

2009

Trimestrale
Anno XIV
Numero 46

ENCO JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

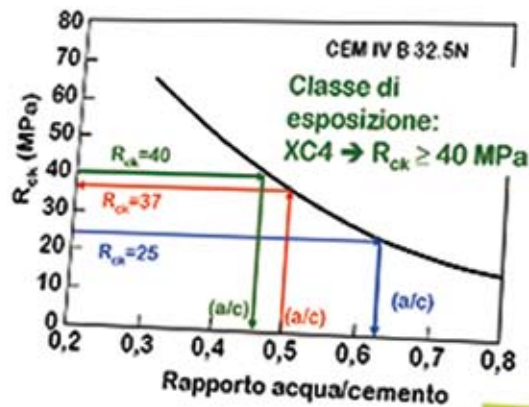
FORMAZIONE TELEMATICA

senza spese di viaggio
senza assenze dal lavoro

ENCO

www.encosrl.it

Scelta della effettiva resistenza caratteristica (R_{ck}) per ragioni di durabilità



a/c = 0,47

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"

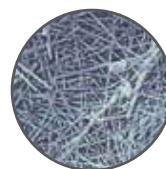


PENETRON®

INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

DITRON s.r.l. è sponsor ufficiale di Simona Galassi; detentrica del titolo mondiale 2008 dei "pesi mosca"

PENETRON®
Sistema Integrale Capillare di Protezione
del Calcestruzzo per Cristallizzazione



DITRON s.r.l. - distributore esclusivo per l'Italia

Corso Peschiera, 336/d - 10139 Torino

Tel. +39 011.7740744 - Fax +39 011.7504341 - Info@penetron.it - www.penetron.it

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



DITRON s.r.l.

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
<http://www.manini.it>

Centri produttivi:
BASTIA UMBRA / PG
APRILIA / LT
PERUGIA

SOMAGLIA / LO



MC-MANINI
PREFABBRICATI



Calcestruzzi
Italcementi Group

*f*onisocal[®] e *f*onisocal^{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

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Trimestrale - Anno XIV - Numero 46

Direttore Mario Collepari

CORSI DI FORMAZIONE TELEMATICA

La crisi economica e produttiva, come quella che stiamo attraversando, provoca sempre una forte tentazione a tagliare le spese "inutili" come sono considerate quelle destinate alla partecipazione a corsi di formazione presso sedi molto spesso lontane dal sito di lavoro e per questo costose sia per le spese di viaggio che per quelle di soggiorno. E invece proprio in occasione delle situazioni critiche occorrerebbe prepararsi ad una ripresa produttiva grazie anche alle innovazioni generate dagli stimoli della crisi stessa. Tuttavia, anche chi di questa impostazione è fermamente convinto si vede costretto a tagliare le spese di fronte a una carenza di risorse finanziarie disponibili.

La situazione sta cambiando in modo rivoluzionario con l'avvento di Internet grazie al quale è diventato possibile organizzare corsi di formazione *on line* a costi di iscrizione irrisori e soprattutto a costi nulli per le spese di viaggio e soggiorno. Un altro significativo vantaggio dai corsi telematici consiste nella possibilità di seguire le lezioni nei giorni e nelle ore ritenute più comode e comunque senza la necessità di interrompere l'attività nella sede di lavoro.

Un altro aspetto molto importante per garantire l'efficacia di un corso telematico è la verifica dell'apprendimento sotto forma di questionari per accertare che il messaggio sia stato recepito correttamente. Da ultimo, ma non ultimo per importanza, per stimolare che le lezioni siano anche "digerite" oltre che ascoltate è necessario che alla frequenza del corso *on line* segua un esame vero e proprio con il rilascio di un documento ufficiale attestante il risultato conseguito.

In questo numero di *Enco Journal* sono segnalati i primi due corsi *on line* organizzati da Enco sulla "Tecnologia del calcestruzzo" e sui "Calcestruzzi speciali" al termine dei quali i partecipanti ai corsi possono chiedere una verifica preliminare dell'apprendimento mediante esami a distanza (via email) confermata da un esame diretto tradizionale al superamento del quale viene rilasciato il Diploma di "Tecnico del calcestruzzo".

Lo studio per il conseguimento di questo Diploma consente ai tecnici che seguono i corsi *on line* della Enco ad approfondire le nuove *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)* entrate in vigore nello scorso Luglio: queste *NTC* obbligano i Progettisti a caratterizzare il calcestruzzo nelle prescrizioni di capitolato sulle opere in C.A e C.A.P e richiedono **nuove responsabilità** per i Direttori dei Lavori nel controllo preventivo (FPC) che deve eseguire il Produttore di calcestruzzo e nei controlli di accettazione delle forniture di calcestruzzo in corso d'opera, come anche della loro corretta messa in opera da parte dell'Impresa.

Mario Collepari

In copertina: Utilizzazione del corso di formazione telematico

SOMMARIO

ANCORA DUBBI SULLE NORME
TECNICHE PER LE COSTRUZIONI
IN C.A. E C.A.P. (D.M. 14.01.2008)

di M. Collepari

(pag. 6)

RIALCALINIZZAZIONE
ELETTROCHIMICA DELLE
COLONNE IN CALCESTRUZZO
ARMATO DEL CAMPANILE DELLA
CHIESA DI S. ANTONIO ABATE A
VALMADRERA

di L. Bertolini, M. Carsana
e E. Redaelli

(pag. 9)

EFFETTI DI DIVERSI TIPI DI FIBRE
ED AGGIUNTE MINERALI SULLE
PRESTAZIONI DI CALCESTRUZZI
AUTOCOMPATTANTI
FIBRORINFORZATI

di V. Corinaldesi e G. Moriconi

(pag. 13)

INFLUENZA DEGLI ADDITIVI SUL
RITIRO IGROMETRICO DEL
CALCESTRUZZO

di A. Borsoi, S. Collepari e R. Troli

(pag. 18)

EFFETTI DELLA VISCOSITA' NEL
CALCESTRUZZO: IL SOLAIO
PREFABBRICATO E LA SOLETTA
GETTATA IN OPERA

di M. Felitti

(pag. 22)

INFLUENZA DELLA CENERE
VOLANTE IN PRESENZA DI AD-
DITIVI CHIMICI SUL RITIRO DEL
CALCESTRUZZO

di A. Borsoi, M. Collepari,
S. Collepari e R. Troli

(pag. 27)

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

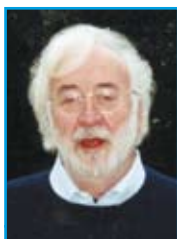
Grafica e Stampa

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

Registrazione al Tribunale di Treviso n.990 26/01/1996 - Iscrizione al RNS n. 06461

ANCORA DUBBI SULLE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI IN C.A. E C.A.P.

(D.M. 14.01.2008)



Mario Collepari

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

Seguito a ricevere richieste di interpretazione sulle responsabilità e gli obblighi del Progettista e del Direttore dei Lavori (DL) secondo le *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC)* emanate con DM del 14 Gennaio 2008 ed entrate definitivamente in vigore con il primo Luglio 2009.

Di seguito sono indicati i paragrafi (§) delle *NTC* e della relativa *Circolare esplicativa delle NTC* che descrivono e precisano gli obblighi del Progettista e del Direttore dei Lavori.

PROGETTISTA

§ 11.2.1 → il Progettista ha l'obbligo di specificare la resistenza caratteristica cubica (R_{ck}) o cilindrica (f_{ck}) tenendo presente che per strutture formate da un calcestruzzo di pari resistenza caratteristica che non supera 1500 m³ è possibile adottare il controllo di tipo A semplificato ($R_{ck} = R_{cm28} - 3,5$ MPa) oppure di tipo B statistico ($R_{ck} = K \cdot s$).

§ 11.2.1 → il Progettista ha l'obbligo di indicare la classe di consistenza del calcestruzzo fresco in funzione della densità dei ferri di armatura e/o della complessità geometrica della struttura

§ 11.2.1 → il Progettista ha l'obbligo di indicare il diametro massimo (D_{max}) dell'aggregato in conformità al copriferro (c_p), all'interferro (i_p), e alla sezione minima (S_{min}) della struttura: $D_{max} \leq 3/4 \cdot c_f$; $D_{max} \leq c_f - 5mm$; $D_{max} \leq 1/3 S_{min}$.

§ 11.2.11 → il Progettista ha l'obbligo di stabilire la classe di esposizione secondo la norma UNI EN 206-1 oppure UNI 11109 e di indicare i copriferri minimi secondo l'Eurocodice 2 "per garantire la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato o in calcestruzzo armato precompresso esposte all'azione dell'ambiente".

DIRETTORE DEI LAVORI

§ 11.2.8 → il DL preliminarmente deve accertare che il

calcestruzzo fornito sia conforme al processo industrializzato (FPC, *Factory Process Control*) e che la fornitura sia accompagnata dal certificato rilasciato dall'organismo di controllo autorizzato dal Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti; in mancanza di questa certificazione la fornitura di calcestruzzo va respinta.

§ 11.2.5.3 → il DL deve eseguire il controllo di accettazione in corso d'opera sulla fornitura di calcestruzzo con almeno un prelievo di due provini per ogni 100 m³ di calcestruzzo o per giorno di getto per un numero totale dei prelievi che dipende dal tipo di controllo (A oppure B). In particolare la norma recita: "Il prelievo dei provini per il controllo di accettazione va eseguito alla presenza del DL o di un tecnico di sua fiducia che provvede alla redazione di apposito verbale di prelievo e dispone l'identificazione dei provini mediante sigle indelebili, etichettate individuali; la certificazione del laboratorio prove materiale deve riportare il riferimento a tale verbale". Il Laboratorio Ufficiale, che attesta la resistenza meccanica relativi ai vari prelievi di calcestruzzo, deve far riferimento al verbale del DL in assenza del quale il certificato è legalmente nullo.

§ 11.2.6 → se le prove per il controllo di accettazione non soddisfano i valori di resistenza caratteristica cubica (R_{ck}) o cilindrica (f_{ck}) di progetto, il DL deve verificare con prove distruttive o non-distruttive che la resistenza media del calcestruzzo in opera (*resistenza strutturale*) sia almeno pari all'85 % del valore medio della resistenza di progetto (*resistenza progettuale*); se nel progetto, come spesso avviene, è indicato solo il valore caratteristico ma non è disponibile il valore medio di progetto, questo può essere calcolato secondo il § C 11.2.6 della *Circolare esplicativa delle NTC* con l'equazione $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa dove f_{cm} ed f_{ck} sono rispettivamente la resistenza media e quella caratteristica di progetto riferita a provini cilindrici.



Laboratorio prove materiali autorizzato dal **Ministero delle Infrastrutture e Trasporti**
Ente iscritto all'Albo dei Laboratori MURST, **Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica**
Diretto dal Prof. Mario Collepari, Honorary Member of the **American Concrete Institute**

Organizza corsi di formazione anche da casa!

Ad Ottobre ed a Novembre inizieranno i primi due **CORSI TELEMATICI ENCO** per il conseguimento del diploma di TECNICO DEL CALCESTRUZZO.

Senza spese di trasferta e soggiorno: è possibile frequentare i Corsi comodamente da casa

Senza obblighi di orari: il corso può essere frequentato nell'arco di un mese decidendo quali e quante lezioni seguire per giorno

E' possibile comunicare con i docenti tramite e-mail per avere chiarimenti, e suggerimenti.

Se si desidera conseguire il diploma di **TECNICO DEL CALCESTRUZZO** occorre:

- frequentare i corsi: **TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO** e **CALCESTRUZZI SPECIALI**;
- per ciascun corso sostenere un esame *on-line* preliminare in data da concordare;
- per ciascun corso sostenere un esame diretto finale in data e sede da concordare.

Per entrambi gli esami è possibile consultare il materiale didattico e normativo così come avviene nella usuale attività professionale. In caso di insuccesso il test *on-line* e l'esame finale sono ripetibili.

A partire dal **5 Ottobre 2009** sarà disponibile il 1° Corso *on-line* **TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO** → **le iscrizioni sono già aperte**

A partire dal **9 Novembre 2009** sarà disponibile il 2° Corso *on line* **CALCESTRUZZI SPECIALI** → **le iscrizioni sono già aperte**

Programmi dei Corsi di Tecnologia del calcestruzzo e di Calcestruzzi speciali sono disponibili sul sito www.encosrl.it cliccando su **CORSI ON LINE**.

Materiale didattico: agli iscritti al primo corso verrà recapitato il libro **Il Nuovo Calcestruzzo** (V Edizione di M. Collepari, S. Collepari e R. Troli) con gli allegati sulle *Norme Tecniche per le Costruzioni*, la *Circolare Ministeriale Esplicativa delle Norme*, il software *Easy&Quick* per le prescrizioni di capitolato sulle opere in CA e CAP, e il video sul "Degradamento del calcestruzzo".

Costo del primo corso: € 350,000 iva esclusa. - **Costo del secondo corso**: € 200,000 iva esclusa.

Iscrizione ai Corsi: si può effettuare l'iscrizione e il pagamento via Internet al sito www.encoshop.com sezione **CORSI ON LINE** → nella fase di completamento dell'ordine (precisazione dei dati dell'acquirente: nome e cognome, ragione sociale, carta di credito, ecc.) andare alla voce **TIPOLOGIA** (in rosso) scegliere l'opzione **CORSI ON LINE** per iscriversi al corso e completare il pagamento, oppure mandare una e-mail con tutti i dati all'indirizzo info@encosrl.it.

Per maggiori informazioni: www.encosrl.it oppure Enco Srl – Via delle Industrie 18/20 – 31050 Ponzano Veneto (TV) – Tel. 0422 96 37 71 – Fax 0422 96 32 37 – info@encosrl.it

CHRYSO® FLEXÓ

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

CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI
MATERIALI DA COSTRUZIONE

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

www.chrysoitalia.com

RIALCALINIZZAZIONE ELETTROCHIMICA DELLE COLONNE IN CALCESTRUZZO ARMATO DEL CAMPANILE DELLA CHIESA DI S. ANTONIO ABATE A VALMADRERA



Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Elena Redaelli
 Politecnico di Milano, Dip. di Chimica, Materiali e
 Ingegneria Chimica "G. Natta"
 luca.bertolini@polimi.it, maddalena.carsana@polimi.it, elena.redaelli@polimi.it



INTRODUZIONE

Le strutture storiche in calcestruzzo armato soffrono spesso di degrado da carbonatazione dovuto all'esposizione, da diversi decenni, ad ambienti rurali o urbani. La carbonatazione del calcestruzzo può indurre la corrosione delle armature e i conseguenti fenomeni di fessurazione, delaminazione e distacco del copriferro (Fig. 1), mettendo a rischio la funzionalità e la stabilità della struttura, oltre al suo aspetto estetico. Il restauro di strutture danneggiate dalla corrosione da carbonatazione consiste generalmente nella rimozione del calcestruzzo carbonatato e nella sua sostituzione con una malta alcalina (Fig. 2). Tuttavia, nel settore degli edifici storici e dei beni culturali viene spesso richiesto di conservare i materiali e le superfici originali. Da questo punto di vista, le tecniche elettrochimiche possono rappresentare un valido metodo poiché non necessitano della rimozione di tutto il calcestruzzo carbonatato: solo il calcestruzzo danneggiato deve essere rimosso. Il restante calcestruzzo, ancorché carbonatato, può essere lasciato in opera. La rialcalinizzazione elettrochimica è una tecnica (1-3) che si basa sull'applicazione di una corrente esterna all'armatura di acciaio; la corrente viene applicata attraverso un anodo temporaneo posto sulla superficie del calcestruzzo. L'obiettivo del metodo è quello di ripristinare l'alcalinità del calcestruzzo attraverso due effetti (4-7): la produzione di alcalinità alla superficie dell'armatura (dovuta alla corrente applicata, (8)) e l'ingresso dalla superficie esterna della soluzione alcalina in cui l'anodo è immerso. La rialcalinizzazione del calcestruzzo ricrea un ambiente favorevole alla ripassivazione dell'acciaio. Al termine del trattamento, l'anodo viene rimosso e la struttura è restaurata conservando per quanto possibile i materiali e le superfici originali (Fig. 3).

