

2009

Trimestrale  
Anno XIV  
Numero 47

**ENCO**  
JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

# NTC: dubbi sul calcestruzzo in opera



# Un diretto vincente...



www.mauromorselli.it



## SISTEMA PENETRON®

La soluzione veloce ed efficace per la realizzazione di strutture interrata a tenuta impermeabile "fin dal principio" nella fase di esecuzione dei getti.

**PENETRON  
ADMIX**

**ACCESSORI COMPLEMENTARI  
di PENETRON ADMIX**

Tecnologie specifiche per la definizione della "Vasca in Calcestruzzo Impermeabile"



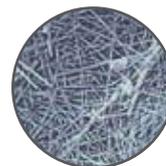
# PENETRON®

INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

DITRON s.r.l. è sponsor ufficiale di Simona Galassi; detentrica del titolo mondiale dei "pesi mosca"

**PENETRON®**

Sistema Integrale Capillare di Protezione  
del Calcestruzzo per Cristallizzazione



**PENETRON ITALIA s.r.l.**  
distributore esclusivo del sistema Penetron®

Corso Peschiera, 336/d - 10139 Torino - Tel. +39 011.7740744 - Fax +39 011.7504341  
Info@penetron.it - www.penetron.it



**Penetron® Italia**

Impermeabilizzazione del Calcestruzzo per Cristallizzazione

*Consulenza alla progettazione e assistenza alla posa in opera: è il Know-how su cui poter contare...*

# l'impronta dello stile

progetto grafico e illustrazione MANINI



**MANINI**  
**PREFABBRICATI**

Sede Generale:  
S. Maria degli Angeli - ASSISI / PG  
Tel. 075-8041018 - Fax 075-8040447  
e-mail: [com@manini.it](mailto:com@manini.it)  
<http://www.manini.it>

Centri produttivi:  
BASTIA UMBRA / PG  
APRILIA / LT  
PERUGIA

SOMAGLIA / LO



**MC-MANINI**  
**PREFABBRICATI**



**Calcestruzzi**  
Italcementi Group

*f*onisocal® *e* fonisocal® **PLUS**®

**IN SINTONIA CON L'AMBIENTE**



**Con FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® non sentire rumore è davvero naturale!**

Calcestruzzi ha dato vita a due innovativi prodotti per la realizzazione di massetti per sottofondi alleggeriti che consentono una notevole riduzione della rumorosità ambientale e il rispetto delle normative vigenti. Derivati da processi di trasformazione certificati, gli aggregati contenuti in FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® abbattano la propagazione sonora e contribuiscono a una maggiore tutela dell'ambiente. L'elevata fluidità di FONISOCAL PLUS® semplifica e velocizza la posa in opera riducendo i costi di realizzazione. FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® confermano l'impegno di Calcestruzzi per uno Sviluppo Sostenibile.

**Contattaci per conoscere Fonisocal® e Fonisocal Plus®.**

[www.calcestruzzi.it](http://www.calcestruzzi.it)

**PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE**

Trimestrale - Anno XIV - Numero 47

**Direttore Mario Collepari**

**NTC: DUBBI SUL CALCESTRUZZO IN OPERA**

Forse la maggiore novità presente nelle *Norme Tecniche per le Costruzioni* (NTC) sulle opere in C.A. riguarda la resistenza meccanica che occorre raggiungere per il materiale estratto dalle strutture (carote) rispetto a quella misurata sui provini ("cubetti") per la determinazione della resistenza caratteristica. A questo importantissimo problema sono dedicati due distinti paragrafi delle NTC (11.2.6 e 11.2.10.1) in apparente contrasto tra loro.

Nel paragrafo 11.2.6 si legge: "è accettabile un valore medio della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive e non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85 % del valore medio definito in fase di progetto". Indicando con  $R_{ms}$  la resistenza media (cubica) del calcestruzzo nella struttura, e con  $R_{cm}$  il valore medio definito in fase di progetto per la prescrizione della resistenza caratteristica  $R_{ck}$  deve valere:  $R_{ms} \geq 0,85 \cdot R_{cm} = 0,85 (R_{ck} + k \cdot s)$  dove  $k$  vale 1,4 ed  $s$  è lo scarto quadratico medio. Se la  $R_{ck}$  in progetto è prescritta con un controllo di tipo **A**, il valore  $k \cdot s$  vale 3,5 MPa e pertanto il valore di  $R_{ms}$ , in MPa, può essere immediatamente calcolato con l'espressione:  $R_{ms} \geq 0,85 (R_{ck} + 3,5)$ . Se, invece, il controllo è di tipo **B** (che deve essere obbligatoriamente adottato per costruzioni con un calcestruzzo omogeneo di oltre 1500 m<sup>3</sup>) il valore di  $R_{ms}$  non può essere calcolato se in progetto non si è precisato anche il valore dello scarto quadratico medio ( $s$ ) accanto a quello di  $R_{ck}$ . Se, a titolo di esempio, la  $R_{ck}$  prescritta è 30 MPa e si prescrive anche un valore di  $s = 4$  MPa, il valore di  $R_{ms}$  diventa:

§ 11.2.6 e controllo **A**:  
 $R_{ck} = 30$  MPa e controllo **A**  
 $R_{cm} \geq 30 + 3,5$  MPa = **33,5 MPa**  
 $R_{ms} \geq 0,85 \cdot 33,5 =$  **28,5 MPa**

§ 11.2.6 e controllo **B**:  
 $R_{ck} = 30$  MPa e controllo **B** con  $s = 4$  MPa  
 $R_{cm} \geq 30 + 1,4 \cdot 4 = 30 + 5,6 =$  **35,6 MPa**  
 $R_{ms} \geq 0,85 \cdot R_{cm} = 0,85 \cdot 35,6 =$  **30,3 MPa**

Nel paragrafo 11.2.10.1 delle NTC si ammette il calcolo del valore medio di progetto (riferito ad una resistenza cilindrica  $f_{cm}$  in MPa) con un'altra equazione; si legge infatti: "sempre in sede di previsioni progettuali, è possibile passare dal valore caratteristico al valor medio della resistenza cilindrica mediante l'espressione  $f_{cm} = f_{ck} + \delta$ ". Adattando questa equazione alla resistenza cubica  $R_{cm}$  - cioè dividendo tutto per 0,83 - si ottiene:  $R_{cm} = R_{ck} + 9,6$  MPa. In base a questa espressione il valore di  $R_{ms}$  diventa:

§ 11.2.10.1 e controllo **B**:  
 $f_{cm} = f_{ck} + \delta \rightarrow R_{cm} = R_{ck} + 9,6 = 30 + 9,6 =$  **39,6 MPa**  
 $R_{ms} \geq 0,85 \cdot 39,6 =$  **33,7 MPa**

Da quanto sopra esposto emerge che, per una stessa  $R_{ck}$ , la resistenza strutturale media  $R_{ms}$  determinata mediante il carotaggio può variare da un minimo di **28,5 MPa** a un massimo di **33,7 MPa** a seconda del tipo di controllo (**A** oppure **B**) e soprattutto del paragrafo della norma NTC cui si fa riferimento. In particolare, a parità di  $R_{ck}$  (30 MPa) e di tipo di controllo (**B**), il valore medio della resistenza del calcestruzzo in opera ( $R_{ms}$ ) non deve scendere al di sotto di **30,3 MPa** o **33,7 MPa** a seconda che il paragrafo delle NTC cui si fa riferimento sia 11.2.6 o 11.2.10.1.

segue a pag. 10

**SOMMARIO**

**COMPORTEMENTO FESSURATIVO DI CALCESTRUZZI CON FIBRE IN PVA ED ADDITIVO SRA:** apparizione della fessurazione e suo sviluppo nel tempo  
*di A. Passuello, G. Moriconi, S.P. Shah e M. Collepari* (pag. 6)

**AWARD A ROBERTO TROLI PER LA SUA CARRIERA SCIENTIFICA** (pag. 12)

**CALCESTRUZZO LEGGERO STRUTTURALE AUTOCOMPATTANTE (LS-SCC) PRODOTTO CON ARGILLA ESPANSA SENZA L'IMPIEGO DI SABBIA NATURALE**  
*di C.M. Corcella e S. Tavano* (pag. 13)

**INFLUENZA DELLE CENERI DA CARTIERA SULLE PRESTAZIONI DI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI**  
*di V. Corinaldesi e S. Monosi* (pag. 18)

**CORSI ON LINE: I PRIMI GIUDIZI** (pag. 22)

**CALCESTRUZZI A RITIRO COMPENSATO PER STRUTTURE SPECIALI.**  
 Parte I - il funzionamento del calcestruzzo a ritiro compensato  
*di R. Troli* (pag. 24)

**ENCO Journal**  
 PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE  
 Ponzano Vito (TV) - Via delle Industrie, 18/20  
 Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237  
 info@encosrl.it

**Direttore Responsabile**  
 MARIO COLLEPARDI

**Redazione**  
 ROBERTO TROLI  
 SILVIA COLLEPARDI  
 ANTONIO BORSOI  
 J. JACOB OGOUMAH OLAGOT  
 FRANCESCA SIMONELLI

**EDITORE**  
 FOCUS  
 Ponzano Vito (TV) - Via delle Industrie, 18/20  
 Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237  
 info@encosrl.it

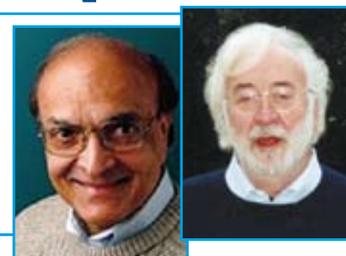
**COMPOSIZIONE**  
 ISABELLA CAPOGNA  
 ALESSANDRA GALLETTI  
 MARA MENEGHEL

**Grafica e Stampa**  
 GRAFICHE TINTORETTO  
 di Rino Lucatello & C. S.R.L.  
 31050 Castrette di Villorba (TV)  
 Via Verdi 45/46

# COMPORAMENTO FESSURATIVO DI CALCESTRUZZI CON FIBRE IN PVA ED ADDITIVO SRA: comparsa della fessurazione e suo sviluppo nel tempo



Alexandra Passuello<sup>1</sup>, Giacomo Moriconi<sup>2</sup>,  
Surendra P. Shah<sup>3</sup> e Mario Collepardi<sup>4</sup>  
<sup>1</sup> Univ. Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil -  
passuelo@gmail.com  
<sup>2</sup> Univ. Politecnica delle Marche - g.moriconi@univpm.it  
<sup>3</sup> Northwestern University, USA - s-shah@northwestern.edu  
<sup>4</sup> Enco, Ponzano Veneto - collepardi@encosrl.it



## 1. INTRODUZIONE

Molteplici sono i motivi che possono portare il calcestruzzo alla fessurazione, tuttavia l'instabilità volumetrica generata dal ritiro della matrice cementizia è sicuramente una delle più usuali e frequenti cause dell'apparizione delle fessure in una struttura in calcestruzzo armato. Questo avviene perché la presenza di vincoli nella struttura impedisce il movimento di contrazione generando tensioni di trazione all'interno del materiale. Siccome il calcestruzzo è caratterizzato da una scarsa resistenza nei confronti degli sforzi di trazione, molto frequentemente le deformazioni da ritiro portano alla fessurazione.

L'entità delle tensioni di trazione che si sviluppano per effetto dell'impedimento delle variazioni volumetriche del calcestruzzo è direttamente proporzionale al ritiro lineare, quindi la riduzione di questa deformazione consentirebbe un miglioramento del comportamento fessurativo. Una diminuzione del ritiro del calcestruzzo può essere conseguita attraverso l'impiego di additivi SRA (Shrinkage Reducing Admixture). Questi speciali additivi sono attualmente disponibili sul mercato in una grande varietà di tipi. Anche se non della stessa composizione, questi prodotti sono simili per natura e provocano tutti la riduzione della tensione superficiale della soluzione presente nei pori capillari della matrice cementizia.

È, tuttavia, necessario anche tener conto che la fessurazione del calcestruzzo è il risultato della scadente capacità di questo materiale di resistere agli sforzi ed alle relative deformazioni di trazione. Aggiungendo alla fragile matrice cementizia un materiale che sia in grado di resistere alle sollecitazioni di trazione è possibile ridurre la vulnerabilità alla fessurazione di questo materiale. Quindi, la presenza di fibre disperse all'interno della matrice cementizia potrebbe migliorare il comportamento fessurativo del calcestruzzo, dal momento che le fibre creano una sorta di cucitura interna della matrice cementizia, assorbendo e trasferendo gli sforzi di trazione attraverso la fessura<sup>1,2</sup>.

L'analisi comparativa della tendenza alla fessurazione di calcestruzzi soggetti a ritiro vincolato in presenza o meno di additivo riduttore di ritiro (SRA), di fibre sintetiche in PVA e della loro combinazione è stato argomento di studio del dot-

torato di ricerca dell'autrice sotto la guida degli altri autori di questo articolo. Il lavoro integrale<sup>3</sup> comprendeva l'analisi di diversi parametri che caratterizzano il comportamento fessurativo del calcestruzzo; tuttavia, in questo articolo sono riportati i risultati ottenuti per quanto riguarda il tempo di apparizione della fessura e l'evoluzione della sua apertura nel tempo.

## 2. CAMPAGNA SPERIMENTALE

### 2.1 Materiali

È stato utilizzato un cemento del tipo HS secondo la normativa americana<sup>4</sup>. In base alle caratteristiche di questo cemento, è stato possibile classificarlo, in conformità alla normativa europea<sup>5</sup>, come cemento al calcare del tipo CEM II-A/LL 42,5R.

Come additivo SRA è stato impiegato un prodotto a base di glicole propilenico reperibile in commercio.

Inoltre, sono state utilizzate fibre sintetiche in poli-vinilalcol (PVA) caratterizzate da due diverse geometrie, riportate in Tabella 1 insieme alle caratteristiche meccaniche.

Infine, quando necessario al fine di mantenere il più simile possibile la classe di consistenza dei calcestruzzi, è stato impiegato un superfluidificante del tipo policarbossilato con sostanza attiva del 17%.

Tabella 1 - Caratteristiche geometriche e meccaniche delle fibre in PVA

Fibra	Tipo	L/Deq	Deq (µm)	L (mm)	Rt (MPa)	E (GPa)
F 200	PVA Micro	200	40	8	1600	42
F 45	PVA Macro	45	660	30	900	23

### 2.2 Proporzionamento delle miscele

La composizione delle miscele è riportata in Tabella 2. Allo scopo di garantire che il ritiro fosse prevalentemente imputabile a fenomeni di natura igrometrica, il rapporto acqua/cemento è stato mantenuto costante al valore di 0,5,

**Tabella 2 - Proporzionamento dei calcestruzzi (kg/m<sup>3</sup>)**

Ingredienti	MIX 1	MIX 2	MIX 3	MIX 4	MIX 5	MIX 6
	Riferimento	SRA	F 200	F 45	SRA F 200	SRA F 45
Cemento	400	400	400	400	400	400
Ghiaio	840	840	840	840	840	840
Sabbia	840	840	840	840	840	840
Acqua	200	196	196	200	194	196
SRA	---	4	---	---	4	4
Fibre PVA	F 200	---	---	6.50	---	3.25
	F 45	---	---	---	6.50	---
	vol. %	---	---	0.50	0.50	0.25
Superfluidificante	---	---	4	---	2	---

tenendo conto dei contributi derivanti dall'additivo SRA e dall'additivo superfluidificante nella determinazione dell'acqua d'impasto.

### 2.3 Metodi

Il comportamento fessurativo dei calcestruzzi è stato valutato attraverso la prova dell'anello (Ring Test), basata sostanzialmente sulla rilevazione delle deformazioni di un'anello di calcestruzzo vincolato da un'anello interno di acciaio. La metodologia di prova ha seguito le raccomandazioni della normativa americana<sup>6</sup>, anche se si sono rese necessarie alcune modifiche dimensionali per tener conto delle caratteristiche dei materiali utilizzati.

Per ogni miscela sono stati confezionati due anelli di calcestruzzo, mantenuti in condizioni protette dall'evaporazione dell'acqua per 24 ore dopo il getto. Subito dopo la rimozione del cassero esterno, la superficie superiore degli anelli è stata impermeabilizzata con silicone. All'interno ed a mezz'altezza di ogni anello d'acciaio sono stati fissati due estensimetri per la misura delle deformazioni indotte (Figura 1), collegati direttamente ad un elaboratore programmato per la registrazione dei dati ogni 30 minuti.



**Fig. 1 - Particolare del fissaggio degli estensimetri e della sigillatura con silicone.**

Per tutto il tempo di prova, i provini sono stati conservati in una camera climatica con temperatura di 23±1°C ed umidità relativa di 50±5% (Figura 2). Dopo l'innescio della fessura, la sua apertura è stata determinata utilizzando un microscopio portatile con precisione di 0,01 mm. L'apertura della fessura è stata ricavata dalla media di 3 misure effet-

tuate lungo l'altezza dell'anello. Questa procedura è stata ripetuta ogni giorno fino ad un minimo di 2 settimane dopo l'apparizione della fessura.

