2012
Quadrimestrale
Anno XVII
Numero 57

ENCO JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Ritornando da Praga

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

Calcestruzzi
Italcementi Group

marineconcrete®

CONSERVAZIONE GARANTITA

DUREVOLE & **UNICO** NEL SUO GENERE.

La ricetta della **durabilità nell'ambiente marino** è targato Calcestruzzi.

Con **Marine**concrete® arriva sul mercato il **primo ed unico calcestruzzo a prestazione, specifico per la realizzazione di strutture durevoli e resistenti all'azione corrosiva dell'aria e dell'acqua di mare**. Sottoposto alle condizioni estreme dell'ambiente marino, **Marine**concrete® ti offre risultati che vanno ben oltre le normative vigenti.

Assapora il gusto di un prodotto innovativo, contattaci per saperne di più!

www.calcestruzzi.it

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

Progetto Durabilità

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 XVII - Numero 57

Direttore Mario Collepardi

RITORNANDO DA PRAGA

Dal 29 Ottobre al 2 Novembre di quest'anno si sono tenute a Praga due Conferenze internazionali organizzate dall'*American Concrete Institute*: una sui superfluidificanti ed altri additivi chimici per il calcestruzzo e l'altra sui recenti progressi nella tecnologia di questo materiale. Questo numero di *Enco Journal* è completamente dedicato ai contributi dei ricercatori italiani a queste due conferenze. I contributi italiani sono stati molto numerosi: nella conferenza sugli additivi sono state presentate 9 ricerche da un totale di 30 co-autori dei quali 9 universitari e 21 ricercatori industriali; nella conferenza sui recenti progressi sono state illustrate 10 ricerche da un totale di 38 co-autori dei quali 15 universitari e 23 ricercatori industriali. In questo numero di *Enco Journal* saranno illustrati 4 contributi tra quelli presentati a Praga.

Innanzitutto va menzionato l'*Award* concesso al Dr. **Salvatore Tavano** per il suo "*Outstanding research contributions in the broad area of chemical admixtures*". Come tutti quelli che ricevono questo ambito riconoscimento, anche Tavano ha tenuto una conferenza intitolata "*Lo sviluppo dei superfluidificanti per calcestruzzo in Europa negli ultimi venti anni*" che viene qui pubblicata in Italiano.

Il secondo articolo che pubblichiamo è relativo alla ricerca presentata dall'Ing. **Silvia Collepardi** (co-autori: Mario Collepardi. Giacomo Iannis e Alessandro Quadrio Curzio) intitolata "*Cenere pesante da inceneritori di residui dai solidi urbani in calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni*". Si tratta di una nuovissima applicazione di un residuo della lavorazione dei termovalorizzatori consistente in cenere pesante macinata la cui produzione verrà attivata nel 2013 da Petracem a Paderno Dugnano (MI).

Il terzo articolo intitolato"*Valutazione delle prestazioni reologiche e meccaniche di un additivo superfluidificante innovativo a base fosfonica*" è presentato dal Prof. **Luigi Coppola** (co-autori: Sergio Lorenzi, Alessandra Buoso e Maurizio Bellotto). Si tratta di una ricerca sulla recente scoperta e sulle applicazione di additivi superfluidificanti fosfonici.

Il quarto articolo di Praga è relativo alla ricerca illustrata dall'Ing. **Valeria Corinaldesi** (coautrice Saveria Monosi) intitolata "*Caratterizzazione di calcestruzzi autocompattanti colorati*". Si tratta di un interessante lavoro per rendere meno "grigio" il tipico colore del calcestruzzo da destinare soprattutto a costruzioni di interesse architettonico.

Infine,da ultimo, ma non ultimo per importanza l'articolo del Dott. **Giorgio Ferrari** (co-autori Alberto Brocchi, Fiorenza Cella, Maria Chiara Dalconi e Federico longhi), intitolato "*Aggregati dal calcestruzzo residuo*", descrive una nuova tecnologia per riciclare il calcestruzzo fresco preconfezionato che ritorna in autobetoniera nella centrale di betonaggio.

Per concludere voglio menzionare i nomi delle Università e delle Imprese che, pur in un momento di grave crisi che attanaglia anche il settore delle costruzioni in calcestruzzo, hanno presentato 19 contributi alla ricerca in questo settore destinati alle due Conferenze *ACI* di Praga. Per le Università ricordiamo: Politecnico di Milano, Università degli Studi della Basilicata, Università di Bergamo, Università di Milano Bicocca, Università di Padova e Università Politecnica delle Marche. Per le Imprese menzioniamo: Addiment, Bozzetto, Buzzi, Enco, Italcementi, Mapei, Petracem e Tecnochem.

Mario Collepardi
ACI Honorary Member

In copertina una vista di Praga dove si sono tenute le due conferenze.

SOMMARIO

LO SVILUPPO DEI SUPERFLUIDIFICANTI PER CALCESTRUZZO IN EUROPA NEGLI ULTIMI VENTI ANNI
di S. Tavano (pag. 5)

CENERE PESANTE DA INCENERITORI DI RESIDUI SOLIDI URBANI IN CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI AD ALTE PRESTAZIONI
di S. Collepardi, M. Collepardi G.Iannis, A.Q. Curzio (pag. 11)

LA BELLISSIMA PRAGA (pag. 16)

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI REOLOGICHE E MECCANICHE DI UN ADDITIVO SUPERFLUIDIFICANTE INNOVATIVO A BASE FOSFONICA
di L. Coppola, S. Lorenzi, A. Buoso, M. Bellotto (pag. 19)

CARATTERIZZAZIONE DI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI COLORATI
di V. Corinaldesi, S. Monosi (pag. 22)

AGGREGATI DAL CALCESTRUZZO RESIDUO
di G. Ferrari, A. Brocchi, F. Cella, M.C. Dalconi, F. Longhi (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 Villorba (TV)
Via Verdi 45/46

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

Per calcestruzzi dinamici

CHRYSO®Fluid Premia 340

Le prestazioni del CHRYSO®Fluid Premia 340 si estendono su 360° per soddisfare l'insieme delle vostre esigenze nell'ambito della prefabbricazione.

Vi sarà già nota la qualità della gamma **CHRYSO®Fluid Premia**, rivolta alla produzione di calcestruzzi armati e precompressi. Scoprite ora **CHRYSO®Fluid Premia 340**: il giusto compromesso tra prestazioni finora inedite, flessibilità di utilizzo ed elevate resistenze meccaniche.

