2011
Quadrimestrale
Anno XVI
Numero 53

ENCO JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo

"Enco - Via delle Industrie, 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV). - Poste Italiane S.p.A. – Spedizione in abbonamento postale – 70% NE/TV"

Mario Collepardi

ACI Honorary Member

Sistema PENETRON® ADMIX

.... il Calcestruzzo Impermeabile !

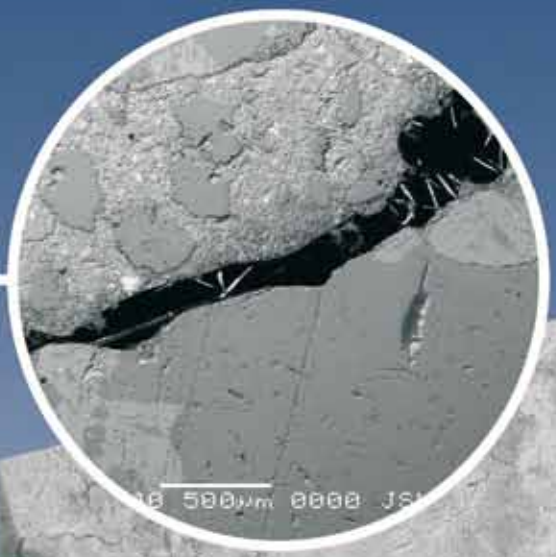
Penetron ADMIX affronta la sfida con l'acqua prima che diventi un problema, riducendo drasticamente la permeabilità del calcestruzzo e aumentando la sua durabilità "fin dal principio".

Scegliere il "**Sistema Penetron® Admix**" significa impermeabilizzare e proteggere le strutture in calcestruzzo nella fase di esecuzione dei getti, ottenendo così, molteplici benefici nella flessibilità e programmazione del cantiere stesso.

PENETRON®

INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

Sistema Integrale di Protezione del Calcestruzzo per Cristallizzazione



* Visione al microscopio elettronico della crescita cristallina all'interno di una fessurazione del calcestruzzo additivato con Penetron Admix.

La porosità, la capillarità e le fessurazioni sono sigillate tramite una capacità "attiva nel tempo" di autocicatrizzazione veicolo umidità nelle strutture interrate o idrauliche.

www.mauromorselli.it

Penetron® italia

Distributore esclusivo del sistema Penetron®

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

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

Se non lo sai lo trovi sul DEC

Cosa significa "*calcestruzzo per ostriche*"?

Cosa significa "*GBC Italia*"?

Cosa è il "carbon negative cement"?

Come si utilizzano i neutroni per studiare il cemento?

Come si calcola la deformazione viscosa quando co-esiste con il ritiro igrometrico?

Cosa significa FPC?

Quali fibre sono impiegate per produrre l'FRP?

Quali tipi di pompe si utilizzano per il trasporto del calcestruzzo fresco?

Quali sono le tecniche di restauro delle strutture in calcestruzzo degradato?

Come si produce il calcestruzzo senza ritiro?

Secondo le NTC, chi deve prescrivere la classe di consistenza e chi deve controllarla?

A queste e moltissime altre domande si trova la risposta consultando il

DEC
Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo

di Mario Collepardi

Oltre 2.500 voci in ordine alfabetico

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

Calcestruzzi
Italcementi Group

Fonisocal® e Fonisocal PLUS®

IN SINTONIA CON L'AMBIENTE

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

Calcestruzzi ha dato vita a due innovativi prodotti per la realizzazione di massetti per sottofondi alleggeriti che consentono una notevole riduzione della rumorosità ambientale e il rispetto delle normative vigenti. Derivati da processi di trasformazione certificati, gli aggregati contenuti in FONISOCAL® e FONISOCAL PLUS® abbattono 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

Fonisocal® e **Fonisocal Plus®** sono marchi registrati Calcestruzzi S.p.A.

Via S. Bernardino, 149/a - 24126 Bergamo Italia - Tel. 035 4167 111 - Fax 035 4167 046 - info@calcestruzzi.it

ENCO
Laboratorio per prove e ricerche sui materiali da costruzione

ENCO JOURNAL

ENCO
Società di Ricerca Software House

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE
Quadrimestrale - Anno XVI - Numero 53
Direttore Mario Collepardi

IL CALCESTRUZZO: QUESTO SCONOSCIUTO

Il *Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo* (***DEC***), mostrato sulla copertina di questo numero di *Enco Journal*, è un'opera che si distingue da tutti gli altri libri del settore per l'impostazione di taglio enciclopedico.

Nel ***DEC*** ci sono due tipologie di descrizioni di termini: alcuni molto brevi che rinviano ad altre voci per un eventuale approfondimento, come per esempio la voce "***Geopolimero***" che rimanda al suo inventore "***Davidovits***" il quale a sua volta, presenta un collegamento con la sua affascinante teoria sulla costruzione delle Piramidi in Egitto ("***Calcestruzzo per le Piramidi***"); in altre voci, invece, molto più complesse ed articolate, gli argomenti non sono frammentati e sono trattati in forma continua come veri e propri capitoli completi formati da numerose pagine.

Si può menzionare tra questi ultimi l'argomento indicato come ***Fisica dell'acqua nel calcestruzzo***, dove sono raccolti vari aspetti del comportamento dell'acqua dentro il materiale che ha ripercussioni pratiche considerevoli sul comportamento del calcestruzzo: la distinzione tra adsorbimento e assorbimento d'acqua, la condensazione capillare dell'acqua all'interno dei pori ancorché l'ambiente sia insaturo di umidità, la teoria della pressione idraulica per giustificare l'importanza della spaziatura delle microbolle d'aria per resistere alla formazione espansiva del ghiaccio.

Ci sono molti altri argomenti che sono trattati in forma di un capitolo omogeneo con varie voci ripetute singolarmente nel ***DEC*** in ordine alfabetico in modo che il lettore da una voce parziale possa agevolmente entrare in una trattazione più completa. Si può menzionare tra questi il ***Restauro delle strutture in calcestruzzo degradato*** o le ***Famiglie di calcestruzzo*** o ***Idratazione del cemento Portland***.

Accanto alle ultime novità del settore (calcestruzzi autocompattanti, senza ritiro igrometrico, ad alta ed altissima resistenza meccanica, riciclati, durabili a breve e lungo termine, a basso impatto ecologico per la bassa o nulla emissione di CO_2, ecc.) sono anche riportati termini di carattere commerciale ma privi di spessore scientifico come il ***Cemento osmotico*** o termini che sorprendono per la loro singolarità di impiego quale il ***Calcestruzzo per ostriche***.

Di grande interesse sono le ricostruzioni storiche dei progressi come, per esempio, quello che porta dalla ***Calce idraulica*** al ***Cemento Portland*** passando per i prodotti intermedi come il ***Cemento Romano***, il ***Cemento di Frost***, ecc.

Sono stati anche descritti gli argomenti dei vari grandi scienziati che hanno contribuito al progresso del calcestruzzo: da Abrams a Lyse, da Lavoisier a Le Chatelier, da Fick a Vicat, da Neville a Malhotra.

Per ogni termine, laddove è disponibile, viene riportata la bibliografia dell'argomento trattato affinché il lettore possa risalire alla fonte originale del lavoro: gli autori citati sono 278 e la maggior parte di essi sono italiani.

Per concludere, questo Dizionario riguarda il calcestruzzo come materiale perché è in questa forma che è poco conosciuto in quanto poco o male insegnato nelle Facoltà di Ingegneria e di Architettura e negli Istituti per Geometri. Esso non include, invece, gli aspetti della Scienza e della Tecnica delle Costruzioni applicate alle costruzioni in C.A. e C.A.P. Forse varrebbe la pena che qualcuno raccolga la sfida per scrivere un secondo Dizionario sugli aspetti strutturali e geotecnici delle opere in C.A. e C.A.P.

Mario Collepardi

In copertina: *DEC - Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo*

SOMMARIO

CARATTERISTICHE PECULIARI DEI CALCESTRUZZI PER PAVIMENTI INDUSTRIALI
di M. Collepardi e R. Troli (pag. 6)

IL CONTRIBUTO DEI MODERNI VISCOSIMETRI NELLA MESSA A PUNTO DEL MIX-DESIGN DEGLI SCC: UN ESEMPIO APPLICATIVO NELLA PREFABBRICAZIONE
di S. Tavano, C.M. Corcella ed E. Albiero (pag. 10)

LE CAUSE DI DEGRADO DEL CALCESTRUZZO E DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO
di L. Massidda (pag. 16)

EFFICACIA DEL NITRATO DI LITIO COME INIBITORE DELLA REAZIONE ESPANSIVA ALCALI-SILICE NEL CALCESTRUZZO
di M. Berra, T. Mangialardi ed A. E. Paolini (pag. 20)

CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA PER IL PONTE DELLA MUSICA A ROMA
di A. Zecchini (pag. 27)

ENCO Journal
PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE
Ponzano V.to (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

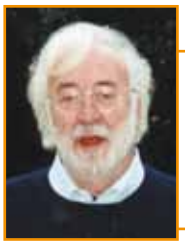
EDITORE
ENCO SRL
Ponzano V.to (TV) - Via delle Industrie, 18/20
Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237
info@encosrl.it

COMPOSIZIONE
ISABELLA CAPOGNA
ALESSANDRA GALLETTI
MARA MENEGHEL

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

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

CARATTERISTICHE PECULIARI DEI CALCESTRUZZI PER PAVIMENTI INDUSTRIALI



Mario Collepardi, Roberto Troli
Enco Srl, Engineering Concrete - Ponzano Veneto (TV)
info@encosrl.it

1. INTRODUZIONE

Le modalità esecutive e la situazione in servizio dei pavimenti industriali sono molto diverse da quelle tipiche delle altre costruzioni e ciò si tramuta, all'atto pratico, nell'impiego di un calcestruzzo peculiare per quanto attiene la composizione, la messa in opera e la stagionatura. Di seguito sono elencati alcuni aspetti che contraddistinguono il calcestruzzo per pavimenti industriali da quello per le altre costruzioni.

2. AGGREGATI PER PAVIMENTI INDUSTRIALI

Tra gli ingredienti che compongono il calcestruzzo, l'aggregato per i conglomerati destinati alla realizzazione dei pavimenti può presentare maggiori inconvenienti laddove contenga determinate impurità ancorché questi prodotti siano entro i limiti di accettazione imposti dalle norme.

A titolo di esempio, un problema frequente nelle pavimentazioni in calcestruzzo è l'emergere in superficie di elementi lignei apportati dagli aggregati impiegati per confezionare il calcestruzzo. Essendo più leggere degli altri componenti del calcestruzzo, le intrusioni lignee tendono a galleggiare e ad emergere sulla superficie del getto durante le operazioni di "staggiatura", salvo essere poi ricoperte da un leggero strato di boiacca cementizia durante le operazione di finitura della superficie. Questo difetto nascosto "sotto la pelle" del pavimento è però destinato a rivelarsi rapidamente in quanto l'elemento ligneo tende a rigonfiare in servizio in presenza di umidità, dando vita a "sbollature" locali o anche semplicemente a cedere per effetto di un carico puntuale o di una pressione localizzata (come quelle prodotte dal piedino di uno scaffale, o dalla ruota di un carrello).

Per tener conto di questo problema specifico delle pavimentazioni industriali, la commissione che ha varato l'ultima versione della norma UNI 8520 parte seconda, nella quale vengono definiti, in ambito nazionale, i limiti di accettazione di particolari sostanze e impurità negli aggregati per calcestruzzo, ha dimezzato i limiti di accettabilità per le cosiddette "particelle leggere" negli aggregati da impiegare per il confezionamento di calcestruzzi destinati a pavimenti industriali rispetto a quelli ammessi per le costruzioni ordinarie (0.25% anziché 0.50% nelle sabbie; 0.05% anziché 0.1% nelle ghiaie).

Tuttavia, anche nelle pavimentazioni realizzate facendo uso di calcestruzzi realizzati con inerti che soddisfino questi limiti più severi è possibile che si verifichino difetti come quelli sopra descritti.

Infatti, considerando, a titolo di esempio, un calcestruzzo confezionato con 1000 kg/m^3 di sabbia e 800 kg/m^3 di ghiaia, si calcola facilmente che lo 0.25% di impurità lignee ammesso nella sabbia corrisponde a ben 2.5 kg per metro cubo di calcestruzzo e lo 0.05% ammesso nella ghiaia ad altri 400 gr/m^3. Considerando un peso specifico di 500-600 kg/m^3 del legno, si arriva ad avere, tollerato dalle norme specifiche per i pavimenti, un volume di intrusioni lignee di circa 5÷6 litri per metro cubo di conglomerato fornito. Ce n'è, evidentemente, abbastanza per creare seri problemi estetici e funzionali sulla superficie del pavimento.

In definitiva per confezionare calcestruzzi realmente idonei alla realizzazione di pavimenti industriali occorre impiegare aggregati selezionati e caratterizzati da quantità di impurità vegetali ben al di sotto dei limiti consentiti dalle norme in vigore.

Ancora più problematica è la presenza di aggregati alcali-

Fig. 1 - Pavimentazione in calcestruzzo priva di strato antiusura fessurata per reazione alcali-aggregato.

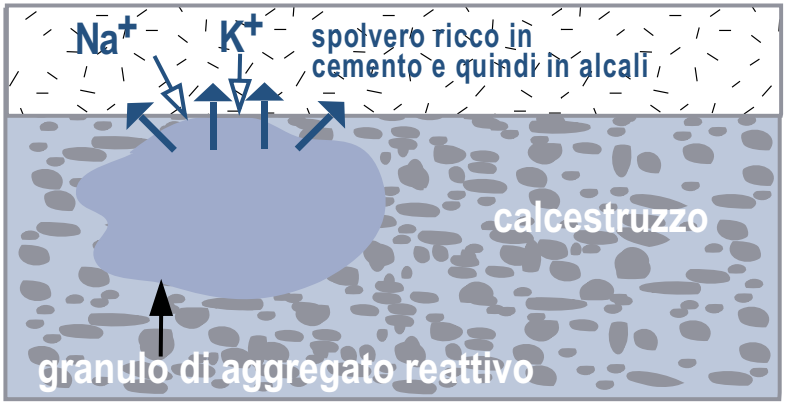


Fig. 2 - A causa dell'elevata concentrazione di alcali nello spolvero (>2 kg/m³) il granulo di aggregato reattivo nel calcestruzzo si rifongia per ASR e tende a sollevare lo spolvero (pop-out).

reattivi nel calcestruzzo per pavimenti industriali. È noto che aggregati contenenti minerali silicei amorfi o scarsamente cristallini possono reagire, a contato con gli alcali (sodio e potassio) del cemento, generando reazioni espansive. Nelle strutture ordinarie il degrado per reazione alcali-aggregato si manifesta, attraverso la formazione di profonde fessurazioni, quando il quantitativo di aggregati reattivi, ossia in grado di espandere a contatto con gli alcali, è superiore ad una certa soglia (Fig. 1). Nel caso specifico delle pavimentazioni industriali con finitura a spolvero,invece, il degrado dovuto a reazioni alcali-aggregato si manifesta più frequentemente (anche in presenza di piccole quantità di tali impurità) e assume una specifica peculiarità: gli aggregati reattivi prossimi alla superficie superiore del pavimento, venendo a contato con un calcestruzzo arricchito in cemento, per la presenza dello spolvero, e quindi di alcali, espandono provocando l'espulsione di conetti di materiale noti come pop-out che pregiudicano la funzionalità in servizio della pavimentazione esposta al traffico veicolare (Fig. 2).

Per limitare la possibilità che si generino fenomeni di pop out, soprattutto nelle aree geografiche dove più frequente è la possibilità di trovare negli inerti per calcestruzzo questi elementi reattivi, sarebbe opportuno realizzare, sia il calcestruzzo che la miscela dello spolvero, adottando un cemento a basso tenore di alcali. Questo tipo di cementi è, purtroppo, di difficile reperibilità sul mercato. Esiste, però un'altra alternativa di più facile attuazione che consiste nell'impiegare, sia per confezionare il calcestruzzo che lo spolvero, un cemento di tipo pozzolanico o d'altoforno. E' stato ampiamente dimostrato, infatti, che le pozzolane o la loppa, reagendo a loro volta con gli alcali del cemento, limitano gli effetti degradanti di una reazione alcali-aggregato.

3. TEMPI DI PRESA DEL CALCESTRUZZO

Una seconda distinzione, rispetto alle altre costruzioni tradizionali, consiste nella necessità di regolare il tempo di presa del calcestruzzo entro valori ben limitati per evitare, da una parte, che il calcestruzzo non possa essere tempestivamente steso e frattazzato in superficie se la presa è troppo rapida, e dall'altra che il calcestruzzo si conservi fresco per tempo troppo lungo con sviluppo di acqua di *bleeding* che si protrae anche dopo la frattazzatura in superficie con possibile formazione di difetti superficiali descritti nel seguito.

Per ovviare a questi inconvenienti è, innanzitutto, opportuno adottare un calcestruzzo con classe di consistenza S5 (superfluida) nel caso di pavimentazioni realizzate mediante applicazione a mano, ed una classe di consistenza S3-S4 per getti applicati con vibrostaggiatura meccanica (*laser screed*).

La scelta di una corretta classe di consistenza, soprattutto nelle applicazioni eseguite a mano, infatti, previene l'eventualità che si effettuino delle aggiunte d'acqua in cantiere le quali, oltre a penalizzare le prestazioni meccaniche complessive del calcestruzzo, esaltano i fenomeni di *bleeding* e possono creare situazioni di tempi di presa non omogenei tra zona e zona. Inoltre, se nei getti per opere diverse dalle pavimentazioni industriali l'aggiunta di piccole quantità di additivo in cantiere, all'interno dell'autobetoniera, può contribuire a risolvere situazioni di lavorabilità inadeguata della fornitura, questa operazione può risultare pericolosa nel caso delle pavimentazioni in calcestruzzo in quanto esiste il rischio concreto di non riuscire ad ottenere una dispersione uniforme dell'additivo aggiunto all'interno dell'autobetoniera, con conseguenze non prevedibili sui tempi di fratazzabilità del pavimento tra zona e zona.

Ne consegue che nelle pavimentazioni in calcestruzzo il controllo della costanza dei parametri che influiscono sulla lavorabilità e sul suo mantenimento nel tempo è estremamente importante per garantire un buon risultato e prevenire il rischio di formazione di difetti superficiali.

Ovviamente anche la scelta del cemento è di vitale importanza ai fini del conseguimento di adeguati tempi di fratazzabilità del pavimento: in linea di massima è consigliabile l'utilizzo di un cemento di classe 32.5 R in tutte le stagioni salvo ricorrere ad un cemento di classe 42.5 R nel periodo invernale, nelle zone caratterizzate da clima più rigido.

4. APPLICAZIONE DELLO SPOLVERO INDURENTE

Si è già accennato al problema del *bleeding* del calcestruzzo e alle possibili conseguenze legate ad un suo protrarsi dopo o durante le operazioni di finitura.

È noto che la risalita d'acqua sulla superficie di un getto per pavimenti dovuta al bleeding provoca un indebolimento meccanico proprio nella zona esposta al traffico e quindi alle sollecitazioni in servizio a causa dell'aumento locale del rapporto acqua/cemento (*a/c*).

Per ovviare a questo inconveniente in passato, nel getto delle pavimentazioni si impiegava un calcestruzzo a consistenza di terra umida che richiedeva però notevoli sforzi applicativi*.

Con l'avvento dei primi additivi fluidificanti è stato possibile rendere più agevole l'applicazione con calcestruzzi

* *Tali manufatti venivano spesso chiamati "battuti" a sottolineare il tipo di operazione necessaria per la loro corretta posa in opera*

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

più lavorabili senza aumentare il rapporto a/c, ma il potere fluidificante e, quindi riduttore di acqua, di tali prodotti non era ancora sufficiente ad eliminare completamente il rischio del *bleeding*. Pertanto, per sfruttare appieno le potenzialità, in termini di produttività, dell'impiego di un calcestruzzo fluido eliminando, nel contempo, le conseguenze negative del *bleeding*, venne ideata, circa trent'anni fa, la cosiddetta finitura "a spolvero" che consiste, come è noto, nel cospargere sulla superficie del getto, interessata dal *bleeding*, una miscela secca di cemento e inerti duri (Fig. 3) e nell'ottenerne l'inglobamento nel calcestruzzo mediante l'uso di macchine fratazzatrici (Fig. 4).