La prova di ritiro libero (Figura 3) è stata eseguita tenendo conto delle raccomandazioni della normativa americana<sup>7</sup>. Tuttavia, per ricreare in entrambi i tipi di prove (ritiro libero e ritiro vincolato) condizioni simili di ritiro è stato necessario modificare il rapporto tra il volume e l'area superficiale esposta all'aria del campione prismatico. È stato applicato sulla superficie del campione lineare due strati di una pellicola adesiva di alluminio,

lasciando libere per l'evaporazione soltanto due facce opposte dal provino (Figura 4).



**Fig. 2 - Esposizione dei provini in camera climatica.**



**Fig. 3 - Metodo di misurazione del ritiro libero.**



**Fig. 4 - Provini lineari ricoperti con pellicola adesiva di alluminio.**

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1 Ritiro libero

Secondo le aspettative, l'aggiunta dell'additivo riduttore di ritiro ha ridotto sostanzialmente il ritiro libero del calcestruzzo (Figura 5). La miscela contenente 1% di SRA, pari a  $4 \text{ kg/m}^3$ , ha mostrato una riduzione del ritiro di circa il 45% rispetto al calcestruzzo di riferimento.

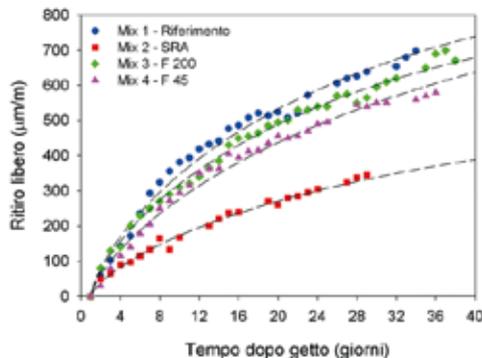


Fig. 5 - Risultati di ritiro libero.

I calcestruzzi fibrorinforzati, invece, non hanno mostrato una simile sostanziale riduzione, essendo stato possibile riscontrare in queste miscele solo una leggera diminuzione del ritiro libero. Per quanto riguarda il calcestruzzo F 200 (Mix 3), la lieve riduzione di ritiro potrebbe essere imputata all'aggiunta dell'1% di additivo superfluidificante, dal momento che gli additivi fluidificanti di nuova generazione possono comportare una riduzione del ritiro del calcestruzzo, anche a parità di acqua d'impasto<sup>8</sup>. Tuttavia, nel calcestruzzo F 45 (Mix 4) la riduzione del ritiro è stata leggermente maggiore di quella avvenuta nel calcestruzzo con le microfibre, anche se l'additivo superfluidificante non è stato aggiunto in questa miscela. Una possibile spiegazione della maggiore riduzione del ritiro libero nel Mix 4 potrebbe essere fornita da una modifica della fuoriuscita d'acqua provocata dalle macrofibre di PVA<sup>9</sup>. La notevole dimensione delle macrofibre di PVA (30 mm di lunghezza e 0,66 mm di diametro) potrebbe aver accentuato la tortuosità dei capillari della matrice cementizia provocando una modifica delle condizioni di evaporazione dell'acqua durante il ritiro del calcestruzzo. Inoltre, si può ipotizzare che la grande affinità con l'acqua, caratteristica delle fibre in PVA, possa aiutare a trattenere una piccola quantità di acqua in più all'interno della matrice cementizia, che potrebbe giustificare la leggera riduzione di ritiro.

La prova di ritiro libero non è stata eseguita sui calcestruzzi in cui le fibre sono state aggiunte in combinazione con l'additivo riduttore di ritiro, ritenendo che la piccola riduzione (< 10%) del ritiro libero riscontrata nei calcestruzzi fibrorinforzati non sarebbe stata in grado di comportare ulteriori modifiche alla significativa riduzione del ritiro avvenuta a causa dall'aggiunta di SRA.

#### 3.2 Ritiro vincolato (Ring Test)

I risultati di deformazione dell'anello di acciaio a causa del ritiro del calcestruzzo sono presentati nelle figure 6-8.

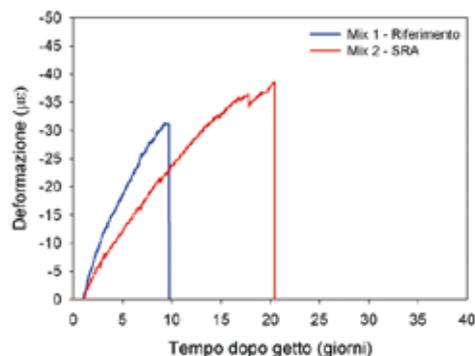


Fig. 6 - Deformazione nell'anello di acciaio ottenuta per il calcestruzzo di riferimento e per quello con aggiunta di 1% di SRA.

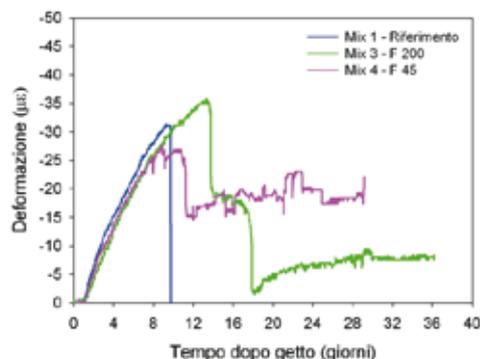


Fig. 7 - Deformazione dell'anello di acciaio per calcestruzzi senza SRA.

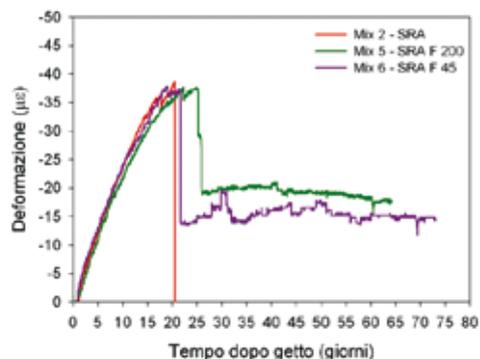


Fig. 8 - Deformazioni dell'anello d'acciaio per calcestruzzi con SRA.

In queste figure è possibile constatare che le deformazioni degli anelli di acciaio iniziano subito dopo il primo giorno dal getto, momento in cui i calcestruzzi vengono esposti ad un ambiente insaturo di vapore ed iniziano a subire il ritiro. Parte della deformazione di ritiro è impedita dall'anello di acciaio provocando sollecitazioni di trazione nell'anello di calcestruzzo. Quando il calcestruzzo non ha più la capacità di assorbire le deformazioni e le sollecitazioni di trazione generate dal ritiro vincolato superando la resistenza a trazione del calcestruzzo, si apre una fessura, rilevabile attraverso il rilassamento delle deformazioni nell'anello di acciaio.

Per il calcestruzzo di riferimento (Mix 1) la fessurazione è avvenuta dopo 10 giorni dal getto mentre per il calcestruzzo con SRA (Mix 2) la fessura è apparsa dopo 20 giorni (Figura

6). Il ritardo nel tempo della fessurazione del calcestruzzo con SRA è dovuto al minore ritiro subito da questa miscela che ha rilassato le sollecitazioni di trazione, fornendo al calcestruzzo un tempo più lungo per consentire un maggiore sviluppo della sua resistenza meccanica.

L'aggiunta di fibre nelle miscele di calcestruzzo, in presenza o meno di SRA (Figure 7-8), non ha portato a notevole ritardi nel tempo della fessurazione. La presenza delle fibre, infatti, non dovrebbe modificare il tempo dell'apparizione della prima fessura nel calcestruzzo<sup>10</sup>. Il loro ruolo, invece, sarebbe quello di contenimento dell'apertura della fessura dopo la sua apparizione, conferendo alla fragile matrice cementizia una maggiore duttilità e permettendo una maggiore deformazione prima della rottura completa. La piccola differenza nel tempo di fessurazione rilevata per i calcestruzzi contenenti le macrofibre (Mix 4 e Mix 6) potrebbe essere molto probabilmente imputata semplicemente alla inevitabile variabilità delle prove sperimentali. Tuttavia, nei calcestruzzi contenenti le microfibre (Mix 3 e Mix 5), il ritardo della fessurazione è risultato più evidente, suggerendo che la presenza delle fibre potrebbe, invece, comportare una leggera tendenza a posticipare nel tempo l'insorgere della fessurazione. Infatti, il meccanismo di apertura della fessura nel calcestruzzo fibrorinforzato è abbastanza complesso e la presenza delle fibre potrebbe produrre variazioni nella localizzazione del punto più fragile della matrice cementizia durante il meccanismo che porta alla fessurazione.

Diversamente da quanto riscontrato nelle miscele senza fibre, i calcestruzzi fibrorinforzati non hanno mostrato un totale rilassamento delle deformazioni, mettendo in evidenza uno stato di compressione residua nell'anello di acciaio dopo la fessurazione. Tale confinamento residuo è dovuto alla tensione di aderenza delle fibre alla matrice cementizia, che permette di assorbire e trasferire gli sforzi di trazione<sup>11</sup>. Il calcestruzzo con microfibre (Mix 3) ha messo in evidenza una seconda fessura dopo 18 giorni dal getto. L'apparizione di molteplici fessure nei calcestruzzi fibrorinforzati<sup>11, 12</sup> è dovuto alla creazione di vincoli interni nella matrice cementizia proprio a causa della presenza di fibre. Questo comportamento appare interessante dal punto di vista fessurativo, dal momento che l'apertura totale di fessurazione viene suddivisa tra le diverse fessure che appaiono.

I risultati dell'evoluzione nel tempo dell'apertura delle fessure sviluppatesi negli anelli di calcestruzzo sono riportati nelle Figure 9-10. Il ritardo della fessurazione provocato dall'aggiunta di 1% di SRA (Mix 2) ha prodotto anche la riduzione dell'apertura di fessura. Questo accade perché la diminuzione della velocità di sviluppo del ritiro consente al calcestruzzo condizioni migliori per sviluppare la resistenza alle deformazioni ed alle sollecitazioni di trazione generate dal ritiro vincolato. La riduzione dell'apertura a causa dell'aggiunta di SRA non è risultata molto marcata nel momento in cui la fessura si è innescata; tuttavia, tale differenza è significativamente aumentata nel tempo, con una percentuale di riduzione di circa il 40% nel momento in cui la prova è stata sospesa.

Pertanto, è possibile verificare l'eccezionale riduzione

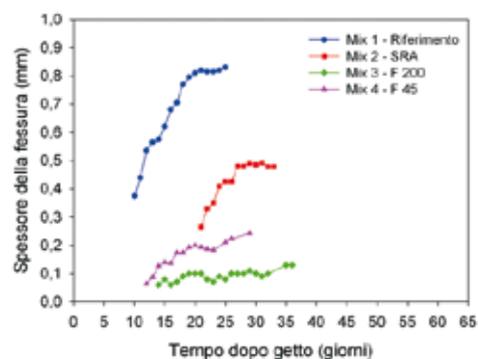


Fig. 9 - Apertura media della fessura nel tempo per calcestruzzo di riferimento, calcestruzzo con SRA e calcestruzzi fibrorinforzati.

dell'apertura della fessura rilevata nei calcestruzzi con fibre. Con riferimento ai calcestruzzi fibrorinforzati senza SRA, nessuna differenza è stata riscontrata nel valore dell'apertura della fessura nel momento in cui la fessura è apparsa, ma con il trascorrere del tempo è stata osservata un'apertura di fessura più ridotta nel calcestruzzo con microfibre. Infatti, le fibre di elevato rapporto d'aspetto generalmente sono più efficaci nel controllo della fessurazione rispetto alle macrofibre<sup>12</sup>. Questo accade perché, a parità di dosaggio, le microfibre sono presenti in maggiore numero all'interno della matrice cementizia e pertanto, dopo la fessurazione, possono impedire più facilmente la crescita della fessura stessa. Inoltre, grazie alle piccole dimensioni, possono agire anche sulla microfessurazione.

Vale la pena di far notare, comunque, che l'apertura della fessura nel calcestruzzo fibrorinforzato con microfibre (Mix 3) si riferisce alla prima fessura avvenuta in questa miscela, e che la seconda fessura apparsa nel diciottesimo giorno ha presentato la stessa apertura di fessura. In questo modo, entrambi i calcestruzzi fibrorinforzati (Mix 3 e Mix 4) hanno presentato la stessa apertura totale di fessurazione; tuttavia, nel calcestruzzo con microfibre l'apertura di fessura è risultata divisa in due, e questo evento appare sicuramente più favorevole in termini di durabilità del materiale, dal momento che in uno spessore più ridotto risulta più difficile l'ingresso di sostanze aggressive per il calcestruzzo.

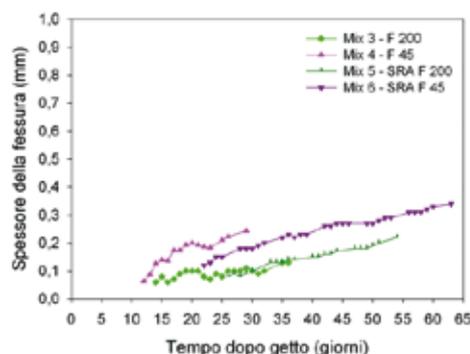


Fig. 10 - Apertura della fessura nel tempo per calcestruzzi fibrorinforzati in presenza o meno di additivo SRA.

Dalla Figura 10 è possibile dedurre ulteriori benefici in relazione al comportamento fessurativo quando le fi-

**Tabella 3 - Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti dopo 30 giorni**

MIX	SRA	FIBRE	PRIMA FESSURA	APERTURA
1 RIFERIMENTO	/	/	10 giorni	0.85 mm
2 SRA	4 kg/m <sup>3</sup>	/	20 giorni	0.50 mm
3 F 200	/	6.50 kg/m <sup>3</sup>	14 giorni	0.10 mm
4 F 45	/	6.50 kg/m <sup>3</sup>	12 giorni	0.25 mm
5 SRA F 200	4 kg/m <sup>3</sup>	3.25 kg/m <sup>3</sup>	25 giorni	0.10 mm
6 SRA F 45	4 kg/m <sup>3</sup>	3.25 kg/m <sup>3</sup>	21 giorni	0.18 mm

bre e l'additivo SRA sono utilizzati contemporaneamente. L'aggiunta di SRA al calcestruzzo con macrofibre ha portato ad una ulteriore riduzione dell'apertura di fessura, mentre il calcestruzzo fibrorinfrozato con microfibre ha mantenuto lo stesso comportamento fessurativo, anche se il dosaggio di fibre è stato dimezzato rispetto alle miscele senza SRA.

La Tabella 3 riporta un confronto riassuntivo tra il tempo di apparizione della fessurazione e l'apertura della fessura dopo 30 giorni dal getto. Dopo tale tempo i calcestruzzi fibrorinfrozati con un basso dosaggio di fibre in PVA (0,25% sul volume totale) ed aggiunta di SRA (1% sul peso di cemento), hanno mostrato una apertura della fessura minore di 0,2 mm, consentendo una percentuale di riduzione superiore al 75% per il calcestruzzo con macrofibre e di circa 90% nel caso delle microfibre. Il costo delle fibre in PVA in Italia è compreso tra 9 e 13 Euro/kg, mentre l'additivo SRA costa 3-5 Euro/kg. Il raggiungimento dello stesso comportamento fessurativo attraverso la sostituzione di 3,25 kg/m<sup>3</sup> di fibre in PVA con 4 kg/m<sup>3</sup> di SRA comporta un risparmio minimo di circa 17 Euro/m<sup>3</sup>. Inoltre, con la riduzione del dosaggio delle microfibre è possibile dimezzare anche il dosaggio dell'additivo superfluidificante (Tabella 2), comportando un ulteriore risparmio senza penalizzazione della qualità del calcestruzzo.

#### 4. CONCLUSIONI

Secondo le aspettative, la presenza di SRA ha posticipato l'apparizione della fessurazione, mentre l'aggiunta di fibre non ha provocato una sostanziale modifica del tempo di apparizione della fessurazione.

L'aggiunta di 4 kg/m<sup>3</sup> di SRA ha ridotto di circa il 40% l'apertura della fessura. Tuttavia, la presenza di 6,5 kg/m<sup>3</sup> di fibre in PVA ha ridotto tale apertura di circa il 70% nel caso delle macrofibre, e di quasi il 90% per le microfibre.

L'aggiunta dell'additivo riduttore di ritiro (SRA) al calcestruzzo fibrorinfrozato con fibre in PVA ha consentito di dimezzare il dosaggio delle fibre per ottenere lo stesso comportamento fessurativo della matrice cementizia, con conseguente beneficio sulla lavorabilità dell'impasto e sul costo finale del calcestruzzo.

#### 5. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Voigt, T., Bui, V. K., Shah, S. P., Drying shrinkage of concrete reinforced with fibers and welded-wire fabric, *ACI Materials Journal*, Vol. 101, No. 3, 2004, pp. 233-241.
- Betterman, L. R., Ouyang, C., Shah, S. P., Fiber-matrix interac-

tion in microfiber-reinforced mortar, *Advanced Cement Based Material*, Vol. 2, 1995, pp. 53-61.