Usufruirete dei seguenti benefici:

- calcestruzzo regolare e omogeneo;
- getto facilitato nelle casseforme;
- livello di Rc raggiungibile alle brevi stagionature, accomunato alle più stringenti esigenze di sicurezza.

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

CHRYSO Italia Sr.l. - Via Madonna - 24040 Lallio-Bergamo - ITALIA - Tel. +39 035 693 331 - Fax +39 035 693 684

CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

www.chryso.com

LO SVILUPPO DEI SUPERFLUIDIFICANTI PER CALCESTRUZZO IN EUROPA NEGLI ULTIMI VENTI ANNI

Salvatore Tavano
Presidente ASSIAD

Dott. Salvatore Tavano

PREMESSA

Già alla fine degli anni 60 prima in Giappone e poi in Europa furono introdotti sul mercato i prodotti di sintesi derivati dalla policondensazione di monomeri solfonati con formaldeide (1) a base naftalina (NSF) in Giappone e di melammina (MSF) in Germania (Fig.1).

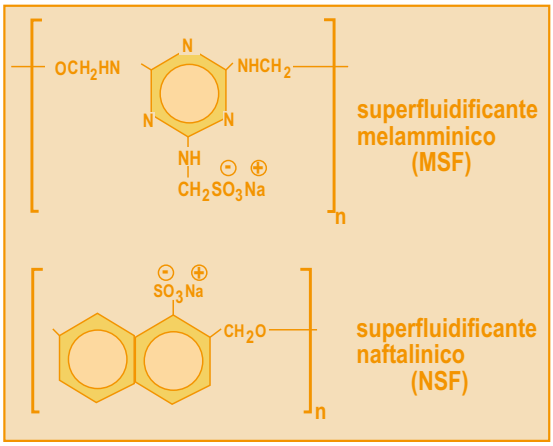


Fig. 1 - Formula di struttura di MSF e NSF

In Germania ed in Italia, ma subito anche nel resto d'Europa, si affermò un prodotto in soluzione acquosa al 20 % di MSF che mostrava spiccate proprietà di fluidificazione degli impasti cementizi senza inglobamento d'aria e/o ritardi delle resistenze meccaniche iniziali. La capacità fluidificante di questo prodotto, brevettato da SKW (2) su invenzione di Aignesberger nel 1966, era tale che all'inizio del suo impiego si verificarono molti insuccessi per l'incapacità di controllare il fenomeno di fluidificazione con frequenti casi di segregazione del calcestruzzo. Questa difficoltà nel comprendere e dominare le grandi potenzialità di questo prodotto determinarono all'inizio scetticismo fra gli addetti ai lavori. Inoltre il suo costo causato dall'alto dosaggio e dal prezzo unitario elevato rispetto ai fluidificanti tradizionali a base ligninsolfonato, indussero alcuni operatori del settore a non credere nel successo di questa nuova generazione di additivi.

In breve tempo, tuttavia, si comprese che le difficoltà tecniche d'impiego potevano essere superate, anche grazie al contributo di assistenza tecnica del produttore che, organizzando conferenze periodiche sull'argomento dal 1971 al 1981, (3) consentì agli esperti di tecnologia del calcestruzzo di tutta Europa di confrontarsi sui vari problemi. Anche il problema dell'elevato costo trovò una soluzione per lo meno in alcuni settori di mercato come quello del calcestruzzo prefabbricato poiché l'uso del MSF, come forte riduttore d'acqua d'impasto, consentiva di incrementare notevolmente le resistenze iniziali in modo da ottimizzare i cicli produttivi e risparmiare energia per la maturazione a vapore. Un altro importante vantaggio, che indusse i prefabbricatori ad utilizzare questo additivo fu la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro perché nelle lavorazioni dove era previsto un calcestruzzo a slump di 2-3 cm si poteva passare a un impasto fluido con slump di 16-18 cm a pari rapporto acqua/cemento (a/c) senza ritardi delle resistenze iniziali al termine del ciclo di maturazione a vapore (4).

In Germania, verso la fine degli anni 70, si avviò anche una prima esperienza nel calcestruzzo preconfezionato prodotto a consistenza superfluida. L'uso di questa tipologia di calcestruzzo facilitava la messa in opera specialmente nelle strutture verticali con elevata densità di armature come anche nelle solette o impalcati per ponti. Questo conglomerato cementizio definito anche autolivellante, quindi particolarmente adatto ai getti orizzontali, può essere considerato un precursore del *Self-Compacting Concrete* (5).

Parallelamente anche la normativa tedesca sul calcestruzzo (DIN 1045), che a quel tempo prevedeva tre classi di consistenza (umida, plastica e fluida), si adeguò introducendo un'ulteriore classe di consistenza denominata "F" con slump di 20-22 cm e uno spandimento alla tavola a scosse di 50-60 cm. L'additivo superfluidificante veniva aggiunto prima dello lo scarico dell'autobetoniera passando da consistenza plastica (slump di 6-8 cm) a consistenza superfluida.

Nel frattempo nel 1978 il CANMET in associazione con l'ACI, raccogliendo anche le esperienze che si stavano conducendo in Giappone fin dal 1960 con l'invenzione da parte

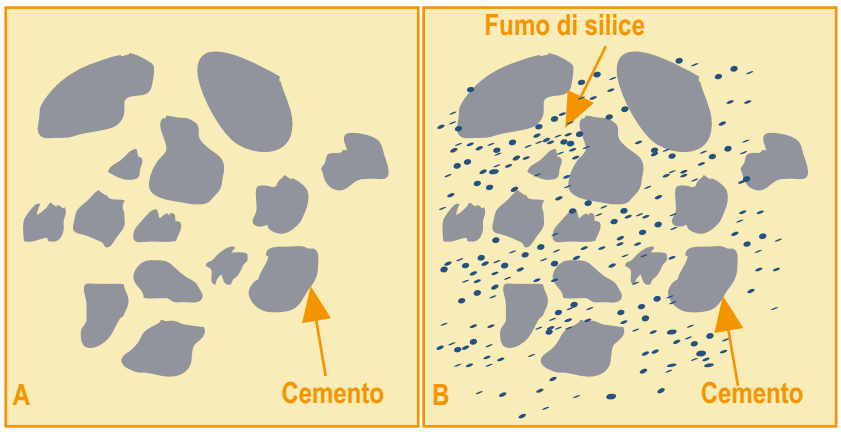


Fig. 2 - Pasta di cemento densificata con l'impiego di fumo di silice (7)

di Hattori (6), organizzò ad Ottawa la prima Conferenza internazionale sui Superfluidificanti per calcestruzzo ripetuta poi nel 1981. Nel corso di questa seconda conferenza furono presentati ben 36 lavori tra i quali anche la memoria di H.H. Bache (7), sull'impiego combinato di NSF e fumo di silice, che gettò le fondamenta per una nuova tecnologia di calcestruzzi e malte speciali ad alte ed altissime resistenze meccaniche (Fig. 2).