Fig. 3 - Semina della miscela di quarzo e cemento sulla superficie del pavimento.

Fig. 4 - Elicottero in fase di esecuzione della prima fratazzatura.

Tale stratagemma, in sostanza, consiste nell'arricchire la quantità di cemento (e di aggregati) sulla superficie del pavimento per bilanciare l'arricchimento in acqua causato dal *bleeding* e mantenere, così, inalterato il rapporto *a/c* o, addirittura, ridurlo con conseguenze benefiche sulla durezza e sulla resistenza all'usura della superficie stessa.

Con l'avvento di additivi superfluidificanti sempre più efficaci, la quantità d'acqua necessaria per realizzare calcestruzzi superfluidi (S5) è andata riducendosi e con essa, i fenomeni di *bleeding* per correggere i quali era stata introdotta la lavorazione "a spolvero". In conseguenza di ciò, in molti pavimenti in calcestruzzo odierni, non si verifica alcun fenomeno apprezzabile di *bleeding* per cui si arriva al paradosso che l'applicatore è costretto a bagnare la superficie del getto per fare in modo che questa sia in grado di "ricevere" lo spolvero.

È, pertanto, evidente che con l'evolversi della tecnologia del calcestruzzo è necessario pervenire ad un "ripensamento" delle tecniche di esecuzione e finitura delle pavimentazioni in calcestruzzo chiedendosi se sia tuttora necessario eseguire, almeno nelle pavimentazioni comuni e poco sollecitate ad usura, l'applicazione dello spolvero o se non sia, invece, sufficiente procedere alla finitura della superficie con le fratazzatrici meccaniche senza alcuna aggiunta.

5. IL CALCESTRUZZO E LE DELAMINAZIONI

L'applicazione dello spolvero indurente e la successiva frattazzatura sono operazioni che richiedono una rigorosa tempestività in relazione alla consistenza del calcestruzzo in superficie: esse non debbono essere eseguite troppo presto, né troppo tardi. Infatti, se lo spolvero viene applicato troppo tardi, su un calcestruzzo già in fase di presa, non è possibile ottenere un adeguato incorporamento dei due materiali per cui si ha la tendenza al formarsi di due strati diversi e sovrapposti che tendono facilmente a distaccarsi dando vita ad una delaminazione o "scartellamento" dello spolvero. Se, invece, l'applicazione dello spolvero viene eseguita prematuramente, ossia, su un calcestruzzo troppo fresco, l'acqua di *bleeding*, che ancora seguita a risalire dal basso, viene bloccata dallo strato di calcestruzzo superficiale in cui è stato incorporato lo spolvero indurente che, grazie alla sua impermeabilità, impedisce all'acqua di *bleeding* di fuoriuscire. Sotto tale strato di calcestruzzo e spolvero indurente si possono formare delle zone piatte lenticolari di acqua che, nel tempo, viene riassorbita dal calcestruzzo circostante con formazioni di zone estese di vuoti; a seguito anche di lievi sollecitazioni veicolari tale strato superficiale cede per la presenza del vuoto sottostante e si distacca dando vita a delaminazioni profonde che coinvolgono, cioè, anche uno strato superficiale di calcestruzzo (Fig. 5).

Si fa notare, però, che il fenomeno delle delaminazioni superficiali è più complesso e non può essere ricondotto, in tutti i casi, ad un problema di "*timing*" ossia di erronea tempistica di esecuzione. In effetti, fenomeni di delaminazione profonda si sono manifestati, in questi ultimi anni, con una frequenza molto maggiore che in passato e soprattutto a partire dall'avvento degli additivi superfluidificanti policarbossilici: questi additivi richiedono la presenza di agenti anti-schiuma nella loro formulazione per evitare la formazione di aria indesiderata in forma di macrobolle. Alcuni di questi additivi – mal formulati per un difetto di agente anti-schiuma o per la loro separazione nel tempo durante lo stoccaggio nel serbatoio – possono provocare la formazione di aria nel calcestruzzo la quale, risalendo verso la superficie superiore, rimane intrappolata sotto lo strato corticale di calcestruzzo nel quale è stato incorporato lo spolvero, con conseguente formazione di delaminazioni profonde analoghe a quelle sopra descritte.

L'esistenza di una precisa correlazione tra sviluppo di aria e alcuni fenomeni di delaminazione è stata dimostrata da indagini eseguite con microscopia ottica su sezioni verticali di carote estratte dai pavimenti interessati. Tali indagini hanno permesso di individuare una notevole concentrazione di aria nell'intorno delle superfici lungo le quali si è verificato il distacco. Da quanto sopra consegue che un calcestruzzo da impiegare per la realizzazione di pavimentazioni industriali

Fig. 5 - Scartellamento dello strato antiusura per tardiva applicazione.

deve essere caratterizzato da un basso contenuto di aria. Secondo alcune indicazioni fornite da esperienze maturate negli Stati uniti, tale contenuto non deve superare il 3%. Questo pone qualche problema nella realizzazione di piazzali esterni in zone soggette a cicli di gelo-disgelo dove, come è noto, le esigenze di durabilità del calcestruzzo imporrebbero l'impiego di conglomerati con un contenuto di aria inglobata superiore al 3% (classi di esposizione XF3 e XF4 secondo la UNI 11146).

In effetti, ancorché sia ampiamente dimostrato che la micro-aria appositamente prodotta in forma di bolle con diametro di circa 100 µm per garantire la durabilità del calcestruzzo sia tendenzialmente stabile e non tenda a risalire verso l'alto, si sono avuti casi nei quali la lavorazione superficiale prodotta dalle fratazzatrici abbia richiamato verso l'alto parte dell'aria inglobata ai fini della durabilità favorendo l'aggregamento delle micro-bolle in bolle di maggiori dimensioni con conseguenze formazione di delaminazioni. Per questo motivo il Report dell'ACI 302.1R *Guide for Concrete Floors and Slam Construction* consiglia di non utilizzare calcestruzzi con aria inglobata nei pavimenti che richiedano una finitura con frattazzatura meccanica.

6. RITIRO IGROMETRICO DEL CALCESTRUZZO

Un'altra significativa distinzione tra le pavimentazioni industriali e altre strutture convenzionali riguarda la grande estensione della superficie esposta all'aria che comporta un'elevata evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo, nella fase di presa ed indurimento, e di conseguenza, un sensibile ritiro igrometrico che può provocare la nascita di fessure e di deformazioni da imbarcamento (quest'ultime dovute al ritiro differenziale tra la parte corticale e quella inferiore della lastra).

Per ovviare a questo inconveniente, che nelle pavimentazioni appare più grave per la loro funzionalità in servizio rispetto ad altre costruzioni, si ricorre, come è noto, alla realizzazione di giunti di contrazione secondo maglie di circa 4 x 4 metri nelle due direzioni che "guidano" la formazione delle fessure e riducono le frecce dei fenomeni di imbarcamento.

Nonostante ciò, la formazione di fessure da ritiro e la perdita di planarità dovuta all'imbarcamento risultano essere tra i difetti più ricorrenti nelle pavimentazioni industriali ai quali si può, però, porre rimedio adottando un calcestruzzo caratterizzato da un basso ritiro igrometrico.

Questo risultato può essere ottenuto impiegando additivi superfluidificanti di elevata efficacia, i quali consentono di ridurre il quantitativo di acqua necessario per ottenere una data lavorabilità. Riducendo la quantità d'acqua è possibile ridurre il rapporto acqua/cemento (*a/c*), oppure, a parità di *a/c*, ridurre il dosaggio di cemento. In entrambi i casi si ottiene una riduzione del ritiro igrometrico a parità di resistenza meccanica e di lavorabilità del calcestruzzo.

Un ulteriore modo per ridurre il ritiro igrometrico del calcestruzzo, a parità delle altre caratteristiche, è rappresentato dall'impiego dei cosiddetti SRA (*Shrinkage-Reducing Admixtures*), additivi di introduzione relativamente recente in grado di ridurre del 30-50% il ritiro igrometrico se impiegati con dosaggi dell'ordine di circa 4 kg/m^3.

Fino ad oggi l'impiego di questi additivi nel settore dei pavimenti è stato piuttosto limitato a causa del costo relativamente alto che caratterizza la maggior parte dei prodotti di questo tipo presenti sul mercato. Nei pochi casi in cui se n'è fatto uso, però, sono stati ottenuti risultati estremamente interessanti con totale assenza di fessure e notevole riduzione dell'imbarcamento anche in pavimenti di basso spessore, maggiormente soggetti a questo fenomeno.

Si segnala infine la possibilità di eliminare completamente il ritiro del calcestruzzo mettendo a punto speciali conglomerati a ritiro compensato mediante l'impiego congiunto di agenti espansivi a base di ossido di calcio e di additivi SRA. In questo modo è possibile realizzare pavimentazioni prive di giunti di contrazione per 1000 m^2 in ambiente chiuso o protetto e per 600 m^2 in ambienti aperti o con forti escursioni termiche.

7. CONCLUSIONI

Il calcestruzzo destinato alle pavimentazioni industriali richiede alcuni accorgimenti che riguardano:

- la scelta di aggregati privi di impurità, in particolare di elementi lignei o alcali-reattivi;
- tempi di presa controllati e compresi entro certi limiti per evitare problemi di posa e difetti superficiali;
- contenuto di aria intrappolata o inglobata inferiore al 3%;
- additivi superfluidificanti a base policarbossilica di qualità controllata in termini di agente anti-schiuma stabile per evitare anomali e deleteri inglobamenti d'aria;
- basso ritiro igrometrico ottenuto impiegando additivi superfluidificanti di elevata efficacia e riduttori di ritiro in eventuale combinazione con agenti espansivi e per arrivare a realizzare pavimenti di 600-200 m^2 senza giunti di contrazione.

BIBLIOGRAFIA

M. Collepardi, "Il Nuovo Calcestruzzo" V Edizione, Ed. Tintoretto Villorba, 2009.

S. Collepardi, L. Coppola e R. Troli, "Pavimentazioni Industriali in Calcestruzzo", Ed. Tintoretto, Villorba, 2006.

M. Collepardi, S. Collepardi, J.J. Ogoumah Olagot, F. Simonelli e R. Troli, "Diagnosi e Restauro delle Strutture in C.A." II Edizione, Ed. Tintoretto, Villorba, 2010

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

IL CONTRIBUTO DEI MODERNI VISCOSIMETRI NELLA MESSA A PUNTO DEL MIX-DESIGN DEGLI SCC: UN ESEMPIO APPLICATIVO NELLA PREFABBRICAZIONE

Salvatore Tavano, Cataldo Matteo Corcella, Elisa Albiero*

* Addiment Italia, Medolago (BG) - MCorcella@addimentitalia.it

1. INTRODUZIONE

La principale caratteristica del calcestruzzo autocompattante è quella di compattarsi per effetto della sola forza di gravità, senza cioè l'ausilio di alcuna forza esterna.

I ben noti vantaggi derivanti dall'impiego del calcestruzzo autocompattante sono il risultato delle sue particolari proprietà di deformabilità e stabilità. Dal momento della sua prima comparsa a partire dal 1988 in Giappone e in Canada, molti sono stati i progressi nelle conoscenze delle proprietà dell'SCC sia allo stato fresco che a quello indurito. Nonostante i progressi tecnologici in questo campo però, la valutazione delle proprietà di flusso del calcestruzzo autocompattante sono ancora affidate principalmente a prove empiriche. Le ragioni sono essenzialmente dovute al fatto che misurazioni più "accurate" su calcestruzzo, quali quelle reologiche tramite opportuni viscosimetri, sono piuttosto elaborate e richiedono costose strumentazioni in rapporto ai comuni strumenti per la valutazione quali la tavola per lo slump-flow e l'imbuto a V per il V-Funnel test. Per questo motivo negli ultimi anni si fa spesso ricorso a procedure che mettono in relazione le proprietà di flusso del calcestruzzo con quelle di malte autocompattanti equivalenti analizzate mediante viscosimetri. [01-02-03]. Con queste nuove strumentazioni, Figura 1, è possibile evidenziare meglio il contributo dell'additivo sulle proprietà del calcestruzzo allo stato fresco, fattore spesso trascurato. Con l'avvento dei superfluidificanti di nuova generazione a base di policarbossilati eteri (PCE, detti anche "acrilici") infatti, sono entrati sul mercato una grande varietà di prodotti strutturalmente e/o chimicamente anche molto diversi, in grado di conferire agli impasti differenti proprietà reologiche.

Fig. 1 - Viscosimetro per paste/malte, viskomat NT.

2. REOLOGIA DELL'SCC

La reologia è la scienza che studia il flusso e la deformazione di materiali e per questo è del tutto appropriata per descrivere la lavorabilità e mobilità dei sistemi cementizi allo stato fresco.

Per un fluido Newtoniano esiste una proporzionalità tra sforzo tangenziale applicato e velocità di deformazione (1), ne deriva che anche sotto uno sforzo bassissimo il materiale fluisce.

Per questo tipo di fluidi la costante η, detta viscosità (o coefficiente di viscosità), dipende solo dalle variabili termodinamiche temperatura, pressione e concentrazione. Essa è perciò una costante che caratterizza il materiale. Esempi di sostanze newtoniane sono l'acqua, gli oli, sospensioni molto diluite, ecc.

$$\tau = \eta D \qquad (1)$$

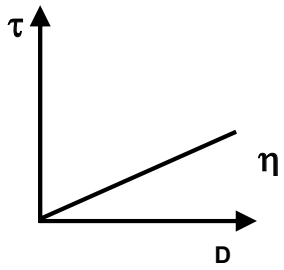


Fig. 2 - Curva di flusso di un fluido Newtoniano.

In un diagramma sforzo applicato τ velocità di deformazione D, la rappresentazione grafica (definita curva di flusso) di un fluido Newtoniano è una retta passante per l'origine.

Il calcestruzzo autocompattante, così come tutti i sistemi cementizi allo stato fresco, è però un fluido non-Newtoniano. Per questo materiale la viscosità non è più una costante, ma una funzione della velocità di deformazione D (o dello sforzo applicato τ) e del tempo (tissotropia). Tra i modelli matematici proposti per descrivere il comportamento dei calcestruzzi e malte autocompattanti quello più utilizzato, per la sua semplicità e significato intuitivo dei para-

metri, è quello di Bingham (2).

$$\tau = \eta_{pl} D + \tau_0 \qquad (2)$$

dove τ_0 rappresenta la soglia (sforzo limite) che è necessario superare affinché il materiale inizi a scorrere (intercetta all'origine), e η_{pl}, detta viscosità plastica, rappresenta la resistenza opposta dal materiale all'aumento di velocità (pendenza della curva), Figura 3.

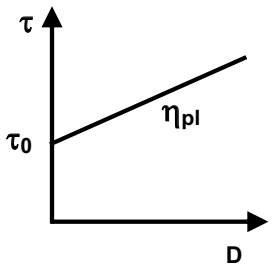


Fig. 3 - Curva di flusso di un fluido Bingham.

Con l'aiuto dei moderni viscosimetri è possibile costruire curve di flusso dalle quali estrapolare parametri relazionabili alla soglia di scorrimento e alla viscosità plastica, rispettivamente G e H.

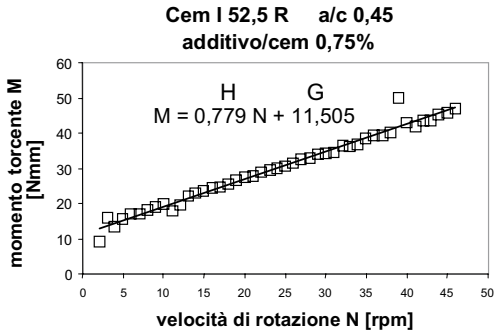


Fig. 4 - Esempio di curva di flusso sperimentale di una malta SCC.

Attraverso questo tipo di rappresentazioni si possono evidenziare le modificazioni delle proprietà di flusso al variare delle componenti del sistema.

Da un punto di vista reologico il calcestruzzo SCC differisce da un calcestruzzo tradizionale super-fluido per i bassissimi valori di soglia di scorrimento τ_0 e per i valori di viscosità plastica η_{pl} generalmente più alti, Figura 5, [04]. In un SCC è la componente tangenziale della forza di gravità che permette al calcestruzzo di fluire, quindi l'SCC non fluirà fintanto che tale componente tangenziale non supererà il valore di soglia di scorrimento.

Un valore di τ_0 basso sarà quindi necessario per assicurare un'alta deformabilità del calcestruzzo e di conseguenza una buona autocompattazione anche con pendenze minime.

Di fondamentale importanza è anche un valore appropriato di η_{pl}: un valore troppo elevato comporterebbe una resistenza troppo elevata al movimento con il risultato di un flusso estremamente lento che non porta alcun vantaggio all'autocompattazione, di contro un valore troppo basso aumenterebbe il rischio di segregazione dinamica (separazione degli aggregati più grossi durante il flusso); la viscosità plastica inoltre fornisce una indicazione estremamente utile ai fini del pompaggio (bassi valori di viscosità plastica si traducono in minori pressioni esercitate dalla pompa).

E' ormai noto quanto fondamentale sia per il confezionamento di un impasto SCC il proporzionamento dei componenti. Fattori quali il quantitativo totale di polveri, il rapporto volumetrico pasta/aggregato, la natura dell'aggregato, il tipo di filler impiegato, sono decisivi nel determinare le caratteristiche reologiche dell'impasto, Figura 6, [05].

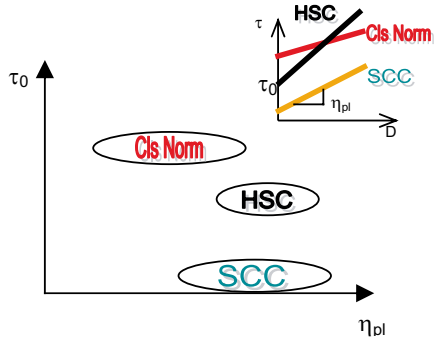


Fig. 5 - Valori relativi di soglia di scorrimento viscosità plastica per un calcestruzzo superfluido (S5), un calcestruzzo ad alte resistenze e un SCC [04].

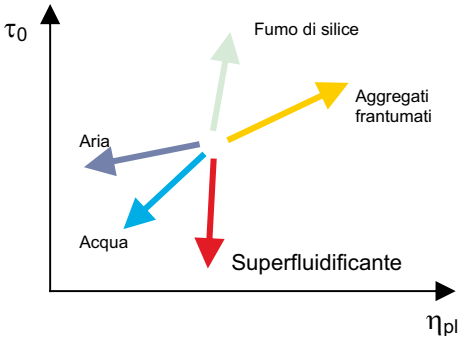


Fig. 6 - Influenza dei diversi componenti sui valori di τ_0 e η_{pl}.

Nel calcestruzzo autocompattante quindi, così come nel calcestruzzo tradizionale, è possibile, agendo sulla scelta dei componenti e sul loro proporzionamento esaltare alcune proprietà di flusso in relazione al tipo di applicazione [06].

I valori di soglia di scorrimento e viscosità plastica possono essere correlati con i valori di slump flow e V-funnel. In base a lavori condotti da numerosi ricercatori, sia in malta che direttamente in calcestruzzo, si può concludere che esiste una discreta correlazione tra viscosità plastica e V-Funnel; la correlazione tra soglia e spandimento è invece più incerta. Questo sembra essere dovuto al fatto che nel determinare il valore di spandimento non è trascurabile il contributo della viscosità plastica [07], [08], [09], [02], [03].

Come si è già detto, la caratteristica fondamentale dell'SCC è l'elevata fluidità; è però opportuno sottolineare che sebbene un calcestruzzo possa essere definito SCC secondo la norma [UNI 11040], non è affatto detto che questo soddisfi a pieno le caratteristiche di scorrevolezza ed omogeneità in tutte le situazioni applicative (getti orizzontali piuttosto che verticali, pompaggio dal basso ecc.); la reologia dell'SCC deve per così dire essere progettata in funzione della geometria della cassaforma e della disposizione e densità dell'armatura.