In questa nota si descrive l'applicazione della tecnica della rialcalinizzazione elettrochimica ad un edificio storico, con il duplice obiettivo di porre sotto controllo la corrosione delle armature e conservare i materiali. Il campanile della chiesa di S. Antonio abate di Valmadrera (LC), costruito negli anni '20,

è una struttura che si articola secondo elementi costruttivi differenti ed è costituita da materiali diversi (Fig. 4). La base della torre, costituita da blocchi in matrice cementizia, si eleva per circa 40 m; la parte superiore, estesa per circa 8 m, è realizzata con mattoni. Su di essa si imposta la torre vera e propria, che si eleva per altri 30 m, ed è costituita dalla cella campanaria, da un piano intermedio e dal tempietto circolare costituito da otto colonne sovrastate dalla cupola (ogni colonna è stata identificata con una lettera, A-H, Fig. 5). Le colonne sono cave: lo spessore del calcestruzzo è all'incirca di 55 mm. Ogni colonna appoggia su un basamento alto 0.75 m ed è sovrastata da un capitello. All'esterno del tempietto,



Fig. 1 - Schematizzazione dell'evoluzione nel tempo di una struttura in calcestruzzo armato soggetta a corrosione da carbonatazione (in grigio più chiaro è mostrato il calcestruzzo carbonatato).

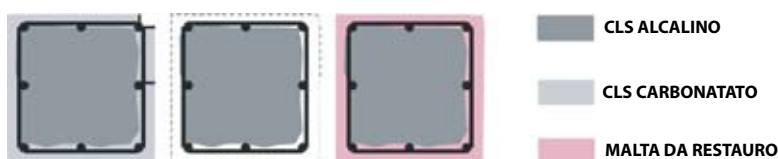


Fig. 2 - Schematizzazione del ripristino tradizionale.

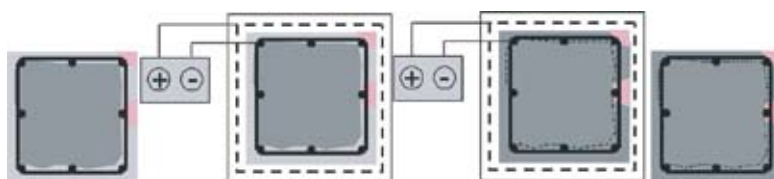


Fig. 3 - Applicazione della rialcalinizzazione elettrochimica.

in corrispondenza dei quattro angoli, sono posizionate le statue degli Evangelisti. La torre campanaria termina a circa 80 m dal suolo con una cupola in calcestruzzo armato sorretta dalle colonne. Le strutture e le finiture in calcestruzzo armato del campanile presentano evidenti segni di degrado, dovuti principalmente alla corrosione delle armature in acciaio e al conseguente danneggiamento e distacco del copriferro.



Fig. 4 - Vista della Chiesa di S. Antonio abate a Valmadrera.

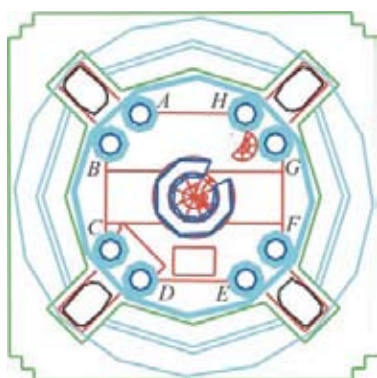


Fig. 5 - Pianta del piano e denominazione delle colonne.

DIAGNOSI

Nell'ambito dell'intervento di restauro del campanile sono state ispezionate tutte le parti in calcestruzzo armato attraverso osservazioni visive, misure di profondità di carbonatazione, misure di potenziale e di spessore di copriferro. In particolare, nella fase iniziale di ispezione visiva, sulle colonne si sono evidenziati diversi punti in cui la corrosione delle armature aveva danneggiato il calcestruzzo. Si è rilevata la presenza di fessure, delaminazioni e distacchi di copriferro (Figure 6 e 7). Da alcune colonne sono stati prelevati dei campioni di calcestruzzo per determinare la profondità di carbonatazione attraverso la prova alla fenolftaleina. Queste analisi hanno mostrato una grande variabilità nello spessore di calcestruzzo carbonatato: si è passati da uno spessore di 1 mm a uno spessore di 55 mm (pari all'intero spessore della parete di calcestruzzo). La carbonatazione ha mostrato profondità molto variabili anche su una stessa colonna. Analogamente, lo spessore di copriferro misurato sulle staffe di contenimento ha mostrato una distribuzione irregolare: ad esempio, sulla colonna A aveva un valore medio pari

a 22 mm, con valori minimo e massimo pari rispettivamente a 11 e 35 mm. Sulla colonna B, il valore medio è risultato pari a 42 mm, con valori minimo e massimo rispettivamente pari a 25 e 58 mm (in quest'ultimo caso il copriferro è risultato quindi trascurabile sulla faccia interna della colonna).

Le misure elettrochimiche del potenziale dell'armatura e della resistività del calcestruzzo, effettuate sia sulle colonne tal quali che dopo abbondante bagnamento con acqua, hanno evidenziato come il calcestruzzo fosse compatto e con una bassa permeabilità.

Nelle zone in cui il calcestruzzo è risultato essere carbonatato, in corrispondenza della superficie delle armature, c'era il rischio che in tempi relativamente brevi la corrosione possa portare alla fessurazione o al distacco del copriferro. Si è, quindi, ritenuto necessario intervenire per bloccare il processo corrosivo. All'intervento si è posto l'obiettivo di rimediare ai danneggiamenti esistenti e di garantire che il degrado non si ripresenti almeno per qualche decina di anni.

Sia il progetto sia la realizzazione del restauro hanno presentato delle peculiarità, in relazione soprattutto alla necessità di conservare i materiali esistenti. Questa esigenza nasce non solo da considerazioni di tipo conservativo, ma anche da implicazioni di natura strutturale. In particolare, nel caso delle colonne, il modesto spessore della parete di calcestruzzo rende praticamente impossibile l'intervento di restauro tradizionale basato sulla rimozione del calcestruzzo carbonatato e la sua sostituzione con una malta da ripristino. L'analisi di questi requisiti ha portato per le otto colonne alla scelta dell'intervento di recupero basato sulla rialcalinizzazione elettrochimica; alla base di questo intervento, infatti, c'è il principio di evitare la rimozione del calcestruzzo non più protet-



Fig. 6 - Esempio di fessurazione sulla superficie di una colonna.



Fig. 7 - Esempio di distacchi di copriferro su una colonna.



Fig. 8 - Riparazione del calcestruzzo danneggiato e collegamenti elettrici sulla colonna C.



Fig. 9 - Applicazione del sistema anodico sulla colonna C.



Fig. 10 - Applicazione del sistema anodico sulla colonna E.



Fig. 11 - Vista delle colonne E (a sinistra) e C (a destra) durante il trattamento preliminare.

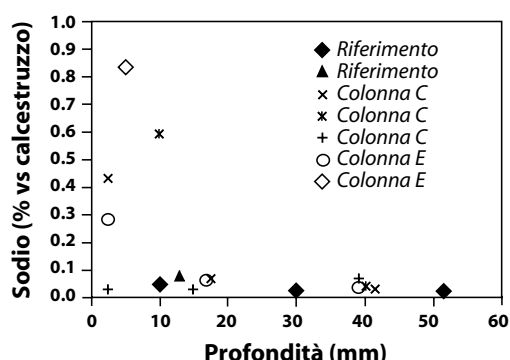


Fig. 12 - Contenuto di sodio nel calcestruzzo in funzione della profondità, prima (riferimento) e dopo il trattamento preliminare di rialcalinizzazione.

tivo (perché carbonatato), e di trasformarlo di nuovo in un materiale alcalino che protegga le armature dalla corrosione. L'applicazione del trattamento è avvenuta in due fasi: inizialmente la rialcalinizzazione è stata applicata su due piccole zone per calibrare i parametri del processo; successivamente è stata applicata a tutte le colonne. I dettagli del trattamento e dei risultati delle analisi effettuate durante e al termine di tale applicazione sono riportati nel riferimento [9].

TRATTAMENTO PRELIMINARE

La rialcalinizzazione elettrochimica è stata inizialmente applicata alle colonne C ed E (Fig. 5), su un'altezza di circa 1 m al di sopra del basamento.

La preparazione delle colonne ha previsto:

- la realizzazione dei collegamenti elettrici (Fig. 8);
- la posa di elettrodi di riferimento di titanio attivato per le



Fig. 13 - Prova alla fenolftaleina sul calcestruzzo, vicino a una armatura sulla colonna C, dopo il trattamento.

- misure di monitoraggio durante il trattamento (Fig. 8);
- la riparazione localizzata del calcestruzzo danneggiato e la sigillatura delle fessure (Fig. 8);
- l'applicazione del sistema anodico (Fig. 9 e 10), costituito da polpa di cellulosa impregnata di una soluzione alcalina di carbonato di sodio, nella quale è stata immersa una rete di acciaio zincato o di titanio attivato;
- l'applicazione della corrente (Fig. 11), con una densità di corrente di 0.8 A/m^2 (riferita alla superficie delle armature) per 17 giorni.

Durante il trattamento è stato monitorato il potenziale dell'armatura; al termine del trattamento sono state effettuate analisi sul calcestruzzo, come la prova alla fenolftaleina e la determinazione del contenuto di sodio (10). I risultati di queste analisi hanno mostrato che la penetrazione dell'elettrolita alcalino (Na_2CO_3) dalla superficie esterna ha interessato solo lo strato più superficiale del calcestruzzo, dello spessore di



Fig. 14 - Vista delle colonne H (a sinistra) e G (a destra) durante il trattamento completo.



Fig. 15 - Prova alla fenolftaleina sulla colonna A.

pochi millimetri (come confermato dai valori dell'analisi del contenuto di sodio, effettuata mediante spettroscopia di emissione al plasma, riportati nel grafico di Fig. 12). Questo può essere attribuito alla bassa permeabilità del calcestruzzo. Il contributo alla rialcalinizzazione, dovuto alla reazione alla superficie dell'armatura, ha invece interessato considerevoli spessori di calcestruzzo (Fig. 13).

TRATTAMENTO COMPLETO

In seguito alla sperimentazione preliminare, il trattamento di rialcalinizzazione elettrochimica è stato applicato a tutte le colonne (eccetto le zone che erano già state trattate nella sperimentazione), inclusi i relativi capitelli.

La preparazione delle colonne è avvenuta in modo analogo alla sperimentazione, con la differenza che invece della polpa di cellulosa si è utilizzata carta di giornale.

Il contatto elettrico con l'armatura è stato fatto in più punti, data l'estensione delle colonne. Inoltre, all'interno di ogni colonna è stato posizionato un elettrodo di riferimento di titanio attivato per le misure di potenziale. Su ogni colonna sono state sigillate le fessure, i distacchi e le altre discontinuità presenti nel calcestruzzo. Ogni colonna è stata rivestita con diversi strati di carta di giornale, avvolta con la rete di acciaio zincato, quindi con un altro strato di giornali e infine con la pellicola di polietilene (Fig. 14). La carta di giornale è stata bagnata con una soluzione di carbonato di sodio versata all'interno della pellicola dall'alto di ogni colonna, in corrispondenza dei capitelli, verificando che la soluzione arrivasse a bagnare anche la carta posta alla base delle colonne. Nel trattamento completo si è utilizzata una soluzione meno

concentrata di quella usata nel trattamento preliminare.

Il trattamento è stato effettuato applicando una densità di corrente di 0.8 A/m² per 3 settimane.

Al termine del trattamento, in alcuni punti delle colonne è stata verificata l'alcalinità del calcestruzzo, rimuovendo localmente il copriferro e spruzzando la superficie esposta con l'indicatore alla fenolftaleina. Queste analisi distruttive sono state effettuate in pochi punti, in modo da limitare il danneggiamento delle colonne. In tutti i casi il calcestruzzo è risultato alcalino sull'intero spessore di copriferro (Fig. 15).

CONCLUSIONI

Il trattamento di rialcalinizzazione elettrochimica è stato applicato alle colonne in calcestruzzo armato del campanile della Chiesa di S. Antonio abate a Valmadrera, sulle quali la carbonatazione del calcestruzzo aveva causato danneggiamenti dovuti alla corrosione delle armature.

Le misure dell'alcalinità e del contenuto di sodio nel calcestruzzo, effettuate al termine del trattamento, hanno consentito di evidenziare che il principale contributo alla rialcalinizzazione del calcestruzzo è dovuto alla produzione di alcalinità alla superficie delle armature dovuta alla corrente applicata. Grazie alla bassa permeabilità del calcestruzzo, si può ritenere che lo strato rialcalinizzato intorno alle armature possa garantire una protezione duratura.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare l'arch. Roberto Spreafico, l'ing. Franco Parolari, il dott. Rob Polder e i volontari della Parrocchia.

BIBLIOGRAFIA

- 1) L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, Corrosion of Steel in Concrete. Prevention, Diagnosis and Repair, Wiley-VCH, Weinheim (2004).
- 2) COST, Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures, COST Action 521, Final Report (2003).
- 3) CEN/TS 14038-1, Electrochemical Realkalization and Chloride Extraction Treatments for Reinforced Concrete, Part 1: Realkalization (2004).
- 4) L. Bertolini, T. Pastore, P. Pedferri, E. Redaelli, Materials and Corrosion, 54, 163 (2003).
- 5) R.B. Polder, H.J. van den Hondel, Proc. RILEM Int. Conf. on Rehabilitation of Concrete Structures, August-September 1992, Melbourne (1992).
- 6) Noteby (Norsk Teknisk Byggekonsroll), Norwegian Patent Application No. 875438 (1987).
- 7) O. Vennesland, J.B. Miller, Electrochemical Realkalisation of Concrete, European Patent Specification No. 0264421 (1992).
- 8) J. Mietz, Materials and Corrosion, 46, 527 (1995).
- 9) L. Bertolini, M. Carsana, E. Redaelli, Journal of Cultural Heritage, 9, (2008).
- 10) A.W.M. van den Hondel, R.B. Polder, Proc. Int. Conf. Eurocorr 2001, Riva del Garda (2001).

EFFETTO DI DIVERSI TIPI DI FIBRE ED AGGIUNTE MINERALI SULLE PRESTAZIONI DI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI FIBRORINFORZATI



Valeria Corinaldesi e Giacomo Moriconi

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

v.corinaldesi@univpm.it - g.moriconi@univpm.it

RIASSUNTO

In questo lavoro sono state valutate le prestazioni di diverse miscele di calcestruzzo autocompattante preparate usando tre diversi tipi di fibre, in acciaio, polivinilalcol (PVA) e polipropilene ad elevata tenacità (PPHT) e due diverse aggiunte minerali (polvere di marmo e polvere da calcestruzzo demolito). Il rapporto acqua/cemento è stato mantenuto costante, pari 0,40. Il comportamento del calcestruzzo fresco è stato valutato mediante prove di fluidità per la determinazione dello spandimento (slump-flow), della deformabilità (V-funnel) e dello scorrimento confinato (L-box) mentre il comportamento del calcestruzzo indurito è stato valutato mediante prove di resistenza meccanica a flessione e compressione, prove di ritiro igrometrico libero e di ritiro plastico vincolato. Le prestazioni ottenute sono state eccellenti, in particolare per i calcestruzzi preparati con fibre PPHT.

INTRODUZIONE

L'obiettivo del lavoro è stato quello di progettare miscele di calcestruzzi autocompattanti per la produzione di elementi prefabbricati in spessore sottile che richiedano un minimo rinforzo in acciaio (rete elettrosaldata). Sono state quindi aggiunte fibre alla miscela del calcestruzzo autocompattante per contrastare l'insorgenza di fessurazioni alla brevi stagionature (imputabili a ritiro autogeno e plastico oppure a stress termici) o nel lungo periodo dovute a ritiro igrometrico (1-7). Da un punto

di vista delle prestazioni meccaniche dovrebbe essere garantita una classe di resistenza del calcestruzzo pari ad almeno C 37/45 MPa per tenere in considerazione i requisiti richiesti in termini di resistenza a flessione allo scasso per consentire la movimentazione dell'elemento ed in termini di effetti imputabili a fenomeni di creep e fatica.

MATERIALI

Come legante è stato impiegato un cemento Portland di miscela tipo CEM II/A-L 42,5 R secondo EN-197/1. La finezza Blaine del cemento era 0,42 m²/g e la sua massa volumica pari a 3050 kg/m³. La composizione chimica del cemento è riportata in Tabella 1.

Come aggiunta minerale è stata impiegata una polvere ottenuta come scarto della lavorazione del marmo. La scelta è stata effettuata tenendo presenti alcuni suggerimenti riportati in letteratura (8), concernenti in particolare la finezza delle polveri per calcestruzzi autocompattanti. La finezza Blaine della polvere di marmo era 0,61 m²/g, mentre la sua massa volumica era pari a 2650 kg/m³; la sua composizione chimica è riportata in Tabella 1.