In questi calcestruzzi l'uso del superfluidificante NSF ad alti dosaggi (da 2 a 3 volte il normale dosaggio) consentiva la dispersione delle particelle ultrafini di fumo di silice esaltandone la loro capacità di densificare la matrice cementizia con conseguenti risultati spettacolari in termini di alta resistenza meccanica, di riduzione della permeabilità all'acqua e agli agenti aggressivi, e di incremento della resistenza all'usura. Questo lavoro di ricerca fu oggetto di un brevetto (8) depositato alla fine degli anni 70 di proprietà della Aalborg Cement Company a nome Bache. Oggi, scaduto il brevetto, l'impiego combinato del fumo di silice con i superfluidificanti è diventato di uso comune per tutte le produzioni di calcestruzzi ad altissima esistenza (> di 100 MPa) e con rapporti a/c intorno a 0.20-0.25 dove in c si include anche il dosaggio di fumo di silice moltiplicato per il cosiddetto fattore di equivalenza (k) compreso tra 1 e 3.

Dopo questo sviluppo dei superfluidificanti, con la crescita ed il consolidamento negli anni 1980-2000 dell'uso dei prodotti a base di MSF ed NSF, nel periodo 2000-2010 si sono affacciati sul mercato i nuovi superfluidificanti a base di policarbossilati-eteri (PCE).

POLICARBOSSILATI ETERI

All'inizio del nuovo millennio anche in Europa,come stava accadendo in Giappone, i ricercatori si persuasero che i risultati importanti ottenuti con MSF e NSF fossero arrivati al loro massimo livello e che, per proseguire nello sviluppo tecnologico del calcestruzzo con superfluidificanti, fosse necessario studiare l'impiego di nuove materie prime. Dopo un iniziale sviluppo ed utilizzo di polimeri vinilici, che tuttavia non ebbero almeno in Europa con l'eccezione della Spagna, un particolare successo, i produttori di additivi per calcestruzzo si dedicarono alla ricerca e all'applicazione dei nuovi policarbossilati eteri (PCE), superfluidificanti di maggior efficacia. Anche in questo caso le prime informazioni arrivarono dal Giappone come avvenne per l'NSF nei primi anni settanta.

Sulla base di queste informazioni si svilupparono anche in Europa i primi PCE (Fig. 3) che producono la loro azione superfluidificante con un meccanismo diverso da quello degli additivi a base di NSF (basato sulla repulsione elettrostatica delle particelle di cemento) e provocato invece dall'impedimento sterico (*Steric Hindrance*) dovuto alle catene laterali presenti nel PCE.

Questo diverso meccanismo consente di ridurre la perdita di lavorabilità degli impasti cementizi rispetto a quello che si ottiene con l'NSF e questo effetto rappresentò un primo progresso specialmente nell'industria del calcestruzzo preconfezionato. L'entità di questo miglioramento, tuttavia, era legata al tipo di cemento, al tipo di clinker con cui era prodotto il cemento, alla temperatura e alla quantità di parti fini contenuta nel calcestruzzo. Il risultato non era, pertanto, sempre garantito. A parte l'incremento dei costi rispetto a quelli dell'NSF, ci furono alcuni insuccessi iniziali riguardo al problema della perdita di lavorabilità che delusero le aspettative createsi con l'introduzione di questi nuovi superfluidificanti e che ne frenarono all'inizio l'impiego nell'industria del calcestruzzo preconfezionato. In sostanza la prima versione di questi additivi non era ancora una soluzione radicale del problema della perdita di lavorabilità anche se l'effetto di fluidificazione era spesso molto più forte di quanto fino ad allora si poteva ottenere con gli NSF. Infatti questi ultimi. per poter provocare incrementi di fluidità elevati paragonabili a quelli provocati dai PCE, dovevano essere impiegati a dosaggi troppo alti che conducevano a forti ritardi delle resistenze iniziali.

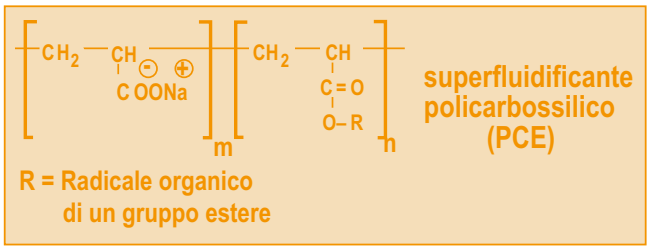


Fig. 3 - Formula di struttura del PCE

IL CALCESTRUZZO SCC E I PCE DI II E III GENERAZIONE

Ai primi anni del millennio attuale, si presentò sul mercato una tecnologia molto originale di produzione del calcestruzzo: il calcestruzzo autocompattante noto anche come SCC (acronimo inglese di *Self-Compacting Concrete*). Si trattava di un calcestruzzo innovativo che poteva essere messo in opera senza necessità di vibrazione, che richiedeva alti dosaggi di superfluidificanti, e l'aggiunta di parti fini nell'ordine di 150-200 kg/m^3 per evitare la segregazio-

ne. Questo calcestruzzo, in linea di principio, poteva essere prodotto anche con NSF ma le caratteristiche dei PCE sembravano più promettenti. Il primo prototipo di SCC fu sviluppato da Okamura (9) all'Università di Tokio già nel 1988 e verosimilmente fu prodotto con NSF, ma la maggior viscosità e il maggior effetto fluidificante che i PCE conferivano al calcestruzzo, fecero sì che questi si imposero rapidamente nella produzione di SCC. Furono messi a punto, pertanto, dei superfluidificanti a base di PCE sempre più mirati al confezionamento di un SCC che avesse tutti i requisiti imposti dalle normative che nel frattempo si stavano redigendo. Per l'SCC si sono cercati prodotti che avessero una capacità di dispersione ancora più elevata per disperdere le numerose particelle di calcare macinato, di cenere volante o altri filler aggiunti nell' SCC. Inoltre, questi PCE - seppur impiegati a più alto dosaggio - non dovevano indurre ritardi nelle resistenze iniziali.