3. IL RUOLO DELL'ADDITIVO

L'uso di sostanze organiche nel calcestruzzo per impartire una maggiore fluidità è conosciuto fin dagli anni '30. Polimeri di sintesi come il naftalen-solfonato (PNS) e la melammina solfonata (PMS),

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

prodotti a partire dagli anni settanta, hanno costituito un notevole passo avanti rispetto alle primitive sostanze di inizio secolo, potendo raggiungere una riduzione del rapporto a/c del 15-20%. Negli anni '90 la svolta alla fluidità del calcestruzzo viene impartita dai nuovi polimeri a base di policarbossilati eteri (PCE) che oltre ad avere una maggiore capacità di riduzione d'acqua, conferiscono al calcestruzzo un più lungo mantenimento della lavorabilità senza effetti secondari di ritardo di presa.

L'interpretazione generale del funzionamento dei superfluidificanti risiede nella capacità di impedire la flocculazione dei granuli di cemento in corso di idratazione (causata da: forze di van del waals, legami chimici tra prodotti di idratazione, forze elettrostatiche tra particelle di carica opposta). Tra le ipotesi proposte per spiegare come questa deflocculazione avvenga, le più citate in letteratura sono la repulsione di tipo elettrostatico e quella di tipo sterico; con un diverso peso tra gli additivi PCE e i tradizionali polisolfonati. Mentre per i primi infatti è più importante l'effetto sterico, grazie alla presenza delle catene laterali idrofile, per i secondi è più importante l'effetto elettrostatico. E' a questa differenza nel meccanismo di funzionamento che si deve il notevole passo avanti nella tecnologia degli additivi.

3.1 La variabilità chimica dell'additivo: un aiuto al mix-design

Una caratteristica molto importante degli additivi PCE risiede inoltre nella loro ampia variabilità strutturale e/o chimica rispetto ai tradizionali additivi polisolfonati. I polimeri a base di PNS sul mercato sono tutti pressoché simili, mentre la struttura dei policarbossilati eteri è più che mai articolata, Figura 7. La capacità di dispersione da parte degli additivi PCE risiede nella loro attenta progettazione che garantisce una bilanciata distribuzione di cariche negative nella catena principale (gruppi carbossilici) e di catene laterali di natura idrofila (polieteri).

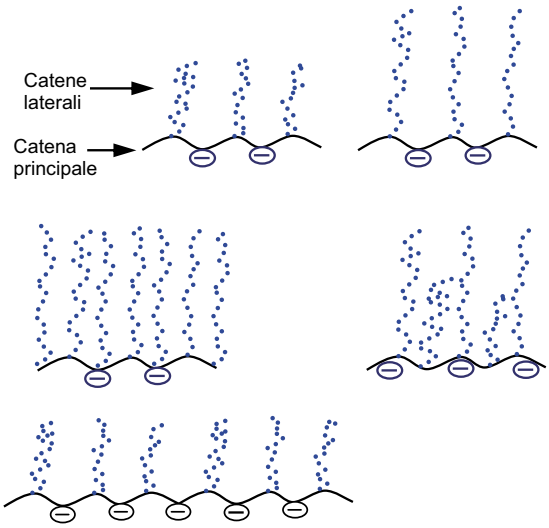


Fig. 7 - Rappresentazione schematica della variabilità strutturale e chimica degli additivi a base di PCE.

Solo dopo l'avvento di questa nuova generazione di superfluidificanti è stato possibile progettare un buon calcestruzzo SCC. Infatti miscele con elevato contenuto in fini, per essere molto fluide e lavorabili nel tempo con bassi rapporti acqua/polveri necessitano di un sistema disperdente particolarmente efficace. I policarbossilati eteri, grazie all'elevato potere disperdente nei confronti dei granuli di cemento e delle particelle di materiali fini, rispondono perfettamente a tali requisiti.

L'ampia variabilità strutturale e chimica di questi polimeri, che si traduce nella presenza sul mercato di una vasta gamma di prodotti, può essere un valido aiuto nella messa a punto del mix-design dei calcestruzzi autocompattanti.

Nella Figura 6 è messo in evidenza come il principale effetto dell'aggiunta di additivo superfluidificante sia quello di abbassare la soglia di scorrimento, altri sono i fattori che controllano la viscosità plastica il più importate dei quali è sicuramente il rapporto acqua/polveri. Nonostante questo, il peso della scelta di un tipo particolare di additivo acrilico non è del tutto trascurabile.

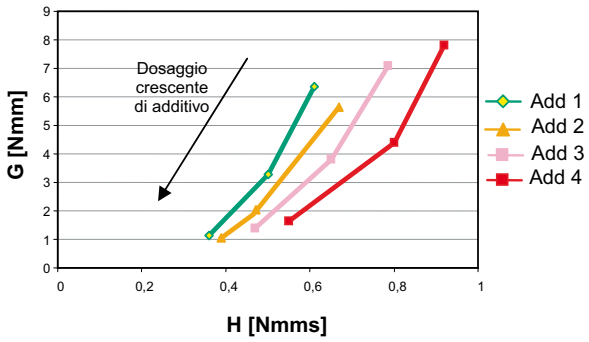


Fig. 8 - Pattern reologico dei diversi additivi. Cemento I 52.5 R, rapporto di a/c costante, dosaggio di additivo variabile.

Nella figura sono riportati i dati ottenuti analizzando mediante il viscosimetro rotazionale Viskomat NT, una malta SCC prodotta con diversi additivi della linea Compactcrete caratterizzati da una differente struttura di base. Ciascun punto è ottenuto dai valori di G e H ricavati dalle curve di flusso per dosaggi crescenti di additivo. Il rapporto acqua cemento è costante per tutte le prove. La composizione della malta SCC è stata studiata in modo da avvicinarsi alla composizione della malta idealmente ottenuta eliminando la frazione superiore ai 2 mm da una comune ricetta SCC per prefabbricazione. Come è possibile osservare a parità di "soglia di scorrimento" G, conseguita attraverso variazioni del dosaggio di additivo, i diversi additivi conferiscono agli impasti differenti valori di "viscosità plastica" H. Cambiando tipo di cemento si è inoltre osservato che la posizione relativa delle curve rimane grossomodo invariata. Tali differenze quindi sono relazionabili alla struttura del polimero, in particolare alla lunghezza della catena principale nonché alla lunghezza delle catene laterali, come evidenziato da diversi autori [10] [11]. Di seguito sono riportati i risultati di prove condotte in calcestruzzo la cui composizione è indicata in tabella 1. Il dosaggio di additivo è stato aggiustato per avere uno stesso valore di spandimento. Come è possibile osservare nella tabella 2, la maggiore viscosità plastica conferita dal Add. 4 si esplica in valori di svuotamento del V-funnel più alti se comparati a quelli ottenuti con l'Add. 1, confermando, se pur attraverso prove empiriche, quanto osservato su malta con il viscosimetro.

Tabella 1 - Composizione del calcestruzzo SCC

Componenti	kg/m³
Cem I 52.5 R	440
Filler $CaCO_3$	90
Acqua	190
Sabbia	900
Ghiaino	820

Tabella 2 - Influenza del tipo di additivo sulla reologia del calcestruzzo

Additivo	Slump flow	V-funnel
Add. 4	690 mm	11 s
Add. 1	690 mm	8 s

Da quanto detto finora, risulta chiaro che considerare il superfluidificante come quell'ingrediente la cui unica funzione è quella di conferire all'impasto una determinata lavorabilità, normalmente valutata mediante lo spandimento su tavola, è quantomeno riduttivo. La sua influenza sulla reologia dell'impasto deve essere quindi opportunamente valutata.

4. ESEMPIO APPLICATIVO

Questo tipo di approccio è stato applicato con successo, nella messa a punto e l'ottimizzazione della ricetta di un calcestruzzo autocompattante per la realizzazione di tegoli di copertura prefabbricati.

Le caratteristiche di questi elementi sono (Figg. 9-10-11):

- forma alare;
- spessori molto sottili (pari a 11, 7 e 5 cm);
- elevata densità di armature;
- intradosso a vista con una finitura liscia da controcassero metallico;
- resistenza a compressione minima a 16 ore pari a 30 N/mm^2;
- R_{ck} 50.

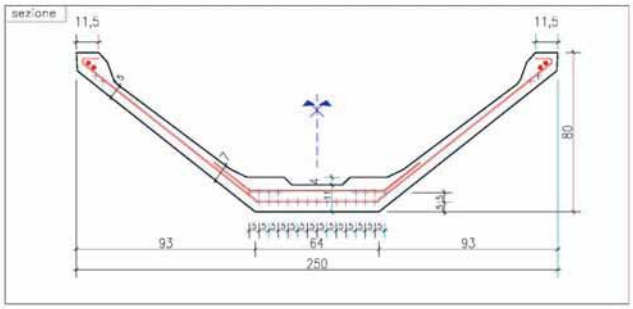


Fig. 9 - Sezione tipo del tegolo.

Fig. 10 - Disposizione delle armature.

Fig. 11 - Fase di apertura del controcassero.

Le difficoltà nella realizzazione di questa struttura sono principalmente legate alla modalità di messa in opera che prevede il getto da un'ala e il successivo riempimento del cassero per risalita. Di conseguenza le caratteristiche reologiche del calcestruzzo autocompattante devono essere tali da consentire il riempimento completo ed omogeneo del cassero.

Esperienze Addiment hanno evidenziato che questo risultato è più facilmente raggiungibile allorquando il calcestruzzo è caratterizzato da valori di viscosità plastica modesti.

Nella pratica comune (Figura 6) questo risultato può essere conseguito o con la scelta di un alto rapporto acqua/polveri (pari a circa 1), o con l'utilizzo di aggregati tondi in luogo dei frantumati o con l'introduzione di aria o infine, riducendo quanto possibile il quantitativo di filler.

Nel caso specifico però i seguenti fattori:

- necessità del cliente di non eccedere con il quantitativo di cemento e quindi di acqua al metro cubo (R_{ck} 55);
- disponibilità di soli aggregati frantumati;
- impossibilità di introdurre aria per non pregiudicare le resistenze meccaniche;
- impossibilità di ridurre il filler oltre i 145 kg al metro cubo per non generare segregazione statica;

avrebbero contribuito a produrre un calcestruzzo con elevata viscosità plastica. La valutazione dell'influenza dell'additivo sulla reologia dell'impasto è risultata quindi, di grande importanza.

Tabella 3 - Mix-design del calcestruzzo impiegato

Componenti	
Cemento II/A-LL 42.5 R	360 kg/m^3
Filler calcareo	145 kg/m^3
Sabbia 0-5	930 kg/m^3
Pietrisco 6-16	810 kg/m^3
Acqua	173 kg/m^3
Additivo 2: Compactcrete 39/P	6,6 kg/m^3
A/P in vol	0,86
A/C	0,48
Q.tà polveri	598 kg/m^3

Facendo riferimento alla Figura 8, tra gli additivi della linea Compactcrete i più indicati allo scopo erano quindi l'Add 1 o l'Add 2 i quali avrebbero contribuito a tenere bassi valori i di viscosità plastica.

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

A seguito di prove di laboratorio, volte a verificare la compatibilità cemento-additivo, l'additivo più indicato è stato l'Add 2.

Di seguito è riportata la ricetta impiegata (Tabella 3) e i risultati di verifica ottenuti in cantiere (Tabella 4). Come è possibile notare nonostante il basso valore del rapporto a/p, il valore di svuotamento al V-funnel è relativamente basso.

Tabella 4 - Caratteristiche allo stato fresco

Prova di verifica	
Slump flow	700 mm
T_{50}	3 sec.
V-funnel	8 sec.
L-box	0,95

Tabella 5 - Resistenze meccaniche medie a compressione con stagionatura a vapore e a 20°C

	N/mm² con vapore	N/mm² t=20°
16 ore	33	24
1 giorno	37	30
7 giorni	42	45
28 giorni	55	60

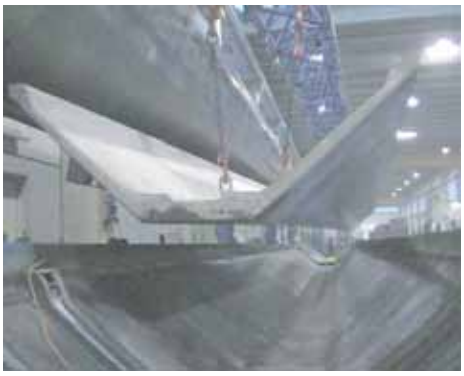


Fig. 12 - Elemento finito.

Fig. 13 - Vista della superficie inferiore dell'ala.

5. CONCLUSIONI

L'evoluzione del calcestruzzo ed il suo trasformarsi nel corso degli anni da materiale povero a materiale specialistico, tecnologicamente sempre più avanzato, comporta che anche il suo studio e la sua caratterizzazione siano più approfondite. La caratteristica fondamentale dell'SCC, l'elevata fluidità, deve essere definita con maggior rigore. Terminologie come fluido, rigido, scorrevole, viscoso, ecc. anche se comunemente utilizzate dagli operatori del settore, risultano essere inadeguate in quanto incomplete e del tutto soggettive. L'approccio più corretto quindi, risulta essere quello reologico mediante l'impiego di viscosimetri rotazionali. Per le particolari proprietà di flusso di questi calcestruzzi o degli equivalenti sistemi semplificati (malte autocompattanti), l'impiego dei moderni viscosimetri ha permesso di valutare le differenze sulle proprietà di flusso indotte da un componente quantitativamente minore ma importante quale l'additivo.

L'influenza di questo componente sulla viscosità plastica dell'impasto, sebbene meno importante rispetto a parametri quali: rapporto acqua/polveri, tipo di cemento, natura di filler e di aggregato, gioca spesso un ruolo non trascurabile. La scelta del tipo di additivo dovrebbe in particolare essere presa in considerazione in quelle situazioni in cui è limitato l'intervento sui suddetti parametri. Nella realtà infatti il ruolo dell'additivo è ancora più importante di quanto possa apparire. Ciò perché i parametri quali il tipo di cemento, la natura del filler e dell'aggregato sono molto spesso, per ragioni tecnico-economiche, delle costanti che l'utente non desidera cambiare.

In questo viene in aiuto l'ampia variabilità chimica e strutturale dei PCE; la vasta gamma di prodotti, risolve anche un problema non troppo infrequente quando si lavora con gli additivi chimici: la compatibilità cemento/additivo [12]. Un'ampia gamma di prodotti garantisce la realizzazione di un SCC anche in situazioni, da un punto di vista chimico, particolarmente difficili.

E' stato mostrato un esempio nella prefabbricazione in cui l'ottenimento di valori moderati di viscosità plastica, particolarmente indicati per questo tipo di struttura, è stato possibile grazie ad una scelta oculata dell'additivo superfluidificante.

BIBLIOGRAFIA

[01] L. NACKBAUR, D. KAPLAN, G. MARCHESE: "Extension of concrete equivalent mortar (CEM) method to Self-Compacting Concrete", Seventh CANMET/ACI, pp. 333-3346, Berlin 2003.

[02] A. F. GHEZAL, K. H. KHAYAT: "Pseudoplastic and thixotropic properties of SCC equivalent mortar made with various admixtures", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 69-83.

[03] H.E. GRAM, P. PÏÏPARINEM: "Study of material properties of SCC by mortar test", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 305-310.

[04] O.H. WALLEVIK: Course on rheology, The Iceland Building Research institute, 2000.

[05] J. CARLSWÄRD: M. EMBORG, S. UTSI, P. ÖBERG: "Effect of constituents on the workability and rheology of SCC", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 143-153.

[06] J. WALRAVEN: "Structural aspects of SCC", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 15-22.

[07] J. CARLSWÄRD, M. EMBORG, S. UTSI, P. ÖBERG: "Relation between workability and rheological parameters", 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 154-164.

[08] I. NIELSSON, O.H. WALLEVIK: "Rheological evaluation of some empirical test methods –preliminary results-, 3rd Int. Symposium on SCC, 2003, Reykjavik, Ed. By O. Wallevik and I. Nielsson, pp 58-68.

[09] S.KAKUTA, T. BABA, Y. UEKI, T. NAGABUCHI: "Rheological estimation of self-compacting grout mortar", Sixth CANMET/ACI, pp. 169-180, Nice 2000.

[10] S. GRZESZCYK, M. SUDOL: "Effect of the chemical structure of superplasticizers upon the rheological properties of cement pastes", Seventh CANMET/ACI, pp. 363-377, Berlin 2003.

[11] E. SAKAI, D. ATARASHI, A. KAWAKAMI, M. DAIMON: "Influence of molecular structure of comb-type superplasticizers and inorganic electrolites on the dispersion mechanisms of limestone powder", Seventh CANMET/ACI, pp. 381-392, Berlin 2003.

[12] I. SHOBER, U. MÄDER: "Compatibility of polycarboxylate superplasticizers with cements and cements blends", Seventh CANMET/ACI, pp. 453-468, Berlin 2003.

A proposito di prestazione termica

longrine +33 (0)4 90 14 48 48 - (10547 - 07/10)

CHRYSO®Flexò

L'evoluzione della normativa sul contenimento dei consumi energetici degli edifici impone importanti adeguamenti alle tecnologie produttive.
Con 65 anni di esperienza maturata nell'ambito dei materiali da costruzione, **CHRYSO** propone oggi **CHRYSO®Flexò**, una innovativa tecnologia per il mercato della prefabbricazione, che permette di realizzare pannelli a taglio termico integrale con la migliore prestazione termica.
La soluzione **CHRYSO** comprende:

- semplici connettori, facili da installare, che assicurano una corretta ripartizione dei carichi. Grazie alla loro matrice sintetica, non inducono ponti termici consentendo la libera dilatazione degli strati del pannello dovuta alle variazioni di temperatura
- un programma di calcolo dedicato che realizza: il dimensionamento e disposizione inserti **CHRYSO® Flexò** di ciascun pannello, il calcolo del coefficiente di trasmittanza con metodo di calcolo certificato, la scheda base del pannello con proposta di armature di rinforzo strutturale. Questo strumento permette con estrema semplicità di individuare la prestazione termica desiderata in funzione delle qualità dei materiali isolanti e di ottenere il miglior compromesso tra costi e prestazioni.

CHRYSO: Abbiamo le soluzioni per costruire il futuro che immaginate.

CHRYSO ITALIA SPA - Via Madonna - 24040 Lallio-Bergamo - ITALIA - Tel.: +39 035 69 33 31 - Fax: +39 035 69 36 84

CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

www.chryso.com

LE CAUSE DI DEGRADO DEL CALCESTRUZZO E DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Luigi Massidda

Università di Cagliari - massidda@dicm.unica.it

DURABILITA' DEI MANUFATTI CEMENTIZI

Con il termine durabilità (*durevolezza*) si intende la capacità di un materiale di durare nel tempo, di resistere cioè ai differenti fattori che ne possono promuovere il degrado mantenendo inalterate le sue caratteristiche prestazionali.

I costi economici associati a una mancanza di durabilità di un'opera in calcestruzzo possono essere rilevanti e ricadono essenzialmente sul proprietario cui spetta l'onere degli interventi di conservazione di una struttura degradata qualora voglia mantenerla in servizio. Il Committente è quindi il principale beneficiario della corretta realizzazione di un manufatto durevole, i cui maggiori costi in fase di realizzazione sono comunque nettamente inferiori a quelli diretti di restauro e alle perdite economiche indirette connesse alla mancata utilizzazione dell'opera.

Le parti interessate alla produzione di un calcestruzzo durevole non si limitano tuttavia alla sola Committenza.

Il Progettista ha infatti la responsabilità diretta della progettazione corretta dell'opera che non si limita alle caratteristiche meccaniche conseguite dai materiali nella struttura, ma deve anche possedere requisiti di durabilità in relazione all'ambiente cui è esposta nella sua vita in servizio. Queste responsabilità richiamate in modo specifico dalla UNI 9858 e dalle successive UNI EN 206/1 e UNI 11104 impongono il rispetto dalle Linee Guida emanate dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per la prescrizione di un calcestruzzo durevole. Altre parti interessate sono il Direttore dei lavori e l'Impresa cui spetta l'onere della realizzazione dell'opera secondo le specifiche del progetto per quanto attiene la scelta dei materiali, il mix design e le fasi critiche di miscelazione, posa e stagionatura del calcestruzzo in opera.