Alternativamente, come aggiunta minerale, è stata impiegata una polvere proveniente da processi di riciclaggio di calcestruzzo demolito. La polvere si forma durante la fase di macinazione del vecchio calcestruzzo, necessaria per separarlo dall'armatura metallica e ridurlo a pezzature idonee all'impiego come aggregato di riciclo, ed è stata ottenuta raccogliendo il materiale passante al setaccio con apertura 0,150 mm. La finezza Blaine della polvere di riciclo così ottenuta era pari a 0,73 m²/g, con una massa volumica di 2150 kg/m³; la sua composizione chimica è riportata in Tabella 1.

Come aggregati sono state impiegate una frazione di sabbia naturale (diametro massimo 6 mm) ed una frazione di ghiaietto di frantumazione (diametro massimo 15 mm). La distribuzione granulometrica delle due frazioni è mostrata in Figura 1 e le principali proprietà fisiche sono riportate in Tabella 2.

Come additivo riduttore d'acqua è stata impiegata una soluzione acquosa al 30% di polimero a base acrilica.

Come fibre, in alcune miscele sono state impiegate fibre in acciaio uncinato dosate allo 0,6% in volume. Tale dosaggio è stato stabilito sulla base di alcune informazioni riportate in letteratura (9-11), che mostrano come un aumento del contenuto di fibre dallo 0,5% all'1,0% comporti un calcestruzzo complessivamente

Tabella 1 - Composizione chimica e finezza del legante e delle aggiunte minerali.

		CEMENTO	POLVERE DI RICICLO	POLVERE DI MARMO
FINEZZA BLAINE (m ² /g)		0.42	0.73	0.61
OSSIDI (%)	SiO ₂	29.67	84.99	38.70
	Al ₂ O ₃	3.74	4.47	8.02
	Fe ₂ O ₃	1.80	3.91	3.34
	TiO ₂	0.09	0.11	0.12
	CaO	59.25	2.94	40.61
	MgO	1.15	1.10	2.93
	SO ₃	3.25	1.30	1.20
	K ₂ O	0.79	0.77	1.37
	Na ₂ O	0.26	0.41	1.00
PERDITA AL FUOCO A 1000°C		11.62	26.57	34.23

Tabella 2 - Alcune proprietà fisiche delle frazioni di aggregato.

FRAZIONE	MASSA VOLUMICA (s.s.a.), kg/m ³	ASSORBIMENTO D'ACQUA, %	PASSANTE AL SETACCIO DA 75 μm, %
SABBIA NATURALE	2610	3.1	0.9
GHIAIETTO FRANTUMATO	2660	2.6	0.1

Tabella 3 - Principali caratteristiche delle fibre impiegate.

TIPO DI FIBRA	LUNGHEZZA (mm)	DIAMETRO (mm)	RAPPORTO D'ASPETTO (AR)	MODULO DI YOUNG (GPa)	RESISTENZA A TRAZIONE (MPa)
ACCIAIO	30	0.70	43	170	450
PVA	12	0.20	62	30	1000
PPHT	35	0.62-0.69	51-57	3.8	600-750

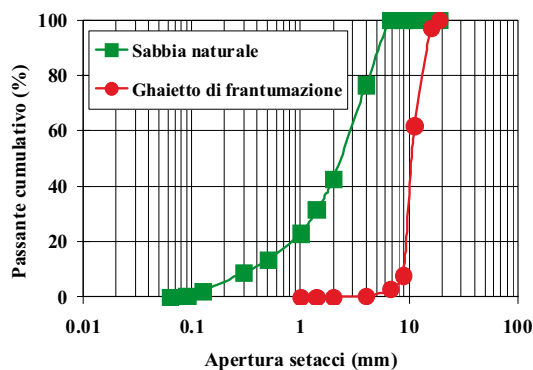


Fig. 1 - Distribuzione granulometrica delle frazioni di aggregato.



Fig. 2 - Fibre impiegate: (a) acciaio, (b) PVA e (c) PPHT.

meno preformante.

In alternativa, sono state impiegate fibre polimeriche, sia in polivinilalcol (PVA) sia in polipropilene ad elevata tenacità (PPHT), aggiunte con dosaggi rispettivamente pari a 0,8 % e 0,6% in volume. La lunghezza ed il diametro delle fibre, il valore del rapporto d'aspetto, il modulo elastico e la resistenza a trazione delle stesse sono riportati in Tabella 3. Inoltre, la loro morfologia è osservabile in Figura 2.

PROPORZIONAMENTO DELLE MISCELE DEI CALCESTRUZZI

Le miscele dei calcestruzzi preparati sono riportate in Tabella 4. Tutti i calcestruzzi erano caratterizzati dallo stato rapporto acqua/cemento pari a 0,40.

Al fine di ottimizzare la distribuzione granulometrica delle particelle solide nel calcestruzzo, le frazioni di aggregato fine e grosso sono state opportunamente combinate, tenendo presenti anche le indicazioni concernenti il proporzionamento dei calcestruzzi autocompattanti riportate in letteratura, ad esempio in

termini di dosaggio massimo (340 l/m³) di aggregato grosso (12, 13). Per raggiungere un dosaggio di particelle finissime di 190 l/m³ è stato necessario aggiungere alla miscela, accanto al cemento, in alternativa polvere di riciclo (ad un dosaggio di 58 kg/m³) o polvere di marmo (ad un dosaggio di 70 kg/m³), con diverso dosaggio in dipendenza della diversa massa volumica delle polveri. In questo modo è stato possibile ottenere un rapporto acqua/materiale finissimo che ricadesse nell'intervallo 0,35÷0,36.

L'additivo superfluidificante è stato dosato all'1,4% sul peso del cemento per raggiungere uno spandimento (slump flow) di 650÷700 mm (vedi Tabella 5).

Il dosaggio di cemento impiegato era piuttosto elevato, pari a 500 kg/m³.

Per questo motivo è stata valutata sperimentalmente l'eventuale fessurazione del calcestruzzo alle brevi stagionature dovuta a ritiro autogeno e/o stress termici (indotti da elevate velocità di sviluppo del calore di idratazione del cemento).

PREPARAZIONE E STAGIONATURA DEI PROVINI

Per ogni miscela di calcestruzzo sono stati confezionati 9 provini cubici (lato 100 mm) e 9 provini prismatici (100 x 100 x 450 mm), rispettivamente per prove di compressione e flessione, in conformità alla norma UNI EN 12390-1. Questi provini sono stati gettati in casseforme d'acciaio e sottoposti a stagionatura umida a 20°C (UNI EN 12390-2).

Inoltre, per ogni miscela sono stati confezionati 3 provini prismatici (100 x 100 x 500 mm) in conformità alla norma UNI 6555 'Determinazione del ritiro idraulico'. Dopo un giorno di stagionatura umida, i provini sono stati mantenuti in ambiente con temperatura (20 ± 2 °C) e umidità relativa (50 ± 2 %) costanti.

Sono stati anche confezionati per ogni miscela 3 provini cilindrici, di altezza 300 mm con diametro di 100 mm, per valutare il modulo elastico statico in compressione in conformità alla norma UNI 6556.

Infine, sono stati confezionati ulteriori provini prismatici (uno per ogni miscela) eseguendo il getto in un angolare d'acciaio 75 x 75 mm, spesso 8 mm e lungo 1030 mm (Figura 3) per il German angle test. Subito dopo il confezionamento tali provini sono stati mantenuti all'aria ed esposti all'irradiazione di una lampada alogena (150 W) per simulare l'effetto dell'ir-

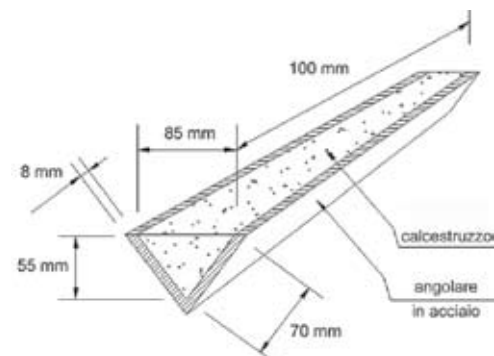


Fig. 3 - Schema dell'angolare in acciaio impiegato per il German angle test.

Tabella 4 - Proporzionamento delle miscele di calcestruzzo.

Miscele	A-PR	A-PM	PPHT-PR	PPHT-PM	PVA-PR	PVA-PM
Acqua/Cemento	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
Acqua, kg	200	200	200	200	200	200
Cemento, kg	500	500	500	500	500	500
Sabbia, kg	1080	1080	1080	1080	1080	1080
Ghiaietto, kg	420	420	420	420	420	420
Polvere di marmo (PM), kg	—	70	—	70	—	70
Polvere di riciclo (PR), kg	58	—	58	—	58	—
Fibre in acciaio (A), kg	50	50	—	—	—	—
Fibre in polipropilene ad alta tenacità (PPHT), kg	—	—	5	5	—	—
Fibre in polivinilalcol (PVA), kg	—	—	—	—	10	10
Superfluidificante, kg	7	7	7	7	7	7

Tabella 5 - Risultati delle prove reologiche su calcestruzzo fresco.

Prova reologica	A-PR	A-PM	PPHT-PR	PPHT-PM	PVA-PR	PVA-PM
Spandimento (Slump Flow)	Φ_{fin} (mm)	660	700	680	680	680
	t_{500} (s)	1	3	3	3	2
	t_{fin} (s)	13	13	13	13	12
Deformabilità (V-funnel)	t (s)	7	5	8	7	8
Scorrimento confinato (L-box)	ΔH_{fin} (mm)	60	65	40	60	30
	t_{stop} (s)	16	12	19	15	21

raggiamento solare diretto. La lampada è stata collocata a 100 mm dalla superficie superiore del getto; in questo modo la temperatura della superficie del calcestruzzo a partire da 4 ore dal getto viene mantenuta costantemente ad una temperatura di 77 ± 1 °C.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Spandimento (Slump Flow)

Sono stati misurati lo spandimento, rappresentato dal diametro medio (Φ_{fin}) del calcestruzzo a fine prova, il tempo di spandimento per raggiungere il diametro di 500 mm (t_{500}) ed il tempo trascorso per raggiungere la configurazione finale (t_{fin}).

Come riportato in Tabella 5, tutte le miscele hanno mostrato un livello di fluidità adeguato per calcestruzzi autocompattanti ed anche una sufficiente viscosità. L'esame visivo ha escluso in ogni caso sia l'effetto alone, dovuto ad essudazione d'acqua, sia l'effetto sombrero, dovuto a segregazione.

Deformabilità (V-funnel)

Come riportato in Tabella 5, il tempo t di efflusso dall'imbuto a V è stato in ogni caso compreso nell'intervallo 5-8 secondi, ampiamente entro i limiti di accettabilità.

Scorrimento confinato (L-box)

I risultati ottenuti mediante scatola ad L con barre disposte orizzontalmente sono riportati in Tabella 5, nella quale sono indicati la differenza di livello ΔH_{fin} del calcestruzzo tra inizio e

fine scatola ed il tempo t_{stop} impiegato per raggiungere la configurazione finale. Tutte le miscele hanno mostrato buoni, in alcuni casi eccellenti, risultati in termini di mobilità in spazi ristretti, particolarmente quando è stata impiegata polvere di riciclo. Inoltre, in nessun caso è stato rilevato visivamente il fenomeno della segregazione di flusso.

Prove di compressione

La resistenza a compressione dei provini è stata valutata in conformità alla norma UNI EN 12390-3 dopo 1, 7 e 28 giorni di stagionatura.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 4. La classe di resistenza minima richiesta (C 37/45) è stata sempre raggiunta. In particolare, ad eccezione della miscela 'PVA-PR', la resistenza media a compressione dopo 28 giorni di stagionatura raggiungeva valori di circa 60 MPa.

Prove di flessione

La resistenza a flessione è stata valutata secondo la norma UNI EN 12390-5 su provini prismatici.

Il comportamento in flessione del calcestruzzo è stato studiato dopo 1, 7 e 28 giorni di stagionatura ed i risultati ottenuti sono riportati in Figura 5. Essi mostrano l'efficacia delle fibre in acciaio nel produrre un miglioramento del comportamento in flessione del calcestruzzo (accentuato in questo caso dalla particolare forma uncinata delle fibre, mostrata in Figura 2). Tuttavia, anche le miscele di calcestruzzo autocompattante preparate con fibre polimeriche (PVA e PPHT) hanno mostrato soddisfacenti prestazioni sotto sollecitazioni flessionali.

Modulo elastico statico e tenacità

Il modulo elastico statico è stato determinato in compressione su provini cilindrici (300 mm di altezza con diametro di 100 mm) secondo la norma UNI 6556.

Inoltre, la tenacità è stata valutata determinando il valore dell'area sottesa dalla curva sforzo-deformazione ottenuta in compressione. Si sono determinati due valori di tenacità: uno è stato calcolato integrando l'area fino alla deformazione corrispondente al valore massimo di resistenza del calcestruzzo ed è stato denominato A-picco; l'altro (denominato A-0,45%) è stato calcolato integrando l'area fino al valore della deformazione pari a 0,45% (generalmente maggiore della deformazione precedente).

I risultati ottenuti dopo 28 giorni di stagionatura sono riportati in Figura 6. I valori del modulo elastico statico sono compresi nell'intervallo prevedibile per un calcestruzzo ordinario della classe di resistenza ottenuta. In particolare, il diverso valore del modulo di Young della fibra (Tabella 3) non sembra influenzare il valore del modulo elastico statico del calcestruzzo.

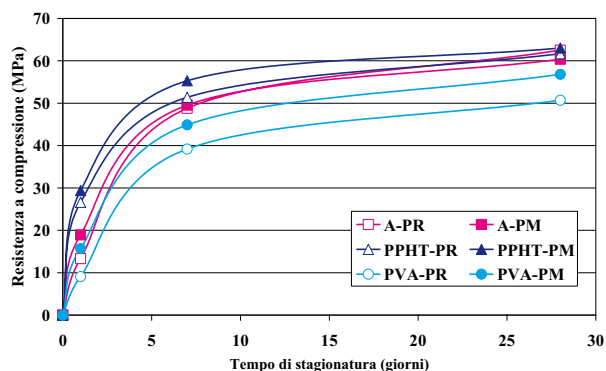


Fig. 4 - Sviluppo della resistenza a compressione nel tempo per i diversi calcestruzzi.

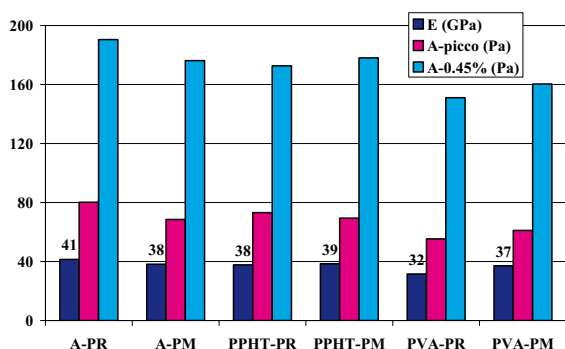


Fig. 6 - Modulo elastico statico (E) e valori di tenacità (A-picco, A-0,45%) calcolati dalle curve sperimentali delle prove di compressione.

La tenacità del calcestruzzo autocompattante è risultata sempre elevata, indipendentemente dalla deformazione considerata, specialmente per le miscele confezionate con fibre di acciaio o PPHT. In particolare, il rapporto fra i valori A-0,45% ed A-peak, indicativo del comportamento post-fessurativo, cade nell'intervallo $2,35 \div 2,75$ per tutte le miscele.

Ritiro igrometrico

La Figura 7 mostra i risultati ottenuti fino a 180 giorni. Si possono prevedere ritiri igrometrici compresi fra 550 e 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ per tutte le miscele dopo 1 anno di esposizione ad umidità relativa del 50%. L'efficacia dell'aggiunta di fibre, di qualsiasi tipo, nel contrastare il ritiro igrometrico del calcestruzzo è del tutto evidente. Infatti, sulla base di dati riportati in letteratura (14), per un calcestruzzo della stessa composizione senza fibre si può ipotizzare un ritiro igrometrico di circa 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ dopo sei mesi di esposizione alla stessa umidità relativa.

German Angle test

Questo metodo di valutazione del ritiro vincolato del calcestruzzo è stato sviluppato dalla Accademia Tecnica di Aachen in Germania ed adottato come Norma Tecnica (TP BE-PCC) dal Dipartimento di Costruzione Autostrade del Ministero Federale dei Trasporti (15). In questo caso, il German Angle test è stato effettuato in condizioni di esposizione severe (sotto irradiazione di una lampada alogena) allo scopo di simulare l'effetto del riscaldamento solare sul ritiro plastico del calcestruzzo alle brevissime stagionature.