Le quantità di SCC prodotte in Europa peraltro non erano e non sono tuttora enormi, ma sono legate a specifici progetti in quanto la sua applicazione è accompagnata da vincoli relativi a problemi di organizzazione del cantiere e a costi elevati. Laddove l'organizzazione del cantiere è facilitata e i maggiori costi sono più assorbibili come nel calcestruzzo prefabbricato, l'SCC ha avuto un maggior successo.

Le diverse esigenze legate alle differenti applicazioni e tipologie di calcestruzzo, di cui l'SCC è uno degli esempi, hanno indotto, pertanto, i ricercatori a differenziare i superfluidificanti basati su PCE creando altrettante tipologie di polimeri adatti ai differenti impieghi. Ciò è stato facilitato dal fatto che questi polimeri si prestano alla creazione di molteplici varietà a differenza dei tradizionali MSF e NSF che viceversa si presentano per il loro impiego nel calcestruzzo praticamente in un'unica versione non modificabile. Al contrario la tecnologia di produzione dei PCE consente di variare ad esempio la lunghezza e quindi i pesi molecolari della catena polimerica centrale e delle catene laterali che influenzano la velocità di dispersione (Fig 4).

E' altresì era possibile variare il rapporto acido/estere o sostituire l'acido acrilico con il metacrilico partendo quindi da un monomero differente ,oppure creando dei copolimeri acrilici- metacrilici. Per allungare il tempo di lavorabilità sono stati messi a punto anche polimeri (10) che, idrolizzati in ambiente alcalino, rilasciano molecole con effetto fluidificante differito assicurando così il mantenimento della lavorabilità nel tempo anche a temperature elevate (Fig. 5).

Quindi i chimici hanno avuto molteplici possibilità per progettare i PCE a differenza degli NSF. Ciò spiega perché si sente parlare di PCE di prima, seconda e anche terza generazione mentre con l'NSF ci fu un'unica generazione di prodotti. Inoltre come accade per gli NSF anche i PCE si prestano a formulazioni con altre componenti chimici ad effetto fluidificante, accelerante o ritardante.

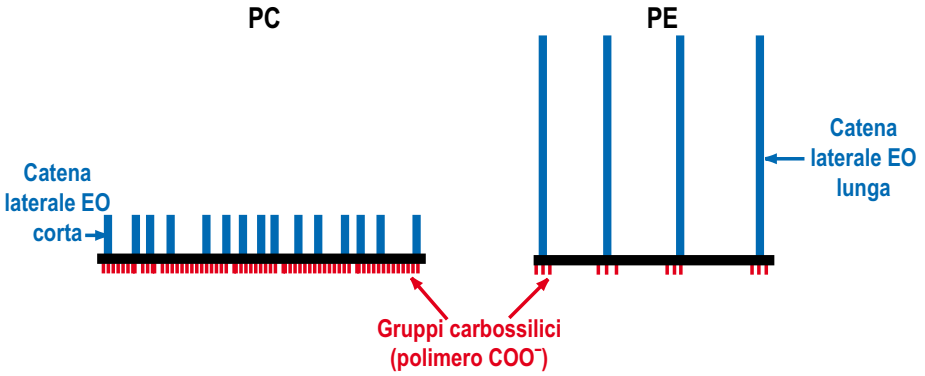


Fig. 4 - Schematizzazione dei polimeri PC e PE (10)

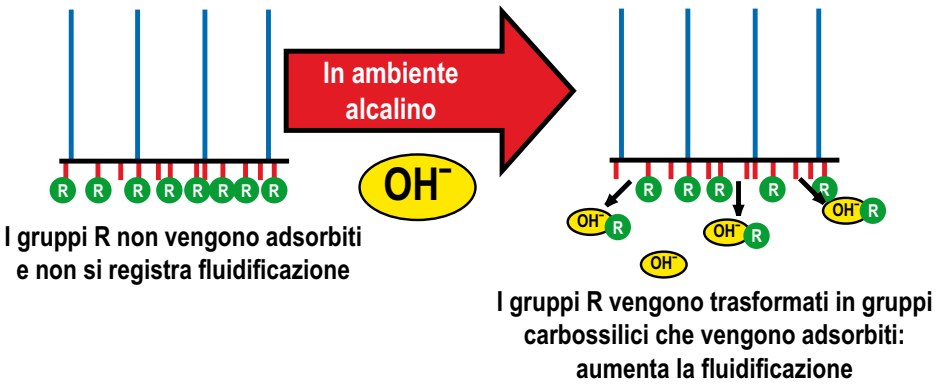


Fig. 5 - Funzionamento dell'SLCA (10)

LA PERDITA DI LAVORABILITA' NEL CALCESTRUZZO PRECONFEZIONATO

Come abbiamo già detto, con le prime versioni di PCE non si risolveva in modo radicale il problema della perdita di lavorabilità nel calcestruzzo preconfezionato e pertanto i produttori hanno cominciato negli ultimi 5 anni a rivolgersi alle successive generazioni di PCE per migliorarne le prestazioni da questo punto di vista. Ciò era necessario in quanto il calcestruzzo preconfezionato aveva bisogno di superare, per lo meno in alcuni Paesi tra cui l'Italia, le vecchie abitudini di aggiungere acqua sul cantiere che di fatto annullavano le garanzie di qualità richieste dal mercato e dalle normative. D'altra parte l'industria del calcestruzzo preconfezionato ha raggiunto in tutti i Paesi europei una dimensione di primaria importanza perché c'è una forte tendenza a delegare la produzione del calcestruzzo a terzi non solo per i piccoli e medi progetti, ma anche per quelli più grandi. Alcuni aspetti però differenziano la produzione in Europa tra Paesi come la Germania e Francia che fanno uso di pre-mescolatori a regime forzato ed usano l'autobetoniera solo per il trasporto e lo scarico, e altri Paesi come l'Italia e la Gran Bretagna che usano l' autobetoniera sia per la miscelazione

che per il trasporto e lo scarico. Ciò influenza l'efficacia dei SF modificando la reologia degli impasti cementizi. Inoltre, alla luce della normativa europea sul cemento, i cementi impiegati in Italia sono prevalentemente di tipo IIA-L mentre quelli impiegati in Germania e Francia sono spesso di tipo I. Questa diversità, insieme alla differenza di temperatura media tra Paesi mediterranei e quelli continentali, fa sì che gli additivi superfluidificanti siano formulati in modo diverso tra i vari Paesi e di ciò occorre tenere conto nei paragoni che si fanno al loro interno.