Se viene impiegato calcestruzzo preconfezionato alcune responsabiltà sono del produttore del calcestruzzo che deve garantire non solo i valori di Rck prescritti, ma anche i requisiti minimi indicati nelle Linee Guida per le varie classi di esposizione ambientale.

DEGRADO DEL CALCESTRUZZO

Le cause del degrado possono essere interne al manufatto o riconducibili ad interazioni con l'ambiente esterno.

Le cause interne dipendono essenzialmente da:
- una cattiva progettazione del manufatto;
- non corretta posa in opera;
- inadeguati processi di "*curing*".

Le cause esterne possono essere di carattere meccanico, fisico o chimico.

Cause meccaniche:
- lesioni indotte da sollecitazioni meccaniche in servizio (*assestamenti, sovraccarichi, carichi ciclici*);
- microfessurazione indotta da variazioni termo-igrometriche (*dilatazione, ritiro*);
- formazione di ghiaccio nella matrice cementizia e negli inerti (*gelività*).

Sollecitazioni indotte da stress termici

Le reazioni di idratazione delle paste cementizie innalzano la temperatura del calcestruzzo che tenderà ad aumentare il proprio volume (specie nel nocciolo della struttura). La differenza tra la temperatura registrata all'interno delle strutture e la temperatura esterna provoca stress termici quando tale differenza supera i 20-25°C. Per superiori valori di ΔT, il calcestruzzo, contrastato nella sua tendenza a espandersi da vincoli interni (*armatura*), e da vincoli esterni, (come ad esempio una platea di fondazione già *matura* e l'elemento strutturale appena gettato con il quale va a contatto), subisce sollecitazioni meccaniche non trascurabili in grado cioè di generare lesioni visibili al momento della rimozione dei casseri o dopo pochi giorni di maturazione quando la superficie si mette in equilibrio con l'ambiente esterno.

Le sollecitazioni meccaniche sono direttamente proporzionali alla deformazione relativa ε ($\Delta l/lo$) che dipende a sua volta dal coefficiente di dilatazione α del materiale e dal valore di ΔT secondo la legge:

$$\boldsymbol{\varepsilon = \alpha \Delta T}$$

tenendo conto della legge di Hooke: $\boldsymbol{\sigma = E\varepsilon}$, lo stress indotto dalla dilatazione termica sarà:

$$\boldsymbol{\sigma = E\alpha\Delta T}$$

I valori di σ risultanti sono spesso tali da superare la resistenza a trazione del materiale e provocare lesioni anche macroscopiche.

Fessure da Ritiro (plastico e igrometrico)

Sono entrambe associate alla variazione dimensionale del manufatto associata alla perdita d'acqua per evaporazione (1).

Il *ritiro plastico* si manifesta principalmente a poche ore dal getto e, soprattutto, in strutture dove il rapporto superficie/volume è alto e dove maggiore sarà la probabilità di evaporazione dell'acqua. Il ritiro plastico è, quindi, causato da una eccessiva perdita superficiale di acqua. Per contrastare il ritiro plastico è assolutamente indispensabile tenere bagnate le strutture per almeno 3 giorni dal momento del getto.

Il *ritiro igrometrico* (o *idraulico*), si manifesta lentamente nel tempo nel manufatto indurito ed è causato da una lenta perdita di acqua nel calcestruzzo. Perché questo fenomeno si verifichi è sufficiente che l'umidità relativa dell'ambiente in cui si trova il manufatto scenda al disotto del 95%. Tutte le strutture non sommerse sono quindi potenzial-

Fig. 1 - Fessure da ritiro igrometrico su un muro di calcestruzzo.

mente interessate dal fenomeno.

Per contrastare il ritiro è opportuno ridurre il rapporto a/c, aumentare il rapporto aggregato/cemento e, soprattutto, bagnare costantemente l'opera soprattutto nei primi giorni di stagionatura.

La gelività (cicli di gelo e disgelo)

Il degrado per gelività, è legato al fatto che l'acqua, nel passaggio dallo stato liquido a quello solido, aumenta il proprio volume di circa il 9% e congelando esercita forti pressioni disgiungenti entro la matrice dei materiali porosi.

L'acqua può provenire dalla superficie o essere presente nella struttura del calcestruzzo soprattutto in manufatti confezionati con alto rapporto a/c. Se i cicli di gelo e disgelo si ripetono, ne risulta un marcato deterioramento, che si evidenzia in genere uno sbriociolamento del calcestruzzo in superficie.

L'approccio di *Everett* (2) consente di valutare la pressione di cristallizzazione ΔP che si sviluppa all'interno di matrici porose caratterizzate da una distribuzione porosimetrica monodimensionale (o assai prossima ad essa) con raggio caratteristico *r*. γ rappresenta la tensione superficiale.

$$\Delta P = 2\gamma\ (1/r)$$

DEGRADO PER GELIVITA'

Il degrado dovuto al congelamento è maggiore nei materiali aventi un diametro di pori dell'ordine di grandezza compresa nell'intervallo (1-3 µm): tale diametro viene definito *diametro critico*.

I pori di dimensioni molto più piccole (< 0,1 µm) sono in effetti poco accessibili all'acqua e quelli di diametro molto grande, se interconnessi, facilitano un più rapido drenaggio, riducendo la possibilità che insorgano tensioni dannose.

COME CONTRASTARE LA GELIVITA'

La presenza di una rete di macrovuoti con opportuna spaziatura (100-300 µm) "sovrapposta" ad una rete di pori di minore dimensione (0,1-10 µm) apporta notevoli benefici sulla resistenza al gelo in quanto consente che le sovrapressioni siano opportunamente accomodate dalla matrice. NeIla tecnologia del calcestruzzo il miglioramento della durabilità alla azione del gelo della microstruttura porosa attraverso l'uso di *additivi aeranti* che producono vuoti in misura di circa il 5% del volume del manufatto (3).

Affinchè tale approccio sia realmente efficace le bolle devono distribuirsi nel volume della matrice secondo una spaziatura ottimale: il raggio di influenza di una bolla sferica deve cioè sovrapporsi a quello delle bolle contigue.

FATTORI AMBIENTALI DI DEGRADO

Le strutture in calcestruzzo e calcestruzzo armato sono a contatto con diversi agenti chimici presenti nell'ambiente con cui sono a contatto, che possono risultare aggressivi nei loro confronti:

Nell'aria:	CO_2, SO_2, NO_x
Nell'acqua e nel terreno:	Cl^-, SO_4^{--}, NH_4^+, CO_2, e acidi di differente natura
Nell'acqua di mare:	Cl^-, SO_4^{--}, Mg^{++}

ACCESSO DELL'ACQUA E DEGLI AGENTI AGGRESSIVI

I meccanismi attraverso cui gli agenti aggressivi veicolati dall'acqua possono penetrare all'interno dei manufatti cementizi sono diversi e possono a seconda delle condizioni essere attivi isolatamente o anche simultaneamente. Fra essi i più importanti sono la permeabilità, la diffusività e la capillarità.

Permeabilità

La profondità di penetrazione dei differenti agenti aggressivi dipende essenzialmente dalla permeabilità del conglomerato.

Questa proprietà è in stretta relazione con la microstruttura porosa del cemento indurito, a sua volta legata in modo critico al rapporto a/c utilizzato, al grado di idratazione e alle condizioni di maturazione. Un calcestruzzo confezionato con basso rapporto a/c se correttamente maturato, consente di avere valori di permeabilità piuttosto bassi dell'ordine di 10^{-13} m/s che tuttavia possono aumentare anche di di 4 ordini di grandezza se lasciato essiccare dopo il getto (4).

Il flusso di un liquido entro un solido poroso contenente pori di piccola dimensione come quelli esistenti in una matrice cementizia può essere in prima approssimazione considerato laminare e obbedire quindi alla legge di Darcy:

$$dq/dt = K\ (\Delta HA/L\mu)$$

dove dq/dt è la velocità di flusso nella direzione di permeazione, K il coefficiente di permeabilità (m/s), ΔH è il gradiente di pressione nella direzione del flusso, A l'area della sezione interessata, μ il coefficiente di viscosità i cui valori dipendono dalla temperatura e in pori piccoli, dalla loro dimensione.

Diffusività

Il meccanismo di trasporto di atomi, molecole, ioni entro il calcestruzzo dipendente dalla differenza di concentrazione delle varie specie nella fase liquida a contatto è governata dalle leggi di Fick.

La prima legge, che si riferisce allo stato stazionario è la seguente:

$$P = D\ (dc/dx)$$

dove P è il flusso nella direzione x, D la diffusività (m^2/s), dc/dx è il gradiente concentrazione.

Capillarità

Una superficie di calcestruzzo indurita se non è satura d'acqua può assorbire acqua dall'ambiente a contatto anche senza che ci sia un vero e proprio battente liquido attraverso fenomeni di capillarità. Il processo dipende dalla radice quadrata del tempo e da una costante del materiale secondo la semplice legge:

$$x = S\sqrt{t}$$

dove S = sorptivity ($m/s^{0,5}$) il cui valore è strettamente legato alla porosità del calcestruzzo e quindi alla sua qualità, t = tempo.

DILAVAMENTO (ATTACCO ACIDO)

Consiste in una azione chimico-fisica per cui la pasta cementizia può essere privata dei prodotti solubili in acqua.

La presenza di *acidi* di qualsiasi natura rende l'azione dilavante particolarmente pericolosa.

Anche le *acque molto pure* come quelle derivanti dallo scioglimento dei ghiacci, ricche di CO_2 e povere di sali possono essere pericolose.

In questo caso si forma acido carbonico (H_2CO_3) e il pH scende sotto 6.

Inizialmente si ha carbonatazione della calce libera che viene poi solubilizzata come bicarbonato:

$$Ca(OH)_2 + H_2CO_3 = CaCO_3 + H_2O$$
$$CaCO_3 + H_2CO_3 = Ca(HCO_3)_2$$

Il *cloruro di calcio* abbondentemente utilizzato come agente disgelante nelle strade e autostrade può contribuire al dilavamento secondo la reazione che produce un ossicloruro di calcio piuttosto solubile:

$$3Ca(OH)_2 + CaCl_2 + 12H_2O = 3CaO\ CaCl_2\ 15H_2O\ \text{(solubile)}$$

Tutti gli acidi inorganici forti come HCl, HNO_3 e H_2SO_4 distruggono rapidamente i manufatti cementizi in quanto agiscono attaccando la fase idrosilicatica C-S-H.

I sali di magnesio presenti in abbondanza in acqua di mare agiscono sostituendosi allo ione calcio non solo del $Ca(OH)_2$, ma anche degli idrosilicati formando composti incoerenti e privi di proprietà leganti.

ATTACCO SOLFATICO

Consiste nella reazione fra lo ione solfato $SO_4^=$ e gli alluminati, la calce libera e gli idrosilicati presenti nella matrice cementizia indurita.

Le reazioni sono:

$$Ca(OH)_2 + SO_4^= + H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O\ \text{(gesso)} + 2OH^-$$
$$C\text{-}S\text{-}H + SO_4^= + H_2O = CaSO_4 \cdot 2H_2O\ \text{(gesso)} + SH\ \text{(silice idrata)}$$

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

$C\text{-}A\text{-}H + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + H_2O = C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (ettringite)

la reazione di formazione dell'ettringite avviene con forte aumento di volume che, se avviene quando il calcestruzzo è indurito, provoca rigonfiamenti, delaminazione e disgregazione dei manufatti. Come è noto infatti, il gesso è sempre presente nel cemento in quanto è aggiunto nella fase di macinazione del clinker come regolatore della presa degli alluminati, altrimenti troppo rapida. In queste condizioni però la formazione dell'ettringite è immediata (*EEF Early Ettringite Formation*) e avviene nella fase in cui l'impasto è ancora plastico e quindi in grado di deformarsi liberamente.

Quando lo ione solfato proviene dall'esterno, venendo veicolato dall'acqua e dai terreni entro i pori capillari della matrice cementizia indurita, la formazione dell'ettringite è più lenta (*DEF Delayed Ettringite Formation*) e le tensioni provocate distruggono la superficie dei manufatti a contatto con l'agente aggressivo (5).

ATTACCO SOLFATICO IN CLIMI FREDDI

In presenza di particolari condizioni climatiche (bassa temperatura <5°C ed elevata umidità relativa >95%) ed in presenza di $CaCO_3$ l'attacco solfatico consiste può dar luogo a formazione di thaumasite secondo la reazione:

$$C\text{-}S\text{-}H + CaSO_4 \cdot 2H_2O + H_2O + CaCO_3 =$$
$$CaSiO_3 \cdot CaSO_4 \cdot CaCO_3 \cdot 15H_2O \text{ (thaumasite)}$$

Questa reazione è ancora più pericolosa di quella che dà luogo alla formazione dell'ettringite, in quanto l'attacco avviene nei confronti degli idrosilicati C-S-H da cui essenzialmente dipendono le caratteristiche meccaniche e di adesione delle paste cementizie. L'effetto che si produce è particolarmente grave e si manifesta come un vero e proprio spappolamento dei manufatti (6).

REAZIONE ALCALI-AGGREGATO

Questo tipo di attacco noto come *ASR* (*Alcali-Silica-Reaction*) riguarda gli aggregati che contengono una particolare forma di silice che reagisce con gli alcali (ioni Na+ e K+) presenti dal cemento (come componenti dalle frazioni argillose della carica) o anche provenienti dall'esterno in particolare per l'utilizzo di NaCl in funzione di agente disgelante.

Na_2O e K_2O si idratano formando NaOH e KOH in grado di combinarsi con la SiO_2 amorfa o poco cristallina (es.opale).

La reazione produce silicati di sodio o di potassio poco cristallizzati che attraverso processi osmotici acquisiscono acqua con notevoli effetti espansivi.

L'effetto si manifesta sulla superficie dei getti a distanza di anni e si presenta con microfessurazioni da cui emergono prodotti in forma gelatinosa biancastra o i caratteristici sollevamenti di piccoli coni di calcestruzzo (*pop out*) (7).

In Italia questo tipo di attacco non è frequente sia per l'impiego di aggregati di buona qualità, che per il largo utilizzo di cementi di miscela di tipo pozzolanico o d'altoforno che contrastano efficacemente la *ASR*.

DEGRADO DEL CALCESTRUZZO ARMATO

I fenomeni di degrado finora descritti riguardono in modo esclusivo il calcestruzzo. Quando, come peraltro avviene generalmente, sono presenti barre di acciaio di rinforzo, si possono verificare altre forme di degrado dovute alla corrosione del metallo.

Esse si manifestano essenzialmente per il fatto che i prodotti della corrosione del ferro, ossidi e idrossidi di differente formula chimica genericamente definiti *ruggine*, occupano un volume più grande del metallo non corroso. Si generano così pesanti azioni espansive in grado fessurare il calcestruzzo (copriferro) a contatto con il metallo e consentire in questo modo un più agevole accesso dell'acqua e dei diversi agenti aggressivi. L'acciaio non più protetto si corroderà con maggiore velocità riducendo la sezione delle barre che in taluni casi può pregiudicare la stabilità statica dell'intera struttura.

PASSIVAZIONE DEL FERRO NEL CALCESTRUZZO

I processi corrosivi dei metalli sono di carattere essenzialmente elettrochimico: si formano cioè delle vere e proprie pile in cui una parte del metallo funge da anodo e quindi manda ioni in soluzione corrodendosi, un'altra funge da catodo ed è protetta. Come in tutte le pile perchè il sistema funzioni è tuttavia necessaria la presenza simultanea di tutti i componenti: anodo, catodo, conduttore metallico e conduttore di seconda specie. Quest'ultimo componente è costituito nel calcestruzzo armato dalla presenza di una soluzione acquosa più o meno ricca di ioni. La termodinamica del processo è inoltre dipendente in modo critico dal pH dell'ambiente. In ambiente fortemente basico infatti, si creano le condizioni perchè il processa conduca alla formazione di un ossido di piccolo spessore e fortemente aderente al metallo che esercita nei suoi confronti un ruolo protettivo (passivazione del ferro).

I valori di pH di una pasta di cemento indurita possono variare da circa 12,5 (soluzione satura di calce) a13,5 (se nel cemento sono presenti sostanze alcaline), per cui in condizioni normali sussistono le condizioni perchè si formi il film di ossido passivante.

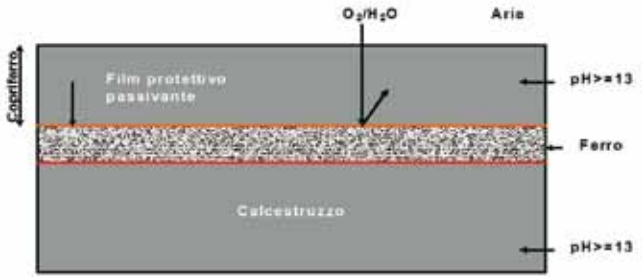


Fig. 2 - Formazione del film passivo.

Questa condizione può essere tuttavia alterata da due tipi di attacco in grado di distruggere l'ossido protettivo e innescare la corrosione: carbonatazione e attacco da cloruri.

ATTACCO DELLA CO_2 (CARBONATAZIONE)

La CO_2 è presente in atmosfera in tenori compresi fra 0,04% e 0,2% in relazione al suo grado di inquinamento.

A contatto con il calcestruzzo reagisce (*neutralizzandoli*) con i componenti alcalini solubili presenti in soluzione entro i pori e con l'idrossido di calcio cristallino della matrice indurita:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 = CaCO_3$$

Il pH della soluzione acquosa si riduce fortemente scendendo da oltre 13 fin quasi alla neutralità (pH = 7). Si raggiungono così valori ben al disotto della soglia minima di 11,5 che assicura le condizioni di passività dei ferri di rinforzo in assenza di cloruri.

VELOCITA' DELLA CARBONATAZIONE

La carbonatazione inizia dalla superficie esterna, penetrando progressivamente all'interno del manufatto secondo la legge:

$$s = K \cdot t^{1/n}$$

dove *s* è lo spessore dello strato carbonatato e *t* è il tempo.

La carbonatazione diminuisce quindi nel tempo più o meno velocemente a seconda dei valori di **n** e **K**, dove *n* dipende dalla porosità (compattezza della matrice), in calcestruzzi porosi vale circa 2, in quelli compatti i valori salgono fino a che la velocità del processo è praticamente annullata e *K* dipende dalle condizioni ambientali, in particolare dall'umidità relativa.

EFFETTO DELL'UMIDITA' SULLA CARBONATAZIONE

Il trasporto della CO_2 avviene facilmente entro i pori riempiti d'aria, mentre la diffusione entro quelli saturi d'acqua procede con una velocità 104 volte inferiore.

La reazione di carbonatazione può però avvenire solo in presenza d'acqua per cui si ha un preciso intervallo di pericolosità che è compreso fra **50** e **80**% (8).

Fig. 3 (in alto) 4 (in basso) - Carbonatazione con espulsione del copriferro per corrosione delle barre di armatura alla base di un pilastro in cemento armato in interno.

ATTACCO DA CLORURI

Origine dei cloruri

La presenza di ioni cloruro nel calcestruzzo può avere differente origine.

Durante il confezionamento del calcestruzzo:

- acqua di impasto;
- aggregati non lavati;
- additivi.

In esercizio dall'ambiente esterno:

- acque di mare o salmastre;
- aerosol marino;
- sali disgelanti.

MECCANISMO DI ATTACCO DA CLORURI

I cloruri agiscono perforandolo il film di ossido protettivo: la zona sottostante scoperta funge da anodo rispetto alle zone circostanti catodiche e si corrode.

Il passaggio della corrente di corrosione fa aumentare l'aggressività nella zona anodica, poiché la velocità di corrosione cresce con l'aumentare del rapporto Cl^-/OH^- e l'idrolisi dei cloruri complessi instabili che si formano in conseguenza dell'attacco può abbassare il pH a valori < 5.

La morfologia è quella (assai pericolosa) tipica delle corrosioni localizzate (pitting corrosion) (9).

I tenori limite di cloruri dipendono dal tipo di cemento e dalle caratteristiche dell'ambiente. Secondo la UNI 9858 per il cemento armato normale non si dovrebbe superare il limite di 0,4% rispetto al peso del cemento impiegato, mentre per il precompresso il limite è naturalmente più severo e si riduce a 0,1%. Tali valori limite possono tuttavia essere superati se il calcestruzzo opera in ambiente asciutto, o anche se l'opera è costantemente sommersa. Nel primo caso infatti la cella di corrosione non può funzionare per l'assenza del conduttore di seconda specie (la soluzione acquosa più o meno ricca di sali), nel secondo caso è difficile la penetrazione dell'ossigeno la cui presenza a contatto del ferro è indispensabile perché avvvengano le reazioni di riduzione catodica.