Solo le due miscele di calcestruzzo preparate con fibre di acciaio hanno mostrato una certa microfessurazione (in verità,

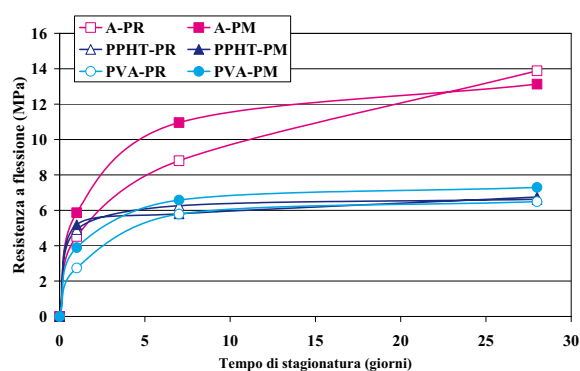


Fig. 5 - Sviluppo della resistenza a flessione nel tempo per i diversi calcestruzzi.

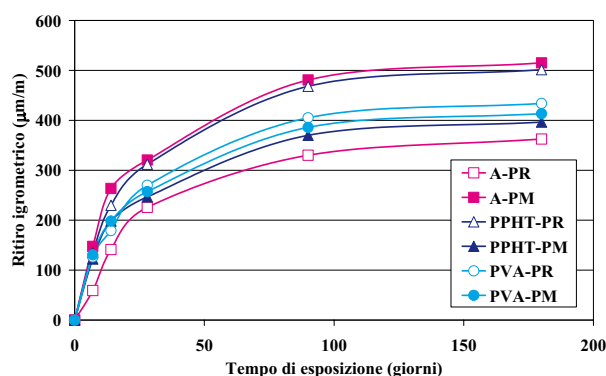


Fig. 7 - Valori di ritiro igrometrico fino a 180 giorni di esposizione ad umidità relativa del 50%.

molto lieve), mentre le altre miscele non hanno mostrato alcuna apparizione di fessure. Tuttavia, il tempo di apparizione della fessurazione è risultato inferiore al giorno di stagionatura, indicando in tal modo il ritiro plastico come responsabile della fessurazione e la minor efficacia delle fibre di acciaio rispetto a quelle polimeriche nel contrastare tale tipo di ritiro.

CONCLUSIONI

Tutti i calcestruzzi, preparati per la produzione di elementi prefabbricati sottili, hanno soddisfatto sia i requisiti di autocompattabilità allo stato fresco sia la classe di resistenza meccanica richiesta di 45 MPa allo stato indurito.

L'aggiunta di fibre si è dimostrata molto efficace nel contrastare sia la fessurazione alle brevissime stagionature (particolarmente le fibre in PVA e PPHT) sia il ritiro igrometrico a tempi più lunghi di stagionatura (particolarmente le fibre in acciaio) del calcestruzzo autocompattante, che costituisce generalmente un problema per questo calcestruzzo, ricco di materiali finissimi (cemento e filler) e povero della frazione di aggregato grosso.

Per quanto concerne ulteriori aspetti relativi alla durabilità, come carbonatazione o profondità di penetrazione dei cloruri e resistenza al gelo, risultati incoraggianti sono riportati in un precedente lavoro relativo ad una miscela molto simile di calcestruzzo autocompattante rinforzato con fibre di acciaio (16).

In conclusione, un'ottima miscela allo stato indurito sembra essere quella preparata con fibre di acciaio e polvere di riciclo. Allo stato fresco, nonostante non esistano significative differenze di comportamento fra le diverse miscele, le migliori proprietà reologiche sono state messe in evidenza dalla miscela preparata con fibre in PVA e polvere di riciclo, che peraltro è risultata

quella lievemente inferiore in termini di prestazione meccanica.

RIFERIMENTI

- Berke N.S., Dallaire M.P., 'The effect of low addition rates of polypropylene fibres on plastic shrinkage cracking and mechanical properties of concrete', ACI SP-142, 1994, 37-66.
- Soroushian P., Mirza F., Alhozaimy A., Plastic shrinkage cracking of polypropylene fibre reinforced concrete, ACI Materials Journal, 92(5), 553-60, 1995.
- Soroushian P., Ravanbakhsh S., Control of plastic shrinkage cracking with specialty cellulose fibres, ACI Materials Journal, 95(4), 429-435, 1998.
- Toledo Filho R.D., Sanjuan M.A., Effect of low modulus sisal and polypropylene fibre on the free and restrained shrinkage of mortars at early age, Cement & Concrete Research, 29(10), 1597-604, 1999.
- Bayasi Z., McIntyre M., Application of fibrillated polypropylene fibres for restraint of plastic shrinkage cracking in silica fume concrete, ACI Materials Journal 99(4), 337-44, 2002.
- Boghossian, E., Wegner L.D., Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete, Cement & Concrete Composites 30, 2008, 929-937.
- Tongaroonsri, S. Tangtermsirikul S., Effect of mineral admixtures and curing periods on shrinkage and cracking age under restrained condition, Construction and Building Materials 23, 2009, 1050-1056.
- Van Khanh, B. and Montgomery, D., 'Drying Shrinkage of Self-Compacting Concrete Containing Milled Limestone', Proc. of the First Int. RILEM Symposium on 'Self-Compacting Concrete', eds. A. Skarendahl & O. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, 227-238.
- Collepari, M., Khurana, R. and Valente, M., 'Construction of a Dry Dock Using Tremie Superplasticized Concrete', ACI SP-119, 2001, 471-492.
- Van Khanh, B. and Montgomery, D., 'Drying Shrinkage of Self-Compacting Concrete Containing Milled Limestone', Proc. of the First Int. RILEM Symposium on 'Self-Compacting Concrete', eds. A. Skarendahl & O. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, 227-238.
- Khayat, K. H. and Roussel, Y., 'Testing and Performance of Fiber-Reinforced, Self-Consolidating Concrete', Proc. of the First Int. RILEM Symposium on 'Self-Compacting Concrete', eds. A. Skarendahl & O. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, 509-521.
- Saak, A.W., Jennings, H. M. and Shah, S. P., 'Characterization of the Rheological Properties of Cement Paste for Use in Self-Compacting Concrete', Proc. of the First Int. RILEM Symposium on 'Self-Compacting Concrete', eds. A. Skarendahl & O. Petersson, Stockholm, Sweden, 1999, 83-93.
- Saak, A.W., Jennings, H.M. and Shah, S.P., New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete, ACI Materials Journal, 98(6), 429-439, 2001.
- Neville, A.M., 'Properties of Concrete', Pitman Publishing, 1975.
- General Federal Ministry of Transport, Highway construction department, 'Technical Test Regulations for Concrete Substitution Systems Made of Cement Mortar/Concrete with a Plastic Additive, TP BE PCC', 1990.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., Durable Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, Cement & Concrete Research, 34(2), 249-254, 2004.



MARIO CRIVELLI

il primo Diplomato in
Tecnico del Calcestruzzo
dei corsi organizzati da Enco.



INFLUENZA DEGLI ADDITIVI SUL RITIRO IGROMETRICO DEL CALCESTRUZZO



Antonio Borsoi, Silvia Collepari e Roberto Troli
Enco srl, Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it

1. INTRODUZIONE

Il ritiro igrometrico (ϵ) è la proprietà che maggiormente influenza il comportamento fessurativo del calcestruzzo. Raramente, se non in provini di laboratorio, il ritiro può manifestarsi senza alcun impedimento (ritiro libero); quasi sempre, soprattutto nelle strutture reali, esistono vincoli che ostacolano il ritiro che si traduce pertanto in una sollecitazione di trazione

$$\sigma_t = E \cdot \epsilon$$

[1]

dove E è il modulo elastico del calcestruzzo

La Figura 1 mostra schematicamente che la fessura avviene quando la sollecitazione di trazione (σ_t) è maggiore della resistenza a trazione (f_t):

$$\sigma_t > f_t \quad [2]$$

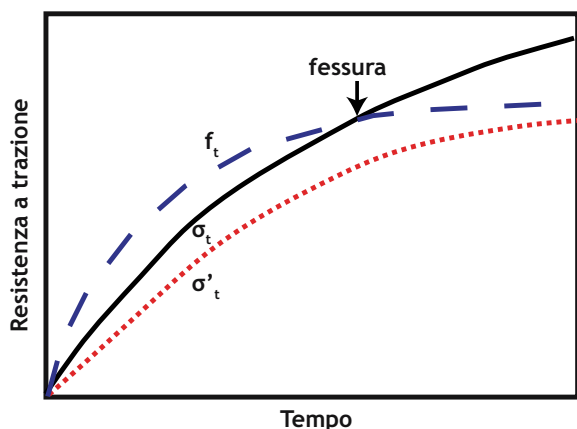


Fig. 1 - Tensione a trazione (σ_t and σ'_t) e resistenza a trazione (f_t) in funzione del tempo.

Quando ciò avviene il calcestruzzo si fessura. La fessurazione può aggravare la vulnerabilità delle strutture in calcestruzzo armato (C.A.) in quanto attraverso le fessure gli agenti aggressivi, ed in particolare quelli che attaccano i ferri di armatura, possono penetrare il copriferro e provocare la corrosione dell'acciaio. Perciò per evitare la fessurazione il ritiro ϵ deve essere adeguatamente ridotto affinché la tensione di trazione indotta dal ritiro impedito diminuisca (σ'_t) e risulti minore di f_t :

$$\sigma'_t < f_t \quad [3]$$

Esistono due strategie per raggiungere questo obiettivo con

l'ausilio di additivi chimici capaci, attraverso meccanismi diversi, di migliorare il quadro fessurativo delle strutture in C.A. e quindi di migliorare la durabilità soprattutto nei confronti di composti che pregiudicano la corrosione dei ferri di armatura:

- cloruri in ambienti marittimi e in strutture di alta montagna esposte al trattamento con sali disgelanti nella stagione invernale;
- aria umida (con O_2 , CO_2 e H_2O) che può promuovere la corrosione da carbonatazione dei ferri di armatura.

Gli additivi disponibili a questo scopo sono i superfluidificanti e gli additivi riduttori del ritiro **SRA** (*Shrinkage Reducing Admixtures*).

Gli **additivi superfluidificanti** debbono essere impiegati per ridurre l'acqua di impasto (a) e, a pari rapporto acqua/cemento (a/c), per ridurre in eguale misura anche il dosaggio di cemento (c). La diminuzione in volume di acqua e di cemento è compensata da un pari aumento del volume di inerte (V_i) cui corrisponde un maggior quantitativo di inerte (i) in kg/m^3 . Si verifica quindi una diminuzione della pasta cementizia ($c+a$) responsabile del ritiro igrometrico e un incremento dell'inerte (i) che si oppone al ritiro. La Figura 2 mostra i risultati sperimentali ottenuti da Lea (1) sul ritiro igrometrico libero (cioè

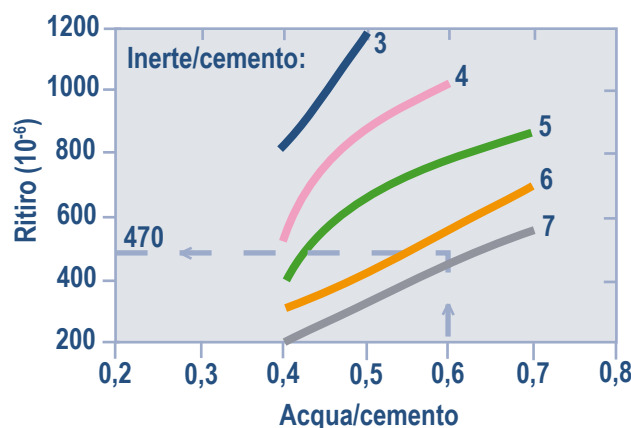


Fig. 2 - Influenza del rapporto acqua/cemento e del rapporto inerte/cemento sul ritiro standard a 6 mesi di provini $10 \times 10 \times 50$ cm esposti a $20^\circ C$ con $UR = 50\%$. I numeri sulle curve indicano il rapporto inerte/cemento \rightarrow Il Nuovo Calcestruzzo, di M. Collepari, S. Collepari e R. Troli, Ed. Tintoretto, Quinta Edizione, 2009

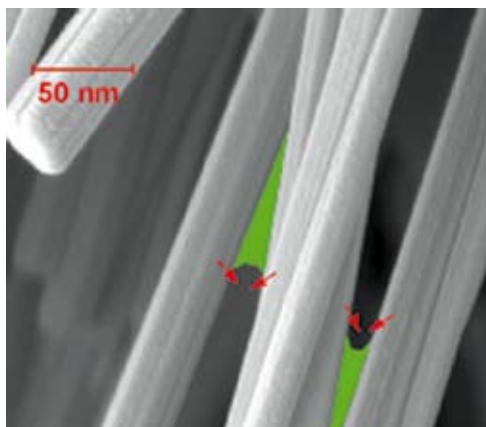


Fig. 3 - Esempio di menischi di acqua (in verde) che provocano l'avvicinamento delle fibre di C-S-H, come indicato dalle frecce e quindi la contrazione da ritiro → Il Nuovo Calcestruzzo, di M. Collepari, S. Collepari e R. Troli, Ed. Tintoretto, Quinta Edizione, 2009

in assenza di impedimenti) di calcestruzzi con diversi a/c e i/c ; a parità di a/c il ritiro standard diminuisce se si aumenta il rapporto inerte/cemento da 3 a 7. Per esempio in un calcestruzzo con $a = 200 \text{ kg/m}^3$ e $c = 300 \text{ kg/m}^3 \rightarrow a/c = 0,60$; se il quantitativo di inerte è 1920 kg/m^3 , il rapporto inerte/cemento = $1920/300 = 6,4$ ed il ritiro standard a 6 mesi è eguale a $470 \cdot 10^{-6} = 470 \text{ }\mu\text{m/m}$

L'impiego di **additivi SRA** consente di ridurre il ritiro igrometrico senza modificare la composizione del calcestruzzo. Il meccanismo, abbastanza complesso, si basa sulla presenza di prodotti (generalmente a base di poli-glicoli) capaci di ridurre la tensione superficiale (γ) dell'acqua e conseguentemente la pressione capillare P che si genera per la formazione dei menischi di acqua (Fig. 3) responsabili del ritiro della pasta di cemento (2):

$$P = 2\gamma / r \cdot \cos \Theta \quad [4]$$

dove r è il raggio del menisco d'acqua nel capillare e Θ è l'angolo di bagnatura dell'acqua liquida con la superficie della pasta cementizia. Se si riduce γ , diminuisce P secondo la [4] e diminuisce quindi la spinta che avvicina le fibre di C-S-H le une verso le altre con conseguente contrazione (ritiro) del sistema cementizio.

2. PARTE SPERIMENTALE: MATERIALI E METODI

Materiali

E' stato impiegato un cemento Portland (CEM I 42.5 R secondo la normativa UNI EN 197-1).

Come additivo superfluidificante (SF) è stato impiegato un prodotto a base di polycarbossilato al 30% in acqua per ridurre l'acqua di impasto e, a pari rapporto a/c , il dosaggio di cemento in eguale misura.

Come additivo SRA è stato impiegato neopentil glicol capace di ridurre la tensione superficiale da 72.8 mN/m per l'acqua pura a 32.4 mN/m per una soluzione acquosa di SRA al 2%.

Come aggregati sono stati impiegati una sabbia naturale (0-4 mm) and una ghiaia di 4-25 mm.

La Tabella 1 mostra la composizione delle seguenti miscele

le di calcestruzzo tutte ad un eguale rapporto a/c di 0,62 con uno slump di 230-240 mm. Queste sono le sigle adottate per le 4 miscele di calcestruzzo:

- *CONTROL mix*: calcestruzzo senza additivi ;
- *SF mix*: calcestruzzo con superfluidificante (1% sul cemento);
- *SRA mix*: calcestruzzo con l'additivo SRA (1% sul cemento);
- *SF/SRA mix*: calcestruzzo con superfluidificante e additivo SRA (entrambi all' 1% sul cemento).

Tabella 1 - Composizione dei calcestruzzi con $a/c = 0,62$ e slump = 230-240 mm.