3. Passuello, Alexandra. Comportamento fessurativo di calcestruzzi con fibre in PVA ed additivo riduttore di ritiro (SRA). Università Politecnica delle Marche. Dottorato di Ricerca. Ingegneria dei Materiali, delle Acque e dei Terreni. VII Ciclo. 2009. Ancona.

4. ASTM C 1157, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, 2008.

5. UNI EN 197/1, Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni, 2006.

- ASTM C 1581-04, Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage, 2004.
- ASTM C 157/C 157M – 06, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.
- Collepari, M., *Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo*, Terza edizione, 1991, Hoepli Editore.
- Sun, W., Chen, H., Luo, X., Qian, H., The effect of hybrid fibers and expansive agent on the shrinkage and permeability of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 595-601.
- Shah, S. P., Rangan, V., Fiber reinforced concrete properties, *ACI Journal*, Title No. 68-14, February 1971, pp. 126-135.
- Lawler, J. S., Zampini, D., Shah, S. P., Microfiber and Macrofiber Hybrid Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE, 2005, pp. 595-94.
- Banthia, N., Yan, C., Shrinkage cracking in polyolefin fiber-reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 4, 2000, pp. 432-437.

#### Editoriale - segue da pag. 5

A parte queste considerazioni – che saranno oggetto di contrastanti interpretazioni da parte di consulenti ed avvocati in occasione di contestazioni sulla qualità del calcestruzzo messo in opera – vale la pena di evidenziare il valore troppo elevato richiesto per il calcestruzzo in opera (soprattutto se si fa riferimento al paragrafo 11.2.10.1 delle NTC) che, per una  $R_{ck}$  di 30 MPa, risulta essere **33,7 MPa** e quindi superiore del 27% rispetto al valore minimo  $R_1$  accettato per la resistenza dei “cubetti” ( $R_1 \geq R_{ck} - 3,5 = 30 - 3,5 = 26,5 \text{ MPa}$ ). In altre parole, secondo il paragrafo 11.2.10.1 delle NTC, l'Impresa dovrà mettere in opera il calcestruzzo con prestazioni medie in sito anche molto maggiori di quelle minime richieste per il calcestruzzo fornito valutato con i prelievi dei “cubetti”.

Stante questa anomala situazione delle NTC, in caso si debba prescrivere un calcestruzzo con una determinata  $R_{ck}$  con controllo di tipo **B**, si raccomanda di prescrivere sempre anche il valore dello scarto quadratico medio ( $s$ ) in modo da poter adottare il paragrafo 11.2.6 nel calcolo del valore medio accettabile ( $R_{ms}$ ) della resistenza del calcestruzzo in opera. In assenza del valore di  $s$  nel progetto, diventa inevitabile ricorrere al paragrafo 11.2.10.1 delle NTC molto (ed irrealisticamente) penalizzante per valutare la resistenza accettabile per il calcestruzzo in opera.

Mario Collepari

# CHRYSO® FLEXÓ

**Il sistema flessibile per i pannelli a Taglio Termico  
di nuova generazione**

## CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI  
MATERIALI DA COSTRUZIONE

[www.chrysoitalia.com](http://www.chrysoitalia.com)

**CHRYSO ITALIA SPA**  
24040 Lallio (BG) Italy · Telefono +39 035 693331 · Fax +39 035 693684

# AWARD A ROBERTO TROLI PER LA SUA CARRIERA SCIENTIFICA



In occasione della conferenza organizzata dall'American Concrete Institute a Siviglia il 14 Ottobre 2009 sono stati conferiti tre riconoscimenti (Award) alla carriera scientifica di Charles Nmai della BASF (USA), di Monique Paget della Handy Chemical (Canada) e del nostro Roberto Troli per il loro fondamentale contributo alla ricerca e allo sviluppo degli additivi per calcestruzzo.



In queste foto alcuni momenti della serata dopo una cena in onore dei premiati: Roberto Troli tra Mohan Malhotra e Mario Collepari al momento della consegna del riconoscimento, con sua moglie Antonella e con il Prof. Collepari.



# CALCESTRUZZO LEGGERO STRUTTURALE AUTOCOMPATTANTE (LS-SCC) PRODOTTO CON ARGILLA ESPANSA SENZA L'IMPIEGO DI SABBIA NATURALE



*Cataldo Matteo Corcella, Salvatore Tavano*  
Addiment Italia, Medolago (BG)  
MCorcella@addimentitalia.it



## INTRODUZIONE

Il calcestruzzo leggero strutturale è apparso sul mercato dei materiali per edilizia negli anni '70 seguendo lo sviluppo tecnologico e produttivo dell'argilla espansa che, come noto, è un materiale espanso ottenuto dalla cottura di argille naturali all'interno di grandi forni rotanti a temperature superiori a 1000°C.

Ciò che caratterizza questo materiale, impiegabile come aggregato nei calcestruzzi, è la buona costanza qualitativa frutto dell'attenta selezione delle materie prime e del rigido controllo del processo di produzione.

I vantaggi di produrre un calcestruzzo leggero strutturale a densità 1600-1900 kg/mc rispetto ad uno ordinario sono numerosi, sia dal punto di vista ingegneristico che ambientale (1, 2).

Assai più recente invece è la comparsa del calcestruzzo autocompattante. Tale prodotto è caratterizzato da prestazioni, in termini di lavorabilità, eccezionali per non dire assolute poiché non richiede lavoro o energia per la sua messa in opera, ma ha prerogative intrinseche di autocompattazione e capacità di riempimento dei casseri sfruttando il solo peso proprio. La qualità dell'SCC dipende principalmente da un corretto dosaggio delle polveri comprensive di cemento, aggiunte minerali e passante a 0.125 mm proveniente dalle sabbie. Di conseguenza, quando il contributo di queste ultime è quantitativamente rilevante (es. sabbie di frantumazione, ormai sempre più frequenti), una loro variazione granulometrica può compromettere profondamente la robustezza e la stabilità degli impasti allo stato fresco.

Recentemente sono stati fatti diversi studi inerenti la combinazione di queste due tecnologie (6,7). Caratteristica comune di tutte queste sperimentazioni, è la presenza nel mix-design di questi calcestruzzi di un quantitativo rilevante di sabbia fine naturale.

La sabbia naturale è tipicamente aggiunta nel calcestruzzo leggero strutturale per controllarne la densità, ottenere elevate resistenze meccaniche e per compensare la scarsità di parti fini che tipicamente caratterizza l'argilla espansa.

Lo scopo della ricerca sperimentale oggetto della presente pubblicazione, è analizzare la possibilità di produrre un calcestruzzo leggero strutturale autocompattante caratterizzato

dalla totale assenza di aggregati naturali di peso normale.

Una miscela di calcestruzzo autocompattante leggero senza sabbia naturale ha tre vantaggi principali: riduzione della variabilità della lavorabilità dovuta alle inevitabili oscillazioni nel contenuto di finissimi nella sabbia, specialmente se di frantumazione; soluzione al problema della diminuzione di disponibilità di sabbia naturale; incremento del rapporto resistenza/densità.

Il principale problema di questo tipo particolare di miscela, è quello di conferire la giusta coesione e scorrevolezza all'impasto evitando nel contempo il fenomeno della segregazione inversa dell'argilla espansa.

Esiste infatti una intrinseca caratteristica negativa nel concetto di SCC, messa formalmente in evidenza dalla relazione di Stokes (in base alla quale la velocità finale  $V_s$  di una particella in un mezzo fluido è direttamente proporzionale alla differenza di densità tra particella e fluido, direttamente proporzionale alla dimensione della particella e inversamente proporzionale alla viscosità del fluido), che riguarda la sensibile differenza di densità tra la pasta (normalmente il suo valore è intorno a 1.90-2.10 kg/l) e gli aggregati grossi (di densità 2.60-2.75 kg/l nel caso questi siano comuni e 1.25-1.67 kg/l nel caso siano argille espanse strutturali). Ciò fa sì che, se la viscosità della pasta legante a basse velocità di deformazione non ha valori ottimali, l'aggregato può sedimentare o galleggiare tanto più velocemente quanto più grandi sono le sue dimensioni (segregazione statica).

Fondamentale per la realizzazione di tale prodotto è quindi l'impiego di una particolare tipologia di argilla strutturale caratterizzata da elevate prestazioni meccaniche e  $D_{max}$  di soli 8 mm, unitamente ad una speciale combinazione di additivi chimici. Quest'ultima è composta da un agente aerante, un viscosizzante e un superfluidificante acrilico in grado di produrre una modificazione delle caratteristiche fisiche della pasta legante consistenti in una riduzione della sua densità, attraverso l'introduzione di un sistema stabilizzato di microbolle d'aria e un aumento della sua viscosità.

## MATERIALI E METODI

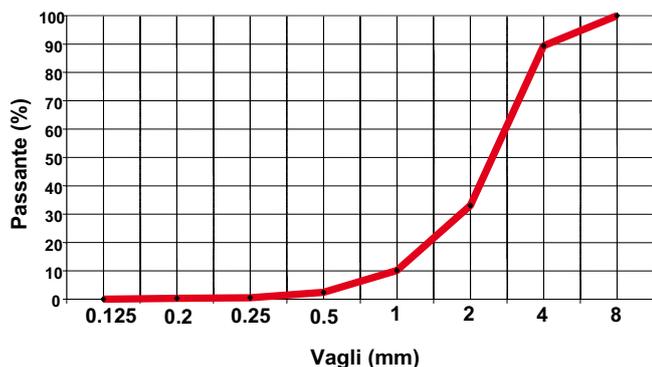
Durante la sperimentazione di laboratorio sono state confezionate diverse miscele di prova utilizzando i seguenti ma-

**Tabella 1 - Caratteristiche fisco-meccaniche dell'argilla espansa**

	UNITA'	VALORI
DENSITÀ IN MUCCHIO (UNI EN 1097-3)	kg/m <sup>3</sup>	800±50
DENSITÀ SPECIFICA DELL'ARGILLA IMPERMEABILIZZATA (UNI 7549-5)	g/cm <sup>3</sup>	1.49
RESISTENZA ALLA FRANTUMAZIONE DEI GRANULI (UNI EN 13055-1)	MPa	10
ASSORBIMENTO D'ACQUA DOPO 24 ORE (EN 1097-6)	%	8
CONDUCIBILITÀ TERMICA, λ (UNI EN 12667)	W/m °K	0.125

teriali:

- Due diversi cementi CEM II/A-LL 42.5R denominati Cem A e Cem B, entrambi con densità di 3.00 kg/l.
- Filler calcareo caratterizzato da un passante del 100% a 0.100 mm e una densità di 2.70 kg/l.
- Argilla espansa strutturale sinterizzata 0.25/8 mm le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 1 e Figura 1.
- Superfluidificante acrilico con una densità di 1.1 kg/l.
- Stabilizzante in polvere composto da una miscela di aerante e viscosizzante



**Fig. 1 - Analisi granulometrica dell'argilla.**

Al fine di avere un maggior controllo sulle proprietà del calcestruzzo, l'argilla espansa è stata pre-bagnata per 24 ore prima del suo impiego (3).

Per la caratterizzazione delle proprietà allo stato fresco del calcestruzzo si sono utilizzate le prove di Slump flow, V-funnel e L-box. Le ultime due sono state impiegate per la valutazione della tendenza alla segregazione. Tutte queste prove sono state condotte oltre che a tempo 0' anche dopo 30' e 60' per la valutazione del mantenimento della lavorabilità.

Le prove di resistenza meccanica a compressione sono state eseguite su provini cubici lato 150 mm,

stagionati a 20°C e U.R. > 95%, a 1, 7 e 28 giorni.

Le miscele sono state preparate impiegando una comune mescolatrice a bicchiere da laboratorio seguendo la seguente procedura: introduzione dell'argilla espansa saturata insieme al cemento, il filler e al 75% dell'acqua di impasto. Dopo 10 minuti di mescolazione introduzione degli additivi insieme alla restante acqua. Mescolazione finale della durata di 5 minuti.

Al fine di simulare le reali condizioni di trasporto in autobetoniera, dopo la prima valutazione della lavorabilità a tempo 0', la miscela di calcestruzzo è stata mantenuta in continua agitazione all'interno della mescolatrice a bicchiere, appositamente modificata per tale scopo, ad una velocità di 3 giri al minuto. Appena prima dell'esecuzione delle prove di lavorabilità a 30' e 60', la miscela è stata mescolata ad alta velocità per 2 minuti.

## RISULTATI E DISCUSSIONE

Una volta misurata la densità dell'argilla espansa in condizioni di S.S.A. (1.6-1.65 kg/l), la composizione dell'agente stabilizzante (aerante+viscosizzante) è stata ottimizzata al fine di conferire un'adeguata viscosità alla pasta legante e ottenere una densità della stessa il più simile possibile a quella dell'argilla saturata (minimizzazione della velocità terminale Vs). Dopo diverse prove di laboratorio, si è trovato che una densità della pasta legante compresa tra 1.74-1.83 kg/l è in grado di conferire buona stabilità alla miscela allo stato fresco senza causare un eccessivo calo delle resistenze meccaniche allo stato indurito.

In Tabella 2 sono mostrate le composizioni delle diverse miscele di calcestruzzo testate. La quantità di acqua e additivi è rimasta costante in tutte le prove. Dopo aver messo a punto la miscela utilizzando il Cem A (miscele A, B, C), si è proceduto ad una sua verifica utilizzando il Cem B (miscela D). Quest'ultima ricetta è stata infine utilizzata per eseguire una prova di riempimento di una piccola cassaforma di legno in presenza di armatura metallica (miscela E).

### Lavorabilità

In Tabella 3 e nelle Figura 2, 3 e 4 sono riportati i risultati

**Tabella 2 - Miscele di calcestruzzo testate**

COMPOSIZIONE	DENSITA' kg/l	MASSA (kg/m <sup>3</sup> )				
		A	B	C	D	E
CEM II/AL 42.5 R A	3.00	420	460	490	---	---
CEM II/AL 42.5 R B	3.00	---	---	---	490	490
FILLER CALCAREO	2.7	235	230	243	243	243
ARGILLA ESPANSA SATURATA	1.61	830	827	798	798	798
ACQUA LIBERA	1.00	186	186	188	188	188
SUPERFLUIDIFICANTE	1.1	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
STABILIZZANTE IN POLVERE	---	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
PESO TEORICO DELLA MISCELA (kg/m <sup>3</sup> )		<u>1675</u>	<u>1707</u>	<u>1723</u>	<u>1723</u>	<u>1723</u>
QUANTITA' TOT. DI FINISSIMI (kg/m <sup>3</sup> )		655	690	733	733	733
a/c		0.44	0.40	0.38	0.38	0.38

Tabella 3 - Proprietà allo stato fresco

	A	B	C	D	E	
CONTENUTO D'ARIA (%)	6.7	5.6	6.5	6.1	6.1	
DENSITA' ALLO STATO FRESCO (kg/m <sup>3</sup> )	1650	1710	1620	1655	1690	
L-BOX A 0'	0.89	0.90	0.91	1.00	1.00	
L-BOX A 60'	0.70	0.70	0.82	0.94	0.93	
V-FUNNEL A 0' (s)	6	7	5	9	9	
V-FUNNEL A 60' (s)	9	10	5	8	8	
SLUMP FLOW (mm)	0 min.	780	755	820	810	800
	30 min.	730	720	715	710	695
	60 min.	670	680	680	650	660
	80 min.	670	685	---	---	---

delle prove di filling ability (Slump flow, V-funnel), passing ability e resistenza alla segregazione dinamica (L-box).

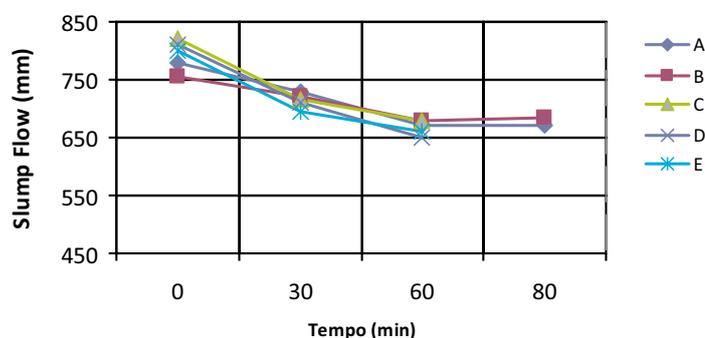


Fig. 2 - Mantenimento della lavorabilità.

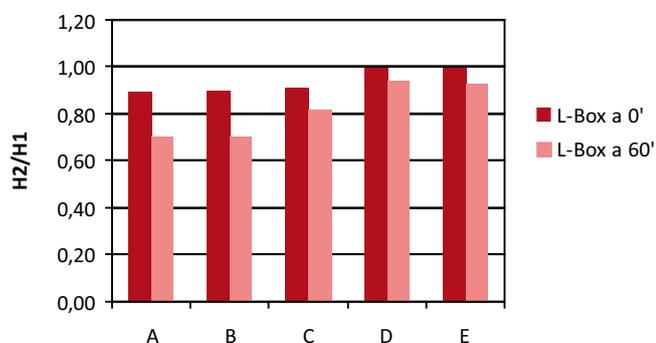


Fig. 3 - Evoluzione del valore H2/H1 alla prova dell'L-Box (una riduzione del suo valore nel tempo indica una perdita di passing ability).