Considerati tutti questi aspetti esistevano due modi per risolvere radicalmente il problema della perdita di lavorabilità. Il primo era quello di aggiungere l'additivo superfluidificante ad un impasto di consistenza plastica (slump 6-8 cm) direttamente in cantiere all'arrivo dell'autobetoniera, come si fece in Germania nella prima esperienza alla fine degli anni '70, per portarlo alla consistenza fluida richiesta. Il secondo, si basava su una specifica formulazione di un superfluidificante che, aggiunto in autobetoniera presso la centrale di betonaggio, avesse una capacità di mantenimento sufficiente a garantire allo scarico la lavorabilità richiesta dal capitolato. La prima soluzione almeno in Italia è stata scartata per problemi di responsabilità non delegabili all'autista e per necessità di controllo centrale dei costi. Si è quindi proseguito con la seconda soluzione grazie ai superfluidificanti PCE di II e III generazione opportunamente formulati a seconda delle stagioni e del cemento impiegato. In tal modo è stato possibile produrre calcestruzzi a consistenza S4 o S5 che mantengono questo livello di lavorabilità dopo 1-2 ore dal carico in autobetoniera anche con temperature esterne superiori a 30 °C oppure produrre SCC in autobetoniera in condizioni di alte temperature con slump-flow di 70 cm dopo 2 ore a 35 °C senza alcuna segregazione (Fig. 6).

In Italia grazie a questa tecnologia si sta producendo, presso una delle più qualificate aziende di calcestruzzo preconfezionato che opera su tutto il territorio, un calcestruzzo a lavorabilità garantita in tutte le condizioni di temperatura tipiche della regione, dove la tubazione dell'acqua posta sul veicolo in precedenza usata per aumentare impropriamente la lavorabilità, non è accessibile perché sigillata, rendendo di fatto impossibile qualsiasi aggiunta d'acqua sul cantiere a meno che non sia stata prevista nel *mix design* in partenza. Il progetto in questione si chiama H2NO ed è stato premiato con un *Award* dall'Associazione di categoria Atecap. Questa iniziativa, supportata da un adeguato *marketing* e da un nutrito staff tecnologico rappresenta da qualche anno sul mercato italiano una vera e propria rivoluzione di abitudini che risolve il problema tecnologico in modo radicale.

CALCESTRUZZO ECOSOSTENIBILE E RUOLO DEI SUPERFLUIDIFICANTI

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti i PCE sono stati accolti all'inizio dal mercato con una certa diffidenza a causa di qualche insuccesso iniziale e anche per i costi elevati di questi prodotti per cui non pochi utilizzatori tendevano ad utilizzarli a dosaggi bassi per compensare i maggiori costi. Con l'evoluzione della chimica dei PCE si è però capito che usandoli ai dosaggi pieni, a fronte di un maggior costo, si ottenevano prestazioni tali da consentire dei veri e propri risparmi economici del costo globale del calcestruzzo.

Le riduzioni del rapporto *a/c* fino al 30% ottenibili con i PCE di II e III generazione senza compromettere la robustezza, cioè la riproducibilità delle prestazioni, e le resistenze iniziali non erano ottenibili con i tradizionali superfluidificanti a base di NSF. Pertanto, sfruttando queste prestazioni si sono aperte grandi possibilità per recuperare diverse specie di scarti di lavorazioni di calcestruzzi, materiali da demolizione come sostituti in parte o in tutto degli aggregati tradizionali, l'impiego di sottoprodotti come la cenere volante ad alti volumi peraltro già studiati e utilizzati negli anni scorsi da Malhotra e Metha (11). Oggigiorno esiste anche la possibilità di studiare il recupero di ceneri di fondo provenienti dalla combustione di rifiuti solidi urbani (12).

Riguardo al calcestruzzo sostenibile l'associazione ASSIAD ha redatto un opuscolo con lo slogan "*grandi cambiamenti con piccole scelte*". In questo opuscolo sono stati considerati tre punti fondamentali:

1. riduzione delle emissioni di CO_2;
2. riduzione della richiesta d'acqua del calcestruzzo;
3. incremento della durabilità delle opere.

La conseguente riduzione dei dosaggi di cemento o il maggior uso di cementi di miscela ha consentito notevoli risparmi economici a parità di prestazioni con forti riduzione delle emissioni di CO_2. Il calcestruzzo che è il materiale da costruzione più usato al mondo presenta un'ECO_2 (*Embodied Carbon Dioxide*) pari a circa il 10% del suo peso (venti volte inferiore all'acciaio) Inoltre, il processo di carbonatazione del calcestruzzo contribuisce a ridurre

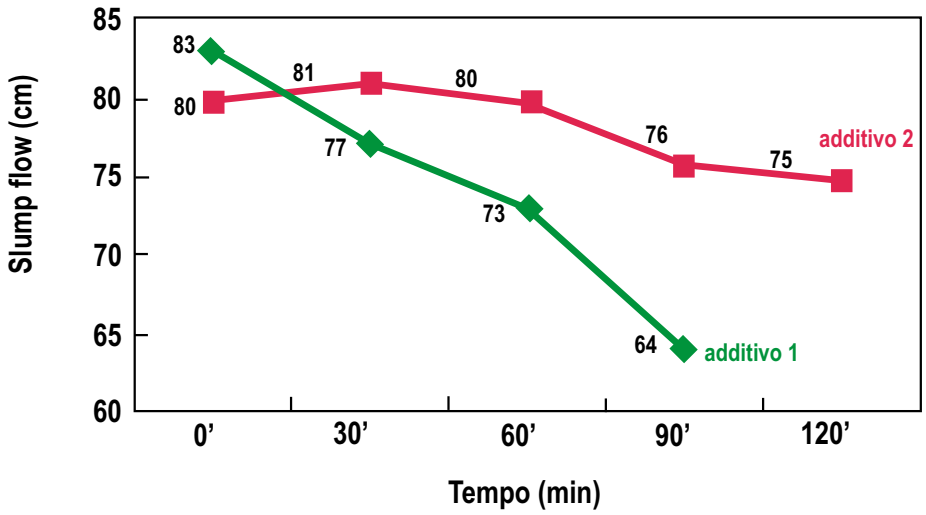


Fig. 6 - Perdita di lavorabilità di SCC impiegando due diversi additivi

la % di CO_2 nell'aria con vantaggi ulteriori sull'effetto serra.