COMPOSIZIONE (kg/m ³)	CONTROL Mix	SF Mix	SRA Mix	SF/SRA Mix
CEMENTO	357	248	356	250
ACQUA	222	153	221	155
SABBIA (0-4 mm)	933	1000	931	1004
GHIAIA (4-25 mm)	926	1015	920	1020
SF	—	2.43	—	2.50
SRA	—	—	356	2.50
SLUMP (mm)	240	230	240	240
ACQUA/CEMENTO	0.62	0.62	0.62	0.62
INERTE/CEMENTO	5.2	8.1	5.2	8.1

Metodi

E' stata misurata la resistenza meccanica a compressione su provini cubici (150 mm) stagionati a 20 °C con UR > 95 % per 1, 7, 28 e 90 giorni.

Su provini prismatici (100x100x500 mm), scasserati a 2 giorni, è stato misurato il ritiro igrometrico libero a 20 °C con UR = 50 % da 2 settimane a 1 anno.

Sono state eseguite prove di campo per studiare il ritiro contrastato in lastre (lunghe 8 metri, larghe 400 mm e spesse 60 mm) bloccate alle estremità e lasciate all'aria aperta nelle stesse condizioni di temperatura, di umidità relativa e di velocità del vento. Sulle lastre confezionate con i quattro calcestruzzi ed esposte per 4 mesi nelle stesse condizioni ambientali sono state misurate il numero e lo spessore delle fessure indotte dal ritiro contrastato. Si tratta di prove molto severe per la forma geometrica (rapporto lunghezza/larghezza eguale a 20) favorevole alla formazione di fessure indotte dal ritiro igrometrico.

3. RISULTATI

La Tabella 1 mostra che nei calcestruzzi *SF mix* e *SF/SRA mix* vi è una riduzione di circa il 30% sia nell'acqua di impasto che nel dosaggio di cemento rispetto al *CONTROL mix* di riferimento senza additivi. A questa riduzione della pasta di cemento corrisponde un significativo aumento nel volume di inerte e il rapporto inerte/cemento aumenta da 5,2 (nel *CON-*

TROL mix) a 8,1 nei calcestruzzi con superfluidificante SF mix e SF/SRA mix.

La Figura 4 mostra che la resistenza meccanica a compressione di tutti i calcestruzzi con il rapporto a/c di 0,62 è compresa nell'intervallo di 30-35 MPa. In particolare la resistenza meccanica dell'SF mix è eguale a quella del CONTROL mix sia alle brevi che alle lunghe stagionature, mentre quella del calcestruzzo con SRA presenta una piccola riduzione di resistenza probabilmente dovuta all'influenza del neopentil glicole sul grado di idratazione del cemento.

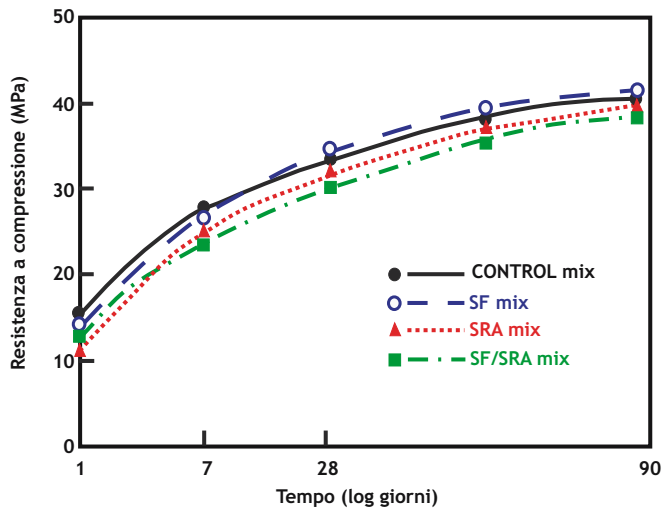


Fig. 4 - Influenza del superfluidificante SF e/o dell'additivo SRA sulla resistenza meccanica.

La Figura 5 mostra l'influenza del superfluidificante sul ritiro igrometrico libero in ambiente con UR del 50%: poiché il rapporto inerte/cemento del calcestruzzo SF mix è molto più alto (8,1 contro 5,2) di quello del CONTROL mix (Tabella 1), il ritiro libero igrometrico è ridotto del 15-20 % rispetto a quello del calcestruzzo senza superfluidificante: l'effetto è in relazione con la diminuzione di pasta di cemento responsabile del ritiro e l'aumento dell'inerte i cui rigidi granuli si oppongono al ritiro della matrice cementizia con un effetto tanto maggiore quanto

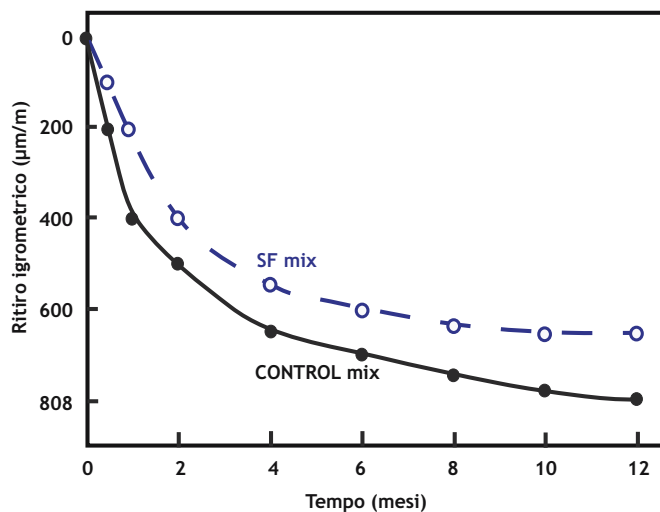


Fig. 5 - Influenza del superfluidificante SF sul ritiro igrometrico del calcestruzzo.

più alto è il rapporto inerte/cemento (Fig. 2).

La Fig. 6 mostra l'influenza dell'additivo SRA sul ritiro igrometrico del calcestruzzo esposto in ambiente con UR del 50%: nel calcestruzzo SRA mix si registra una diminuzione del ritiro libero del 20-25 % rispetto al calcestruzzo senza additivo CONTROL mix. Questo effetto, in assenza di variazione nei rapporti a/c (0,62) ed i/c (5,2), è dovuto alla riduzione della tensione superficiale dell'acqua libera presente nei pori capillari provocata dal neopentil glicole ed alla conseguente riduzione della pressione capillare secondo l'equazione [4] che spinge le fibre di C-S-H le une verso le altre (Fig. 3) provocando una contrazione (ritiro) di volume nella pasta di cemento.

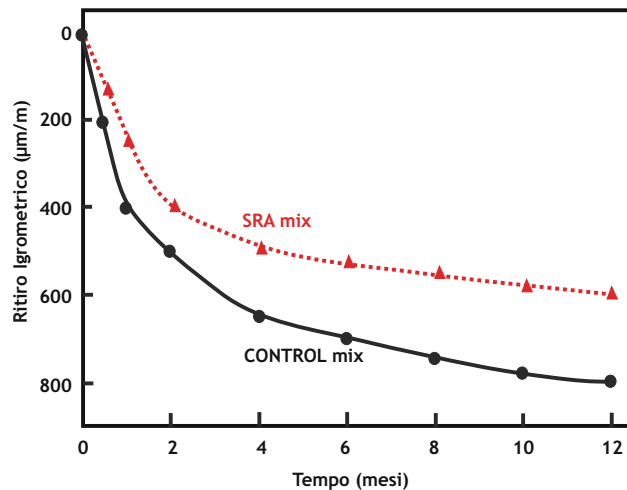


Fig. 6 - Influenza dell'additivo SRA sul ritiro igrometrico del calcestruzzo.

La Fig. 7 mostra l'influenza dell'azione combinata degli additivi SF ed SRA sul ritiro igrometrico del calcestruzzo: la riduzione di ritiro provocata dalla co-presenza degli additivi raggiunge il 30-35 % rispetto a quello del CONTROL mix. Questo effetto è in relazione con l'aumento del rapporto inerte/cemento (da 5,2 a 8,1) provocato dal superfluidificante SF e con la diminuzione della tensione superficiale dell'acqua causata dalla presenza dell'additivo SRA.

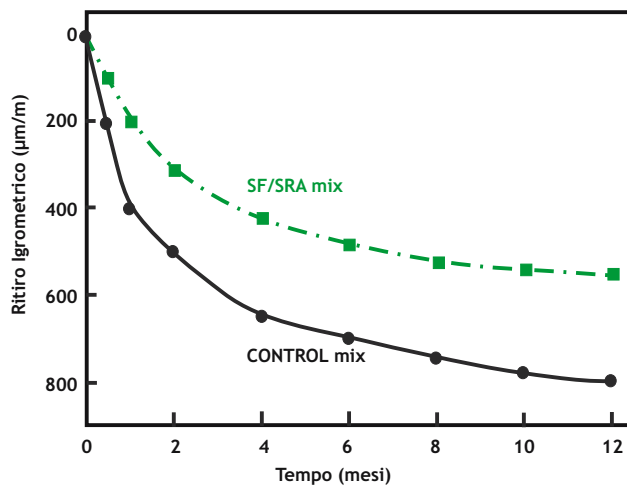


Fig. 7 - Influenza del superfluidificante SF insieme all'additivo SRA sul ritiro igrometrico del calcestruzzo.

I risultati delle prove di campo sull'influenza degli additivi sul numero e sull'apertura delle fessure indotte dal ritiro igrometrico contrastato son mostrati in Tabella 2. Nella lastra confezionata con il calcestruzzo *SF mix* si registra una diminuzione del numero e delle aperture delle fessure rispetto alla lastra confezionata con il calcestruzzo senza additivi *CONTROL mix*. L'effetto è più marcato se si impiega l'additivo SRA e questo comportamento è in linea con il minor ritiro libero del calcestruzzo *SRA mix* (Fig. 6) rispetto al calcestruzzo *SF mix* (Fig. 5). In presenza dell'additivo superfluidificante. L'impiego combinato di superfluidificante e additivo SRA nel calcestruzzo *SF/SRA mix* comporta una ulteriore significativa riduzione nel numero e nell'ampiezza delle fessure generate dal ritiro vincolato della lastra: si è registrata solo una fessura con apertura di 150 µm lungo tutta la lastra.

Tabella 2 - Distribuzione delle fessure nelle lastre esposte a ritiro contrastato per 4 mesi.

CALCESTRUZZO	NUMERO DI FESSURE	MASSIMA APERTURA DELLE FESSURE (mm)
CONTROL Mix	7	2.50
SF Mix	4	1.52
SRA Mix	3	0.42
SF/SRA Mix	1	0.15

4. CONCLUSIONI

Il rischio di fessura nelle strutture in calcestruzzo armato esposte al ritiro igrometrico può essere mitigato in due modi:
 - attraverso una riduzione della pasta cementizia responsabi-

le del ritiro igrometrico e un contemporaneo aumento del volume dell'aggregato; in questo lavoro l'obiettivo di una riduzione del ritiro libero del 20-25 % è stato raggiunto con un additivo superfluidificante impiegato riducendo l'acqua di impasto e, a pari rapporto acqua/cemento, riducendo anche il dosaggio di cemento; questo obiettivo può essere anche perseguito senza l'impiego di additivi superfluidificanti impiegando inerti con maggior diametro massimo e quindi con minore acqua di impasto e cemento secondo la nota regola di Lyse (4);

- attraverso l'impiego di un additivo SRA capace di ridurre il ritiro del 25-30% attraverso una diminuzione della tensione superficiale dell'acqua libera presente nei menischi tra le fibre di cemento idratato in forma di fibre di C-S-H;
- mediante una combinata aggiunta di additivo superfluidificante e di SRA con i quali si può arrivare a ridurre il ritiro libero del 30-35%.

La riduzione del ritiro igrometrico libero si tramuta in una riduzione della sollecitazione di trazione nelle strutture in calcestruzzo armato vincolate e quindi in una riduzione delle fessure per numero ed ampiezza.

5. BIBLIOGRAFIA

- (1) F.M. Lea, "The Chemistry of Cement", Arnold, London, 1970.
- (2) J. Bae, N:S. Berke, R.J. Hoopes, and J. Malone, "Freezing and Thawing Resistance of Concretes with Shrinkage Reducing Admixtures", RILEM Proceedings (2002), PRO 24 (Frost Resistance of Concrete: from Nanostructure Behaviour and Testing), pp. 327-333.
- (3) M. Collepardi, S. Collepardi e Roberto Troli, "Il Nuovo Calcestruzzo", pag. 91-93, Edizione Tintoretto, Quinta Edizione 2009.



SUSANTA CHATTERJI

Susanta Chatterji ci ha lasciato il 25 Luglio 2009.

Ho incontrato Susanta verso la fine degli anni '70 ed ho potuto apprezzare il caparbio e rigoroso approccio scientifico con cui affrontava il suo lavoro come anche il suo affettuoso rapporto con la famiglia e con la figlia Ina in particolare. Susanta Chatterji, nato in India nel 1931, ha lavorato in India, in Svezia, in Inghilterra, in Danimarca, in Italia e in Giappone.

Dal 1957 al 2008 Susanta Chatterji ha pubblicato 245 articoli nelle più prestigiose riviste del settore su argomenti di grande importanza nell'area del cemento e del calcestruzzo, quali l'espansione solfatica, la reazione alcali-aggregato, la diffusione ionica nella matrice cementizia, il gelo-disgelo in sistemi cementizi aerati, la natura coesiva e adesiva dei legami nei sistemi cementizi. Alla sua cara figlia Ina vanno le condoglianze di Enco Journal e quelle mie personali.

Mario Collepardi

EFFETTI DELLA VISCOSITA' NEL CALCESTRUZZO: IL SOLAIO PREFABBRICATO E LA SOLETTA GETTATA IN OPERA



Matteo Felitti

Libero Professionista - studiotecnicomp@alice.it

1. INTRODUZIONE

Il presente lavoro¹, che per ragioni di spazio si riportano alcune note esplicative, tratta il problema relativo alla **ridistribuzione tensionale** che si manifesta nelle sezioni di travi continue costituite da due parti reologicamente non omogenee. In particolare viene studiato il caso di solai alveolari prefabbricati² a cui viene, in tempi successivi, solidarizzata in opera una soletta collaborante in calcestruzzo ordinario (Figura 1).

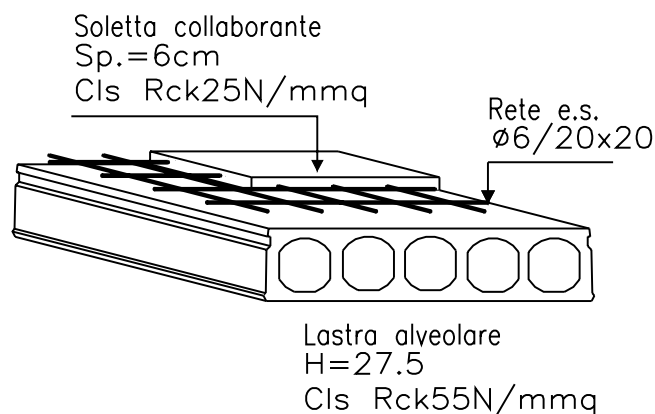


Figura 1

L'analisi a lungo termine di tali elementi rappresenta un problema di particolare interesse pratico, la cui corretta soluzione permette di effettuare la misura della sicurezza nella fase di esercizio in maniera affidabile. La soletta collaborante può riguardarsi quale vincolo diffuso interagente con l'elemento prefabbricato ed il suo comportamento è quello di vincolo posticipato relativamente al peso proprio strutturale mentre per le azioni applicate alla struttura già solidarizzata il comportamento della soletta è quello di vincolo preesistente. Viene formulato in forma generale il problema relativo ad elementi non omogenei nelle sezioni trasversali, indicandone le moda-

lità risolutive, basate su algoritmi numerici e su formulazioni algebriche approssimate. Per questo secondo approccio il problema è trattato in dettaglio, valutando per una fra le tipologie di solaio alveolare più utilizzate nella pratica e per prefissati valori dello spessore della soletta collaborante, **la variazione nel tempo del regime statico** assumendo la suddetta soletta quale vincolo preesistente-posticipato. Si segnala, infine, la soluzione del problema che può essere perseguita introducendo il Modello di Dischinger.

2. LA VISCOSITA' NEL CALCESTRUZZO

Gli effetti delle deformazioni differite (deformazioni viscosse) del calcestruzzo prodotte da uno stato tensionale devono essere in linea di principio valutati con buona accuratezza in quanto influenzano sia lo stato di sforzo che quello di deformazione delle strutture in calcestruzzo armato e precompresso. Tale influenza è però differente in relazione alle tipologie strutturali, alla natura delle azioni applicate nonché alle possibili variazioni di schema statico che si verificano nel corso della vita e dell'utilizzo delle stesse strutture.