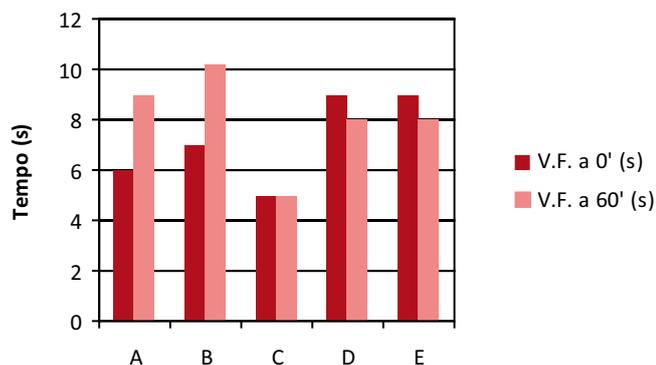


Fig. 4 - V-funnel.

Come si vede, la miscela A mostra un ottimo comportamento a tempo 0', come indicato dai valori di Slump flow (780 mm) e V-funnel (6 s) oltre che dalla totale assenza di segregazione, confermata dal valore di L-Box (0.89) e dall'osservazione diretta. Dopo 60' però, nonostante il buon valore di Slump flow (670 mm), la prova all'L-Box è stata negativa (0.70) indicando un peggioramento del passing ability. L'osservazione visiva ha confermato la comparsa di un fenomeno di segregazione inversa. Al fine di risolvere tale problema, il contenuto di cemento è stato aumentato da 420 kg/m<sup>3</sup> nella miscela A fino a 490 kg/m<sup>3</sup> nella miscela C. A seguito di tale modifica la lavorabilità è migliorata protrandosi per oltre 60' senza alcun segno di segregazione, come dimostrato dal superamento del test dell'L-Box ( $H_2/H_1 = 0.8$ ).

Tali risultati sono stati infine confermati impiegando un diverso cemento (miscele D e E).

Al fine di simulare il comportamento di questo calcestruzzo in una reale situazione di getto, con la miscela E è stata effettuata una prova di riempimento di una cassaforma in legno di 2.5 m di lunghezza, 1.1 m di altezza, 10 cm di profondità in presenza di una armatura di rinforzo. Come mostrato nella Figura 5, la prova ha avuto esito positivo non essendo visibile alcun segno di segregazione o nidi di ghiaia.

### Sviluppo di calore

A causa dell'elevata quantità di cemento presente e della bassa conducibilità termica di questo tipo di calcestruzzo, lo sviluppo di calore all'interno della suddetta cassaforma in legno è stato monitorato con una termocoppia PT100 annegata all'interno del calcestruzzo (miscela E) ad una profondità di 20 cm dalla superficie.

Come si può vedere nel grafico in Figura 6, la massima temperatura interna raggiunta è stata di 44°C dopo 15 ore e 30 minuti dal getto. Il gradiente massimo allo scassero è stato di circa 20°C, nonostante ciò, né al momento dello scassero né successivamente, si sono rilevate fessurazioni di origine termica. Quest'ultimo comportamento è probabilmente dovuto al più basso modulo elastico di questo calcestruzzo rispetto ad un analogo calcestruzzo di peso normale (4, 7).

### Resistenze meccaniche

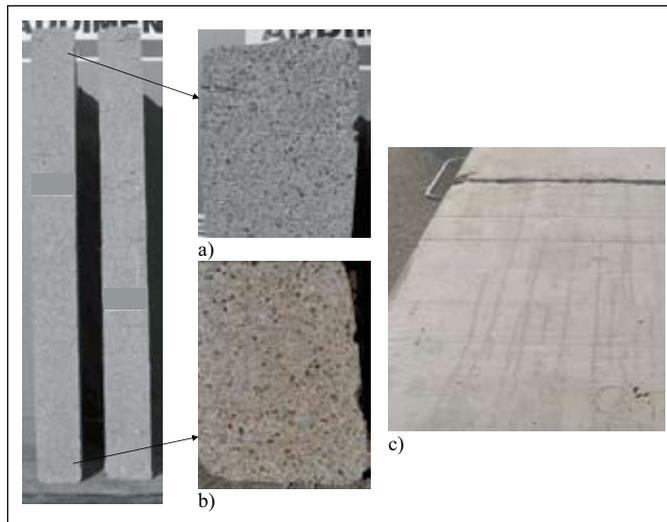
In Tabella 4 e Figura 7 sono riassunti i risultati della resistenza meccanica a compressione.

Come previsto l'impiego dell'argilla espansa e l'introduzione di un elevato volume di microvuoti, ha comportato un abbassamento delle resistenze meccaniche rispetto ad un calcestruzzo di peso normale di pari rapporto a/c. E' noto infatti che la resistenza a compressione di un calcestruzzo normale dipende principalmente dal rapporto a/c, essendo la resistenza a compressione degli aggregati lapidei generalmente superiore a 100 MPa.

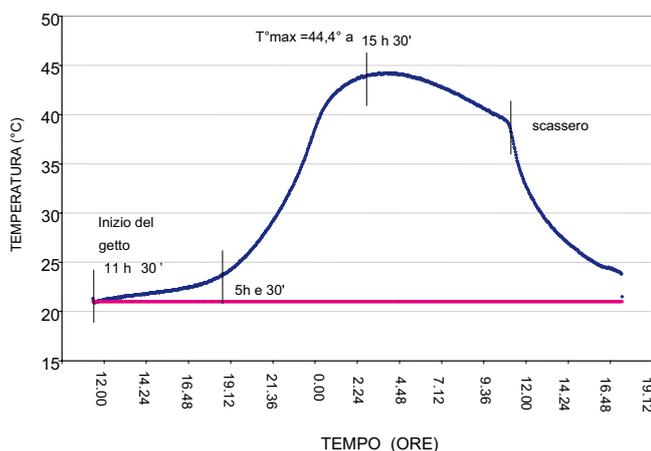
Ad ogni modo grazie al basso rapporto a/c (0.38) e alle ottime proprietà meccaniche dell'argilla espansa impiegata, avente  $D_{max} = 8$  mm, si sono raggiunte resistenze meccaniche a compressione fino a 55 MPa a 28 gg.

**Tabella 4 - Proprietà allo stato indurito**

		A	B	C	D	E
Resistenza a compressione (MPa)	1 giorno	14.0	15.2	16.4	15.0	17.0
	3 giorni	---	30.7	31.0	---	---
	7 giorni	27.8	35.3	35.5	40.0	45.1
	28 giorni	31.5	43.0	43.0	51.2	55.2
Densità (kg/m <sup>3</sup> )	1 giorno	1640	1643	1655	1712	1749
	3 giorni	---	1655	1688	---	---
	7 giorni	1660	1648	1697	1741	1780
	28 giorni	1665	1710	1685	1765	1818



**Fig. 5 - Vista in sezione del manufatto di prova gettato per la valutazione della capacità di riempimento e della stabilità: a) parte alta, b) parte bassa; e superficie (c).**



**Fig. 6 - Evoluzione termica all'interno del manufatto 20 cm al di sotto della superficie.**

### Ritiro igrometrico

Il ritiro igrometrico è stato valutato a 60 giorni su provini 10 cm x 10 cm x 50 cm stagionati alle condizioni di 20°C e U.R. 50%, come indicato dalla normativa italiana UNI 6555. Così come per le resistenze meccaniche, il basso rapporto a/c e le ottime proprietà meccaniche dell'argilla, hanno per-

messo di ottenere un valore dello stesso di soli 550 µm/m, cioè comparabile al ritiro di un calcestruzzo autocompattante "ordinario" di analogo contenuto di polveri e pari resistenza meccanica.

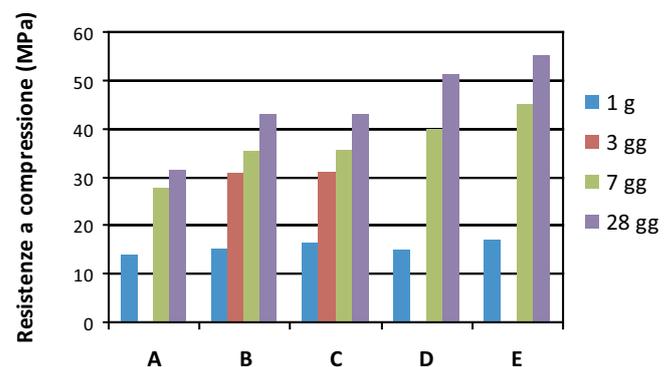
### Prova di pompabilità

Al fine di confermare i dati ottenuti nella sperimentazione di laboratorio e verificare la pompabilità di questo calcestruzzo, è stata eseguita una prova industriale presso un impianto di betonaggio. La prova è stata condotta su sei metri cubi di calcestruzzo miscelato a secco in autobetoniera. L'argilla è stata caricata in botte la sera precedente insieme a 1000 lt di acqua per la preventiva saturazione. Il giorno seguente, in fase di carico si è proceduto all'aggiunta del cemento, del filler e infine dell'additivo.

La prova in autobetoniera ha rivelato una certa difficoltà nella miscelazione come evidenziato dall'abbondante presenza di agglomerati sferici del diametro di circa 15-20 cm, costituiti in larga misura da materiale fine. Il prolungamento del tempo di miscelazione finale non ha comportato alcun miglioramento.

Il calcestruzzo ha mostrato elevata scorrevolezza (slump flow 760 mm) sebbene rispetto alle precedenti esperienze di laboratorio sia apparso un po' più "magro" e viscoso. Nonostante tali differenze tra laboratorio e cantiere, la prova di pompabilità è stata positiva; il materiale è stato pompato senza interruzioni all'interno di un ampio scavo evidenziando le sue caratteristiche autolivellanti. Lo sforzo della pompa è stato il medesimo che per un "comune" calcestruzzo autocompattante.

### CONCLUSIONI



**Fig. 7 - Resistenze meccaniche delle varie miscele di SCC a varie stagionature.**

In questo studio è stato dimostrato come sia possibile produrre un calcestruzzo leggero strutturale autocompattante, definito LS-SCC (lightweight structural self-consolidating concrete), altamente performante sia allo stato fresco che

a quello indurito, facendo ricorso alla sola argilla espansa come aggregato, senza cioè alcuna aggiunta di sabbia naturale.

Le ottime proprietà meccaniche dell'argilla espansa utilizzata ( $D_{max} = 8 \text{ mm}$ ), unitamente al basso rapporto a/c, hanno permesso la produzione di miscele di calcestruzzo leggero con resistenze meccaniche fino a 55 MPa a 28 giorni e densità allo scasso di  $1700 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ . Il ritiro igrometrico misurato a 60 giorni è stato modesto,  $550 \mu\text{m/m}$ , cioè del tutto paragonabile al ritiro di un calcestruzzo autocompattante "ordinario" di analogo contenuto di polveri e pari resistenza meccanica.

Per assicurare l'ottima lavorabilità sia in termini di filling ability (Slump flow fino a 800 mm), che di passing ability ( $H2/H1 \approx 1$  all'L-Box) è stato necessario l'impiego di un quantitativo di finissimi pari a  $730 \text{ kg/m}^3$  unitamente all'aggiunta di un sistema di additivi composto da una superfluidificante acrilico, un agente aerante ed un agente viscosizzante. Il mantenimento della lavorabilità è stato molto buono tanto che le proprietà autocompattanti sono perdurate per oltre 1 ora.

Prove industriali hanno indicato una certa difficoltà di omogeneizzazione della miscela allorché venga utilizzata la procedura di mescolazione a secco dei componenti descritta nell'articolo. A tal proposito si ritiene che tale problematica possa essere agevolmente risolta impiegando una produzione ad umido (premescolatore) o una miscelazione mediante il sistema brevettato "C.H.T.T." (premescolazione della pasta legante additivata e successiva miscelazione con gli aggregati) (8). In ogni caso è intenzione degli autori verificare se, pur adottando una mescolazione a secco, l'utilizzo di una diversa procedura di carico (ordine di aggiunta dei componenti, tempi di mescolazione, ecc.) possa limitare al massimo tale problematica.

Con i dovuti accorgimenti di cui sopra, è ragionevole pensare che l'assenza della sabbia naturale, inevitabilmente soggetta a variazioni granulometriche specialmente nel suo contenuto di parti finissime, e l'utilizzo di soli prodotti "industriali" soggetti a rigidi controlli di produzione, contribuiscano a rendere la produzione di questo tipo di calcestruzzo più costante ed efficiente (5). Questo nuovo concetto di calcestruzzo leggero strutturale inoltre, seppur nella sua specificità, contribuisce ad uno sviluppo sostenibile in virtù delle sue caratteristiche termo-isolanti e del mancato sfruttamento delle sempre meno disponibili cave di sabbia naturale (6).

A tal riguardo sono in programma ulteriori studi per analizzare la possibilità di una riduzione dei costi di produzione sostituendo una significativa quantità di cemento con altri leganti come: loppa d'altoforno, cenere volante, ecc. Questo aspetto, insieme alla valutazione di altre proprietà meccaniche come modulo elastico, resistenze a flessione, creep, saranno oggetto di ulteriori indagini.

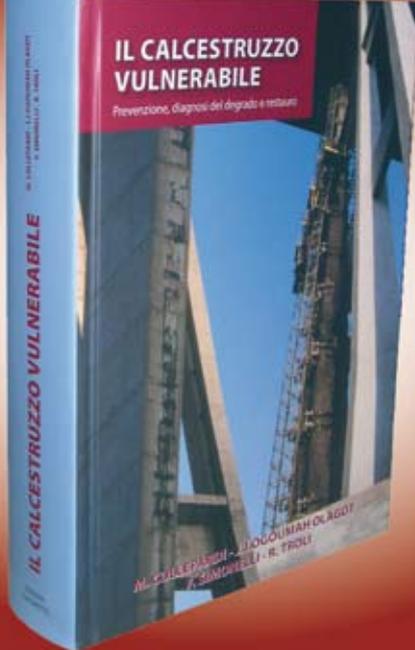
## RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le aziende Laterlite s.p.a e Unical s.p.a per il loro contributo alla realizzazione delle prove su campo.

## BIBLIOGRAFIA

1. Moira, A., "Structural lightweight aggregate concrete"; Concrete Construction, July 1995
2. NRMCA, "Structural lightweight concrete"; Concrete in Practice, 2003
3. Coppola, L., Monosi, S., Collepardi, M., "Il calcestruzzo leggero"; Nuovo cantiere, October 1995
4. ACI Committee 213, "Guide for structural lightweight aggregate concrete"; American concrete institute, 1967
5. ACI Committee 304, "Batching, mixing and job control of lightweight concrete"; American Concrete Institute, 1991
6. Schuitemaker, E.J., van Breugel, K., den Uijl, J.A., "Design of self-compacting lightweight concrete with environment-friendly lightweight aggregate"; proceedings of the 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, August 2003
7. Collepardi, M., Borsoi, A., Collepardi, S., Troli, R., "Recent developments of special self-compacting concretes"; proceedings of the 7th International CANMET/ACI Conference on recent advances in concrete technology, Las Vegas, USA, May 2004
8. Cadore, R., Capecchi, C., Bianchin, G., Campinoti, C., "La premescolazione della pasta di cemento"; inConcrete 66, 2005.

**...se vuoi la durabilità  
sai dove trovarla...**



**IL CALCESTRUZZO VULNERABILE**  
Prevenzione, diagnosi del degrado e restauri

**IL CALCESTRUZZO VULNERABILE**

M. COLLEPARDI - M. COLOMBAI - G. AGOSTI  
F. SIMPLETELLI - R. TROLI

Enco Srl - Via delle Industrie 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)  
Tel. 0422 963771 - Fax 0422 963237 - www.encosrl.it - E-mail: info@encosrl.it  
Acquistabile tramite il sito internet [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) oppure telefonando al 0422 963771

# INFLUENZA DELLE CENERI DA CARTIERA SULLE PRESTAZIONI DI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI



Valeria Corinaldesi e Saveria Monosi

Univ. Politecnica delle Marche - Dip. di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio

v.corinaldesi@univpm.it - s.monosi@univpm.it



## INTRODUZIONE

Il calcestruzzo autocompattante è caratterizzato da elevata fluidità accompagnata da adeguata coesione dell'impasto, tali da consentirne la posa in opera in assenza di vibrazione, evitando fenomeni di segregazione durante le fasi di getto e successiva presa. Al fine di conseguire questi requisiti, di per sé antitetici, è necessario introdurre nella miscela un volume piuttosto elevato di materiali con finezza paragonabile a quella del cemento [Khayat e Guizani, 1997; Borsoi et al, 2006; Okamura e Ozawa, 2003], senza tuttavia eccedere nel contenuto di cemento stesso, onde evitare problemi di durabilità legati allo sviluppo del calore di idratazione o a fessurazioni per ritiro. Nel confezionamento di calcestruzzi autocompattanti risulta quindi importante l'impiego di aggiunte minerali, non necessariamente con attività pozzolanica, ma caratterizzate da un finezza pari ad almeno quella del cemento [Borsoi et al, 2006; Troli et al, 2003]. Si tratta spesso di sottoprodotti industriali che, essendo ben impiegabili anche per la produzione di cementi di miscela [EN 197-1], sono spesso difficili da reperire.