CRITERI PER LA PREVENZIONE DEL DEGRADO

L'insieme dei criteri che dovrebbero guidare gli "addetti ai lavori" nella realizzazione di un'opera in calcestruzzo durevole sono gli stessi che devono essere rispettati perché il materiale possa essere definito un "buon calcestruzzo". Naturalmente poiché come si è visto la pericolosità dell'attacco dipende dall'aggressività dell'ambiente, l'attenzione e il rispetto dei criteri generali di qualità del manufatto devono crescere con l'aumento della severità della classe di esposizione.

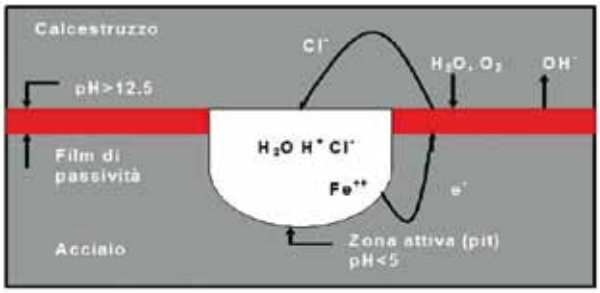


Fig. 5 - Distruzione del film passivante da parte dei cloruri.

Fig. 6 - Corrosione di una struttura in calcestruzzo armato per effetto dell'aerosol marino.

Le già citate Linee Guida sul Calcestruzzo Strutturale e la UNI 11104 individuano quattro parametri essenziali da cui dipende la durabilità:

- valore minimo della resistenza caratteristica R_{ck};
- rapporto a/c minimo;
- contenuto di cemento minimo;
- minimo spessore del copriferro (35 o 45 mm).

Ad essi si devono aggiungere, in caso di ambiente gelivo, le precauzioni da adottare in tal caso e cioè: particolare attenzione nella scelta degli aggregati che non devono naturalmente essere gelivi e l'impiego di particolari addittivi aeranti.

Il requisiti minimi relativi ai suddetti parametri diventano naturalmente più severi per le classi di esposizione più pericolose, ma il loro rispetto può consentire una vita utile in servizio delle strutture non inferiore ai 50 anni.

BIBLIOGRAFIA

(1) Mehta P.K., Monteiro P.J.M., "Concrete: Structure, Properties and Materials", II ed., Prentice Hall, USA, 1993.

(2) Everett D.H."The thermodynamics of frost damage to porous solids", Trans. Far. Soc., 57, (1961), 1541-51.

(3) Neville A.M., "Properties of Concrete", Longman scientific and Technical, III ed., England, 1986

(4) Collepardi M., Coppola L., "Permeabilità del calcestruzzo: Teoria, Pratica e Prescrizioni di capitolato", Ind. Ital. del Cemento, (1992) 665-671.

(5) Taylor H.F., "Delayed Ettringite Formation", Proc. of the Conf. Adv. In Cement and Concrete, ASCE, N.Y., (1994) 122-131.

(6) Collepardi M. "A State-of-the-Art Review on Delayed Ettringite Formation", Cem. and Concr. Comp.,25 ,(2003), 401-407.

(7) Diamond S., "A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms, 2. Reactive aggregates, Cem. and Concr. Res., 6, (1976), 549-60.

(8) Tuutti K.,"Corrosion of steel in concrete", Swedish Foundation for Concrete Research, Stokholm, 1982.

(9) Pedeferri P., Bertolini L., "La corrosione nel calcestruzzo e negli ambienti naturali", McGraw-Hill, Italia, 1996.

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

EFFICACIA DEL NITRATO DI LITIO COME INIBITORE DELLA REAZIONE ESPANSIVA ALCALI-SILICE NEL CALCESTRUZZO

Mario Berra[1], Teresa Mangialardi[2], Antonio E. Paolini[2]

[1]RSE S.p.A. Via Rubattino, 54 - 20134 Milano

[2]Fac. di Ingegneria Civile e Industriale, Univ. di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana, 18 - 00184 Roma - paolini@ingchim.ing.uniroma1.it

1. INTRODUZIONE

La reazione espansiva alcali-silice (A-S) è una delle cause di degrado del calcestruzzo nelle strutture e può comportare una riduzione del tempo di vita in servizio delle opere. In qualche caso potrebbe esserne compromessa anche l'integrità strutturale.

Si tratta di una reazione chimica che si sviluppa tra l'ambiente alcalino del calcestruzzo (connesso principalmente agli alcali del cemento ma con possibili contributi anche da parte degli aggregati o dell'ambiente esterno) e alcuni aggregati silicei contenenti fasi reattive agli alcali, quali forme di silice amorfa (ad es. opale), microcristallina o criptocristallina e/o minerali e rocce silicatiche, quali ad es. argilliti, filliti, areniti, graniti, scisti (aggregati silicei/silicatici). Indipendentemente dal fatto che gli aggregati coinvolti siano silicei o silicatici, si parla di reazione alcali-silice, dal momento che il componente reattivo è sempre silice termodinamicamente instabile.

Il prodotto della reazione è un gelo silicatico alcalino che, assorbendo l'acqua, espande all'interno del calcestruzzo, causando l'insorgere di sforzi di trazione ed innescando, di conseguenza, stati fessurativi, con possibili distacchi di materiale (pop-outs). L'entità del degrado è legata al livello di reattività agli alcali degli aggregati utilizzati, al contenuto di alcali del calcestruzzo e al contenuto di umidità presente nel calcestruzzo stesso. Tuttavia, anche lo stato di sforzo presente nella struttura assume un ruolo importante nel determinare gli effetti espansivi della reazione. In condizioni di espansione contrastata, infatti, il comportamento espansivo del calcestruzzo è fortemente dipendente dalla sollecitazione meccanica applicata, a sua volta legata a vari fattori, quali le condizioni di vincolo e di carico della struttura.

La velocità con cui si manifesta la reazione A-S, come pure la sua durata, dipendono grandemente dalle forme di silice reattiva presenti nell'aggregato. La reazione è relativamente veloce e di durata limitata nel caso di forme di silice scarsamente cristallina o metastabile. In questi casi, le fessurazioni delle strutture incominciano a manifestarsi entro 5-10 anni e la reazione è praticamente completa dopo 10-20 anni. Decisamente più lente e di più lunga durata (molti decenni) sono, invece, le reazioni che interessano le rocce contenenti quarzo.

Oltre un certo livello di espansione, anche le prestazioni meccaniche del calcestruzzo possono essere compromesse, a cominciare dalle caratteristiche elastiche. Le strutture affette dalla reazione alcali-silice, soprattutto se massive, sono inoltre soggette a spostamenti anomali e/o disallineamenti tra le parti, ad esempio, in corrispondenza di giunti costruttivi.

Nella Figura 1 è riportato un esempio di struttura (spalla di un ponte) affetta da reazione A-S. Naturalmente, il ricorso ad aggregati sicuramente non reattivi agli alcali, valutati sulla base di protocolli di prova affidabili, rappresenta la via più diretta per eliminare il problema. Tuttavia, la ridotta disponibilità di aggregati di elevata qualità per la confezione delle strutture in calcestruzzo e il conseguente crescente impiego di aggregati di minore qualità (aggregati potenzialmente reattivi agli alcali) rendono necessaria l'adozione di misure preventive, finalizzate a prevenire i dannosi effetti espansivi della reazione.

Fig. 1 - Spalla di ponte con evidenti danni da reazione alcali-silice.

Limitare l'accesso di umidità all'interno della massa del calcestruzzo mediante trattamenti superficiali (rivestimenti o impregnazioni), garantendo così condizioni asciutte, sarebbe teoricamente un'altra possibile soluzione, ma la loro efficacia non trova riscontri concordi e generalmente, tali trattamenti, da soli, non vengono considerati come una misura preventiva sufficiente.

Le strategie effettivamente praticabili per prevenire i danni della reazione A-S sono altre. Quella principale consiste nel limitare l'alcalinità della soluzione dei pori del calcestruzzo. E ciò può essere perseguito attraverso due modalità:

- limitare il contenuto di alcali del calcestruzzo della struttura durante la sua vita in servizio, anche tenendo conto di eventuali incrementi di concentrazione degli alcali del calcestruzzo dovuti sia a fattori esterni (ad esempio, l'impiego di sali disgelanti) che interni (ad esempio, il rilascio di alcali da parte dell'aggregato). Una misura preventiva di questo tipo può essere attuata attraverso l'impiego di cementi Portland (o Portland al calcare) a basso tenore di alcali totali (Na_2O_{eq} < 0,6% in peso del cemento);
- ricorrere all'impiego di sufficienti quantità di materiali a comportamento pozzolanico (cenere volante, pozzolana naturale, fumo di silice condensato, etc.) o di adeguati quantitativi di scorie granulate di altoforno di dimostrata efficacia. Queste aggiunte minerali attive possono essere utilizzate individualmente o in miscela con il cemento Portland (cementi di miscela).

Una ulteriore possibile strategia di prevenzione consiste nel modificare le proprietà del gelo silicatico prodotto dalla reazione A-S mediante l'uso di additivi chimici a base di composti di litio ($LiNO_3$, Li_2CO_3, Li_2SO_4, LiOH o LiF), in modo da renderlo non espansivo. Individuata già da diverso tempo, questa strategia ha ricevuto particolare attenzione solo negli ultimi anni, sia attraverso approfonditi studi di laboratorio che con casi di applicazione in campo, principalmente all'estero.

Come per l'impiego delle aggiunte minerali attive, anche nel caso dell'additivo chimico a base di litio è necessario individuare quel dosaggio efficace che è in grado di garantire una reale azione preventiva nei confronti dall'espansione deleteria alcali-silice. Tale dosaggio efficace dipende, oltre che dal tipo di composto, dalla reattività dell'aggregato, dal contenuto di alcali del calcestruzzo e dalle sue condizioni di esposizione ambientale. Per soddisfare questa necessità, nel presente lavoro si è sviluppato un approccio metodologico che è basato sull'impiego di alcuni parametri di reattività innovativi, già proposti in precedenti studi [1-6], e ora finalizzati specificatamente alla valutazione dell'efficacia dei composti del litio come inibitori della reazione espansiva A-S. La validità di tale approccio è anche verificata sperimentalmente, utilizzando dati di espansione ottenuti su calcestruzzi confezionati con cemento Portland, aggregati silicei/silicatici di differente reattività agli alcali e nitrato di litio ($LiNO_3$), come inibitore della reazione alcalina [7]. Come discusso più avanti, il nitrato di litio, per le sue migliori caratteristiche chimiche, si lascia nettamente preferire agli altri composti di litio per l'impiego come inibitore della reazione deleteria A-S [8].

2. APPROCCIO METODOLOGICO PROPOSTO

L'approccio teorico si basa sulla conoscenza dei seguenti tre parametri innovativi di reattività: 1) il Livello di Soglia degli Alcali (LSA) di un aggregato, 2) la Forza Motrice del processo di espansione deleteria nel calcestruzzo (FM) e 3) la Forza Motrice massima tollerabile (FM_{tol}) dal calcestruzzo stesso. In particolare, il primo parametro (LSA) è utilizzato per la valutazione della reattività agli alcali degli aggregati, il secondo (FM) fornisce indicazioni sulla possibilità di sviluppo della reazione deleteria A-S, il terzo (FM_{tol}) è preso come parametro di valutazione dell'efficacia degli inibitori della reazione deleteria A-S (cementi di miscela, aggiunte minerali attive, composti del litio). Ciascun parametro è espresso in termini di concentrazione degli alcali del calcestruzzo (kg Na_2O_{eq}/m^3), essendo il fenomeno espansivo A-S associato alla reazione dell'aggregato con gli alcali della miscela di calcestruzzo. Così, l'approccio proposto è, di fatto, un bilancio di materia degli alcali in seno alla miscela di calcestruzzo durante la sua vita in servizio, bilancio che può essere di notevole utilità, sia in sede di mix-design, per calcestruzzi confezionati con aggregati suscettibili di reazione A-S, sia in sede di definizione di interventi di ripristino, per strutture in calcestruzzo affette da tale reazione.

Nello sviluppare tale approccio metodologico, non si sono presi in considerazione gli aggregati silicei/silicatici con effetto "pessimum", peraltro scarsamente diffusi nel nostro Paese, aggregati che sono caratterizzati da espansione non proporzionale al loro contenuto di costituente reattivo, ma da un'espansione massima in corrispondenza di un particolare contenuto di questo costituente (contenuto "pessimum").

Inoltre, l'approccio metodologico è limitato all'impiego dei composti del litio, quali inibitori dell'espansione deleteria A-S.

2.1 Livello di Soglia degli Alcali di un aggregato

Nel caso di calcestruzzi confezionati con aggregati contenenti forme di silice/silicato reattive agli alcali e privi di effetto "pessimum", l'espansione associata alla reazione alcali-silice è tanto più grande quanto maggiore è la reattività agli alcali degli aggregati e quanto più alto è il contenuto di alcali disponibili, L_{ac}, del calcestruzzo.

Il parametro di reattività LSA di un aggregato è definito come il contenuto (o concentrazione) limite di alcali disponibili del calcestruzzo, al di sopra del quale si manifesta l'espansione deleteria nel calcestruzzo stesso. Per concentrazioni di alcali disponibili inferiori o uguali ad LSA, non si avrà alcuna espansione deleteria, il che non sta a significare espansione nulla o, tanto meno, assenza di reazione alcali-silice.

Per la definizione di LSA, si fa riferimento a calcestruzzi di cemento Portland (o Portland al calcare) di composizione standard, confezionati con l'aggregato in esame. Così, il valore di LSA risulta specifico di ogni aggregato e sarà tanto più grande quanto minore è la reattività agli alcali dell'aggregato considerato.

Il valore di LSA può essere ricavato, sperimentalmente, attraverso una serie di prove di espansione in calcestruzzi di cemento Portland (o Portland al calcare) confezionati con l'aggregato in esame, a differenti contenuti di alcali disponibili, L_{ac}, ottenuti tramite opportune aggiunte di NaOH all'acqua di impasto.

Rispetto alle classificazioni di reattività di tipo tradizionale, cioè basate su limiti di espansione prefissati (metodi di valutazione pass-fail), la classificazione degli aggregati basata sul parametro LSA consente di discriminare, in maniera assai più articolata, la loro reattività agli alcali e quindi prevedere, con maggiore sicurezza, il loro comportamento nel calcestruzzo durante la sua vita in servizio.

2.2 Forza motrice del processo di espansione deleteria

Sulla base della definizione della reattività agli alcali degli aggregati in termini di LSA, è possibile esprimere la forza motrice, FM, del processo espansivo associato alla reazione deleteria alcali-silice, in termini della concentrazione di alcali disponibili del calcestruzzo eccedente tale valore limite.

Per calcestruzzi confezionati con un dato aggregato (valore definito di LSA), la forza motrice, FM, può essere, genericamente, espressa come:

$$FM = L_{ac\,max} - LSA + L_{ac} \qquad (1)$$

con:

$$L_{ac\,max} = L_{acn} + S_{max} \qquad (2)$$

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

dove:

$L_{ac\ max}$ = contenuto massimo di alcali disponibili del calcestruzzo (kg Na_2O_{eq}/m^3) previsto durante la sua vita in servizio;

L_{acn} = contenuto di alcali disponibili del calcestruzzo (kg Na_2O_{eq}/m^3) derivante da tutti i suoi componenti, ad esclusione dell'aggregato (L_{ac} "naturale");

S_{max} = contributo supplementare massimo di alcali disponibili (kg Na_2O_{eq}/m^3) derivante da fonti interne (ad esempio, dagli aggregati) ed esterne (ad esempio, sali disgelanti) al calcestruzzo, durante la sua vita in servizio;

ΔL_{ac} = variazione effettiva del contenuto di alcali disponibili che si determina nella soluzione dei pori del calcestruzzo per effetto dell'eventuale impiego di misure preventive della reazione espansiva deleteria A-S (cementi Portland a basso tenore di alcali, cementi di miscela, aggiunte minerali attive, composti del litio).

Il valore di L_{acn} nell'equazione (2) è calcolato conoscendo la composizione ponderale della miscela di calcestruzzo (mix-design) ed il contenuto di alcali disponibili dei vari componenti la miscela stessa, ad esclusione dell'aggregato, il cui contributo di alcali disponibili è incluso nel termine S_{max}, come fonte interna al calcestruzzo.

Il valore di S_{max} può essere stimato sulla base di esperienze precedentemente acquisite su strutture di calcestruzzo confezionato con la stessa tipologia di aggregato e soggette a condizioni di esposizione ambientale simili a quelle della struttura in esame. Se non si dispone di queste informazioni, si può assumere, per S_{max}, un valore conservativo di 1,5 kg Na_2O_{eq}/m^3, in analogia a quanto suggerito in un protocollo di prova messo a punto dal Gruppo "ad hoc" ASR del British Cement Association [9].

Nel presente lavoro, avendo limitato l'approccio metodologico all'impiego dei composti del litio come unica misura preventiva della reazione deleteria A-S, il materiale in studio è costituito da calcestruzzi di composizione prefissata confezionati con cemento Portland (o Portland al calcare) ed aggregati con valori definiti di LSA ed additivati o meno con uno specifico composto del litio. Inoltre, come cemento di riferimento, si è preso un Portland (o Portland al calcare) con un tenore di alcali disponibili del 1% in peso come Na_2O_{eq}, pari al suo contenuto di alcali totali, avendo assunto un rilascio del 100%.

In base all'equazione (1), per calcestruzzi confezionati con il cemento di riferimento e privi di litio (calcestruzzi di riferimento), la forza motrice, FM, del processo espansivo deleterio può essere espressa come:

$$FM = L_{ac\ max} - LSA = L_{acn} + S_{max} - LSA \qquad (3)$$

potendosi porre:

$$L_{ac} = 0 \qquad (4)$$

Secondo l'equazione (3), perché possa verificarsi un'espansione deleteria in siffatti calcestruzzi, si dovrà avere $FM > 0$, cioè $L_{ac\ max} > LSA$. Per valori di $FM \leq 0$, non si avrà, invece, alcuna espansione deleteria.

Pertanto, per questi tipi di calcestruzzo, l'unica misura preventiva della reazione A-S effettivamente praticabile è costituita dall'impiego, in opportuni dosaggi, di cementi Portland (o Portland al calcare) a più basso tenore di alcali, in modo da ridurre L_{acn} e, quindi, rendere negativo il valore di FM nell'equazione (3), a parità di S_{max} e LSA.

Così, in sede di mix-design, si potrà procedere sia alla selezione degli aggregati, in base al loro valore di LSA, sia alla composizione delle miscele (tipo di cemento Portland o Portland al calcare, a basso o ad alto tenore di alcali, e relativo dosaggio), sulla base del valore di $L_{ac\ max}$ compatibile con le resistenze progettuali e con le condizioni di esposizione ambientale della struttura di calcestruzzo in questione.

Per un tale approccio, si considera trascurabile l'influenza della composizione del calcestruzzo (dosaggio di cemento, rapporto acqua/cemento) sul valore di LSA degli aggregati.

2.3 Forza Motrice massima tollerabile

Come già detto, uno dei metodi più efficaci di prevenzione della reazione espansiva A-S è quello basato sull'impiego dei composti del litio, anche se questa misura non è ancora molto diffusa su larga scala.

Il meccanismo d'azione attualmente più accreditato, sebbene ancora non del tutto chiarito [10], è quello secondo cui i composti del litio modificano la natura del prodotto della reazione alcali-silice, portando alla formazione di un silicato misto, in cui il sodio e il potassio sono parzialmente sostituiti dal litio. A differenza del gelo silicatico, altamente espansivo, che si forma in assenza di litio, il silicato misto si presenta come prodotto maggiormente cristallino e scarsamente espansivo, essendo caratterizzato da una bassa capacità di assorbimento d'acqua e, quindi, da uno scarso potere rigonfiante.