La riduzione dell'acqua d'impasto da una media di 200 l/m^3 a una media di l60 l/m^3 comporta un risparmio del 20% nell'acqua, di un sostanza che è una risorsa mondiale di primaria importanza e che lo sarà sempre di più nel prossimo futuro. Se consideriamo che la produzione mondiale di calcestruzzo raggiunge i 11,5 miliardi di m^3 è facile calcolare il risparmio d'acqua globale.

Infine i calcestruzzi confezionati a basso rapporto *a/c*, se ben maturati, sono anche più durevoli e questo riduce la necessità di interventi futuri di manutenzione con conseguenti vantaggi per l'impatto ambientale.

Quindi, l'impiego di superfluidificanti nel calcestruzzo si può trasformare da strumento tecnico-economico a necessità ambientale diventando sempre più un elemento fondamentale per costruire secondo le regole dell'edilizia sostenibile.

CONCLUSIONI

L'attuale situazione economica è molto grave ed è nostro compito cercare di ricevere stimoli anche da questa crisi. I dati disponibili sulla penetrazione dei superfluidificanti nei mercati del calcestruzzo preconfezionato e prefabbricato non lasciano molte speranze di crescita di questi due settori. Questi mercati sono in via di saturazione e pertanto bisogna completamente ripensare i modelli di crescita. Lasciando agli economisti la soluzione globale di questo problema, noi possiamo fare alcune considerazioni valide per il settore degli additivi per calcestruzzo. Un esempio lo abbiamo avuto guardando al passato recente con l'arrivo dei PCE perché le industrie dei produttori di additivi hanno potuto incrementare i fatturati senza aumentare le quantità prodotte ma sfruttando l'evoluzione scientifica e tecnologica derivante anche dall'introduzione delle nanotecnologie nella produzione dei PCE.

Si potrebbe come prima conclusione affermare che la crescita deve già da oggi basarsi non più sull'aumento della quantità ma sull'aumento della qualità. Poiché i volumi di calcestruzzo prodotto non potranno aumentare occorre che nel metro cubo di calcestruzzo si possa introdurre più chimica qualificata ripetendo quello che è già avvenuto con l'avvento dei superfluidificanti a base di PCE. Come esempio possiamo citare nuovi additivi acceleranti basati sulla formazione di nuclei di cemento idratato che sembrano essere molto promettenti.

Anche se queste operazioni comporteranno un aumento dei costi per m^3 di calcestruzzo, un aumento iniziale può, nell'ottica della costruzione sostenibile, essere accettato se farà risparmiare risorse in futuro. Non sarà facile far accettare da parte degli utilizzatori del calcestruzzo questo concetto che capovolge le regole economiche ma non ci sono molte altre alternative. Bisognerà gestire questi processi a livello dei Governi che potrebbero incentivare gli acquisti di prodotti anche se più cari, purché arrechino un risparmio intrinseco per le generazioni future. Sarà anche necessario imporre regole costruttive più stringenti che garantiscano la durabilità in senso lato delle costruzioni con riduzione dell'impatto ambientale dando eventualmente in contropartita degli incentivi fiscali

Il nostro destino è quindi quello di un equilibrista che cammina su una fune per raggiungere la crescita sostenibile; se cade a sinistra c'è la recessione, se cade a destra c'è la crescita caotica con distruzione di risorse non rinnovabili. A noi, ma soprattutto ai giovani, la giusta scelta

Desidero, infine, ringraziare i miei collaboratori che mi hanno supportato nella stesura di questo articolo.

BIBLIOGRAFIA

(1) N. Spiratos, M. Pagè, N.P. Mailvaganam, V.M. Malhotra, C. Jolicoeur, "*Superplasticizers for Concrete*".

(2) U.S. patent 3,941,734 March 1976.

(3) Melment Symposiums from 1971 to 1981.

(4) P. DeLama, S. Tavano, " *Vibration Energy Optimisation in Prefabricated Concrete Casting Using Superplasticizers*", ACI SP 68 pag. 307 presented to the second Canmet/ACI International Conference on Superplasticizers in Concrete Ottawa June 1981.

(5) M. Collepardi," *A very close Precursor of Self Compacting Concrete*" Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology, S. Francisco, 16-19 September 2001.

(6) U.S. patent 3,686,133 August 1972.

(7) H.H. Bache, "*Densified Cement/Ultrafine Particle-Based Material*" presented to the second CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers in Concrete Ottawa.

(8) European Patent Application 0010777A1.