Lo scopo di questo lavoro è di valutare se le ceneri provenienti dalla combustione di fanghi di cartiera possano essere utilmente reimpiegabili in qualità di aggiunte minerali per la produzione di calcestruzzi autocompattanti, ponendo l'attenzione sia alle proprietà reologiche dello stato fresco sia alle prestazioni meccaniche e al comportamento deformativo da essiccamento dello stato indurito [Collepari et al, 2005; Bonen e Shah, 2005].

I fanghi di cartiera sono sottoprodotti della produzione della carta. Circa 6 kg di fango vengono prodotti per ogni tonnellata di carta. Nel 2004, la produzione italiana complessiva di fanghi di cartiera fu di circa 6•105 tonnellate [Asquini et al, 2008].

I fanghi di cartiera sono composti da filler minerali, sali inorganici, piccole fibre di cellulosa, acqua e composti organici. La composizione dei filler minerali dipende dal tipo di carta prodotta. I fanghi di cartiera vengono spesso inceneriti nelle cartiere stesse per ridurne il volume da smaltire in discarica e, a volte, per produrre energia per usi interni bruciando i fanghi assieme a residui di legno. Questo processo viene ottenuto mediante disidratazione a basse temperature (< 200°C), seguita da incenerimento ad elevate temperature (> 800 °C). Durante l'incenerimento, carta e componenti organiche vengono bruciati a temperature comprese nell'intervallo 350÷500°C, mentre i filler minerali ed i sali inorganici

vengono trasformati nei rispettivi ossidi a temperature più elevate (> 800°C). CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO e SiO<sub>2</sub> sono gli ossidi più abbondantemente presenti nei fanghi di cartiera inceneriti [Liaw et al, 1998]. I fumi di combustione trasportano le particelle leggere di cenere volante che in tal modo possono essere intercettate e raccolte per impiegarle come sottoprodotto riciclabile. Se non riciclate tali ceneri andrebbero conferite in discarica a costi elevati in quanto catalogate come rifiuto speciale (pur se non pericoloso). Il loro reimpiego avrebbe quindi una duplice valenza ambientale ed economica.

Alcuni tentativi di riutilizzo di tali ceneri sono rintracciabili in letteratura [Marcis et al, 2005; Ernstbrunner 2007; Liaw et al, 1998], in cui le ceneri di cartiera sono state miscelate con altri ingredienti per la produzione di cementi di miscela o mattoni. Infatti i principali elementi costituenti le ceneri da cartiera sono Al, Mg, Si e Ca, i cui ossidi vengono largamente impiegati nell'industria ceramica.

## MATERIALI IMPIEGATI

In qualità di legante è stato impiegato un cemento portland di miscela al calcare CEM II/A-L 42.5 R secondo EN-197/1; quindi, per realizzare una miscela di riferimento sono stati impiegati i seguenti costituenti solidi: una sabbia silicea (0-4 mm), un ghiaietto di frantumazione (5-15 mm) ed un filler calcareo (L, dall'inglese 'limestone') con finezza Blaine pari a 0.52 m<sup>2</sup>/g.

In alternativa al filler calcareo, in questa sperimentazione sono state preparate delle miscele contenenti ceneri di combustione dei fanghi di cartiera (PMA, acronimo dall'inglese 'Paper Mill Ash'). Tali ceneri sono state impiegate al posto

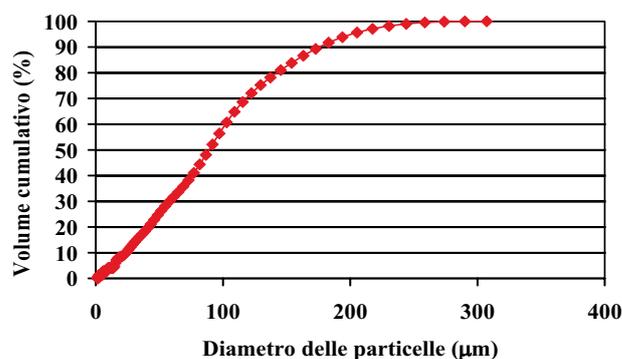
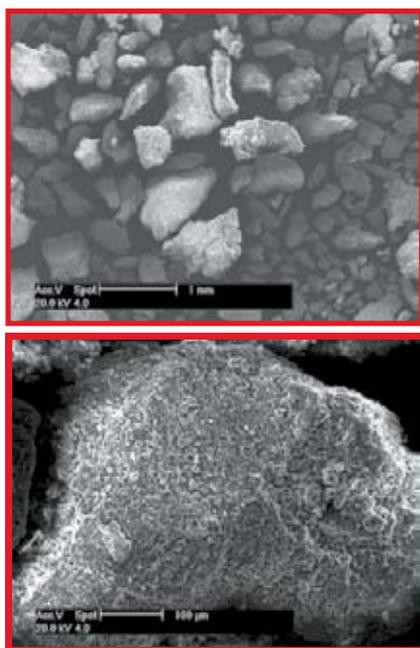


Fig. 1 - Distribuzione granulometrica della cenere di cartiera tal quale.



**Fig. 2 - Immagini ottenute al SEM della cenere di cartiera tal quale.**

del filler calcareo secondo due modalità: ceneri tal quali (PMA<sub>tq</sub>) così come prodotte in cartiera (Fig. 1), oppure dopo macinazione (PMA<sub>mac</sub>), finalizzata all'aumento della finezza Blaine, ottenendo un valore finale pari a 0.55 m<sup>2</sup>/g.

Per la cenere tal quale (PMA<sub>tq</sub>), la percentuale di materiale passante attraverso il setaccio da 0.150 mm è pari a circa l'80% (Fig. 1). Questa informazione è stata tenuta in considerazione in fase di proporzionamento delle miscela di calcestruzzo autocompattante al fine di controllare correttamente la quantità di filler effettivamente introdotto nella miscela stessa. Due immagini della cenere tal quale ottenute mediante microscopia elettronica a scansione con due diversi ingrandimenti sono riportate in Fig. 2.

### PROPORZIONAMENTO DELLE MISCELE

Sono state preparate quattro diverse miscele di calcestruzzo autocompattante con lo stesso rapporto acqua/cemento pari a 0.54, lo stesso dosaggio del cemento (370 kg/m<sup>3</sup>) e degli inerti ma cambiando il tipo di aggiunta minerale

(Tabella 1).

Per la miscela di riferimento (RIF) è stato impiegato filler calcareo, il cui impiego per la preparazione di calcestruzzi autocompattanti è ormai consolidato, poi è stata impiegata cenere tal quale in parziale sostituzione del filler calcareo per la miscela (L+PMA<sub>tq</sub>) ed infine cenere macinata in parziale o totale sostituzione del filler calcareo per le miscele 'L+PMA<sub>mac</sub>' e 'PMA<sub>mac</sub>' rispettivamente. Quando è stata impiegata la cenere di cartiera tal quale (PMA<sub>tq</sub>), il controllo del dosaggio introdotto è stato particolarmente difficile per la variabilità dei risultati ottenuti in fase di misurazione del suo volume apparente. È stato adottato un valore di massa volumica apparente pari a circa 1.2 g/cm<sup>3</sup> per la cenere tal quale, mentre la massa volumica misurata per la cenere macinata è risultata pari a 2.1 g/cm<sup>3</sup>. Il dosaggio delle aggiunte minerali è stato scelto sulla base di considerazioni volumetriche per raggiungere un volume complessivo di particelle finissime nelle miscele (incluso quindi il cemento) pari a 180-190 litri per metro cubo di calcestruzzo. In questo modo il rapporto tra i volumi di acqua d'impasto e materiale finissimo è risultato compreso nell'intervallo 1.0-1.05.

Sono stati inoltre impiegati due diversi tipi di additivi chimici: un superfluidificante a base acrilica con un dosaggio compreso tra 1.1-1.4% sul peso del cemento e, in alcuni casi, un additivo modificatore di viscosità (VMA) con un dosaggio pari allo 0.05% o 0.1% sul peso del cemento. In presenza di cenere di cartiera macinata, il dosaggio di additivo riduttore d'acqua è risultato maggiore per la maggiore richiesta d'acqua del filler caratterizzato da una finezza più elevata. Per lo stesso motivo non è stata necessaria l'aggiunta di additivo VMA nel caso di impiego di cenere macinata, infatti le miscele presentavano già un buon comportamento coesivo.

Per quanto riguarda le frazioni di aggregato impiegate, sabbia silicea e ghiaietto di frantumazione sono stati proporzionati al 54% e 46% rispettivamente. In questo modo il rapporto tra i volumi di sabbia e quello di malta è risultato pari a 0.45 ed il volume di aggregato grosso molto basso, pari a 265 litri per metro cubo di calcestruzzo.

### RISULTATI E DISCUSSIONE

#### Prova allo stato fresco: slump flow

Il comportamento reologico del calcestruzzo allo stato fresco è stato valutato mediante prova dello slump flow, misurando sia il diametro medio della focaccia di calcestruzzo sia il tempo necessario al conseguimento della configurazione finale. I risultati ottenuti per le quattro miscele studiate sono riportati in Tabella 2.

Tutte le miscele hanno mostrato una adeguata deformabilità sotto l'azione del peso proprio. Infatti il valore del diametro medio della focaccia è sempre risultato superiore a 600

**Tabella 1 - Proporzionamento delle miscele dei calcestruzzi, dosaggi in kg/m<sup>3</sup>.**

MISCELE	RIF	L+PMA <sub>tq</sub>	L+PMA <sub>mac</sub>	PMA <sub>mac</sub>
Acqua/Cemento	0.54	0.54	0.54	0.54
Acqua	200	200	200	200
Cemento	370	370	370	370
Sabbia silicea (0-4)	810	810	810	810
Ghiaietto di frantumazione (5-15)	690	690	690	690
Filler calcareo	160	100	85	---
PMA <sub>tq</sub>	---	70	---	---
PMA <sub>mac</sub>	---	---	60	130
Superfluidificante	5.6 (1.1%)	5.5 (1.0%)	6.5 (1.25%)	7.0 (1.4%)
Agente modificatore di viscosità (VMA)	0.56 (0.1%)	0.40 (0.05%)	---	---

**Tabella 2 - Risultati dello slump flow test.**

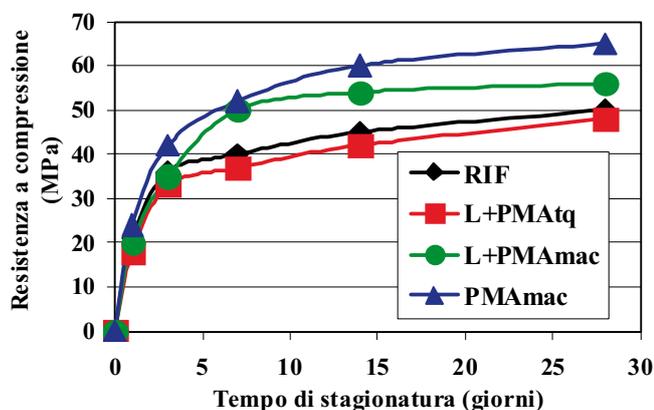
MISCELE	RIF	L+PMAtq	L+PAMmac	PMAmac
Slump Flow (mm)	650	580	630	620
Tempo (s)	15	9	12	13

mm, a parte il caso in cui è stata impiegata cenere tal quale, per cui il valore misurato è stato di 580 mm. Anche in termini di viscosità (valutabile mediante la misura dei secondi intercorsi prima dell'arresto), tutte le miscele hanno mostrato un buon comportamento ad eccezione della miscela di riferimento che è sembrata troppo viscosa. Il motivo di tale eccesso di viscosità è probabilmente ascrivibile all'elevato dosaggio di VMA impiegato (0.1% in peso sul cemento). Comunque in nessun caso sono stati notati fenomeni di segregazione quali la comparsa di un'aureola di pasta cementizia attorno alla focaccia di calcestruzzo o il cosiddetto effetto sombrero.

**Prove allo stato indurito: resistenza a compressione**

La resistenza a compressione dei calcestruzzi autocompattanti è stata misurata su provini cubici (100x100x100 mm) a tempi di stagionatura crescenti: 1, 3, 7, 14 e 28 giorni. Tutti i provini, dopo lo scasso sono stati mantenuti in condizioni di umidità relativa pari ad almeno il 95%, ad una temperatura di 20°C.

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 3 e mostrati graficamente in Fig. 3. Si può notare come la cenere di cartiera tal quale abbia leggermente penalizzato le prestazioni meccaniche del calcestruzzo (-4%). Una possibile spiegazione a cui si potrebbe imputare tale comportamento risiede nell'indebolimento della matrice cementizia conseguente alla elevata



**Fig. 3 - Resistenza a compressione in funzione del tempo di stagionatura.**

**Tabella 3 - Resistenze a compressione dei calcestruzzi (in MPa)**

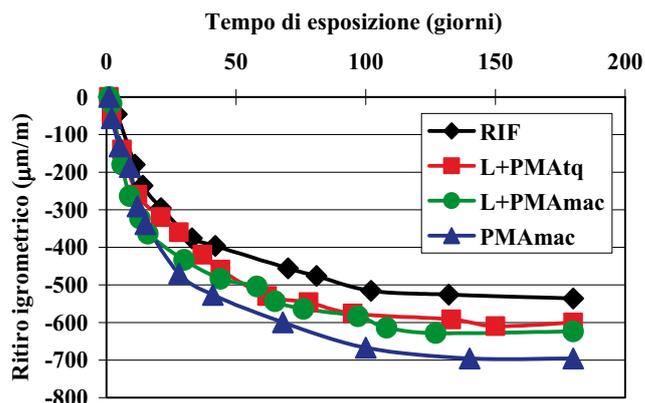
TEMPO DI STAGIONATURA (GIORNI)	RIF	L+PMAtq	L+PAMmac	PMAmac
1	21	18	9	20
3	36	33	21	35
7	40	37	29	50
14	45	42	33	54
28	50	48	35	56

porosità della cenere tal quale. Al contrario, l'impiego di cenere di cartiera macinata caratterizzata da un elevato valore di finezza, leggermente superiore a quello del filler calcareo di riferimento, ha consentito il raggiungimento di un'ottima prestazione meccanica particolarmente alle medie e lunghe stagionature (+30% in caso di totale sostituzione del filler calcareo). Tale aumento della resistenza a compressione può essere imputabile alla maggiore finezza della cenere di cartiera macinata e quindi ad un maggiore effetto fillerizzante della stessa. Benché tale cenere contenga ossidi di alluminio e silicio, sembrerebbe azzardato ipotizzare un'eventuale attività pozzolanica attivata dall'azione della macinatura con conseguente aumento della superficie specifica delle particelle di cenere.

**Prove allo stato indurito: misure di ritiro igrometrico**

Il comportamento deformativo alle lunghe stagionature dei calcestruzzi autocompattanti sottoposti ad essiccamento è stato valutato mediante prove di ritiro igrometrico su provini prismatici (100x100x500 mm) a partire da 1 giorno dal getto fino a sei mesi. I provini dopo lo scasso sono stati esposti ad un ambiente condizionato con umidità relativa del 60% e temperatura di 20°C. I risultati ottenuti sono riportati in Fig. 4.

Rispetto alla miscela di riferimento l'impiego di cenere



**Fig. 4 - Misure di ritiro igrometrico fino a 180 giorni di esposizione.**

di cartiera in qualsiasi modalità (tal quale o macinata) ha prodotto valori di ritiro leggermente superiori. In particolare, nel caso di cenere tal quale è stato rilevato un valore del ritiro igrometrico dopo 180 giorni superiore del 12% rispetto alla miscela di riferimento. Il motivo in questo caso potrebbe essere ascrivibile al volume maggiore di materiale finissimo e/o alla maggiore porosità della miscela 'PMAtq' rispetto alla miscela 'RIF'.

Nel caso di impiego della cenere macinata, il valore del ritiro igrometrico dopo 180 giorni è risultato superiore a quello della miscela di riferimento del 16% o 30% a seconda della percentuale di sostituzione (il valore più elevato di ritiro corrisponde ad una sostituzione del 100%). In questo caso la maggiore sensibilità all'essiccamento del calcestruzzo può essere imputabile alla maggiore finezza dell'aggiunta minerale impiegata con conseguente aumento

dell'acqua assorbita dalla stessa.

## CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati sperimentali ottenuti in questa sperimentazione si possono trarre le seguenti conclusioni di carattere generale:

- l'impiego di cenere di cartiera tal quale sembrerebbe promettente in termini di comportamento reologico allo stato fresco in presenza di additivo modificatore di viscosità;
- tuttavia, quando viene impiegata cenere di cartiera tal quale le prestazioni meccaniche del calcestruzzo autocompattante ed il ritiro igrometrico risultano leggermente penalizzati rispetto ai risultati ottenuti per la miscela di riferimento;
- l'impiego di cenere di cartiera macinata è sembrato vantaggioso in termini di miglioramento del comportamento reologico allo stato fresco del calcestruzzo autocompattante, anche in assenza di additivi modificatori di viscosità;
- quando la cenere di cartiera macinata è stata impiegata al 100% ha comportato un significativo miglioramento delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo (+30%) principalmente per un migliore effetto fillerizzante rispetto al filler calcareo;
- d'altra parte, quando è stata impiegata cenere di cartiera macinata in totale sostituzione del filler calcareo è stato rilevato un incremento significativo del ritiro igrometrico dopo sei mesi, imputabile alla maggior finezza dell'aggiunta minerale impiegata.

## BIBLIOGRAFIA

Asquini, L., Furlani, E., Bruckner, S., Maschio, S. (2008). "Production and characterization of sintered ceramics from paper mill sludge and glass cullet.", *Chemosphere*, 71, 83-89.

Bonen, D., and Shah, S.P. (2005). "Fresh and hardened properties of

self-consolidating concrete", *Progress in Structural Engineering and Materials*, 7(1), 14-26.

Borsoi, A., Collepari, M., Collepari, S., Croce, E.N., Passuelo, A. (2006) "Influence of Viscosity Modifying Admixture on the Composition of SCC" *Proceedings of Eight CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Supplementary Papers*, 2006, 253-261.

Collepari, M., Borsoi, A., Collepari, S., Troli, R. (2005). "Strength, Shrinkage and Creep of SCC and Flowing Concrete" *Proceedings of Fourth International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Ed. By S.P. Shah, Chicago, MI, USA, vol. 2, 911-919.

EN 197-1. "Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements." CEN, 2000.

Ernstbrunner, L. (1997). "Rejects from paper manufacture utilized in the cement works", *Papier* 51 (6), 284-286.

Khayat, K.H., Guizani, Z. (1997). "Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete", *ACI Materials Journal*, 94(4), 332-340.

Liaw, C.T., Chang, H.L., Hsu, W.C., Huang, C.R. (1998). "A novel method to reuse paper sludge and cogeneration ashes from paper mill.", *J. Hazard. Mater.* 58, 93-103.

Marcis, C., Minichelli, D., Bruckner, S., Bachiorrini, A., Maschio, S. (2005). "Production of monolithic ceramics from incinerated municipal sewage sludge, paper mill sludge and steelworks slag", *Ind. Ceram.* 25 (2), 89-95.

Okamura, H., and Ozawa, K. (2003). "Mix design for Self-Compacting Concrete", *Concrete Library of JSCE, Reykjavik, Iceland*, 107-120.

Troli, R., Ogoumah Olagot, J.J., Monosi, S., Collepari, M. (2003) "Low Heat Development in Self-Compacting Concrete for Massive Structure", *Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. ACI SP 217-10*, 103-112.



# DANIELE BOCCACCINI

## il primo Diplomato di Master in Ingegneria del Calcestruzzo



# Corso di formazione on line sulla TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO

Ecco i primi giudizi di chi ha frequentato il corso in Ottobre. Per agevolare la raccolta dei dati sono state chieste le valutazioni (espresse in **scadente, sufficiente, buona, ottima, eccellente**) sui seguenti aspetti: comprensione della presentazione grafica, chiarezza del commento audio, completezza della informazione, interesse degli argomenti.

Giudizio sul corso online sulla "Tecnologia del Calcestruzzo":

- comprensione della presentazione grafica: **ottimo**;
- chiarezza del commento audio: **buono** (in merito alla qualità dell'audio non certo dei contenuti);
- completezza della informazione: **eccellente**;
- interesse degli argomenti: **ottimo**.

Posso senz'altro dire che il corso si è rivelato estremamente interessante e molto ben organizzato. Considerando che è la mia prima esperienza di corsi on-line e che la materia mi era nota solo da reminescenze universitarie e sporadiche esperienze professionali ho trovato modo di apprezzare sia la chiarezza espositiva dei contenuti che il dettaglio di informazioni ricevute.

**Ing. Erino Giordani - erinogiordani@yahoo.it**

Giudizio sul corso online sulla "Tecnologia del Calcestruzzo":

- comprensione della presentazione grafica: **eccellente**;
- chiarezza del commento audio: **eccellente**;
- completezza della informazione: **eccellente**;
- interesse degli argomenti: **eccellente**.

Vi ringrazio per l'opportunità di avermi fatto conoscere davvero meglio e soprattutto organicamente questo materiale di cui quasi tutti pensano di conoscere quasi tutto; ho inquadrato i tanti aspetti diversi e complementari della tecnologia e conto di trarne profitto nelle mie future attività. Grazie ancora!

**Ing. Sergio Castronuovo - sergio.castronuovo@enel.com**

Valutazione del corso online di "Tecnologia del Calcestruzzo"

- comprensione della presentazione grafica: **"eccellente"**;
- chiarezza del commento audio : **"eccellente"**;
- completezza della informazione: **"eccellente"**;
- interesse degli argomenti: **"eccellente"**.

Credo che qualche video in più possa rendere ancora più gradevole i vari moduli, in particolare i più corposi.

**Salvatore La Malfa**

Valutazione del corso online "Tecnologia del Calcestruzzo"

- comprensione della presentazione grafica: **"ottima"**;
- chiarezza del commento audio: **"ottima"**;
- completezza della informazione: **"ottima/eccellente"**;
- interesse degli argomenti: **"ottima/eccellente"**.

Il corso è molto interessante; sarebbe stato forse opportuno prevedere un maggior tempo per seguire le lezioni (ad esempio un mese e mezzo ==> nota di Enco: richiesta accolta).

Ho affrontato già l'argomento del calcestruzzo durante il corso degli studi universitari (Architettura); il corso online della Enco appare però più completo, con una migliore esposizione degli argomenti e più aggiornato.

**Arch. Luciano Maria Monaco - Immonaco@libero.it**

# I PRIMI GIUDIZI

[www.encosrl.it](http://www.encosrl.it) → corsi on line

Giudizio sul corso online di “Tecnologia del calcestruzzo”:

- Comprensione della presentazione grafica: **“ottimo”**;
- Chiarezza del commento audio: **“ottimo”**;
- Completezza della informazione: **“eccellente”**;
- Interesse degli argomenti: **“eccellente”**.

Lavoro presso un’impresa edile la quale possiede anche un impianto di betonaggio, fornisce cls per i suoi cantieri ed altre imprese edili. Sono stata nominata addetta al laboratorio. Per effettuare le prove di laboratorio mi sono appoggiata al laboratorio mobile e del personale tecnico della Italcementi.

**Geom. Sara Gallazzini, [info@gallazzini.it](mailto:info@gallazzini.it)**

Ho terminato di seguire il Vs. corso e in generale il giudizio è molto buono:

- comprensione della presentazione grafica: **“ottimo”**;
- chiarezza del commento audio: **“buono”**;
- completezza della informazione: **“ottimo”**;
- interesse degli argomenti: **“ottimo”**.

Sono una studentessa di ingegneria civile presso il Politecnico di Torino. Nella laurea di primo livello ho sostenuto l’esame di “Scienza e tecnologia dei materiali da costruzione” e uno dei libri indicati nella bibliografia del corso era proprio “Il nuovo calcestruzzo”. Ho sostenuto anche l’esame di “Cantieri ed impianti per infrastrutture II” che comprendeva nel programma molti degli argomenti proposti nel Vs. corso. Uno dei prossimi esami di nuovo riporrà parte degli argomenti del Vs. corso ed è proprio questo che mi ha spinto ad iscrivermi. Per quel che è la mia esperienza, seguire in modo interattivo un corso è più efficace che non ripassare solo sfogliando un libro.

**Serena Caraci, [serena.caraci@eutelia.com](mailto:serena.caraci@eutelia.com)**

Valutazioni del corso online di “Tecnologia del calcestruzzo”:

- comprensione della presentazione grafica: **“ottima”**;
- chiarezza del commento audio: **“buona”**- questo giudizio è per l’audio, non per la chiarezza espositiva, che meriterebbe almeno “ottima”);
- completezza della informazione: **“ottima”**;
- interesse degli argomenti: **“eccellente”**.

In sintesi, sono molto soddisfatto del corso, perchè è ben fatto, approfondito ed interessante. L’unica piccola critica è, alcunevolte, il desiderio di mostrare tutti i calcoli, che rallenta un po’ il ritmo, ma è tipico della lezione tradizionale in aula.

**Ing. Andrea Galletto - [a\\_galletto@libero.it](mailto:a_galletto@libero.it)**

Valutazione del corso sulla “Tecnologia del Calcestruzzo”:

- comprensione della presentazione grafica: **“eccellente”**;
- chiarezza del commento audio: **“eccellente”** (solo in alcune slide il commento è troncato alla fine di 1-2 secondi ==> nota di Enco: difetti eliminati);
- completezza della informazione: **“ottima”** (“eccellente“ se si prendono il libro ed i link al sito di encosrl.it);
- interesse degli argomenti: **“eccellente”**.

Sono consulente per diversi impianti di produzione di calcestruzzo in materia di FPC.

**Ing. Antonio Gerardi - [info@antoniogerardi.it](mailto:info@antoniogerardi.it)**

# CALCESTRUZZI A RITIRO COMPENSTATO PER STRUTTURE SPECIALI

## Parte I - Il funzionamento del calcestruzzo a ritiro compensato



Roberto Troli

Enco srl, Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it

### INTRODUZIONE

Il presente articolo costituisce la prima parte di un più ampio lavoro dedicato all'impiego di conglomerati a ritiro compensato nella realizzazione di opere in calcestruzzo armato speciali al fine di prevenire la formazione di fessure dovute alle coazioni prodotte dal ritiro igrometrico impedito.

In questa prima parte dell'articolo viene illustrato il principio di funzionamento dei tipi di calcestruzzi a ritiro compensato esistenti ponendo l'attenzione sulle differenze esistenti e sui limiti di utilizzo di alcuni di essi. Vengono fornite, inoltre, indicazioni su come debbono essere progettati i calcestruzzi a ritiro compensato al fine di prevenire la fessurazione delle opere in c.a.

Nella seconda parte dell'articolo, che verrà pubblicata nel prossimo numero della presente rivista, verranno descritti tre interessanti esempi di impiego di calcestruzzi a ritiro compensato nella realizzazione di opere speciali.

### FESSURE DOVUTE AL RITIRO IGROMETRICO

Il ritiro igrometrico è una contrazione di volume che si verifica nel calcestruzzo, durante l'indurimento, causata dalla perdita di umidità verso un ambiente insaturo.

Se il ritiro igrometrico potesse avvenire liberamente, senza alcun vincolo, non rappresenterebbe alcun problema per la maggior parte degli elementi strutturali in conglomerato cementizio.

Purtroppo, a causa della presenza di vincoli interni ed esterni (interazione con l'armatura metallica di rinforzo, collegamento con altre parti della struttura, attrito con il sottofondo per le lastre su terreno, etc ...) la contrazione da ritiro è parzialmente o totalmente ostacolata e trasformata in una sollecitazione di trazione.

Dal momento che, come è noto, in calcestruzzo è un materiale scarsamente resistente a trazione, le sollecitazioni di trazione prodotte dal ritiro igrometrico impedito superano facilmente la resistenza a trazione del materiale, determinando la formazione di fessure.

Le fessure prodotte dal ritiro igrometrico rappresentano uno dei principali problemi che interessano le strutture in cemento armato in quanto sono spesso causa di precoce

degrado, perdita di funzionalità o, semplicemente, difetto estetico.

Infatti, le fessure costituiscono una facile via di accesso all'interno della struttura per agenti aggressivi come l'anidride carbonica e i cloruri che possono così promuovere una rapida corrosione delle armature metalliche pur in presenza di un calcestruzzo impermeabile in quanto caratterizzato da un basso rapporto a/c.

Le fessure dovute al ritiro igrometrico, inoltre, possono compromettere la funzionalità delle pavimentazioni in calcestruzzo sottoposte ad intenso traffico veicolare oppure di strutture marine o di contenimento di liquidi cui viene richiesta una perfetta tenuta all'acqua.

Infine, le fessure possono costituire un problema anche nel caso di elementi architettonici non esposti ad ambienti particolarmente aggressivi in quanto ne compromettono, in genere, l'aspetto estetico.

### CALCESTRUZZI A RITIRO COMPENSATO

Probabilmente l'impiego di calcestruzzi a ritiro compensato è il metodo più efficace per eliminare o, almeno, minimizzare la formazione di fessure dovute al ritiro igrometrico nelle strutture in cemento armato.

Questa tecnica si basa su un'espansione volumetrica che viene indotta nel calcestruzzo, mediante una reazione chimica tra un agente espansivo e l'acqua.

Normalmente l'espansione indotta chimicamente si verifica durante i primi 2-7 giorni di vita del calcestruzzo per cui essa si sviluppa e termina molto più rapidamente delle contrazioni causate dalla perdita di umidità. Per questo motivo, affinché tale espansione iniziale possa essere vantaggiosamente utilizzata per compensare le contrazioni dovute al successivo ritiro igrometrico, essa deve essere adeguatamente contrastata e trasformata in una coazione di compressione che, nel tempo, compensa le trazioni prodotte dal ritiro igrometrico impedito.

Il vincolo più efficace per contrastare l'espansione iniziale è rappresentato dalle armature metalliche normalmente presenti nelle strutture in cemento armato. In genere la percentuale di armatura necessaria ai fini statici è più che sufficiente a garantire un efficace contrasto per

l'espansione. Si deve, però, porre una cura aggiuntiva nel posizionare tali armature all'interno della sezione in modo tale da garantire un contrasto il più possibile uniforme nei confronti dell'espansione.

Il comportamento espansivo di un calcestruzzo a ritiro compensato viene valutato in base alla norma UNI 8148 [1] mediante misura della variazione di lunghezza di un tondino d'acciaio annegato in un provino prismatico confezionato con il conglomerato espansivo, scasserato al termine della presa (circa 6-8 ore dopo il confezionamento) e mantenuto in particolari condizioni di stagionatura. Sulle modalità di stagionatura previste dalla norma si tornerà successivamente.

Non sono disponibili documenti normativi o raccomandazioni nazionali o europee a riguardo della progettazione di elementi strutturali e non strutturali realizzati con calcestruzzo a ritiro compensato. Tale argomento, però, viene approfonditamente trattato nel report dell'ACI (American Concrete Institute) numero 223-98 [2]. Secondo questo documento il progetto di strutture in calcestruzzo a ritiro compensato deve includere i seguenti quattro step:

a) Stima del ritiro igrometrico dell'elemento strutturale. La stima del ritiro libero finale dell'elemento strutturale (in assenza dell'espansione iniziale) deve essere eseguita prendendo in considerazione l'influenza delle caratteristiche del calcestruzzo impiegato (privato dell'agente espansivo), dell'umidità relativa media dell'ambiente di esposizione, delle dimensioni dell'elemento e della percentuale di armatura metallica. Allo scopo possono essere utilizzate formulazioni presenti nella letteratura tecnica [3] o tratte da documenti normativi come, ad esempio, la UNI EN 1992-1-1 (EC2) all'Appendice B o il D.M. 14/01/08 al par. 11.2.10.6.

b) Scelta dell'espansione necessaria. Al fine di garantire l'assenza di formazione di fessure da ritiro igrometrico, è opportuno che l'espansione indotta inizialmente nell'elemento strutturale sia maggiore o, al limite uguale al ritiro igrometrico finale atteso per quel dato elemento strutturale. In realtà, un'espansione iniziale inferiore al valore del ritiro finale è in genere sufficiente a garantire l'assenza di fessure da ritiro igrometrico a patto che le sollecitazioni di trazione che si sviluppano una volta che le contrazioni da ritiro superano in valore assoluto l'espansione iniziale siano inferiori alla resistenza a trazione del materiale. Si fa notare, però, che esistono, nelle strutture in cemento armato, ulteriori fenomeni che possono provocare sviluppo di sollecitazioni di trazione nel calcestruzzo le quali, sommate a quelle prodotte dal ritiro igrometrico, potrebbero comunque innescare la formazione di fessure. Ci si riferisce, in particolare, alle contrazioni prodotte da abbassamenti della temperatura ambientale. Altra fonte di possibili fessurazioni sono le coazioni residue che si producono nelle strutture in conglomerato cementizio per effetto dell'iniziale riscaldamento dovuto allo sviluppo del calore di idratazione del cemento e del successivo raffreddamento. Siccome il riscaldamento iniziale e il successivo raffreddamen-

to avvengono in una fase in cui il modulo elastico del calcestruzzo cresce molto velocemente, ad un bilancio sostanzialmente nullo delle deformazioni (dilatazione iniziale nella fase di riscaldamento e contrazione successiva, nella fase di raffreddamento) non corrisponde un bilancio altrettanto nullo delle tensioni con formazione, più precisamente, di coazioni di trazione residuali dovute al fatto che, nella fase di raffreddamento, il materiale è più rigido che in quella iniziale di dilatazione termica. Per quanto sopra, se si vuole avere la ragionevole certezza di eliminare la formazione di fessure, è necessario che la somma in valore assoluto della sollecitazione di compressione iniziale e della resistenza a trazione del materiale (a maturazione ultimata) sia maggiore della somma delle coazioni di trazione che possono innescarsi nell'elemento strutturale per effetto dei fenomeni sopra descritti.

c) Stima dell'espansione necessaria nella prova secondo UNI 8148: L'espansione effettiva che si produce nell'elemento strutturale è diversa da quella misurata nei provini prismatici confezionati secondo la norma UNI 8148. la principale differenza è dovuta alla diversa percentuale di armatura metallica presente nel provino rispetto alla struttura reale. Il grafico riportato in Fig. 1, tratto dal già citato report ACI 223-98 e basato su dati pubblicati da Russell nel 1973, mette in relazione l'espansione effettiva che avviene nell'elemento strutturale (e che deve compensare il ritiro atteso nello stesso secondo quanto detto in precedenza) con l'espansione misurata nei provi i prismatici testati secondo la UNI 8148 al variare della percentuale geometrica di armatura metallica nel primo. In questo modo è possibile valutare qual è l'espansione minima che dovrà essere ottenuta nei test eseguiti nella fase di pre-qualifica del calcestruzzo a ritiro compensato secondo la UNI 8148.