L'efficacia di questa misura preventiva dipenderà, essenzialmente, dal tipo e dosaggio del composto di litio impiegato e dal contenuto di alcali disponibili, $L_{ac\ max}$, del calcestruzzo.

Per calcestruzzi confezionati con il cemento Portland (o Portland al calcare) di riferimento ed additivati con uno specifico composto di litio, il termine ΔL_{ac} nell'equazione (1) può essere espresso come:

$$\Delta L_{ac} = \Delta L_{acn} - R_{ac} \qquad (5)$$

dove ΔL_{acn} e R_{ac} sono due parametri che dipendono, essenzialmente, dal tipo e dosaggio del composto di litio considerato e sono come appresso definiti.

ΔL_{acn} rappresenta la variazione del contenuto di alcali disponibili del calcestruzzo associata ad un'eventuale variazione di alcalinità e pH del liquido dei pori della matrice cementizia prodotta dall'aggiunta del composto di litio considerato. Nel caso di impiego di LiOH o Li_2CO_3, si ha un aumento del pH del liquido dei pori e, quindi, un incremento positivo di ΔL_{acn}. Per contro, il nitrato di litio, essendo un sale neutro, non produce alcuna variazione del pH del liquido dei pori e, quindi, per questo composto si può porre $L_{acn} = 0$ nell'equazione (5).

Il termine R_{ac} rappresenta un'entità fittizia di consumo degli alcali da parte dei composti del litio, consumo che è, invece, reale nel caso di impiego di aggiunte minerali attive. In quest'ultimo caso, infatti, R_{ac} rappresenta, proprio, il consumo di alcali per incorporamento nei prodotti di idratazione pozzolanici e/o idraulici dell'aggiunta minerale utilizzata. Così, nel caso dei composti di litio, R_{ac} sta ad indicare quella riduzione di alcali, a meno di ΔL_{acn}, che sarebbe necessaria, in assenza di litio, per avere lo stesso effetto di prevenzione ottenuto, con l'aggiunta di litio, attraverso la formazione del silicato misto di litio/sodio/potassio.

Il termine ΔL_{ac} nell'equazione (5) può quindi risultare negativo o positivo, a seconda dei valori di ΔL_{acn} e R_{ac}. Un valore negativo di ΔL_{ac} è indice di un comportamento efficace del composto di litio in esame, dal momento che esso è in grado di ridurre la forza motrice del processo espansivo (eq. (1)). Per contro, un valore positivo di ΔL_{ac} ($\Delta L_{acn} > R_{ac}$) è indice di un effetto controproducente (effetto "pessimum" del composto di litio), nel senso che l'aggiunta del litio produce un'intensificazione del processo

espansivo (aumento di FM), anziché una sua limitazione.

In base a questa schematizzazione, si può comprendere perché il nitrato di litio non produca alcun effetto "pessimum" (essendo $\Delta L_{acn} = 0$), mentre composti come LiOH o Li_2CO_3 ($\Delta L_{acn} > 0$) possano produrre un effetto "pessimum", se il loro dosaggio risulta insufficiente ($R_{ac} < \Delta L_{ac}$). Questa è la principale ragione per cui il nitrato di litio si lascia nettamente preferire agli altri due composti nell'impiego come inibitore della reazione deleteria A-S. Il nitrato di litio è anche dotato di una solubilità in acqua abbastanza alta (415 g/kg acqua a 20°C) che ne facilita l'impiego in calcestruzzo, senza peraltro il rischio di innescare reazioni collaterali dannose, come quelle che possono essere prodotte dall'aggiunta di Li_2SO_4 (attacco solfatico).

Perché si possa verificare la formazione del silicato misto in quantità sufficiente a prevenire lo sviluppo dell'espansione A-S deleteria, è necessario mantenere, nel liquido dei pori della matrice cementizia, un rapporto molare Li_2O/Na_2O_{eq}, indicato con D_{Li}, sufficientemente alto in modo da favorire la sostituzione, nel prodotto di reazione, del sodio e potassio con il litio. Il valore di D_{Li} è anche funzione della reattività agli alcali dell'aggregato utilizzato e sarà tanto più alto quanto minore è il valore di LSA dell'aggregato stesso. Per il raggiungimento di alti valori di D_{Li} è necessario che il composto di litio sia prontamente ed altamente solubile in acqua, com'è il caso del nitrato di litio.

Per una composizione di calcestruzzo prefissata (valori definiti di LSA e S_{max}), il valore di ΔL_{ac} è caratteristico del tipo e dosaggio di composto di litio usato e questo valore di ΔL_{ac} corrisponde alla massima forza motrice che il calcestruzzo in esame può tollerare, indicata, nel seguito, FM_{tol}.

Ponendo, infatti, nell'equazione (1):

$$FM = 0 \qquad (6)$$

e:

$$L_{ac\,max} = L_{ac\,tol} \qquad (7)$$

si ottiene:

$$L_{ac\,tol} - LSA = - \Delta L_{ac} \qquad (8)$$

dove $L_{ac\,tol}$ è il valore massimo del contenuto di alcali disponibili del calcestruzzo che, compatibilmente con il valore di LSA dell'aggregato utilizzato, non produce alcuna espansione deleteria nel calcestruzzo (FM = 0).

Così, la differenza ($L_{ac\,tol} - LSA$) rappresenta, proprio, la massima forza motrice tollerabile, FM_{tol}, che è associata al tipo di miscela utilizzata (tipo e dosaggio di additivo) ed è indipendente dal tipo di aggregato (LSA), essendo ΔL_{ac} caratteristico del composto di litio impiegato (tipo e dosaggio) e potendosi porre:

$$FM_{tol} = L_{ac\,tol} - LSA \qquad (9)$$

e, in base all'equazione (8):

$$FM_{tol} = - \Delta L_{ac} \qquad (10)$$

Pertanto, la forza motrice tollerabile, FM_{tol}, può essere presa come parametro di valutazione dell'efficacia dei composti del litio nella prevenzione della reazione deleteria alcali-silice. E' evidente che quanto più grande è il valore di FM_{tol}, tanto maggiore sarà l'efficacia del composto di litio nella prevenzione della reazione deleteria A-S.

Sostituendo l'equazione (10) nella (1), si ottiene:

$$FM = L_{ac\,max} - LSA - FM_{tol} \qquad (11)$$

che è l'equazione che fornisce la forza motrice del processo espansivo deleterio nel caso di calcestruzzi di cemento Portland (o Portland al calcare) additivati con composti del litio. Questa equazione vale anche per calcestruzzi privi di composti di litio e confezionati con cemento Portland (o Portland al calcare) a più basso tenore di alcali. In quest'ultimo caso, FM_{tol} corrisponde esclusivamente alla riduzione di L_{acn}.

Per ogni calcestruzzo di cemento Portland (o Portland al calcare) confezionato con uno specifico aggregato (valore definito di LSA) ed additivato con uno specifico composto del litio, esisterà un dosaggio di litio, dLi in termini di kg Li_2O/m^3 di calcestruzzo, che è in grado di annullare la forza motrice, FM, del processo espansivo. Il valore di d_{Li} per cui FM = 0 è detto dosaggio efficace ed indicato con d_{eff} (kg Li_2O/m^3). Il valore di d_{eff} sarà proporzionale sia alla forza motrice FM che al contenuto di alcali disponibili, $L_{ac\,max}$, del calcestruzzo, dovendosi pure garantire un rapporto molare Li_2O/Na_2O_{eq} appropriato (D_{eff}), per favorire la formazione del silicato misto non espansivo.

Così, il dosaggio efficace, deff, di un dato composto di litio può essere espresso come:

$$d_{eff} = k'_{A\text{-}S}\, L_{ac\,max}\, (L_{ac\,max} - LSA) \qquad (12)$$

dove $k'_{A\text{-}S}$ è una costante di proporzionalità che dipende, essenzialmente, dal tipo di composto di litio considerato.

L'equazione (12) può essere posta, in termini di rapporto molare efficace, D_{eff}, come:

$$D_{eff} = k''_{A\text{-}S}\, (L_{ac\,max} - LSA) \qquad (13)$$

con:

$$k''_{A\text{-}S} = 2{,}07\, k'_{A\text{-}S} \qquad (14)$$

essendo 2,07 il rapporto tra i pesi molecolari di Na_2O e Li_2O.

In base alle equazioni (7)-(11), è possibile porre l'equazione (13) nella forma:

$$D_{eff} = k''_{A\text{-}S}\, FM_{tol} \qquad (15)$$

Dall'equazione (13) si può notare che, a parità di aggregato (LSA) e contenuto di alcali disponibili del calcestruzzo ($L_{ac\,max}$), il dosaggio efficace di litio risulterà tanto più basso quanto minore è il valore di $k''_{A\text{-}S}$. Dall'equazione (15) si ha che, a parità di D_{eff}, la forza motrice tollerabile, FM_{tol}, sarà tanto più grande quanto minore è $k''_{A\text{-}S}$.

Pertanto, il reciproco di $k''_{A\text{-}S}$ può essere preso come parametro di valutazione dell'efficacia dei composti di litio nella prevenzione della reazione deleteria A-S.

Per un dato composto di litio, il valore di $k''_{A\text{-}S}$ e, quindi, di $1/k''_{A\text{-}S}$, può essere valutato, sperimentalmente, attraverso più serie di prove di espansione condotte su calcestruzzi confezionati con un cemento Portland (o Portland al calcare), un aggregato di cui si conosce il valore di LSA e il composto di litio in esame.

In una prima serie di prove, si mantiene costante il valore di Lac e, quindi, della forza motrice FM (valore prefissato di FM) e si varia il dosaggio di litio, d_{Li} (kg Li_2O/m^3), misurando le espansioni dei vari calcestruzzi al tempo ultimo previsto dal metodo di prova selezionato.

Riportando i valori di espansione ultima, E_{tu}%, in funzione del dosaggio di litio, d_{Li}, è possibile ricavare d_{eff}, come il valore di d_{Li} in grado di annullare la forza motrice, FM. Il valore di d_{eff} corrisponde al dosaggio di litio per il quale il valore di E_{tu}% è pari al limite di espansione stabilito dal metodo di prova selezionato. A questo dosaggio efficace corrisponde pure una forza motrice tollerabile, FM_{tol}, pari proprio al valore di FM prefissato per la serie di prove considerata.

Effettuando altre serie di prove, analoghe alla precedente ma con differenti valori di FM, cioè con differenti valori di L_{ac} del calcestruzzo, è possibile ricavare altrettanti valori di d_{eff} e FM_{tol} per il composto di litio in studio.

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

Riportando, infine, in un diagramma i valori di D_{eff}, corrispondenti a ciascun d_{eff}, in funzione di FM_{tol}, è possibile ricavare k''_{A-S} come pendenza della retta passante per l'origine, qualora sia verificata la validità dell'equazione (15) nell'intervallo dei valori di FM sperimentato.

3. VERIFICA SPERIMENTALE DELL'APPROCCIO PROPOSTO

Per la verifica sperimentale dell'approccio proposto, si sono utilizzati i dati di espansione ottenuti su differenti tipi di calcestruzzo sottoposti alla prova di espansione accelerata alla temperatura di 38°C ed umidità relativa (UR) del 100%, secondo il metodo standard canadese CSA.A23.2-14A, che è simile a quello standard americano ASTM C1293.

3.1 Composizione dei calcestruzzi indagati

La composizione dei calcestruzzi era quella standard, prevista dal metodo di prova: dosaggio di cemento = 420 kg/m^3; rapporto in peso acqua/cemento = 0,44; rapporto in peso aggregato grosso:aggregato fine:cemento = 2,6:1,6:1. Il cemento utilizzato era un Portland a basso tenore in alcali, con un contenuto di Na_2O_{eq} pari a 0,55% in peso.

I calcestruzzi erano preparati con due differenti tipi di aggregati silicei/silicatici designati, in questo lavoro, con le lettere A e B. Entrambi i tipi di aggregato provenivano da cave italiane ed erano disponibili sia nelle frazioni granulometriche fini che grossolane.

L'aggregato A era costituito da rocce riolitiche (85%), da quarzo stressato (8%) e microcristallino (5%). L'aggregato B, meno reattivo dell'A, era costituito da rocce carbonatiche (72%) accompagnate da significative quantità di selce (15%) e calcite (10%).

I due aggregati erano utilizzati con la granulometria standard prevista dal metodo di prova (0,15-19 mm).

Il contenuto di alcali disponibili del calcestruzzo derivante dai suoi ingredienti ad esclusione dell'aggregato, L_{acn}, era pari a 2,3 kg Na_2O_{eq}/m^3. Calcestruzzi con più alti contenuti di alcali disponibili erano ottenuti tramite appropriate aggiunte di pastiglie di NaOH all'acqua di impasto. Per entrambi i tipi di calcestruzzo (con aggregato A o B), il valore di L_{ac} era variato nell'intervallo 2,3-9,0 kg Na_2O_{eq}/m^3.

Il nitrato di litio era aggiunto sotto forma di soluzione acquosa al 30% in peso di composto ed il suo dosaggio era variato tra 0 e 7,8 kg Li_2O/m^3.

Le prove di espansione erano eseguite su provini di calcestruzzo di forma prismatica (75x75x280 mm) preparati e stagionati come previsto dal metodo di prova canadese.

3.2 Curve tipiche di espansione e determinazione del parametro LSA dei due aggregati

Il comportamento espansivo dei vari calcestruzzi era valutato confrontando la loro espansione al tempo ultimo di prova (365 giorni) con il limite fissato dal metodo (0,04% a 365 giorni). Un calcestruzzo era giudicato a comportamento espansivo deleterio soltanto se la sua espansione a 365 giorni (E_{tu} %) era superiore a 0,04%.

Nella Figura 2 sono mostrate alcune tipiche curve che si riferiscono allo sviluppo temporale dell'espansione nei due tipi di calcestruzzo additivati o meno con nitrato di litio, per il più alto valore di Lac investigato (9 kg Na_2O_{eq}/m^3) e per il più alto dosaggio di $LiNO_3$ adottato (7,8 kg Li_2O/m^3 per l'aggregato A e

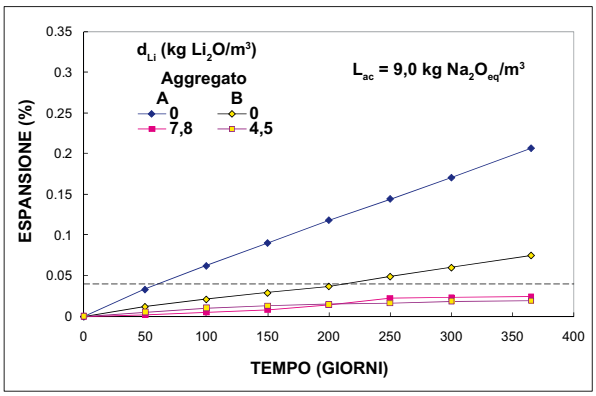


Fig. 2 - Curve tipiche di espansione dei campioni di calcestruzzo stagionati a 38°C e 100% UR.

4,5 kg Li_2O/m^3 per l'aggregato B).

I dati di espansione relativi ai calcestruzzi non additivati confermano la maggiore espansività dell'aggregato A rispetto a B, così come i dati ottenuti sui calcestruzzi contenenti litio confermano la grande capacità di questo composto nel prevenire lo sviluppo dell'espansione deleteria A-S, anche per valori molto alti di L_{ac} (9 kg Na_2O_{eq}/m^3), difficilmente riscontrabili in situazioni reali.

I dati di espansione raccolti sui calcestruzzi non additivati, oltre che costituire riferimento per quelli additivati con litio, hanno consentito di determinare i valori di LSA dei due aggregati.

A tal fine, i valori di E_{tu}% ottenuti per i due tipi di calcestruzzo sono stati riportati nella Figura 3, in funzione del contenuto di alcali, L_{ac}, unitamente al limite di espansione di 0,04% (linea

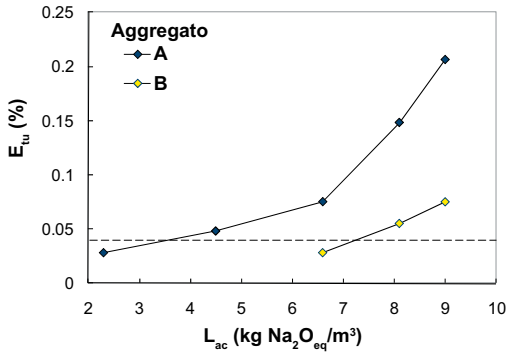


Fig. 3 - Determinazione del Livello di Soglia degli Alcali degli aggregati A e B.

orizzontale tratteggiata).

Il valore di LSA è stato determinato come il contenuto di alcali, L_{ac}, che produce un'espansione del calcestruzzo pari a 0,04% a 365 giorni, cioè corrispondente all'ascissa del punto di intersezione della linea orizzontale tratteggiata con la curva di espansione relativa all'aggregato considerato. Si sono ottenuti i valori di LSA pari a 3,6 kg Na_2O_{eq}/m^3 per l'aggregato A e 7,3 kg Na_2O_{eq}/m^3 per l'aggregato B. Questi valori di LSA sono congruenti con il diverso comportamento da campo esibito dai due tipi di aggregato: l'aggregato A molto più reattivo del B, essendo il primo caratterizzato da un valore di LSA molto più basso del secondo.

Così, per i calcestruzzi di Figura 2 non additivati con litio, la forza motrice FM del processo espansivo è risultata pari a 1,7 kg

Na_2O_{eq}/m^3 per i calcestruzzi incorporanti l'aggregato B e a 5,4 kg Na_2O_{eq}/m^3 per quelli con l'aggregato A. Ciò può spiegare la maggiore espansività presentata dai calcestruzzi con aggregato A, a parità di L_{ac}.

3.3 Dosaggi efficaci di $LiNO_3$ e relazione tra D_{eff} e FM_{tol}

Nelle Figure 4(a) e 4(b) sono mostrati i dati di espansione ultima, E_{tu}%, in funzione del dosaggio di litio, d_{Li}, per i calcestruzzi incorporanti l'aggregato A o B, rispettivamente.

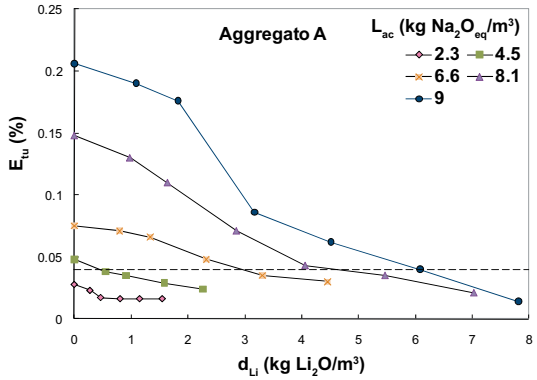


Fig. 4 (a) - Determinazione del dosaggio efficace di nitrato di litio per i calcestruzzi incorporanti l'aggregato A.

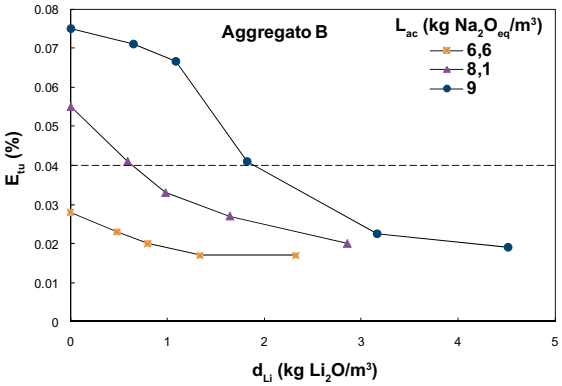


Fig. 4 (b) - Determinazione del dosaggio efficace di nitrato di litio per i calcestruzzi incorporanti l'aggregato B.

Per ogni valore di L_{ac} investigato, si è determinato il dosaggio efficace di nitrato di litio, d_{eff} (kg Li_2O/m^3), come quel dosaggio in grado di produrre un'espansione del calcestruzzo pari a 0,04% a 365 giorni.

L'aggiunta del nitrato di litio a calcestruzzi con Lac inferiore al valore di LSA dell'aggregato non perturba il comportamento non espansivo di questi calcestruzzi, così come dosaggi di litio superiori a d_{eff} non risultano controproducenti. Ciò sta a dimostrare che l'impiego di questo additivo non presenta particolari aspetti di criticità.