Allo scopo di poter individuare i casi in cui la viscosità gioca un ruolo importante sul regime statico/deformativo della struttura, è conveniente suddividere le strutture in omogenee e non omogenee :

- si definiscono **omogenee** le strutture formate da un solo materiale avente in ogni punto le stesse caratteristiche elastoviscose;
- si definiscono **non omogenee** le strutture formate da più materiali aventi caratteristiche elastoviscose differenti (tali disomogeneità possono sussistere nelle sezioni trasversali degli elementi strutturali o lungo il loro asse oppure nei vincoli esterni della struttura). Inoltre risulta comodo suddividere le azioni applicate in azioni statiche (**forze**) e geometriche (**deformazioni o spostamenti impressi**) e, per le prime, possono considerarsi i due casi di vincoli preesistenti oppure posticipati rispetto alla loro applicazione. In virtù delle distinzioni fatte, derivano le seguenti considerazioni riguardo al calcolo ed all'importanza degli effetti della viscosità sul regime di sforzo e deformazione nelle strutture in calcestruzzo. Alle strutture omogenee si applicano i ben noti teoremi della viscosità lineare che sintetizzano il comportamento viscoelastico di tali strutture. In particola-

¹ Per consultare la versione integrale di tale articolo, dove sono riportati tutti i passaggi matematici, si veda l'industria italiana del Cemento n. 853 - maggio 2009 - pagg. 394-407.

² Si tratta di un elemento ottenuto mediante un procedimento di estrusione. Possiede, insieme ad una buona capacità di adattamento alle diverse esigenze progettuali, una elevata capacità autoportante. L'armatura è costituita esclusivamente dai cavi di precompressione. Il suo comportamento taglio-resistente è affidato alla resistenza a trazione del calcestruzzo.

re, il **primo teorema della viscosità lineare** afferma che in presenza di azioni statiche il regime tensionale non subisce variazioni nel tempo per effetto della viscosità rispetto a quello valutabile in fase elastica, mentre si manifesta un incremento delle deformazioni che aumentano nel tempo in modo affine a quello calcolato in fase elastica. Il **secondo teorema della viscosità lineare** afferma che in presenza di azioni geometriche lo stato di deformazione totale resta nel tempo uguale a quello valutabile in fase elastica, mentre le tensioni decrescono in modo affine a quelle calcolate in fase elastica. Infine in presenza di variazioni di schema statico e di azioni statiche, si manifesta il cosiddetto **riacquisto del regime principale**, in virtù del quale la struttura nel tempo tende a riacquistare, pur senza raggiungerlo completamente, il regime statico che essa avrebbe avuto se tutti i suoi vincoli fossero stati preesistenti all'applicazione delle azioni (regime principale). Lo stato tensionale nelle strutture omogenee è pertanto influenzato dalla viscosità solo nel caso di azioni di tipo geometrico o di vincoli posticipati. Nel primo caso si ha sempre diminuzione del regime tensionale prodotto dal rilassamento del materiale, mentre nel secondo caso tale regime può aumentare in alcune zone della struttura e diminuire in altre rispettando ovviamente l'equilibrio globale fra le azioni applicate e le reazioni dei vincoli preesistenti e posticipati. Al contrario in presenza di azioni statiche e di vincoli preesistenti la viscosità influenza solo le deformazioni.

Quando si considerano strutture non omogenee i teoremi precedenti, nonché le conseguenze che da essi discendono, non sono più applicabili e la risoluzione della struttura diviene più complessa. In questi casi si rende necessario studiare degli algoritmi numerici aventi validità generale. In alternativa, come accennato in precedenza, si può ricorrere all'applicazione di metodi risolutivi approssimati, quali ad esempio i metodi algebrizzati, che sostituiscono alla legge costitutiva viscoelastica di tipo integrale - **equazione integrale di Volterra** - una legge approssimata algebrica lineare in modo da ricondurre la risoluzione della struttura a quella di un problema elastico in presenza di una deformazione impressa nota che tiene conto approssimativamente delle deformazioni di origine viscosa accumulate nel materiale.

3. ANALISI ED EVOLUZIONE DELLO STATO DI TENSIONE

Si consideri lo schema per il calcolo delle forze di interazione in Figura 2:

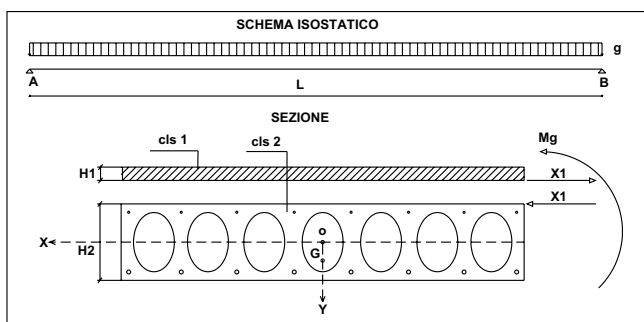


Figura 2

Operando con il metodo forze l'equazione di congruenza nel tempo si scrive:

$$X_1 [\delta_{11}^{(1)} (1 + \chi_1 \varphi_1) + \delta_{11}^{(2)} (1 + \chi_2 \varphi_2)] + X_{10} [\delta_{11}^{(1)} \varphi_1 (1 - \chi_1) + \delta_{11}^{(2)} \varphi_2 (1 - \chi_2)] = -\delta_{10}^{(2)} (1 + \varphi_2) \quad [3.1]$$

all'istante iniziale si ha:

$$t = t_0 \rightarrow \varphi_1 = \varphi_2 = 0 \rightarrow X_{10} (\delta_{11}^{(1)} + \delta_{11}^{(2)}) = -\delta_{10}^{(2)}$$

da cui si ottiene la soluzione elastica del problema:

$$X_{10} = -\frac{\delta_{10}^{(2)}}{\delta_{11}^{(1)} + \delta_{11}^{(2)}} \quad [3.2]$$

Poniamo uguale a ω il rapporto tra i coefficienti di influenza sezionali relativi alla soletta e alla lastra alveolare (per $X=1$):

$$\omega = \frac{\delta_{11}^{(1)}}{\delta_{11}^{(1)} + \delta_{11}^{(2)}} \quad [3.2 \text{ bis}]$$

e sostituendo nella [3.1] si ha:

$$X_1 [\omega (1 + \chi_1 \varphi_1) + (1 - \omega) (1 + \chi_2 \varphi_2)] = X_{10} [1 + \varphi_2 - \omega \varphi_1 (1 - \chi_1) - (1 - \omega) \varphi_2 (1 - \chi_2)]$$

da cui ricaviamo:

$$X_1 = X_{10} \frac{1 + \chi_2 \varphi_2 + \omega [\varphi_2 (1 - \chi_2) - \varphi_1 (1 - \chi_1)]}{1 + \chi_2 \varphi_2 + \omega (\chi_1 \varphi_1 - \chi_2 \varphi_2)} \quad [3.3]$$

innanzitutto, per sezioni omogenee, si ha:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \rightarrow \chi_1 = \chi_2 \rightarrow X_1 = X_{10}$$

(**primo teorema viscosità lineare**)

per sezioni con una parte elastica, si ha

$$\varphi_2 = 0$$

(nel nostro caso consideriamo come parte elastica la lastra alveolare in quanto più vecchia della soletta)

quindi:

$$X_1 = X_{10} \frac{1 - \omega \varphi_1 (1 - \chi_1)}{1 + \omega \chi_1 \varphi_1}$$

Introducendo il coefficiente viscosità del **Modello di Dischinger** si ha:

$$\varphi = \varphi_\infty [1 - e^{-\beta(t-t_0)}]$$

considerando i due calcestruzzi e dopo semplici passaggi si

ottiene:

$$\frac{\delta\varphi_2}{\delta t} = \frac{\delta\varphi_1}{\delta t} \left[\frac{\varphi_{\infty 2}}{\varphi_{\infty 1}} e^{-\beta(t_{01}-t_{02})} \right]$$

integrando primo e secondo membro e indicando con C (è il termine di disomogeneità legato alla differenza di età e di valore asintotico della deformazione viscosa) l'espressione in parentesi, si ha:

$$\varphi_2 = c\varphi_1 \quad [3.4]$$

in particolare per C=1 si hanno le strutture omogenee e per C=0 si hanno le strutture con parte elastica (nel nostro caso la lastra alveolare, avendo una stagionatura più lunga della soletta).

Ancora con riferimento al noto **Modello di Dischinger** e riprendendo la [3.3], si ha:

$$\frac{X_1}{X_{10}} = \frac{1 + \frac{c \cdot \varphi_1 - 1 + e^{-c\varphi_1}}{1 - e^{-c\varphi_1}} + \omega \cdot \left[\frac{1 - e^{-c\varphi_1} (1 + c \cdot \varphi_1)}{1 - e^{-c\varphi_1}} - \frac{1 - e^{-\varphi_1} (1 + \varphi_1)}{1 - e^{-\varphi_1}} \right]}{1 + \frac{c \cdot \varphi_1 - 1 + e^{-c\varphi_1}}{1 - e^{-c\varphi_1}} + \omega \cdot \left[\frac{\varphi_1 - 1 + e^{-\varphi_1}}{1 - e^{-\varphi_1}} - \frac{c \cdot \varphi_1 - 1 + e^{-c\varphi_1}}{1 - e^{-c\varphi_1}} \right]} \quad [3.5]$$

Per vincolo posticipato si ha:

$$X_1 [\delta_{11}^{(1)} (1 + \chi_1 \varphi_1) + \delta_{11}^{(2)} (1 + \chi_2 \varphi_2)] = -\delta_{10}^{(2)} \varphi_2$$

sostituendo il termine χ , si ha:

$$X_1 [\omega (1 + \chi_1 \varphi_1) + (1 - \omega) (1 + \chi_2 \varphi_2)] = X_{10} \varphi_2$$

da cui si ricava:

$$\frac{X_1}{X_{10}} = \frac{c \cdot \varphi_1}{1 + \frac{c \cdot \varphi_1 - 1 + e^{-c\varphi_1}}{1 - e^{-c\varphi_1}} + \omega \cdot \left[\frac{\varphi_1 - 1 + e^{-\varphi_1}}{1 - e^{-\varphi_1}} - \frac{c \varphi_1 - 1 + e^{-c\varphi_1}}{1 - e^{-c\varphi_1}} \right]}$$

4. APPLICAZIONE NUMERICA

Consideriamo una lastra di solaio alveolare larga 120 cm (figura 1) e avente le seguenti caratteristiche geometriche ed inerziali:

$$A = 1601,6 \text{ cm}^2 \quad (\text{area sezione})$$

$$I = 157931 \text{ cm}^4 \quad (\text{inerzia sezione})$$

$e = 13,34 = x_s$ (eccentricità del baricentro rispetto al lembo superiore della lastra) e una soletta collaborante di cui consideriamo tre spessori teorici:

$$S = 2 \text{ cm} - S = 4 \text{ cm} - S = 8 \text{ cm}.$$

Di seguito (come specificato precedentemente) indichiamo con l'indice 1 il calcestruzzo relativo alla soletta e con l'indice 2 il calcestruzzo relativo alla lastra alveolare.

A questo punto calcoliamo il rapporto tra i coefficienti di influenza sezionali ω attraverso la [3.2 bis], con una forza di interazione soletta – solaio pari a uno (Figura 2):

$$\omega = \frac{\delta_{11}^{(1)}}{\delta_{11}^{(1)} + \delta_{11}^{(2)}}$$

con

$$\delta_{11}^{(1)} = \frac{1}{E_1 A_1} \quad \text{e} \quad \delta_{11}^{(2)} = \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{e^2}{E_2 I_2}$$

sostituendo nell'espressione di ω , si ha

$$\omega = \frac{\frac{1}{E_1 A_1}}{\frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} + \frac{e^2}{E_2 I_2}}$$

dividendo numeratore e denominatore per $\frac{1}{E_1 A_1}$ e ponendo pari a 0.85 il rapporto fra i moduli elastici dei due calcestruzzi, si ottiene:

$$\omega = \frac{1}{1 + \frac{0,85 A_1}{A_2} + \frac{0,85 e^2 A_1}{I_2}} \Rightarrow$$

$$\omega = \frac{1}{1 + \frac{0,85 \cdot 120 \cdot s}{1601,6} + \frac{0,85 \cdot 13,34^2 \cdot 120 \cdot s}{157931}}$$

in definitiva, lasciano lo spessore della soletta come parametro libero, si ha:

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,179 \cdot s}$$

Facendo variare lo spessore s della soletta (2 cm - 4 cm - 8 cm), si ottengono i relativi valori di ω :

$$\omega = 0,74 - \omega = 0,58 - \omega = 0,41$$

A questo punto, con il modello di Dischinger, calcoliamo il coefficiente di disomogeneità C (rappresentato dal termine in parentesi quadra) al variare dell'intervallo di tempo in giorni

$$(t_{01} - t_{02}) = 15, 30, 60, 90, \infty$$

$$\frac{\delta\varphi_2}{\delta t} = \frac{\delta\varphi_1}{\delta t} \left[\frac{\varphi_{\infty 2}}{\varphi_{\infty 1}} e^{-\beta(t_{01}-t_{02})} \right]$$

e ponendo pari a $\frac{\varphi_{\infty 2}}{\varphi_{\infty 1}} = 0,8$ il rapporto tra i coefficienti di viscosità alla Dischinger, e pari a β giorni⁻¹ il termine che compare come esponente.

Sostituendo, quindi, nell'espressione precedente, si ricava il termine C

$$C = 0,74 - C = 0,69 - C = 0,59 - C = 0,51 - C = 0$$

Infine facendo variare i termini ω (in funzione dello spessore della soletta) e C, tracciamo le curve che descrivono l'evoluzione dello stato tensionale.

Nelle pagine che seguono vengono riportati i grafici relativi alle funzioni X_1/X_{10} (evoluzione dello stato tensionale) e della funzione.