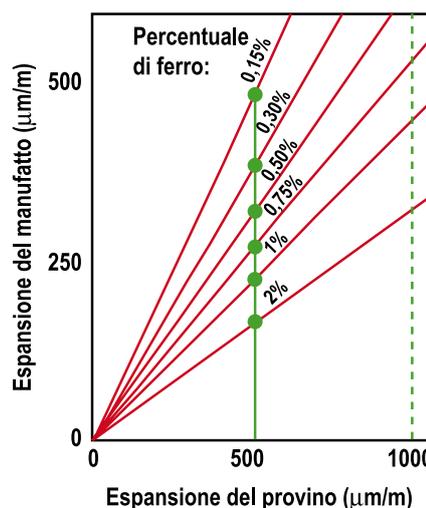


Fig. 1 – Espansione nella struttura in funzione dell'espansione ottenuta nel provino prismatico [4]

d) Proporzionamento del calcestruzzo: In questa fase si definisce la quantità di agente espansivo necessario, per

tentativi o sulla base di precedenti risultati sperimentali, per ottenere l'espansione richiesta e vengono eseguiti i test di espansione contrastata secondo la più volte citata UNI 8148 in modo da verificare l'esattezza del proporzionamento eseguito.

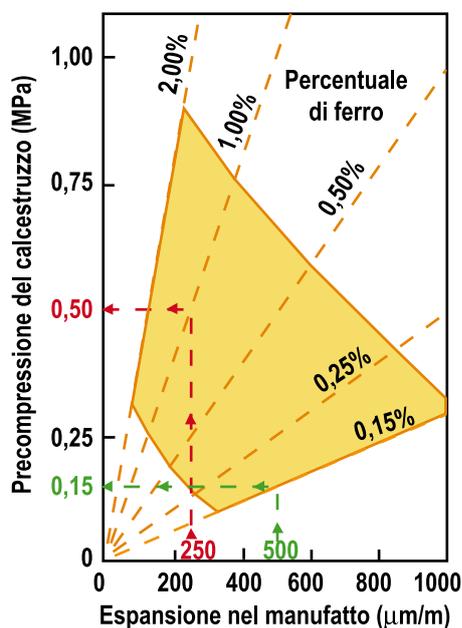


Fig. 2 – Sollecitazione di compressione indotta nell'elemento strutturale dall'espansione contrastata [4]

Ancorché l'espansione iniziale induca una sollecitazione di trazione nelle armature metalliche, non è, in genere, necessario eseguire una verifica statica dello stato tensionale indotto in quanto esso è sicuramente inferiore alle tensioni ammissibili per il materiale se vengono rispettati i valori minimi di armatura previsti negli eurocodici e nella normativa nazionale. Inoltre non è, in genere, richiesta una verifica dello stato tensionale prodotto nelle armature metalliche dalla combinazione degli effetti prodotti dai carichi esterni e dall'espansione iniziale, in quanto, come è noto, le sollecitazioni prodotte inizialmente dall'espansione sono destinate ad attenuarsi rapidamente e a diventare non significative prima che si possa ipotizzare una messa in carico ai massimi carichi di esercizio della struttura. In caso, però, siano previste significative sollecitazioni nella struttura nei primi giorni di vita, quando è verosimile che l'espansione residua nel calcestruzzo sia ancora importante, occorrerà eseguire le verifiche statiche nei confronti dei suddetti carichi combinando lo stato di sollecitazione prodotto dai carichi con quello prodotto dalla coazione espansiva. Questo è vero sia per le armature metalliche che per il calcestruzzo. Nel caso di quest'ultimo, la sollecitazione di compressione prodotta dall'espansione contrastata può essere agevolmente calcolata mediante considerazioni di congruenza o facendo riferimento al grafico di Fig. 3 anch'esso tratto dal ACI 223-98.

I calcestruzzi a ritiro compensato possono essere realiz-

zati, alternativamente, impiegando speciali cementi espansivi in luogo dei cementi ordinari classificati, in Europa, dalla EN 197/1, oppure aggiungendo degli agenti espansivi a calcestruzzi confezionati con cementi ordinari.

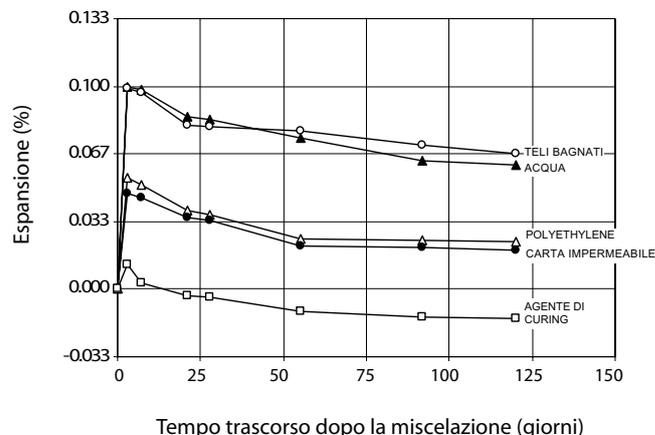


Fig. 3 – Effetto di vari metodi di stagionatura sull'espansione effettiva ottenuta con calcestruzzi a ritiro compensato realizzati con cementi espansivi a base solfatica [2]

Il primo tipo di tecnologia è molto diffuso negli Stati Uniti ed è, anzi, l'unico contemplato dal documento ACI 223-98. Il secondo tipo di tecnologia è, invece, più diffuso in Europa dove non esistono norme che regolano la produzione di cementi espansivi e dove l'impiego di cementi speciali, non rispondenti alle caratteristiche composizionali e prestazionali definite nella EN 197/1 per opere strutturali non è, di fatto, ammesso.

## CEMENTI ESPANSIVI

Il primo cemento espansivo venne sviluppato, contemporaneamente, in Russia e in Francia. In particolare, agli inizi degli anni '40, Lossier mise a punto un cemento espansivo miscelando un cemento Portland ordinario con un agente espansivo a base di solfato di calcio e alluminati di calcio e con uno stabilizzatore consistente in loppa d'altoforno. L'espansione del sistema era assicurata dalla reazione tra il solfato di calcio, gli alluminati di calcio e l'acqua per produrre ettringite.

L'ettringite è una sostanza nota nella tecnologia del calcestruzzo in quanto è spesso collegata a severe forme di degrado (per attacco solfatico) che avvengono nel calcestruzzo proprio per la notevole espansione che ne accompagna la formazione. Il degrado del calcestruzzo dovuto ai solfati può verificarsi per *attacco solfatico esterno* (ESA), quando il manufatto cementizio è a contatto con un ambiente esterno (acque o terreni) ricco di solfati, o per *attacco solfatico interno* (ISA) quando il solfato è presente sottoforma di impurità nelle materie prime (in particolare negli aggregati) o come conseguenza di particolari trattamenti termici [1]. In entrambi i casi il degrado avviene in quanto la reazione espansiva dovuta alla formazione di ettringite non avviene in maniera omogenea in tutto il volu-

me di calcestruzzo ma è localizzata solo in corrispondenza delle zone dove è penetrato lo ione solfato (ESA) o dove è presente l'impurità. Si verificano, quindi, delle coazioni interne dovute all'espansione eterogenea che portano alla formazione di fessure e/o distacchi.

Nel cemento espansivo messo a punto da Lossier (e in tutti quelli analoghi, sviluppati successivamente che sfruttano la formazione di ettringite come sistema espansivo) se si prendono le dovute precauzioni in merito ai vincoli interni ed esterni presenti nella struttura, non si verificano situazioni di degrado in quanto l'espansione è distribuita omogeneamente nel volume di calcestruzzo ed è "controllata", ossia, l'aumento di volume è ottimizzato in modo da non creare eccessive coazioni.

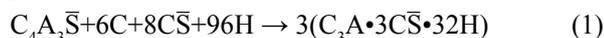
Nel caso specifico del cemento Lossier, il "controllo" della reazione veniva effettuato dalla loppa d'altoforno che si sostituiva gradualmente agli alluminati di calcio nella combinazione con il solfato, ponendo un limite all'espansione.

Altri cementi espansivi vennero messi a punto negli anni successivi, tutti basati su una produzione controllata di ettringite.

La norma Americana ASTM C845-90 and ACI 223-98 classifica i cementi espansivi attualmente disponibili in commercio prevedendone i seguenti tre differenti tipi:

- 1) cemento tipo K (cemento Klein), contenente "solfo-alluminato tetracalcico" ( $C_4A_3\bar{S}$ )<sup>1</sup>, solfato di calcio ( $C\bar{S}$ )<sup>1</sup> and ossido di calcio libero (C)<sup>1</sup>;
- 2) cemento tipo M, prodotto miscelando cemento Portland con alluminati di calcio ( $CA$ )<sup>1</sup> e ( $C_7A_{12}$ )<sup>1</sup>;
- 3) cemento tipo S, che contiene un eccesso di alluminato tricalcico ( $C_3A$ )<sup>1</sup> e solfato di calcio ( $C\bar{S}$ )<sup>1</sup> rispetto ai quantitativi normalmente contenuti nel cemento Portland e in quelli di miscela.

Tra i cementi espansivi sopra elencati, il più diffuso è il tipo K che può essere alternativamente prodotto co-macinando cemento Portland ordinario con un agente espansivo prodotto separatamente, ovvero, mescolando opportunamente le materie prime da inserire nel forno in modo da ottenere direttamente un clinker espansivo. In entrambi i casi, la reazione espansiva può essere rappresentata come segue<sup>1</sup>:



La reazione espansiva inizia non appena si verifica il contatto tra acqua e cemento ma impiega da 3 a 7 giorni per esaurirsi. Questa relativa "lentezza" della reazione che porta alla formazione di ettringite, assicura che la maggior parte dell'espansione si espliciti quando il calcestruzzo ha raggiunto un grado di indurimento sufficiente ad aderire alle barre di armatura determinando un adeguato contrasto nei confronti dell'espansione stessa.

D'altro canto, dal momento che la formazione di ettrin-

gite richiede un elevato quantitativo di acqua (sono necessarie 32 molecole d'acqua per ogni molecola di ettringite che si forma) perché venga raggiunto il livello di espansione potenziale pianificato, è necessario assicurare alla struttura un'adeguata stagionatura umida per almeno 7 giorni.

Oltre alla durata del trattamento di stagionatura, ai fini del raggiungimento dell'espansione potenziale, è fondamentale anche il tipo di sistema impiegato.

La Fig. 3, tratta dall'ACI 223-98, mostra l'effetto di vari metodi di stagionatura sull'espansione effettivamente ottenuta in strutture realizzate con calcestruzzi a ritiro compensato a base di cementi espansivi di natura ettringitica. Come si può notare, l'aspersione continua di acqua sulla superficie o la protezione della stessa con teli mantenuti umidi (*wet burlap*) sono sistemi preferibili in quanto assicurano apporto di acqua dall'esterno che contribuisce alla reazione per la formazione di ettringite. Altri metodi di *curing* come quelli che prevedono la semplice protezione con teli impermeabili, ma senza aggiunta di acqua dall'esterno, possono causare una riduzione dell'espansione iniziale fino al 50% rispetto a quella ottenuta con i metodi che assicurano apporto di acqua dall'esterno al calcestruzzo.

Membrane antievaporanti ottenute spruzzando cere o resine (*curing compound*) sulla superficie del getto possono risultare totalmente inefficaci se non forniscono una copertura completa di tutta la superficie e non prevengono l'evaporazione di acqua per almeno 7 giorni.

Un'incompleta espansione iniziale dovuta a carenze di stagionatura umida, può risultare doppiamente negativa sia perché il ritiro igrometrico finale non può essere completamente compensato, sia perché una considerevole quantità di solfato non reagito permane nella struttura. Tale solfato non reagito sarà presente soprattutto nelle zone più corticali della struttura che sono quelle più affette da perdita di umidità per insufficiente stagionatura umida. Qualora, come spesso avviene, la struttura venisse in contatto in servizio con umidità proveniente dall'esterno, la reazione espansiva potrebbe "riaccendersi" interessando, però, solo quegli strati corticali dove è maggiormente presente il solfato non reagito e dove è più facile che avvenga un aumento di umidità in servizio. Ciò comporterebbe l'esplicitarsi di reazioni espansive non uniformemente distribuite analoghe a quelle prodotte dall'attacco solfatico esterno. [3].

La forte dipendenza dell'efficacia dei cementi espansivi a base solfatica dalla qualità e dalla durata della stagionatura umida e il pericolo di possibili deleterie espansioni ritardate, in caso di insufficiente stagionatura, sono due tra i motivi che hanno fortemente limitato in passato la diffusione dell'uso dei calcestruzzi a ritiro compensato basati su questa tecnologia.

Un ulteriore inconveniente nell'utilizzo pratico dei calcestruzzi a ritiro compensato basato sull'impiego di cementi espansivi speciali è rappresentato dalla necessità di provvedere un silo aggiuntivo presso l'impianto di betonaggio per lo stoccaggio del cemento espansivo in affiancamento al cemento o ai cementi ordinari utilizzati normalmente.

<sup>1</sup> Notazione contratta della chimica del cemento dove: C = CaO, A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, S = SiO<sub>2</sub>, H = H<sub>2</sub>O e  $\bar{S}$  = SO<sub>3</sub>

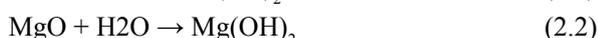
Sono disponibili nel mercato agenti espansivi esterni a base di solfo-alluminato tetra calcico da aggiungere al cemento portland ordinario nella produzione di calcestruzzi a ritiro-compensato. Questi agenti espansivi, però, non hanno trovato un ampio impiego in quanto le loro prestazioni in termini di espansione possono dipendere fortemente dalla composizione dello specifico cemento utilizzato.

In effetti, la reazione che porta alla formazione di ettringite coinvolge sostanze come il solfato di calcio e gli alluminati di calcio che sono contenute, in forme e quantità variabili, anche nel cemento Portland ordinario e nei cementi di miscela. Pertanto, la quantità di ettringite che si produce in seguito all'aggiunta di un determinato quantitativo di agente espansivo esterno, può risultare molto diversa, qualora venga utilizzato un cemento piuttosto che un altro.

Per lo stesso motivo un dosaggio improprio del agente espansivo esterno a base solfatica, in relazione allo specifico cemento utilizzato, può portare ad un indesiderato quantitativo di solfato non reagito nel calcestruzzo.

#### AGENTI ESPANSIVI A BASE DI OSSIDO DI CALCIO O DI MAGNESIO

Un altro metodo utilizzato (soprattutto in Europa e in Giappone) per produrre calcestruzzi a ritiro compensato è quello che sfrutta come reazione espansiva l'idratazione dell'ossido di calcio (CaO) e/o di magnesio (MgO) che porta alla produzione dei corrispondenti idrossidi secondo le seguenti reazioni:



Gli ossidi di calcio e di magnesio disponibili normalmente in commercio, usati in agricoltura o per produrre la calce aerea impiegata in edilizia nella realizzazione di malte per muratura ed intonaco, non sono adatti per essere impiegati come agenti espansivi.

Infatti, tali ossidi, ottenuti per cottura di calcari e dolomite ad una temperatura di circa 900°C, reagiscono troppo rapidamente con l'acqua quando il calcestruzzo si trova ancora in fase plastica o nelle prime fasi dell'indurimento e non ha, pertanto, sviluppato sufficiente capacità di aderire alle armature metalliche, requisito necessario perché l'espansione venga adeguatamente contrastata e trasformata in una coazione benefica di compressione.

Per essere idonei all'uso come agenti espansivi, l'ossido di calcio o di magnesio devono essere ottenuti per cottura a temperature superiori a 1000°C. Infatti, a tali temperature di produzione essi vengono soggetti ad un parziale processo di *sinterizzazione* che ne riduce la porosità e la reattività. Ossidi di questo tipo vengono detti "stracotti" o "cotti a morte".