Per un dato tipo di calcestruzzo (valore definito di LSA), d_{eff} aumenta sia al crescere di L_{ac} che all'aumentare della forza motrice FM, a parità di L_{ac}.

Come mostrato nella Figura 5, indipendentemente dal tipo di aggregato, si ha una relazione unica tra d_{eff} e FM.

Nella Figura 6 è mostrata la relazione tra il dosaggio efficace di litio, in termini di rapporto molare Li_2O/Na_2O_{eq}, D_{eff}, e la forza motrice massima tollerabile, FM_{tol}.

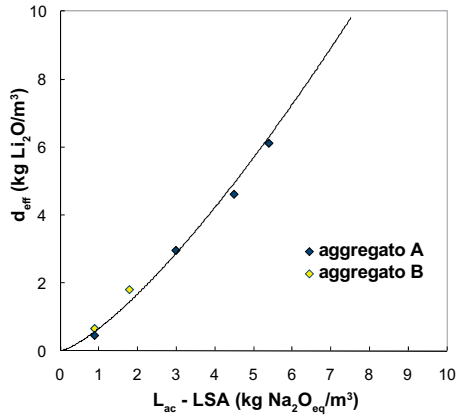


Fig. 5 - Relazione tra dosaggio efficace di nitrato di litio e forza motrice dell'espansione deleteria A-S.

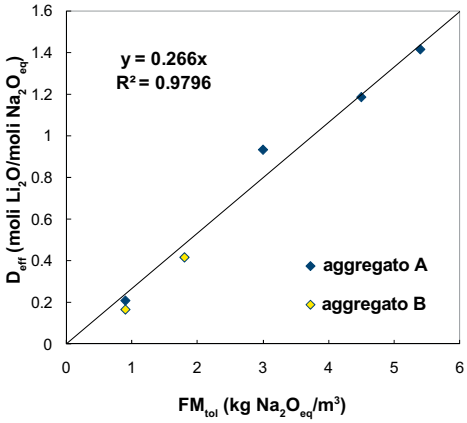


Fig. 6 - Relazione tra dosaggio efficace D_{eff} e forza motrice massima tollerabile FM_{tol}.

Come si può notare, esiste una soddisfacente relazione lineare tra D_{eff} e FM_{tol}, che è indipendente dal tipo di aggregato impiegato, in accordo con quanto previsto dall'equazione (15), il che sta a dimostrare la validità dell'approccio metodologico proposto.

4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO METODOLOGICO

Come esempio di applicazione dell'approccio metodologico proposto, si prende in esame il caso di un'opera in calcestruzzo che richieda un dosaggio di cemento di 400 kg/m³ e, per la quale, si disponga di un cemento Portland con un tenore di alcali del 1% in peso come Na_2O_{eq}.

A questo calcestruzzo corrisponde un contenuto di alcali disponibili, L_{acn}, di 4,0 kg Na_2O_{eq}/m^3, qualora non vi siano contributi di alcali da parte di additivi (superfluidificanti, aeranti, etc.) eventualmente utilizzati.

Se si ritiene, in sede di mix-design, che, durante la vita in servizio della struttura, non vi siano apporti supplementari di alcali da fonti interne ed esterne al calcestruzzo (S_{max} = 0), allora, per scongiurare il rischio di sviluppo di fenomeni espansivi associati alla reazione A-S, si dovranno utilizzare aggregati con LSA > 4,0 kg Na_2O_{eq}/m^3 (FM < 0 nell'equazione (1)). Se, invece, si adotta un valore conservativo di S_{max} di 1,5 kg Na_2O_{eq}/m^3, allora il valore minimo di LSA richiesto per gli aggregati salirà ad oltre 5,5 kg Na_2O_{eq}/m^3.

In base alla scala di reattività degli aggregati proposta in un precedente lavoro [3], valori di LSA nell'intervallo 2,8 – 5,5 kg Na_2O_{eq}/m^3 corrispondono ad aggregati moderatamente reattivi

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

agli alcali, mentre sono considerati lentamente reattivi quegli aggregati con LSA compreso tra 5,5 e 7,4 kg Na_2O_{eq}/m^3.

Considerato che la reperibilità di idonei aggregati è tanto più difficoltosa quanto più alto è il valore di LSA richiesto, il problema dell'approvvigionamento degli aggregati può, in ogni caso, essere risolto additivando il calcestruzzo con un appropriato dosaggio di uno specifico composto del litio.

Nel caso che l'aggregato disponibile sia altamente reattivo (LSA = 2,5 kg Na_2O_{eq}/m^3), per un valore di $L_{ac\ max}$ = 5,5 kg Na_2O_{eq}/m^3, si avrebbe, in assenza di litio, una forza motrice, FM, di 3,0 kg Na_2O_{eq}/m^3 (eq. (3)), in grado di produrre una notevole espansione del calcestruzzo.

Per annullare questa alta forza motrice e, quindi, prevenire lo sviluppo dell'espansione deleteria, si può ricorrere all'impiego di nitrato di litio, utilizzando un dosaggio efficace (D_{eff}) pari a 0,80 moli Li_2O/moli Na_2O_{eq}, corrispondente a 2,1 kg Li_2O/m^3. Questo dosaggio è ricavato ponendo nell'equazione (15) FM = FM_{tol} = 3,0 kg Na_2O_{eq}/m^3 e k''$_{A\text{-}S}$ = 0,266 (Fig. 6).

Il dosaggio efficace di $LiNO_3$ si riduce a 0,40 moli Li_2O/moli Na_2O_{eq}, corrispondente a 0,77 kg Li_2O/m^3, qualora la forza motrice del processo sia pari a 1,5 kg Na_2O_{eq}/m^3, assumendo S_{max} = 0 ($L_{ac\ max}$ = 4,0 kg Na_2O_{eq}/m^3).

Facendo proprio riferimento alle condizioni prospettate nel primo esempio (aggregato altamente reattivo, cemento ad alto tenore di alcali, dosaggio di cemento = 400 kg/m^3, S_{max} = 1,5 kg Na_2O_{eq}/m^3), che sono di estrema severità per la reazione A-S, il dosaggio D_{eff} di 0,80 moli Li_2O/moli Na_2O_{eq} è stato assunto come dosaggio di sicurezza. Ciò anche in considerazione del fatto che la forza motrice tollerabile massima corrispondente a questo dosaggio (FM_{tol} = 3,0 kg Na_2O_{eq}/m^3) è, generalmente, in eccesso rispetto alla forza motrice che può svilupparsi nei calcestruzzi, in situazioni reali.

La diretta proporzionalità tra D_{eff} e FM_{tol} (eq. (15)), anche per valori di FM_{tol} ben superiori a 3,0 kg Na_2O_{eq}/m^3 (almeno fino a 5,4 kg Na_2O_{eq}/m^3, valore ultimo di FM investigato nel presente studio), garantisce, peraltro, la possibilità di incrementare, ove necessario, le prestazioni del calcestruzzo, in termini di FM_{tol}, attraverso aggiunte di litio superiori a quella di sicurezza.

E' degno di nota che il valore di sicurezza di D_{eff} individuato in questo lavoro (0,80 moli Li_2O/moli Na_2O_{eq}) sia molto simile al rapporto molare di 0,74 largamente raccomandato in letteratura come dosaggio efficace per i composti del litio [11-13].

E' altresì degno di nota che la forza motrice massima tollerabile di 3,0 kg Na_2O_{eq}/m^3, corrispondente al dosaggio di sicurezza, sia paragonabile a quella che è possibile garantire attraverso l'impiego di cementi di miscela contenenti aggiunte minerali attive di comprovata efficacia (FM_{tol} = 3,3 – 4,6 kg Na_2O_{eq}/m^3), quando impiegati come inibitori della reazione deleteria A-S [6].

CONCLUSIONI

L'approccio metodologico, basato su parametri di reattività innovativi, quali il Livello di Soglia degli Alcali, LSA, degli aggregati, la Forza Motrice, FM, del processo espansivo e la Forza Motrice massima tollerabile, FM_{tol}, si rivela appropriato per la formulazione di calcestruzzi durevoli, confezionati con aggregati suscettibili di reazione A-S e additivati con composti del litio (nitrato di litio, in questo studio). Con tale approccio, si è ricavata una relazione tra il dosaggio efficace, D_{eff}, e la forza motrice massima tollerabile, FM_{tol}, che consente di prevedere D_{eff} al variare della composizione (contenuto di alcali disponibili della miscela, tipo di aggregato) e delle condizioni di esposizione ambientale del calcestruzzo, che determinano lo sviluppo della forza motrice espansiva. Si è anche definito, per il nitrato di litio, un dosaggio efficace di sicurezza, il cui valore (0,80 moli Li_2O/moli Na_2O_{eq}) è in buon accordo con quello (0,74 moli Li_2O/moli Na_2O_{eq}) raccomandato nella letteratura tecnica.

BIBLIOGRAFIA

[1] M. Berra, T. Mangialardi, A.E. Paolini: "Rapid evaluation of the threshold alkali level for alkali-reactive siliceous aggregates in concrete". Cement and Concrete Composites, 21 (4), 325 (1999).

[2] M. Berra, T. Mangialardi, A.E. Paolini: "A new methodology for the qualification of siliceous aggregates against alkali-silica reaction in concrete". Materials and Structures, 36 (259), 302 (2003).

[3] M. Berra, T. Mangialardi, A.E. Paolini: "Alkali-silica reactivity criteria for concrete aggregates." Materials and Structures, 38 (277), 373-380 (2005).

[4] M. Berra, T. Mangialardi, A.E. Paolini: "Use of an ultra-accelerated concrete prism expansion test for alkali-silica reactivity assessment" Magazine of Concrete Research, 57 (1), 39-47 (2005).

[5] M. Berra, G. Faggiani, T. Mangialardi, A.E. Paolini: "Influence of stress restraint on the expansive behaviour of concrete affected by ASR" Cement and Concrete Research, 40 (9), 1403-1409 (2010).

[6] U. Costa, A. Gallo, G.P. Ioni, T. Mangialardi, A. Migheli, A. Minoia, A.E. Paolini, F. Santinelli, G. Vola, G. Zanardi, F. Zenone: "A new approach to evaluating the effectiveness of pozzolanic and blastfurnace cements against alkali-silica reaction in concrete". XIII ICCC - Int. Congr. on the Chemistry of Cement, 3-10 luglio 2011, Madrid.

[7] M. Berra, T. Mangialardi, A.E. Paolini: "Use of lithium compounds to prevent expansive alkali-silica reactivity in concrete". Advances in Cement Research, 15 (4), 145 (2003).

[8] S. Diamond: "Unique response of LiNO3 as an alkali silica reaction-preventive admixture". Cement and Concrete Research, 29 (8), 1271-1275 (1999).

[9] BCA, Testing Protocol for Greywacke Aggregates BSI/517/1/20 "ad hoc" Group on ASR. British Cement Association, Crownthorne, Berkshire (1999).

[10] C. Tremblay, M.A. Bérubé, B. Fournier, M.D. Thomas, K.J. Folliard: "Experimental investigation of the mechanisms by which LiNO3 is effective against ASR". Cement and Concrete Research, 40, 583-597 (2010).

[11] B.Q. Blackwell, M.D.A. Thomas, A.Sutherland: "Use of lithium to control expansion due to alkali-silica reaction in concrete containing U.K. aggregates". Proceedings of the 4th International Conference on Durability of Concrete, Sydney. ACI SP-170, American Concrete Institute, Detroit, 1997, pp. 649-663.

[12] J.S. Lumley: "ASR suppression by lithium compounds". Cement and Concrete Research, 27 (2), 235-244 (1997).

[13] M.D.A. Thomas, R. Hooper, D.B. Stokes: "Use of lithium-containing compounds to control expansion in concrete due to alkali-silica reaction". Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Québec. Centre de Récherche Interuniversitaire sur le Béton (CRIB), Laval, 2000, pp. 783-792.

CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA PER IL PONTE DELLA MUSICA A ROMA

Andrea Zecchini
Calcestruzzi Spa - Direzione Tecnologica Qualità

INTRODUZIONE

In questo articolo si tratterà dello studio e della valutazione degli aspetti tecnologici riguardanti la progettazione di una miscela di calcestruzzo ad alta resistenza, R_{ck} 85, per la fornitura da parte di Calcestruzzi SpA presso il Ponte della Musica (Roma). Verranno valutate le prove effettuate in fase di pre-qualifica nei laboratori della Calcestruzzi SpA (Laboratorio Casilino) e le verifiche durante la fase di qualifica da parte del Committente presso l'impianto di produzione.

1. DEFINIZIONI

Il calcestruzzo strutturale viene identificato e classificato in riferimento alle sue prestazioni allo stato indurito mediante la resistenza caratteristica R_{ck} verificata attraverso la prova a compressione effettuata su provini cubici o cilindrici. Le normative di riferimento sia europee (1) che quelle italiane (2) suddividono il calcestruzzo attraverso la dicitura CXY/KZ in riferimento alla resistenza a compressione su provini cilindrici (CXY) e su provini cubici (KZ).

Foto 1 - Vista d'insieme del ponte ultimato.

Foto 2 - Vista dell'intradosso della piattaforma.

1.1 Classi di resistenza

I calcestruzzi con resistenza cubica superiore a 55 MPa vengono ulteriormente suddivisi nelle seguenti categorie (3): calcestruzzi con resistenza cubica inferiore a 55 MPa e con rapporto a/c minore di 0.55 (Calcestruzzo ordinario o a resistenza normale – NR); calcestruzzi con resistenza cubica superiore a 55 MPa ed inferiore a 75 MPa con rapporto a/c minore di 0.45 (Calcestruzzo ad alte prestazioni – AP); calcestruzzi caratterizzati da un rapporto a/c minore di 0.35 e una resistenza cubica superiore a 75 MPa ed inferiore a 115 MPa (Calcestruzzo ad alta resistenza – AR);

I calcestruzzi AR sono caratterizzati da basso rapporto in peso acqua/legante (a/l), da alto dosaggio di legante, dall'impiego di aggiunte minerali reattive verso l'idrossido di calcio (ceneri volanti, argille calcinate, pozzolane naturali, microsilice) che intervengono sulle caratteristiche fisico-meccaniche e sulla durabilità del calcestruzzo e di additivi chimici superfluidificanti.

Il dosaggio del legante varia nell'intervallo 400 - 550 Kg/m^3 e rappresenta il totale del cemento Portland più le aggiunte minerali attive. Il rapporto a/l è generalmente nell'intervallo 0,25 - 0,35.

2. MISCELA - CARATTERISTICHE

Per la fornitura relativa al Ponte della Musica è stato commissionato un calcestruzzo R_{ck} 85 con diametro massimo 16 mm, la classe di esposizione ambientale scelta per l'opera XC4 e consistenza S5.

3. PROVE DI PRE-QUALIFICA

Presso il laboratorio centrale della zona Lazio sono state effettuate le prime verifiche e le prime analisi di fattibilità del calcestruzzo. I primi studi di laboratorio avevano l'obiettivo di individuare materie prime tali da assicurare il rispetto contemporaneo dei tre requisiti fondamentali di una miscela di calcestruzzo preconfezionato ad Alta Resistenza:

- requisito Tecnologico – il ridotto rapporto acqua / cemento;
- requisito Reologico – Adeguata Lavorabilità e idoneo mantenimento di lavorabilità;
- requisito Meccanico – Resistenza a compressione di progetto.

La scelta dei componenti e dei vari dosaggi per il calcestruzzo AR è ricaduta su:

- aggregati di natura basaltica;
- cemento tipo 52.5 R Cem I;
- addditivo superfluidificante;
- aggiunte di tipo II (Fumi di silice)

descritte nel prossimo paragrafo.

3.1 Materie prime - aggregati

Aggregato fine : I calcestruzzi ad alta resistenza hanno un

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

Foto 3 - Vista dei piedritti in calcestruzzo di spiccato dell'arco.

Foto 4 - Vista della soletta in fase di getto.

Foto 5 - Vista della soletta a getto completato.

quantitativo di legante cementizio superiore rispetto ai calcestruzzi ordinari l'apporto di particelle fini alla miscela richiesto alle sabbie, fondamentale per le formulazioni correnti, non è determinante per questo tipo di miscele dove la distribuzione granulometrica della sabbia non ha conseguenze sul bleeding e sulla segregazione ma bensì solo ed esclusivamente sulla richiesta d'acqua.

Aggregato grosso: La scelta dell'aggregato grosso risulta di fondamentale importanza per questo tipo di miscele dove il ridotto rapporto acqua/cemento (cc 0.30) conferisce alla matrice cementizia un livello di resistenza molto simile e a volte uguale a quello dell'aggregato stesso. In questi casi ogni ulteriore riduzione del rapporto acqua/cemento non crea nessuna tipologia di vantaggio in termini di resistenza a compressione. L'unica possibilità, in casi analoghi, è quella di cambiare la tipologia di aggregato con uno avente caratteristiche meccaniche migliori. In fase di pre-qualifica della miscela, i risultati a compressione hanno precluso l'utilizzo di alcuni aggregati e quindi obbligatoriamente richiesto la loro sostituzione.

Di seguito sono stati riportate due tipologie di mix (A e B) e i relativi risultati in termini meccanici nei quali i componenti sono dosati in egual misura ma la tipologia di aggregato grosso, nel caso del mix B, è di natura basaltica (Tabella 1 – Figura 1).

Tabella 1 - Resistenze a compressione A e B

	R85 aggregati normali (MPa)	R85 aggregati basaltici (MPa)
3 gg	63	70.1
7 gg	78.7	84.5
14 gg	81	86.3
28 gg	81.4	87.8

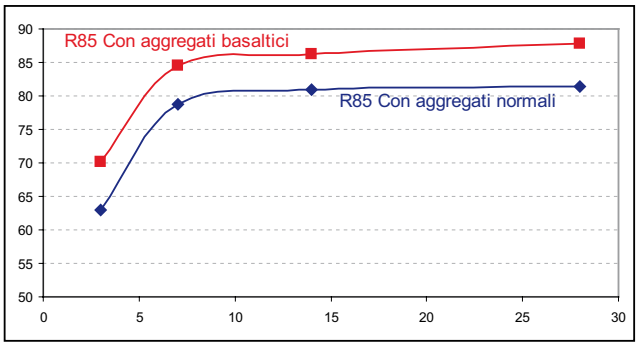


Fig. 1 - Resistenze a compressione mix A e B.

Come si può osservare lo sviluppo della resistenza nei calcestruzzi AR, con rapporti acqua /cemento inferiori a 0.35, risulta molto influenzato dalla natura litologica e dalle caratteristiche meccaniche dell'aggregato grosso.

La forma e la tessitura dell'aggregato grosso influenza, come l'aggregato fino, la reologia della miscela e la richiesta d'acqua. Viene preferita una tipologia di aggregato grosso con superficie frantumate perché queste generano una sorta di effetto incastro meccanico all'interno della miscela. Al contrario si preferisce evitare, anche nel caso di calcestruzzi ordinari, tipologie di aggregati con particelle aventi forme allungate, le quali potrebbero creare, in fase indurita, zone di disomogeneità con possibili piani di rottura preferenziali.

Cemento: Per questo tipo di prodotto è stato indispensabile utilizzare il cemento 52.5 R tipo Cem I in modo tale da garantire il requisito meccanico richiesto.

Aggiunte - Fumo di silice: Il fumo di silice o microsilice è un sottoprodotto della fabbricazione di silicio e leghe ferro-silicio. La microsilice, grazie alle sue caratteristiche, possiede svariate funzioni, le più riconosciute attualmente sono:

- Funzione "Fillerizzante" : La microsilice si presenta con particelle sferiche con dimensioni variabili tra lo 0.1 µm e 2 µm e superficie specifica (Blaine) con valori compresi tra 15000 e 25000 m^2/kg, quindi con caratteristiche dimensionali 10 volte inferiori a quelle dei cementi normalmente utilizzati per la produzione di calcestruzzo. Questo consente hai granuli di microsilice di collocarsi all'interno della matrice cementizia con la creazione di una struttura molto più compatta.
- Funzione "Pozzolanica": Le caratteristiche mineralogiche e la composizione chimica della microsilice rendono il prodotto altamente reattivo e quindi valutabile, non solo come un'aggiunta di inerte all'interno della miscela, ma bensì un contributo al dosaggio del cemento. L'impiego di fumo di silice costituisce un mezzo per innalzare e per conseguire la resistenza di progetto e la lavorabilità desiderata.