EVOLUZIONE DELLO STATO TENSIONALE

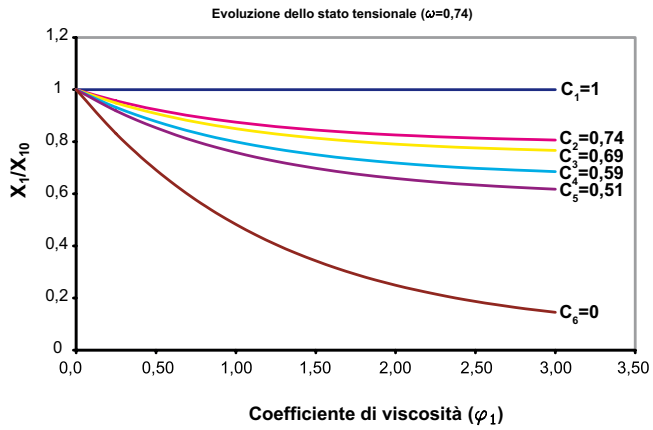


Figura 3

EVOLUZIONE DELLO STATO TENSIONALE PER VINCOLO POSTICIPATO

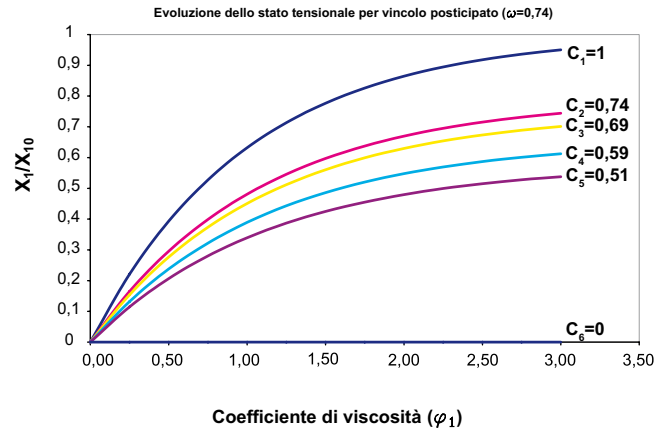


Figura 6

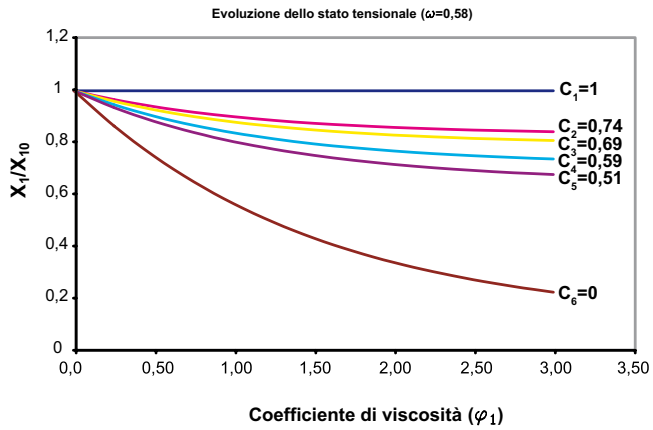


Figura 4

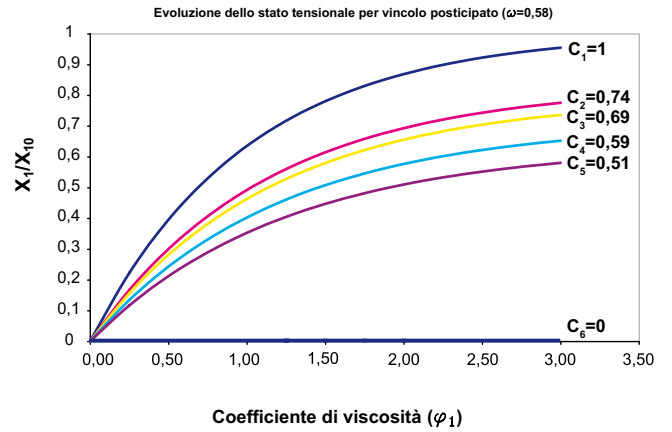


Figura 7

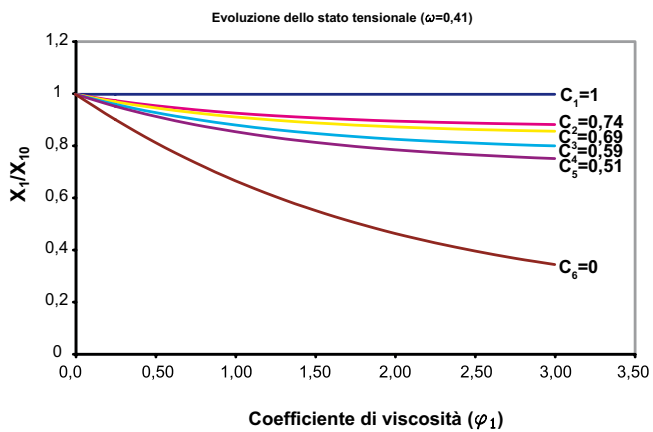


Figura 5

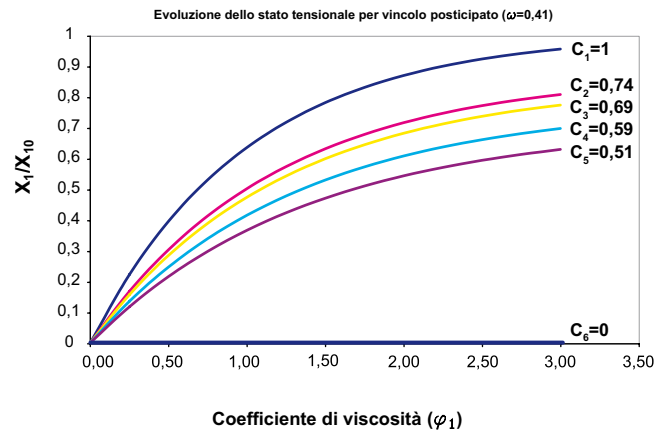


Figura 8

FUNZIONE ω

$$\omega = \frac{1}{1 + 0,179 \cdot s}$$

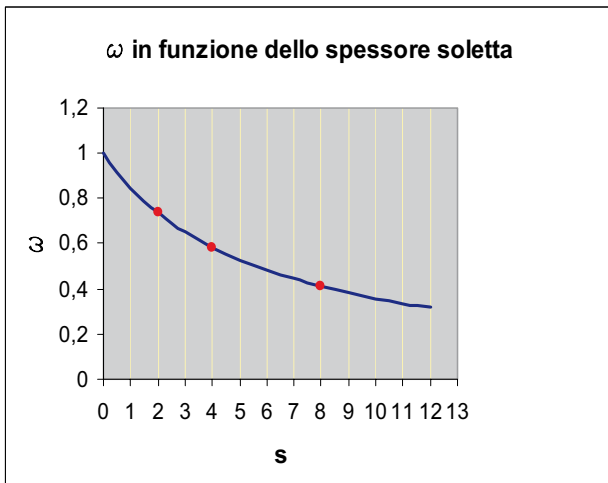


Figura 9

5. CONCLUSIONI

Dall'analisi dei grafici si possono trarre i seguenti risultati che hanno, in qualche modo, interesse nella pratica professionale:

1. Evoluzione dello stato tensionale

per $\omega=0 \rightarrow \delta_{11}^{(1)}=0 \rightarrow$ soletta rigida \rightarrow assenza di ridistribuzione

per $\omega=1 \rightarrow \delta_{11}^{(2)}=\infty \rightarrow$ solaio infinitamente deformabile \rightarrow assenza di redistribuzione

2. Evoluzione dello stato tensionale per vincolo posticipato

per $\omega=0 \rightarrow \delta_{11}^{(1)}=0 \rightarrow$ soletta rigida \rightarrow massimo riacquisto

per $\omega=1 \rightarrow \delta_{11}^{(2)}=\infty$ per $\delta^{(1)}$ qualsiasi \rightarrow il vincolo soletta è sempre rigido \rightarrow massimo riacquisto.

Inoltre, con riferimento alla curva ω di fig. 9, si può concludere:

a) se ω aumenta, lo spessore della soletta diminuisce e si tende verso la massima redistribuzione tensionale e il minimo riacquisto;

b) se ω diminuisce, lo spessore della soletta aumenta e si tende verso la minima redistribuzione tensionale e il massimo riacquisto.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

• F. Mola, Metodi di analisi di strutture in c.a. e c.a.p. a comportamento elasto-viscoso lineare, Studi e Ricerche Vol. 3, 1981, Corso di perfezionamento per le Costruzioni in Cemento armato F.Ili Pesenti, Politecnico di Milano.

• F. Mola, Analisi generale in fase visco-elastica lineare di

strutture e sezioni a comportamento reologico non omogeneo, Studi e Ricerche Vol. 8, 1986, Corso di perfezionamento per le Costruzioni in Cemento armato F.Ili Pesenti, Politecnico di Milano.

- M. Collepari, Il Nuovo Calcestruzzo, Edizioni Tintoretto, 2006.
- M.L. Krasnov ed Altri, Equazioni Integrali, Libreria Italia-URSS, 1982.
- L. Amerio, Analisi Infinitesimale, Vol. II, Di Stefano Editore, 1970.
- F. Mola, A. Migliacci, Progetto agli Stati Limite delle Strutture in c.a.- cap. 8, parte seconda, Casa Editrice Ambrosiana, 2003.
- M. Felitti, Applicazioni di Scienza delle Costruzioni, centro fotocopie Facoltà di Architettura di Napoli, 2000.
- G. Di Palma, Strutture iperstatiche piane : metodi analitici di soluzione, centro fotocopie Facoltà di Architettura di Napoli, 2003.

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

IL CALCESTRUZZO VULNERABILE
Prevenzione, diagnosi del degrado e restauri

IL CALCESTRUZZO VULNERABILE

M. COLLEPARDI - F. MOLA
F. SIMPATELLI - R. FIORE

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 oppure telefonando al 0422 963771

INFLUENZA DELLA CENERE VOLANTE IN PRESENZA DI ADDITIVI CHIMICI SUL RITIRO DEL CALCESTRUZZO



Antonio Borsoi, Mario Collepari,
Silvia Collepari e Roberto Troli
Enco srl, Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it



1 - INTRODUZIONE

Il ritiro igrometrico (ϵ_p) è fonte di preoccupazione per la integrità del calcestruzzo. In presenza di vincoli il ritiro si tramuta in sollecitazione di trazione (σ_t) e quando questa supera la resistenza a trazione (R_t) del calcestruzzo il materiale si fessura con pregiudizio per la durabilità (1):

$$\sigma_t > R_t$$

Sono disponibili nella letteratura tecnica articoli sulla influenza della cenere volante sul ritiro autogeno (2-6) e su quello igrometrico (7-9) e questi articoli indicano che entrambi i tipi di ritiro diminuiscono quando il cemento Portland è sostituito dalla cenere, ancorché risultati opposti siano stati trovati da B. Ma e collaboratori (10).

Non sono disponibili in letteratura articoli sulla influenza congiunta della cenere volante e degli additivi chimici. Pertanto un obiettivo del lavoro di ricerca oggetto di questo articolo ha riguardato l'influenza della cenere volante sul ritiro igrometrico del calcestruzzo in presenza di additivi superfluidificanti (SF) e di SRA (*Shrinkage-Reducing Admixture*) i quali possono entrambi ridurre il ritiro igrometrico.

Gli additivi SF impiegati per ridurre acqua e cemento, a pari rapporto acqua/cemento, fanno aumentare il volume dell'aggregato che si oppone al ritiro e questa diminuzione è tanto più evidente quanto maggiore è il rapporto aggregato/cemento (1).

Gli additivi SRA (*Shrinkage-reducing admixtures*) agiscono sulla riduzione del ritiro senza intervenire nella modifica della composizione del calcestruzzo ma modificando la tensione superficiale dell'acqua (1).

Un secondo obiettivo di questo articolo riguarda lo studio della influenza della cosiddetta cenere volante beneficiata (*Beneficiated Fly Ash*, BFA) sul ritiro dei calcestruzzi in presenza di additivi superfluidificanti ed SRA.

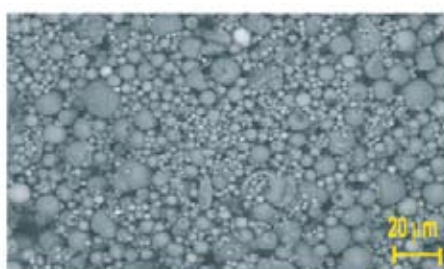
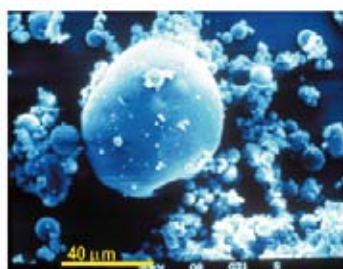


Fig. 1 -Microfotografia al microscopio elettronico della cenere volante (a sinistra) e della cenere beneficiata.

2. PARTE SPERIMENTALE: MATERIALI E METODI

Materiali

La Tabella 1 mostra la composizione del cemento Portland (CEM I 42.5 R), della cenere volante normale e di quella beneficiata (BFA). Quest'ultima è stata ottenuta per rimozione del carbone

Tabella 1 - Composizione dei materiali cementizi.

COMPOSIZIONE	MATERIALE CEMENTIZIO		
	CEMENTO PORTLAND	CENERE VOLANTE	BFA
SiO ₂	23.1	54.1	53.7
Al ₂ O ₃	5.1	28.9	34.2
CaO	62.9	2.0	4.1
Fe ₂ O ₃	0.9	3.7	3.8
K ₂ O	0.3	0.7	0.7
Na ₂ O	0.4	0.4	0.3
MgO	0.2	0.5	0.9
Perdita al fuoco	2.0	6.6	0.8

incombusto dalla cenere volante mediante una tecnica elettrostatica e l'estrazione mediante sospensione in aria della frazione più tondeggianti e più fine delle particelle di cenere (Fig. 1).

Conseguentemente è possibile produrre un calcestruzzo con BFA più prestazionale di quello con cenere normale sia per la lavorabilità del calcestruzzo fresco che per la minore porosità del calcestruzzo indurito. A seguito della trasformazione di cenere normale in BFA la percentuale di carbone incombusto è stata ridotta da 6,6 a 0,8 % mentre la dimensione media delle particelle è passata da 20 a 5 μ m.

E' stato impiegato un additivo superfluidificante (SF) a base di polycarbossilato in 30% in acqua. Come additivo riduttore di additivo (SRA) è stato impiegato neopentil glicole capace di ridurre la tensione superficiale dell'acqua da 72,8 a 32,4 N/mm² quando utilizzato in forma di una soluzione acquosa al 2%.

Tabella 2 - Composizione and caratteristiche delle miscele di calcestruzzo con cenere volante (CV) normale in presenza o meno di additivo superfluidificante SF e di additivo riduttore del ritiro SRA

COMPOSIZIONE (kg/m ³)	CONTROL Mix	CV Mix	CV+SRA Mix	CV+SF Mix	CV+SRA/SF Mix
CEMENTO	357	284	284	198	201
CENERE VOLANTE (CV)	—	71	71	51	51
ACQUA	222	221	220	154	155
SABBIA (0-4 mm)	933	929	932	993	1004
GHIAIA (4-25 mm)	926	921	921	1037	1048
SUPERFLUIDIFICANTE (SF)	—	—	—	3.24	3.28
ADDITIVO SRA	—	—	3.55	—	2.52
SLUMP (mm)	240	240	235	230	230
ACQUA/CEMENTO	0.62	0.78	0.77	0.78	0.77
ACQUA/(CEMENTO+CV)	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
INERTE/CEMENTO	5.2	6.5	6.5	10.2	10.2
INERTE/(CEMENTO+CV)	5.2	5.2	5.2	8.2	8.2
RES. MECCANICA A 28 GIORNI (MPa)	34.5	29.5	28.0	30.5	28.0

Le Tabelle 2 e 3 mostrano le composizioni dei calcestruzzi con cenere volante (CV) e BFA rispettivamente tutti alla stessa consistenza (slump = 230-240 mm). Di seguito sono riportate le sigle per identificare questi calcestruzzi:

CONTROL mix: calcestruzzo senza aggiunte minerali e senza additivi; *CV mix*; *CV + SRA mix*: calcestruzzo con cenere volante e additivo SRA; *CV + SF mix*: calcestruzzo con cenere volante e additivo superfluidificante SF; *CV + SRA/ SF mix*: calcestruzzo con cenere volante e additivi SF e SRA; *BFA mix*: calcestruzzo con BFA senza additivi; *BFA + SRA mix*: calcestruzzo con BFA e additivo SRA; *BFA + SF mix*: calcestruzzo con cenere volante e additivo superfluidificante SF; *BFA + SRA/ SF mix*: calcestruzzo con BFA e additivi SF e SRA.

Metodi

Su provini cubici (150 mm) stagionati a 20 °C è stata misurata la resistenza meccanica a compressione da 1 a 90 giorni.

I calcestruzzi sono stati esposti ad ambienti insaturi di vapore in due diverse condizioni: provini liberi di subire la contrazione sui quali è stato misurato il ritiro igrometrico in laboratorio e lastre esposte all'aria in prove di campo vincolate alle estremità per impedire il ritiro.

In laboratorio su provini prismatici (100x100x500 mm) sformati a 2 giorni ed esposti in ambiente insaturo con UR a 50% a 20 °C è stato misurato il ritiro igrometrico libero da 10 a 120 giorni.

Con ciascuno dei calcestruzzi è stata confezionata anche una lastra lunga 8 m, larga 400 mm e spessa 60 mm; tutte le lastre sono state appoggiate su terreno (Fig.2) ed esposte per 120

giorni all'aria nelle stesse condizioni di UR, di temperatura e di vento dopo essere state bloccate alle estremità in modo che il ritiro vincolato si traducesse in una tensione di trazione (σ_t) con rischio di fessurazione se $\sigma_t > R_t$. Su ciascuna lastra sono state misurate il numero e l'ampiezza massima delle fessure. La geometria delle lastre, ed in particolare l'eccessivo rapporto lunghezza/larghezza eguale a 20 favorisce la formazione di fessure indotte dal ritiro vincolato.

3. RISULTATI

Res. meccanica dei calcestruzzi con cenere volante e BFA

La Figura 3 mostra la resistenza meccanica del calcestruzzo di riferimento senza aggiunte minerali (*CONTROL mix*) e quelle dei calcestruzzi con cenere normale (*CV mix*) e cenere beneficiata (*Control BFA*). A causa della sostituzione del 20 % di cemento con BFA si registra una modesta riduzione di resistenza alle stagionature iniziali (1-7 giorni) e un aumento di resistenza meccanica di circa il 10 % tra 28 e 90 giorni. Se il cemento è sostituito dalla cenere volante la riduzione di resistenza meccanica è maggiore e persiste anche alle lunghe stagionature ancorché in misura trascurabile.

Risultati simili sono stati ottenuti in presenza di additivi e nelle Tabelle 2 e 3 si trovano i valori di resistenza meccanica a 28 giorni. In presenza di SRA si registra una lieve diminuzione di resistenza (5 %) rispetto al corrispondente calcestruzzo senza SRA.