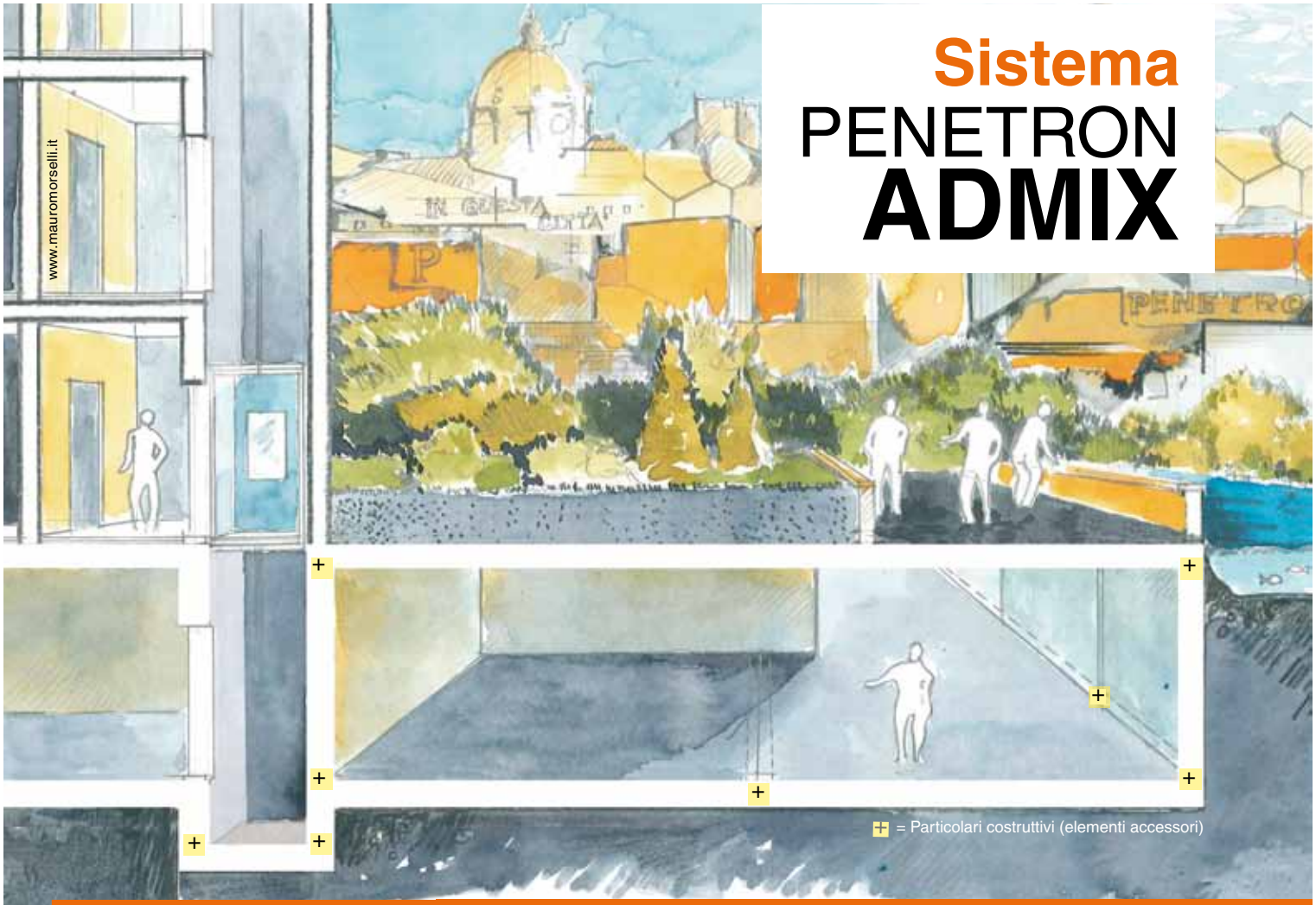
(9) H.Okamura, M.Ouchi, "*SCC*", Journal of Advanced Concrete Technology, vol.1, 1,5-15,4/03.

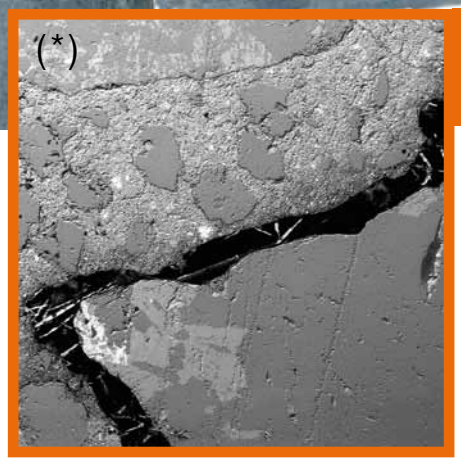
(10) M. Collepardi, "*The New Concrete*", Tintoretto, Villorba, Italy, 2nd Ed. 2010.

(11) Malhotra, V.M., and P.K. Mehta, "*High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete*", Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Inc., Ottawa, Canada, 2002, 101 pp.

(12) S. Collepardi, M.Collepardi, G.Iannis and A. Quadrio Curzio, "*SCC with ground bottom ash from municipal solid wastes incinerators*", Proceedings of Twelfth International Conference, Prague, pp.453-464, (2012).

Sistema PENETRON ADMIX





La capacità "attiva nel tempo" di autocicatrizzazione veicolo umidità nelle strutture interrate o idrauliche

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 concepire la "vasca strutturale impermeabile" in calcestruzzo, senza ulteriori trattamenti esterni-superficiali, ottenendo così molteplici benefici nella flessibilità e programmazione di cantiere.

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

ISO 9001:2000 · TUV Rheinland of North America, Inc. · CE · NSF · BASTA

PENETRON®
INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

Penetron® Italia
Distributore esclusivo del sistema Penetron®

Via Italia 2/b - 10093 Collegno (TO)
Tel. +39 011.7740744 - Fax +39 011.7504341
Info@penetron.it - www.penetron.it

Sistema PENETRON®

CENERE PESANTE DA INCENERITORI DI RESIDUI SOLIDI URBANI IN CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI AD ALTE PRESTAZIONI

Silvia Collepardi, Mario Collepardi*, Giacomo Iannis**, Alessandro Quadrio Curzio****

**Enco, **Tecnochem Italiana, ***Petracem - info@encosrl.it*

INTRODUZIONE

La cenere volante derivante dagli inceneritori dei Rifiuti Solidi Urbani (RSU), dopo essere stata macinata può essere impiegata, grazie alla sua attività pozzolanica, in parziale sostituzione del cemento Portland per la produzione di un calcestruzzo in linea con uno sviluppo sostenibile. In alcune ricerche (1,2) l'attività pozzolanica di questa cenere è dovuta alla sua reazione con la calce di idrolisi formata per idratazione del cemento Portland. Tuttavia, la cenere pesante macinata da RSU finora non è stata impiegata con successo a causa di alcuni effetti collaterali ed in particolare alla presenza di polvere di alluminio che provoca in ambiente con PH di circa 13 la formazione di idrogeno gassoso nel calcestruzzo riducendone le prestazioni meccaniche e la impermeabilità all'acqua.

In questo articolo sono presentati alcuni interessanti risultati sull'impiego della cenere pesante da RSU macinata senza la formazione di idrogeno gassoso grazie alla rimozione delle particelle di alluminio. Il suo comportamento è stato confrontato con quelli del fumo di silice e della cenere volante in calcestruzzi autocompattanti ad alte prestazioni grazie alla presenza di additivi superfluidificanti, additivi anti-ritiro ed agenti espansivi per produrre conglomerati privi di fessure ancorché non stagionati ad umido.