Microstruttura e zona di transizione: Nei calcestruzzi ordinari, quindi con rapporto a/c compreso tra 0.45 e 0.65, la microstruttura della matrice è caratterizzata da un'elevata porosità e da una zona di transizione con l'aggregato di circa 50µm. La zona di transizione si presenta con una porosità, una densità ed una morfologia completamente differente dalla matrice cementizia indisturbata (Figura 2).

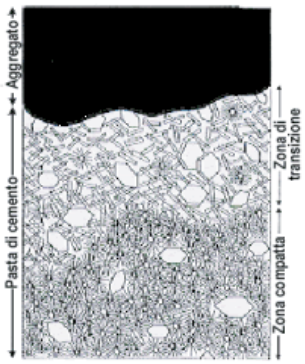


Fig. 2 - Schema della zona di transizione (4).

Le differenze morfologiche e di densità comportano una "difettosità" all'interno della zona di interfaccia e questa causa un difficile trasferimento delle tensioni dalla pasta di cemento all'aggregato, la conseguenza di ciò è la scarsa influenza delle caratteristiche degli aggregati sulle proprietà della matrice legante.

Nei calcestruzzi AR la zona di interfaccia è praticamente nulla e le proprietà meccaniche dell'aggregato sono molto simili a quelle della pasta di cemento, questo comporta un migliore trasferimento delle tensioni tra matrice e aggregato, quindi un comportamento molto più elasto-lineare anche fino a tensioni molto vicine al carico di rottura.

L'utilizzo della microsilice comporta un aumento della durabilità dell'opera perché l'eliminazione totale o parziale della zona di transizione non permette agli elementi "dannosi" per il calcestruzzo di permeare all'interno dello stesso.

3.2 Miscele di prova

Qui di seguito sono elencate alcune prove effettuate nei laboratori Calcestruzzi SpA durante la progettazione dell'R_{ck} 85 per la fornitura presso il Ponte della Musica. Le miscele sono denominate A – B – C – D i cui costituenti sono elencati in Tabella 2.

Tabella 2 - Componenti miscele

Componenti	Miscele			
	A	B	C	D
Cemento 52.5 R Cem I (kg)	530	530	480	530
Microsilice (kg)			50	40
Sabbia (kg)	526	654	745	630
Aggregato grosso ordinario (kg)			908	
Aggregato grosso basaltico (kg)	1140	1054		990
Add. Superfluidificante (litri)	8	6.9	7.2	10.6
Add. SRA (litri)			4.8	
Add. Espansivo (kg)				20
MV Teorica (kg/mc)	2382	2411	2364	2386

Per ogni singola miscela sono state verificate le caratteristiche reologiche attraverso la misurazione dell'abbassamento al cono di Abrams (UNI EN 12350-2) a intervalli prestabiliti (Tabella 3 – Figura 3).

Tabella 3 - Consistenza delle miscele

Slump a:	Miscele			
	A	B	C	D
0	180	270	180	260
30	0	230	170	240
60	0	180	140	210

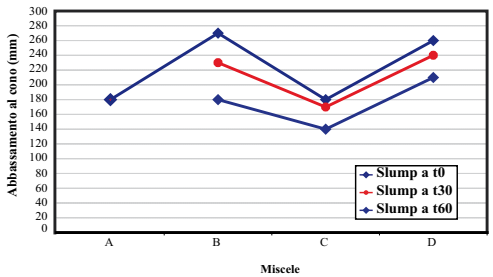


Fig. 3 - Valutazione della consistenza (UNI EN 12350:2).

Successivamente sono state verificate le resistenze a compressione (UNI EN 12390-3) rispettivamente dopo 3, 7 e 28 giorni di maturazione alle condizioni standard (Tabella 4 – Figura 4).

Facendo le opportune considerazioni nei riguardi della tipologia di richiesta da parte del Committente e soprattutto in considerazione della tipologia di opera, della complessità e della densità di armatura all'interno dei piedritti, la miscela più idonea risulta la miscela D.

Tabella 4 - Resistenza a comressione delle miscele

R_{ck} a:	Miscele			
	A	B	C	D
3 gg	78	80.5	63	71.3
7 gg	80	82.3	78.7	86.8
28 gg	84.6	86.5	81.4	106.3
Rapporto a/c eq.	0.340	0.330	0.317	0.316

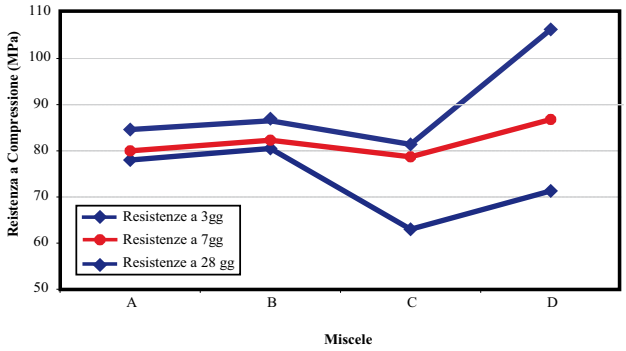


Fig. 4 - Valutazione delle resistenze a compressione (UNI EN 12390:3).

Un'altra considerazione da effettuare è nei riguardi della resistenza a compressione in termini di resistenza di progetto.

$Rm_{target} = R_{ck} + k*\sigma$

$Rm_{target} = 85 + (1.64*5) = 93.2$ MPa

Nella valutazione della resistenza di progetto è stata presa in considerazione anche la curva del calcestruzzo con il cemento tipo I 52.5R.

Come si può notare dalla Figura 5 lo sviluppo della resistenza con rapporti acqua/cemento molto bassi risente di qualsiasi piccola variazione.

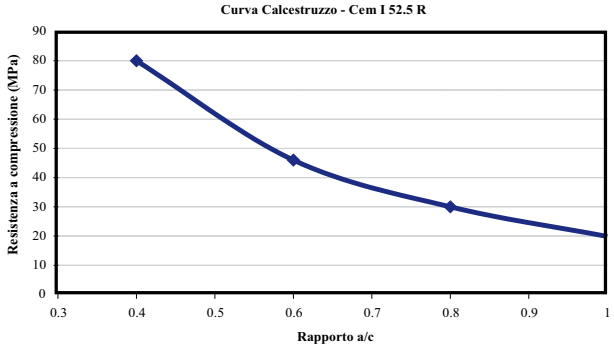


Fig. 5 - Curva del calcestruzzo 52.5 R Cem tipo I.

Piccole variazioni sul rapporto acqua/cemento possono creare grosse variazioni sulle resistenze, per queste motivazioni la progettazione della miscela in oggetto è stata effettuata con valori a 28 giorni di circa 100 MPa.

ENCO Porte Aperte 14 Ottobre 2011
Per maggiori informazioni: www.encosrl.it

4. PRE-QUALIFICA PRESSO LABORATORIO ACCREDITATO

Nella progettazione della miscela risultava utile verificare anche alcune caratteristiche della miscela allo stato indurito, la Calcestruzzi SpA in collaborazione con un laboratorio riconosciuto dal Ministero del Lavori Pubblici ha effettuato sulla miscela le seguenti prove:
- verifica del ritiro idraulico;
- verifica del modulo elastico secante a compressione.

4.1 Ritiro idraulico

La valutazione del ritiro idraulico è stata effettuata a determinati intervalli temporali con riferimento ad un valore "zero" equivalente al tempo di fine presa del calcestruzzo.

Le contrazioni che avvengono nel calcestruzzo e che danno luogo al ritiro sono distinguibili in due differenti tipologie:

- Il Ritiro Autogeno

  Questo è dovuto essenzialmente a motivi interni del calcestruzzo poiché avviene anche quando non sussistono variazioni igrometriche e termiche nell'ambiente di maturazione.

  Tale fenomeno è causato dall'idratazione del cemento, i prodotti derivati dalla reazione occupano un volume inferiori nei confronti di quelli che hanno prodotto la reazione.

  Questa contrazione dipende fondamentalmente dal tenore di cemento utilizzato per il confezionamento della miscela.

- Il Ritiro Igrometrico

  Le cause che provocano il ritiro igrometrico, a differenza di quello precedentemente descritto, sono imputabili a condizioni esterne al prodotto.

  L'evaporazione dell'acqua contenuta nella miscela verso l'ambiente esterno provoca l'instaurarsi di contrazioni all'interno della massa di calcestruzzo.

  Tale fenomeno dipende esclusivamente dai fattori ambientali quali la temperatura esterna, l'umidità relativa e la velocità dell'aria nonché dal rapporto a/c poiché un eccesso di acqua libera provocherebbe un aumento del ritiro.

Normalmente quando si fa riferimento al ritiro ci si riferisce al ritiro idraulico considerato come deformazione totale ottenuta dalla somma del ritiro autogeno e dal ritiro idrometrico.

Qui di seguito vengono riportati i risultati ottenuti in laboratorio sulla miscela R_{ck} 85 (Tabella 5 – Figura 6).

Tabella 5 - Determinazione del Ritiro Idraulico

Stagionatura (ore/gg)	24 h	48 h	3 gg	6 gg	7 gg	14 gg	28 gg
Ritiro µm/m	-10	-110	-170	-230	-240	-330	-390

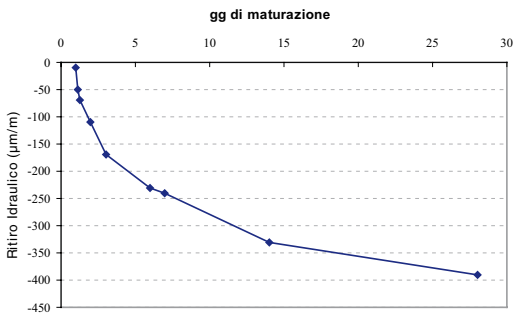


Fig. 6 - Grafico del ritiro idraulico

Viene quindi determinato un ritiro idraulico dopo 28 giorni di maturazioni di -390 µm/m quindi valori riconducibili a calcestruzzi ordinari.

4.1.2 Modulo elastico secante a compressione

Durante la pre-qualifica della miscela si è determinato sperimentalmente il modulo elastico sia dopo 7 giorni di maturazione e sia dopo 28 giorni di maturazione.

Il modulo elastico risulta essere un parametro fondamentale nella progettazione e nelle applicazioni strutturali. Tale proprietà, differentemente dall'acciaio, dipende da molti fattori comunque tutti riconducibili alla natura composita del calcestruzzo.

In letteratura sono presenti molte relazioni tra la resistenza a compressione e il modulo elastico secante.

Qui di seguito sono riportati i valori ottenuti dopo 7 giorni di maturazione e 28 giorni di maturazione e confrontati con la relazione presente nelle NTC del 14-01-2008.

Tabella 6 - Determinazione del Modulo Elastico Secante a Compressione

	Provini		
	1	2	Medie
Resistenza a compressione a:			
7 gg	75.6	75.1	75
28 gg	92.9	92.4	93
Mod. elastico secante DM 14-01-2008			
7 gg	40363	40282	40322
28 gg	42937	42867	42902
Mod. elastico secante sperimentale			
7 gg	41346	41767	41557
28 gg	42269	43700	42985

Dalla tabella 6 si può verificare come esista una buona corrispondenza, soprattutto a 28 giorni di maturazione, tra il valore sperimentale e quello calcolato attraverso la correlazione presente nelle NTC del DM 14-01-2008.

5. CONCLUSIONI

La realizzazione dell'R_{ck} 85 per il Ponte della Musica, così come per tutte le opere di eccellenza, ha richiesto un'intensa attività di laboratorio per la progettazione e la messa a punto della miscela.

Oggigiorno grazie allo sviluppo nell'industria degli additivi superfluidificanti, l'utilizzo di varie tipologie di aggiunte minerali e del progresso tecnico degli impianti risulta possibile produrre, con relativa semplicità, calcestruzzi ad Alta Resistenza con rapporti acqua / cemento inferiori a 0.35 su tutto il territorio nazionale.

La Calcestruzzi SpA, insieme al suo staff tecnico, sviluppa e asseconda le richieste dei progettisti sia in termini di prodotti ad elevate performance meccaniche, come il prodotto oggetto della seguente memoria, sia attraverso nuovi prodotti innovativi valorizzando e utilizzando materie prime seconde.

6. RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro e lo studio della miscela sono stati svolti dalla direzione tecnologia e qualità della zona Lazio ed in particolare in collaborazione con il Geom. Giuseppe Bottoni, Geom. Franco Francucci e il Geom. Domenico Sassone.

8. BIBLIOGRAFIA

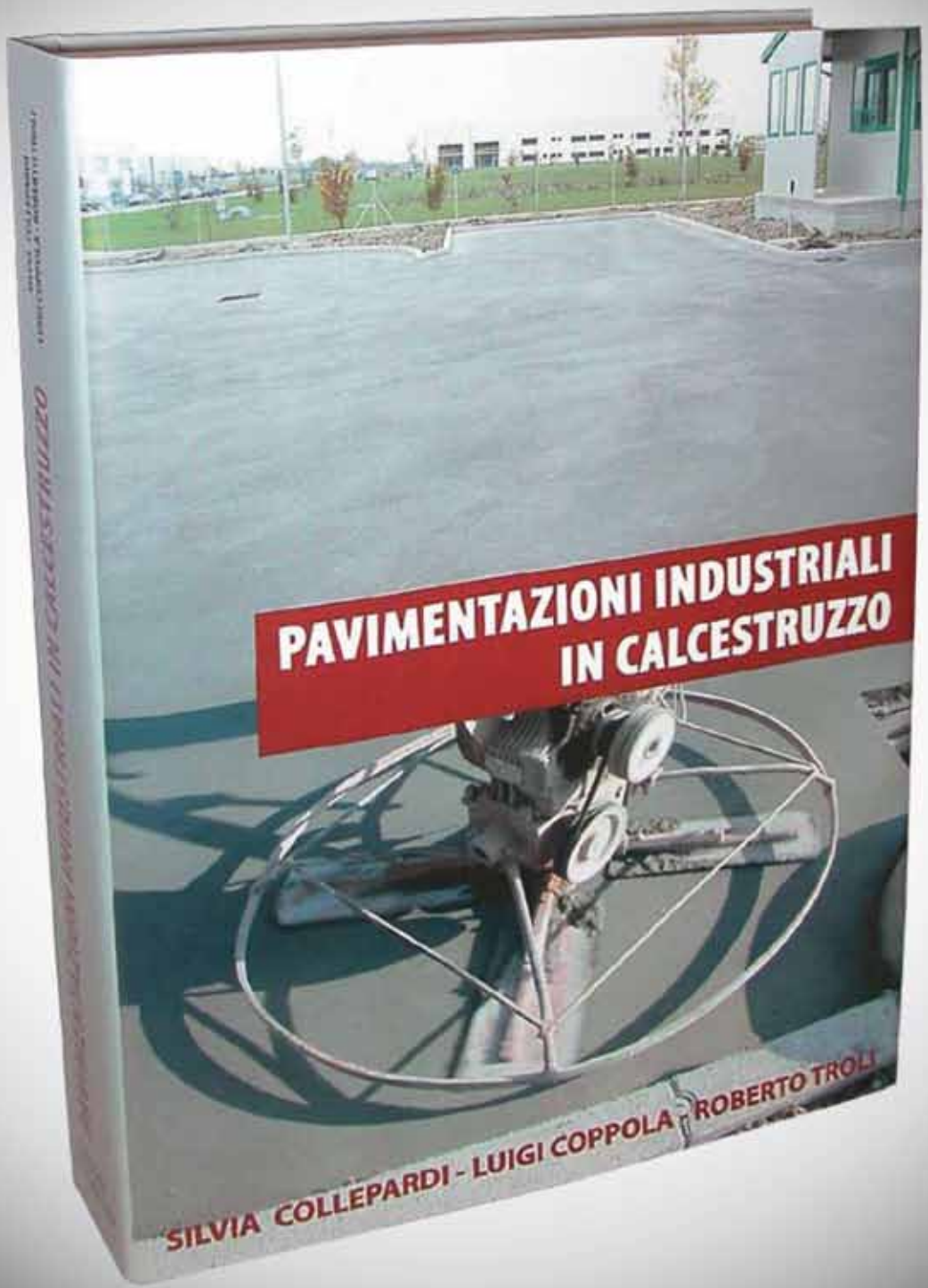
(1) EN 206:2006

(2) UNI EN 11104:2003

(3) Linee Guida su calcestruzzi strutturali Alta Resistenza Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici Servizio Tecnico Centrale

(4) "Il Nuovo Calcestruzzo" – Mario Collepardi Ed. Tintoretto

... saperle costruire è un'arte ....



Enco Srl - Via delle Industrie, 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)
Tel. 0422 963 771 - Fax 0422 963237 - www.encosrl.it - info@encosrl.it

Acquistabile tramite il sito internet www.encosrl.it oppure telefonando al 0422 963771

MILANO PER WORLD EXPO 2015

Porta Nuova, un grande progetto, realizzato dal Gruppo Hines, di riqualificazione e trasformazione urbana di 300 mila mq di aree dismesse con destinazione commerciale, terziaria, residenziale, espositiva, alberghiera, culturale e con realizzazioni di strutture di supercalcestruzzi Rck 85 MPa con altezza fino a 200 metri.

- **CALCESTRUZZI** prodotti da **Holcim Srl**
- **ADDITIVAZIONI E TECNOLOGIE** dei calcestruzzi: **Tecnochem Italiana** in collaborazione con **Enco Srl**
- **GENERAL CONTRACTORS:**
  "Garibaldi": Impresa **Colombo Spa**
  "Varesine": Imprese **CMB** e **Unieco**
  "Isola": Impresa **ZH – Zimmerhofer**
- **PROGETTISTI:**

- **MSC Associati**
- **ARUP**
- **Redesco**
- **Boeri**
- 28 Architetti di 8 paesi diversi

TECNOCHEM ITALIANA SPA
è membro del
GREEN BUILDING COUNCIL

Additivi e tecnologia dei calcestruzzi
"Dal Progetto al Cantiere" con Engineering
e laboratori mobili Tecnochem

TECNOCHEM È LEED®

LEED®
Leadership **E**nergy
Environmental **D**esign

technology

Strutture di fondazione con spessori fino a 5,5 metri, realizzate con calcestruzzo autocompattante, Rck 40 MPa, a bassissimo calore di idratazione, monitorato in opera con termocoppie (Δt ≤ 25°C), formulato con le seguenti additivazioni ed aggiunte:

TECNOS® *azur*	Superfluidificanti Policarbossilati specialmente formulati "ad hoc"
PLASTARD® 18	Ritardante integrale, Fluidificante
MICROBETON® POZ/ H	Microsilici ad elevatissima reattività pozzolanica e reodinamica
SCC-VISCO	Regolatore di viscosità
INSULATOR-tec 10	Guaina termica protettiva per calcestruzzi armati

Strutture progettate con pilastri in supercalcestruzzo autocompattante Rck 70/85 MPa, reodinamico, pompabile fino a 160 m, resistente al fuoco, con mantenimento della lavorabilità fino a 180 minuti, formulato con le seguenti additivazioni ed aggiunte:

TECNOS® *azur*	Superfluidificanti Policarbossilati specialmente formulati "ad hoc"
PLASTARD® 18	Ritardante integrale, Fluidificante
MICROBETON® POZ	Fumi di Silice
MICROBETON® POZ/H	Microsilici ad elevatissima reattività pozzolanica e reodinamica
SCC-VISCO	Regolatore di viscosità
SHRINKO-tec® nano 4	S.R.A. Shrinkage Reducing Agent
INSULATOR-tec 10	Guaina termica protettiva per calcestruzzi armati

I primi grandi Progetti in Italia gestiti come LEED®

Milano per Expo 2015
GARIBALDI

Milano per Expo 2015
VARESINE

Milano per Expo 2015
ISOLA

Progettazione della durabilità e sostenibilità ambientale con crediti LEED®:
Energia ed atmosfera - Materiali e risorse
Qualità ambientale -
Innovazione nella progettazione

TECNOCHEM ITALIANA SPA
TECNO ECO LOGIC CHEM
Via Sorte 2/4 - 24030 Barzana (BG) Italy - Tel. +39 035 554811 - Fax +39 035 554816
info@tecnochem.it - www.tecnochem.it