Calcestruzzi con cenere volante (CV)

La Tabella mostra che tutti i calcestruzzi con cenere volante (CV) sono stati confezionati con lo stesso rapporto acqua/(cemento + CV)

Tabella 3 - Composizione and caratteristiche delle miscele di calcestruzzo con cenere volante beneficiata (BFA) in presenza o meno di additivo superfluidificante SF e di additivo riduttore del ritiro SRA

COMPOSIZIONE (kg/m ³)	CONTROL Mix	BFA Mix	BFA+SRA Mix	BFA+SF Mix	BFA+SRA/SF Mix
CEMENTO	357	282	281	199	200
BFA	—	71	71	51	52
ACQUA	221	152	146	106	102
SABBIA (0-4 mm)	933	920	920	991	1002
GHIAIA (4-25 mm)	926	913	911	1035	1051
SUPERFLUIDIFICANTE (SF)	—	—	—	3.03	2.98
ADDITIVO SRA	—	—	3.52	—	2.52
SLUMP (mm)	240	230	230	230	235
ACQUA/CEMENTO	0.62	0.54	0.52	0.53	0.51
ACQUA/(CEMENTO+CV)	0.62	0.43	0.41	0.42	0.40
INERTE/CEMENTO	5.2	6.5	6.5	10.3	10.3
INERTE/(CEMENTO+CV)	5.2	5.2	5.2	8.1	8.1
RES. MECCANICA A 28 GIORNI (MPa)	34.5	37.5	37.0	39.0	38.5



Fig. 2 - Proves di campo sulle lastre di calcestruzzo bloccate alle estremità ed esposte al ritiro igrometrico vincolato.

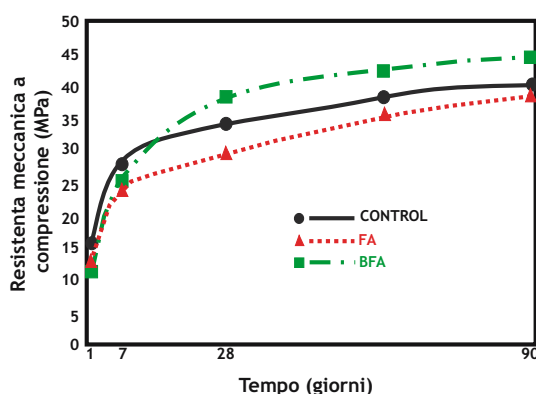


Fig. 3 - Influenza della cenere e della BFA sulla resistenza meccanica a compressione.

di 0,62 adottato per il calcestruzzo senza cenere e additivi legante *CONTROL mix*. D'altra parte il rapporto acqua/cemento di tutti i calcestruzzi con CV è maggiore (0,77 contro 0,62) di quello del *CONTROL mix* per la minore quantità di cemento Portland.

Un adeguato dosaggio di additivo superfluidificante (circa 1,3 % sul peso del materiale cementizio) è stato impiegato nei calcestruzzi *CV + SF mix* o *CV + SRA/SF mix* per ridurre l'acqua di impasto e del cemento del 30% rispetto ai calcestruzzi *CONTROL mix* o *CV + SRA mix* rispettivamente a parità di slump (circa 235 mm). La riduzione dell'acqua e del cemento è stata compensata da un pari aumento in volume dell'inerte cosicché il rapporto inerte/cemento che è di 5,2 nei calcestruzzi senza superfluidificante SF diventa 8,2 nei corrispondenti calcestruzzi con SF.

La presenza di SRA (1% sul peso del materiale cementizio) non provoca alcuna modifica nella composizione dei calcestruzzi rispetto a quello senza SRA.

Ritiro igrometrico libero dei calcestruzzi con CV

La Figura 4 mostra il ritiro igrometrico libero dei calcestruzzi con CV rispetto al calcestruzzo di riferimento *CONTROL mix* senza cenere. La sostituzione del 20% di cemento con CV in assenza di additivi chimici provoca una riduzione del ritiro igrometrico di circa il 15% e questo risultato è in accordo con quelli riportati nei riferimenti bibliografici (8-10).

La Fig. 4 mostra anche che in presenza di SF, a causa dell'aumento del rapporto inerte/cemento da 5,2 a 8,2 si registra un'ulteriore riduzione nel ritiro igrometrico libero del calcestruzzo con cenere (*CV + SRA mix*) rispetto al *CONTROL mix*: circa 25% dopo 120 giorni di esposizione all'ambiente insaturo di vapore con UR del 50%.

La Fig. 4 mostra anche che in presenza di SRA il ritiro del calcestruzzo con cenere (*CV + SRA mix*) volante diminuisce rispetto al *CONTROL mix* di circa il 22% a 120 giorni per effetto della riduzione nella tensione superficiale dell'acqua.

La Fig. 4 mostra infine che con la combinata presenza degli additivi SF ed SRA il ritiro libero del calcestruzzo *CV + SRA/ SF mix* diminuisce del 37% rispetto al ritiro del *CONTROL mix*.

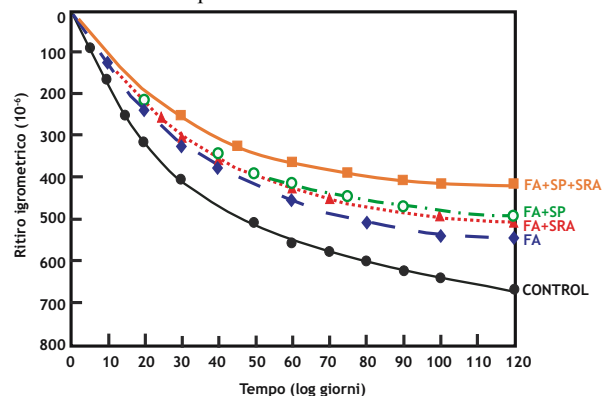


Fig. 4 - Ritiro libero dei calcestruzzi con cenere volante a confronto con il calcestruzzo senza cenere (*CONTROL mix*).

Ritiro igrometrico vincolato del calcestruzzo con CV

La Tabella 4 mostra che dopo 4 mesi di esposizione all'aria, a causa del minor ritiro vincolato, il numero e l'apertura delle fessure che si sono formate nelle lastre vincolate alle estremità diminuiscono soprattutto se la sostituzione di cemento con cenere volante è accompagnata dalla presenza del superfluidificante SF o dell'additivo SRA. In particolare non è apparsa alcuna fessura nella lastra confezionata con cenere in presenza di entrambi gli additivi (*CV + SRA/ SF mix*).

Tabella 4 - Distribuzione delle fessure in lastre di calcestruzzo esposte al ritiro igrometrico contrastato

CALCESTRUZZO	NUMERO DI FESSURE	MASSIMA APERTURA DELLE FESSURE (mm)
CONTROL Mix	7	2.50
CV Mix	6	2.15
CV+SRA Mix	3	0.42
CV+SP Mix	3	0.35
CV+SRA/SP Mix	0	—
BFA Mix	6	2.20
BFA+SRA Mix	3	0.31
BFA+SR Mix	2	0.20
BFA+SRA/SF Mix	0	—

Calcestruzzi con BFA

La Tabella 3 mostra le composizioni dei calcestruzzi con BFA a

uno slump di circa 235 mm. Il rapporto acqua/cemento che è 0,62 nel *CONTROL mix* diventa 0,54 nel *BFA mix* e 0,52 nel *BFA + SRA mix*: l'effetto è da attribuire alla favorevole sfericità delle particelle di BFA e all'assenza di carbone incombusto. In presenza di additivo superfluidificante SF (1,2 % sul materiale cementizio) l'acqua di impasto e il dosaggio di cemento diminuiscono entrambi del 30 % e il rapporto acqua/cemento rimane circa 0,52 nei calcestruzzi *BFA + SF mix* e *BFA + SF/SRA mix*. La diminuzione di acqua e cemento provocata dal superfluidificante è compensata da un pari aumento di volume dell'inerte cosicché il rapporto inerte/cemento passa da 6,5 nel *BFA mix* e nel *BFA + SRA mix* a 10,3 nei calcestruzzi *BFA + SF mix* e *BFA + SF/SRA mix*.

Ritiro igrometrico libero dei calcestruzzi con BFA

La Fig. 5 mostra il ritiro libero dei provini in condizioni di laboratorio (UR = 50% a 20 °C). La sostituzione del 20 % di cemento con BFA riduce il ritiro libero del 20% a 120 giorni rispetto a quello del *CONTROL mix*. Perciò la riduzione di ritiro nel *BFA mix* (appare essere maggiore di quello registrato nella Fig. 4 nel corrispondente calcestruzzo con cenere (*CV mix*): 20 contro 15%.

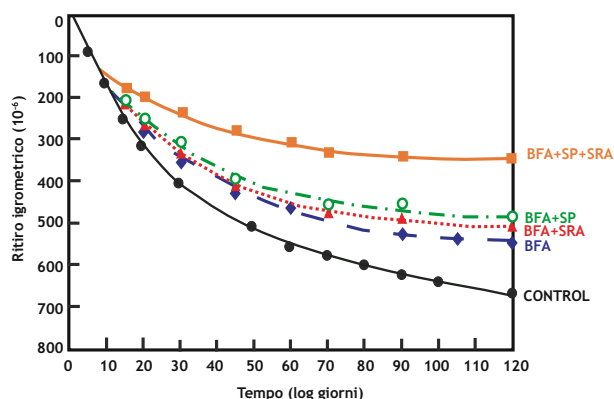


Fig. 5 - Ritiro libero dei calcestruzzi con BFA a confronto con il calcestruzzo senza cenere (*CONTROL mix*)

In presenza di SF, a causa del significativo incremento nel rapporto aggregato/cemento da 6,5 a 10,3 si registra un notevole decremento nel ritiro igrometrico del *BFA + SF mix* che a 120 giorni è 30% minore di quello del *CONTROL mix* (Fig.5).

In presenza di SRA (Fig. 5) il calcestruzzo con BFA (*BFA + SRA mix*) presenta una diminuzione nel ritiro del 27 % rispetto al calcestruzzo di riferimento senza BFA ed additivo (*CONTROL mix*) dovuto alla variazione della tensione superficiale e alla pressione capillare che fa contrarre i menischi d'acqua tra le particelle di cemento idratato (1).

Il congiunto impiego di SF ed SRA in un calcestruzzo, dove parte del cemento portland è stato sostituito da BFA (*BFA + SF/SRA mix*), provoca una riduzione del ritiro libero igrometrico del 45% dopo 120 giorni di esposizione all'aria insatura di laboratorio (UR = 50% a 20 °C) come è mostrato in Fig.5.

Ritiro igrometrico vincolato nei calcestruzzi con BFA

La Tabella 4 mostra la diminuzione di fessure per numero ed ampiezza nelle lastre vincolate confezionate con calcestruzzo con BFA rispetto al calcestruzzo senza BFA (*CONTROL mix*). L'effetto aumenta con l'impiego degli additivi SF o SRA e ancor di più se sono impiegati entrambi gli additivi: in queste condizioni la lastra lunga 8 metri e larga 400 mm appoggiata su terreno e bloccata alle estremità non mostrava alcuna fessura dopo 4 mesi di esposizione all'aria: il fenomeno è da attribuire alla riduzione del ritiro igrometrico libero ϵ_r e quindi alla tensione di trazione σ_t che diventa inferiore alla resistenza a trazione R_t del calcestruzzo:

$$\sigma_t < R_t$$

4. CONCLUSIONI

Si è trovato che si verifica una significativa riduzione (20%) dopo 4 mesi di esposizione in un ambiente con umidità relativa UR del 50% a 20°C quando il 20% del cemento portland è stato sostituito da cenere volante (CV) o cenere beneficiata (BFA).

Questo effetto è risultato significativamente migliorato se la sostituzione è accompagnata da additivi superfluidificanti (SF) e/o SRA. Il comportamento della cenere beneficiata in presenza di additivi (*BFA + SF/SRA mix*) è molto migliore di quello che si registra nel ritiro igrometrico del corrispondente calcestruzzo con cenere volante (*CV + SF/SRA mix*).

Da un punto di vista pratico la diminuzione del ritiro libero (ϵ_r), misurato in provini in laboratorio, si tramuta in una minore tensione di trazione laddove le strutture reali non sono libere di muoversi per la presenza di vincoli che ostacolano il ritiro e generano tensioni di trazioni σ_t capaci di fessurare le strutture se $\sigma_t > R_t$ dove R_t è la resistenza a trazione del calcestruzzo.

La diminuzione del ritiro libero si tramuta in una minore fessurazione per numero e ampiezza di fessure ed entrambi gli effetti mitigano significativamente il rischio di corrosione dei ferri di armatura se le strutture sono esposte in classi di esposizione aggressive come per esempio XC4, XS2 ed XF4.

5. BIBLIOGRAFIA

- 1) M. Collepari, S. Collepari, e R. Troli, "Il Nuovo Calcestruzzo" Quinta Edizione, Editore Tintoretto, Villorba, 2009
- 2) S. Tangtermsirikul, "Class C fly ash as a shrinkage reducer for cement paste", Fuel and Energy Abstracts, pp. 346-346, 1996
- 3) I. Kenji and Y. Megumi, "Fly ash mortar of autogenous shrinkage characteristics in early age", Proceedings of Cement & Concrete, Japan Cement Association, pp. 176-181, 2001.
- 4) H.K. Lee, K.M. Lee and Kim B. G., "Autogenous shrinkage of high-performance concrete containing fly ash", Magazine of Concrete Research, pp. 507-515, 2003.
- 5) J.E. Jonasson, "Shrinkage measurements of mortars with energetically modified fly ash" Samhällsbyggnad, Technical report 2005:11.
- 6) P. Termkhajornkit, T. Nawa, M. Nakai, and T. Toshiki Saito, "Effect of fly ash on autogenous shrinkage", Cement and Concrete Research, pp. 473-482, 2005.
- 7) C. D. Atis "High-Volume Fly Ash Concrete with High Strength and Low Drying Shrinkage", Journal of Materials in Civil Engineering, pp. 153-156, 2003.
- 8) P. Chindaprasirt, S. Homwuttivong and V. Sirivivatnanon, "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar", Cement and Concrete Research, pp. 1087-1092, 2004.
- 9) Y. Takada, H. Nishi, H. Quan, and H. Kasami, H, "Study of the quality improvement of fly ash concrete with durability improving admixture" pp. 411-418, 2005.
- 10) B. Ma, X. Wen, M. Wang, J. Jan and G. Jian, "Drying Shrinkage of Cement-Based Materials Under Conditions of Constant Temperature and Varying Humidity", Journal of China University of Mining and Technology, pp. 428-431, 2007.
- 11) A. Borsoi, M. Collepari, S. Collepari e E. Croce, "Cenere volante beneficiata a confronto con cenere volante normale e fumo di silice", Enco Journal N. 33, 2006.
- 12) M. Collepari, S. Collepari, J.J. Ogoumah Olagot and R. Troli "Beneficiated Fly Ash Versus Normal Fly Ash or Silica Fume", Proceedings of 9th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Warsaw (Poland), 20-25 May, pp. 1-8, (2007).

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

info@colabeton.it



engineering
per strutture
impermeabili
in calcestruzzo
armato

IGROTAC® ISOTANK

SISTEMA GLOBALE "VASCA BIANCA" PER L'IMPERMEABILIZZAZIONE DI STRUTTURE INTERRATE

IGROTAC® ISOTANK engineering

Progetto globale ISOTANK coordinato dal ns.
Ufficio Assistenza Promozione Progettuale in
collaborazione con i Responsabili Strutturisti e con
l'Impresa di Costruzione

IGROTAC® ISOTANK qualità

DURABILITÀ ed **IMPERMEABILITÀ** del calcestruzzo:

- Progettazione del Mix Design
- Prequalifica della Centrale di Betonaggio
- Controllo in Cantiere

IGROTAC® ISOTANK giunti iniettabili

- **Elementi di fessurazione**
- **Canali per riprese di getto**
- **Manicotti per tubazioni passanti**
iniettati a posteriori con speciali formulati poliacrilati,
idroespansivi, anticorrosione

IGROTAC® ISOTANK Flex Tape

Per la tenuta e la sigillatura di fessure o giunti soggetti
a forte movimento e pressioni di falda

IGROTAC® ISOTANK tecnologie di iniezione

TECNO-INJECT PU:

formulati poliuretanicamente fortemente idroespansivi

TECNO-INJECT ACRYL:

formulati acrilici, idroespansivi, anticorrosivi, resistenti, durabili



Via Sorte 2/4 - 24030 Barzana (BG) Italy - Tel. +39 035 554811 - Fax +39 035 554816
info@tecnochem.it - www.tecnochem.it

technology
↑