Un ulteriore rallentamento della reazione di espansione può essere ottenuto riducendo la finezza di macinazione dei granuli di ossido, purché "cotti a morte".

La Fig. 4 mostra schematicamente l'espansione contrastata ottenuta in laboratorio, con un calcestruzzo a ritiro compensato basato sull'impiego di ossido di calcio "cotto a morte" comparato con quello di un calcestruzzo realizzato con un cemento espansivo a base solfatica, a parità di tutte le altre condizioni. Come si può notare, il calcestruzzo espansivo a base di ossido di calcio raggiunge la massima espansione in meno di tre giorni mentre quello a base solfatica continua la propria espansione per almeno una settimana.

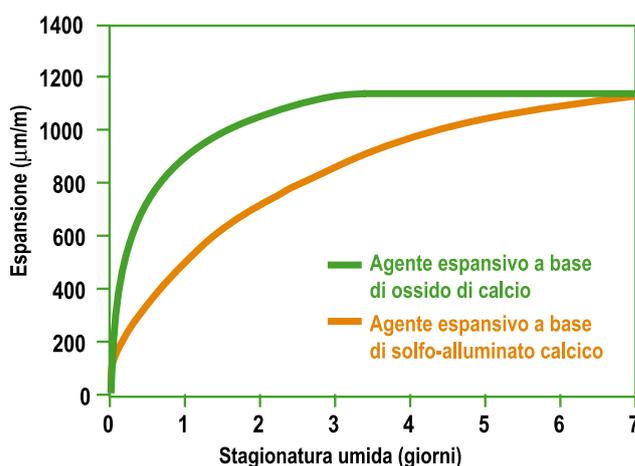


Fig. 4 – Confronto tra il comportamento schematico di un calcestruzzo espansivo a base di ossido di calcio e quello di un calcestruzzo a base di solfo-alluminato tetra calcico [4]

La rapida espansione dal CaO rende necessario l'impiego di un calcestruzzo a rapido sviluppo delle resistenze meccaniche al fine di sfruttare al meglio la reazione espansiva aumentando la frazione di questa che viene contrastata per effetto dell'instaurarsi di un'adeguata adesione tra calcestruzzo e barre di acciaio. Per ottenere un più rapido incremento iniziale delle prestazioni meccaniche, è possibile fare ricorso all'utilizzo di cementi di classe superiore e di tipo R (CEM 42.5R, o 52.5R) e/o ad un elevato dosaggio di additivi superfluidificanti per ridurre il rapporto a/c ed incrementare, di conseguenza le prestazioni.

Essendo la reazione espansiva innescata dal solfo alluminato tetracalcico più lenta di quella dell'ossido di calcio, ancorché "cotto a morte", i calcestruzzi a ritiro compensato a base solfatica sono meno dipendenti da questa problematica.

D'altra parte, però, i calcestruzzi espansivi a base di CaO richiedono un più breve periodo di stagionatura umida (circa 2 giorni), al fine di raggiungere l'espansione finale prevista. Per questa ragione le loro prestazioni in termini di espansione sono meno affette da carenze di stagionatura umida e non vi è alcun rischio reale di permanenza nella struttura di CaO residuo che potrebbe portare a espansioni posticipate.

Sebbene sia possibile produrre cementi espansivi a base di ossido di calcio è decisamente più diffuso l'impiego di questo prodotto come componente esterno da aggiungere

ad un calcestruzzo realizzato con cemento portland ordinario.

Ciò è possibile in quanto, contrariamente a quanto avviene per gli espansivi a base solfatica, le reazioni (2.1) e (2.2) non sono influenzate dalla composizione chimica dello specifico cemento utilizzato per cui l'espansione prodotta da una determinata quantità di espansivo non cambia al variare del cemento utilizzato.

Esistono ulteriori vantaggi nell'utilizzo di un agente espansivo, in luogo di un cemento espansivo, nella realizzazione di calcestruzzi a ritiro compensato:

- a) è possibile ottimizzare l'espansione chimica senza modificare la quantità di cemento e delle altre materie prime del calcestruzzo, con evidente semplificazione delle procedure di mix design;
- b) in caso di utilizzo simultaneo di calcestruzzo ordinario e di calcestruzzo a ritiro compensato nella stessa struttura è possibile utilizzare per entrambi un conglomerato caratterizzato da medesima composizione, ad eccezione dell'agente espansivo, ottenendo una maggiore uniformità di prestazioni e una maggiore razionalizzazione della produzione;
- c) l'uso combinato di un cemento Portland ordinario e di un agente espansivo a base di CaO è in genere economicamente più conveniente dell'uso di un cemento speciale a base di solfo-alluminato;

### L'USO COMBINATO DI ESPANSIVI A BASE DI CAO E DI ADDITIVI RIDUTTORI DI RITIRO (SRA)

Gli additivi riduttori di ritiro, meglio noti come SRA (Shrinkage-Reducing Admixtures), sono prodotti liquidi a base di sostanze organiche come il *propilen glycole etere* o il *neo pentil glicole*, che, introdotti nel calcestruzzo in quantità variabili tra l'1 e il 2% in peso rispetto al cemento, sono in grado di ridurre il ritiro igrometrico fino al 50% [5].

Secondo alcuni autori [6] l'efficacia degli SRA deve es-

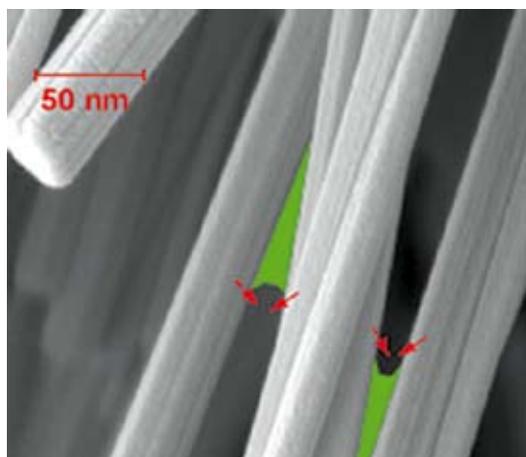


Fig. 5 – Menischi d'acqua che interagiscono con cristalli di C-S-H provocando il ritiro igrometrico della pasta cementizia [5]

sere ascritta alla diminuzione delle tensione superficiale dell'acqua ( $\gamma$ ) prodotta da tali sostanze la quale provocherebbe una diminuzione della tensione capillare  $P$  causata dalla formazione di menischi all'interno dei pori capillari della pasta cementizia cui, secondo alcune teorie è attribuita la responsabilità del ritiro igrometrico del calcestruzzo (Fig. 5).

Recentemente [7] si è dimostrato che l'uso di un additivo SRA in combinazione con un agente espansivo a base di ossido di calcio consente di realizzare calcestruzzi a ritiro compensato efficaci anche in assenza di prolungate operazioni di stagionatura. In particolare, studiando il comportamento espansivo di provini prismatici realizzati con calcestruzzo a ritiro compensato con e senza SRA e sottoposti ad una stagionatura costituita da protezione dall'evaporazione per 24 ore con film di polietilene e, successivamente, esposizione all'aria (60% R.H) si è appurato che l'influenza positiva dell'SRA si manifesta in due differenti aspetti (Fig. 6):

- una riduzione del ritiro igrometrico che interessa il provino quando esposto all'ambiente insaturo (effetto sostanzialmente atteso per la presenza dell'SRA ( $\beta$ );
- un inaspettato aumento dell'espansione iniziale che si verifica quando il provino è protetto dall'evaporazione dal film di plastica ( $\alpha$ ).

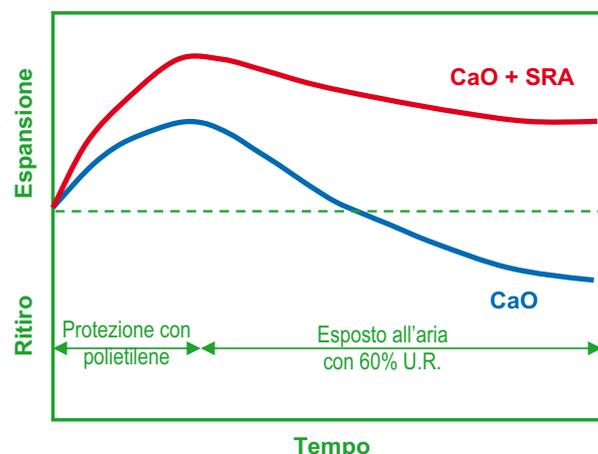


Fig. 6 – Influenza dell'SRA nel comportamento espansivo dei calcestruzzi a ritiro compensato a base di CaO

In sostanza, impiegando contemporaneamente un agente espansivo a base di ossido di calcio e un agente SRA è possibile realizzare calcestruzzi a ritiro compensato più semplici da gestire in quanto la compensazione del ritiro igrometrico risulta meno dipendente dalle operazioni di *curing* ed ottenibile anche con tecniche di stagionatura più facili da realizzare in cantiere come una semplice protezione con teli impermeabili da mantenere per un breve periodo di tempo.

L'effetto sinergico  $\alpha$  in Fig. 6 è stato confermato da altri autori [8] i quali ipotizzano che la causa di ciò possa essere ricercata nella massiccia formazione di cristalli allungati di idrossido di calcio che avverrebbe nell'idratazione dell'os-

sido di calcio in presenza dell'SRA.

Gli stessi autori in [9] propongono un'altra spiegazione del fenomeno: essendo l'SRA una molecola organica con azione idrofobica, potrebbe rallentare la solubilità in acqua del CaO, ritardandone l'idratazione e aumentando, quindi la frazione di questa che viene contrastata.

Un effettivo ritardo attribuito alla presenza di SRA è stato verificato in [10] nell'idratazione di un agente espansivo a base di ossido di magnesio.

La differenza di comportamento tra calcestruzzi a ritiro compensato ordinari (con solo agente espansivo) e di ultima generazione (contenenti sia l'agente espansivo che l'SRA) è tale che si è reso necessario provvedere ad una modifica della già citata norma UNI 8148.

La versione precedente della norma, emessa nel 1980, prevedeva che i provini prismatici, una volta scassati, venissero mantenuti costantemente sott'acqua fino al termine delle misure di espansione. Questo tipo di stagionatura, ideale per un calcestruzzo a ritiro compensato, oltre a non corrispondere in nessun modo a quanto realmente avviene in cantiere, comportamento una sovrastima dell'effettiva espansione iniziale, non consentiva di distinguere il comportamento di calcestruzzi con SRA da quelli senza SRA. Nella nuova versione della norma, emessa nel 2008, accanto al metodo di stagionatura precedente, oggi identificato come metodo A, è stato aggiunto un metodo di stagionatura alternativo (metodo B) caratterizzato da una protezione dei provini per 48 ore con un film di polietilene alla temperatura di 20°C e la successiva esposizione, fino al termine della prova ad un ambiente insaturo costituito da  $T = 20^\circ\text{C}$  e U.R. = 55%.

Vale la pena di far notare che, ai fini di una corretta compensazione del ritiro nell'elemento strutturale non è necessario che nella prova secondo UNI 8148 metodo B l'espansione indotta inizialmente sia superiore o uguale al successivo ritiro igrometrico del provino (Fig. 6). Infatti, le leggi fisiche che caratterizzano il passaggio di scala dal provino all'elemento strutturale effettivo sono diverse per i due fenomeni (espansione iniziale e ritiro igrometrico successivo) per cui si verifica, in genere che il ritiro igrometrico nell'elemento reale possa essere adeguatamente compensato anche se la curva espansione-ritiro nella prova secondo UNI 8148 metodo B attinge, alle stagionature successive, a valori negativi (ritiro).

Come spiegato in precedenza, ai fini di una completa compensazione del ritiro igrometrico è necessario che l'espansione contrastata nella struttura, valutabile a mezzo della prova secondo UNI 8148 (impiegando il metodo B per essere più attinenti alla realtà di cantiere) e trasformata per mezzo del grafico di Fig. 1 eguagli il ritiro igrometrico atteso, sempre, nella struttura e valutato con le modellazioni di letteratura o di normativa.

Sebbene tale effetto sinergico sia stato confermato da vari autori, l'effettivo meccanismo di interazione tra CaO ed SRA non è stato ancora completamente chiarito e necessita di ulteriori indagini. Nonostante questa carenza, l'uso

pratico di questa tecnologia è andato diffondendosi negli ultimi anni nel settore delle costruzioni con molte interessanti applicazioni.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI 8148/2008 "Agenti espansivi non metallici per impasti cementizi - Determinazione dell'espansione contrastata del calcestruzzo".
- [2] ACI 223R-98 "Standard Practice for the use of shrinkage compensating concrete", ACI Manual of Concrete Practice, Detroit, MI.
- [3] M. Collepardi et al. "Il nuovo Calcestruzzo", 5a Edizione, Ed. Tintoretto, 2009, pp. 263-273
- [4] M. Collepardi et al. "Il nuovo Calcestruzzo", 5a Edizione, Ed. Tintoretto, 2009, pp. 359-373
- [5] M. Collepardi et al. "Il nuovo Calcestruzzo", 5a Edizione, Ed. Tintoretto, 2009, pp. 230-235
- [6] N.S. Berke et al. "Improving concrete performance with Shrinkage-Reducing Admixtures", 7th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizer and Other Chemical Admixtures in Concrete, Berlin, Germany, Ed. V.M. Malhotra, pp. 37-50, 2003.
- [7] M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, J.J. Ogoumah Olagot, R. Troli, "Effects of Shrinkage-Reducing Admixture in Shrinkage Compensating Concrete Under Non-Wet Curing Conditions", Cement and Concrete Composites, 6, 2005, pp. 704-708.
- [8] C. Maltese, C. Pistolesi, A. Lolli, A. Bravo, T. Cerulli and D. Salvioni, "Combined Effect of Expansive and Shrinkage Reducing Admixtures to Obtain Stable and Durable Mortars", Cement and Concrete Research 12, 2005, pp 2244-2251
- [9] C. Maltese, A. Lolli, C. Pistolesi, A. Bravo, and T. Cerulli, "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixture on microstructure of mortars and concretes", Proceeding of the International Conference on Durability of Concrete, Editor: V.M. Malhotra, Montreal, pp. 781-796, 2006).
- [10] Z. Zhibin et al., "Synergistic effect of MgO-based expansive agent and shrinkage-reducing admixture on compensating the shrinkage of cementitious materials", Proceeding of the 9th International Conference on International Conference on Superplasticizer and Other Chemical Admixtures in Concrete, Ed: T.Holland, R. Gupta and V.M.Malhotra, Seville, pp. 395-406, 2009)
- [11] M. Collepardi, R. Troli, M. Bressan, F. Liberatore, G. Sforza, "Crack-Free Concrete for Outside Industrial Floors in the Absence of Wet Curing and Contraction Joints", Suppl. of 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizer and Other Chemical Admixtures", Sorrento, 2006, pp. 103-115

# colabeton

## il futuro del calcestruzzo

servizio tempestivo



assistenza in cantiere



ricerca e sviluppo



Colabeton progetta, realizza e distribuisce calcestruzzi durabili a prestazione garantita e una vasta gamma di prodotti speciali.

Oltre 150 impianti di betonaggio completamente informatizzati distribuiti su tutto il territorio nazionale. Una capillare rete commerciale integrata dai laboratori di area per la ricerca e lo sviluppo dei prodotti con un servizio tecnologico centrale che è punta avanzata e base dell'innovazione tecnologica. Tra i leader del calcestruzzo in Italia c'è Colabeton.

**Direzione Generale**

via della Vittorina 60, Gubbio (Pg)

t.+39 075 92401

f.+39 075 9273965

**Numero Verde**  
**800-102102**

[www.colabeton.it](http://www.colabeton.it)

[info@colabeton.it](mailto:info@colabeton.it)

# VHDRS® CarFib

Sistemi razionali di riparazione anticorrosione e di rinforzo con materiali compositi

Progettazione secondo la **NORMATIVA CNR - DT 200/2004** e secondo le **LINEE GUIDA della PROTEZIONE CIVILE NAZIONALE** per la riparazione ed il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni

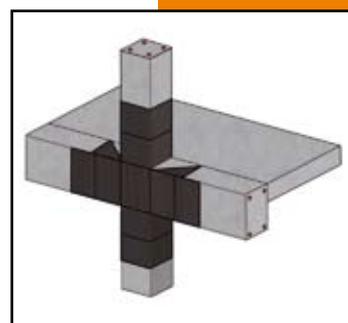
## RIPARAZIONE STRUTTURALE ANTICORROSIONE

Protezione del ferro esposto e ricostruzione con malta strutturale rispondenti alla normativa **CE EN 1504-3 CLASSE R4** o con microcalcestruzzi **REFOR-tec®**

## RINFORZO CON TESSUTI E LAMINE IN FIBRE DI CARBONIO

- Rinforzo a taglio e flessione di travi
- Rinforzo dell'estradosso delle volte
- Rinforzo a flessione di solai
- Rinforzo del nodo per il taglio trasferito dai tamponamenti
- Rinforzo a taglio dell'estremità di pilastri e travi

**TECNOCHEM**® **TECNO ECO**  
ITALIANA SPA **LOGICHEM**



technology