PARTE SPERIMENTALE

Materiali

La cenere pesante da RSU si presenta come una miscela di particelle inorganiche mescolate con frammenti metallici. Il nuovo processo messo a punto da Petracem si basa sulla preliminare rimozione dei frammenti metallici in grossa pezzatura contenenti ferro e allumino e quindi su una macinazione sotto acqua della cenere pesante in grado di formare uno *slurry* molto fluido contenente circa il 60% di acqua dalla quale le particelle metalliche di alluminio furono completamente separate dallo *slurry.*

La Fig. 1 mostra le particelle, di forma irregolare, di cenere pesante macinata al microscopio elettronico a scansione. La Fig. 2 mostra la laser-granulometria della cenere pesante macinata (GBA dall'Inglese *Ground Bottom Ash*), in confronto con quelle di una cenere volante da carbone (FA dall'Inglese *Fly Ash*) e di un fumo di silice (SF da *Silica Fume* in Inglese). Il valore del D_{50}, cioè del diametro in corrispondenza del quale il 50% di materiale è più fine, è 0.3 μm, 1.5 μm e 30 μm rispettivamente per SF, GBA e FA.

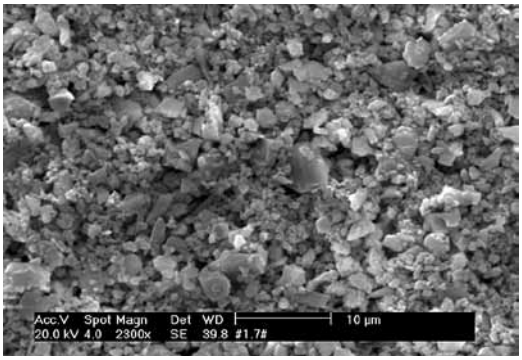


Fig. 1 - Particelle di GBA osservate al microscopio elettronico a scansione

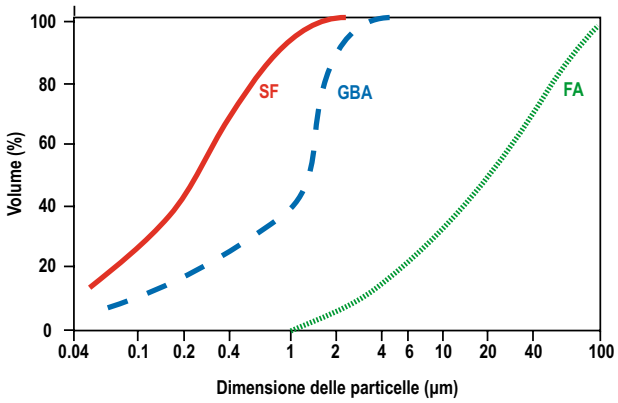


Fig. 2 - Laser-granulometria di fumo di silice (SF), cenere pesante macinata (GBA) e cenere volante (FA)

La Tabella 1 mostra la composizione in termini di ossidi in percentuale presenti nei materiali cementizi impiegati inclusi la GBA (nella sua forma priva di acqua), la cenere volante, il fumo di silice e un calcare (LS dall'Inglese *Limestone*) finemente macinato per la produzione di calcestruzzi auto-compattanti (SCC dall'Inglese *Self-Compacting Concrete*).

In tutti i calcestruzzi sono stati impiegati additivi antiritiro noti come SRA (dall'Inglese *Shrinkage-Reducing Admixture*)

Tabella 1 - Composizione chimica della cenere pesante (GBA), della cenere volante (FA), del fumo di silice (SF) e del calcare (LS) macinato

OSSIDI (%)	GBA	FA	SF	LS
SiO_2	40.07	55.11	95.12	---
CaO	20.43	2.12	0.79	54.92
Al_2O_3	11.08	27.91	0.21	---
Fe_2O_3	10.60	3.75	0.70	---
MgO	3.37	0.51	0.58	---
Na_2O	3.52	0.41	0.19	---
K_2O	0.90	0.71	0.31	---
Perdita al fuoco	5.2	6.8	2.01	44.02

in misura di 4 kg/m^3, ed è stata impiegata un'adeguata quantità di superfluidificante (da 12 a 16 kg/m^3) di tipo policarbossilico (SPC) in modo da mantenere costante al valore di 0.42 il rapporto *a*/(*c*+*mcp*) (dove *mpc* indica i materiali cementizi pozzolanici) con uno *slump-flow* fisso di 720 mm.

In alcuni SCC sono stati anche impiegati un agente espansivo a base di calce (CaO) "cotta a morte" (a 1000°C) per produrre calcestruzzi a ritiro compensato. In altri calcestruzzi sono state aggiunte fibre macrostrutturali in PVA (Poli-Vinil-Alcol) lunghe 30 mm e spesse 1 mm. Gli additivi, l'agente espansivo e le fibre in PVA sono tutti prodotti da Tecnochem.

La Tabella 2 mostra la composizione dei vari SCC tutti con un rapporto *a*(*c*+*mcp*) di 0.42 ed uno *slump-flow* di 720 mm. In 3 calcestruzzi sono stati impiegati anche 30 kg/m^3 dell'agente espansivo a base di CaO (in sostituzione del filler calcareo LS) o di 4 kg/m^3 di fibre in PVA. I dosaggi di GBA e di SF sono stati fissati a circa 50 kg/m^3 in sostituzione del cemento Portland CEM I 52.5 R mentre per la cenere volante è stato adottata un'aggiunta di circa 100 kg/m^3 sempre in sostituzione del cemento Portland.

Le composizione dei vari calcestruzzi sono identificati dai seguenti codici:

- ***Control Mix*** → SCC di riferimento con SRA, SPC e filler calcareo (LS) senza aggiunte minerali, senza agente espansivo e senza fibre PVA;
- ***GBA-1 Mix*** → con (GBA), senza agente espansivo e fibre PVA;
- ***GBA-2 Mix*** → con GBA ed agente espansivo;
- ***GBA-3 Mix*** → con GBA e fibre in PVA;
- ***SF-1 Mix*** → con SF senza agente espansivo e fibre PVA;
- ***SF-2 Mix*** → con SF ed agente espansivo;
- ***SF-3 Mix*** → con SF e fibre in PVA;
- ***FA-1 Mix*** → con FA senza agente espansivo e fibre PVA;
- ***FA-2 Mix*** → con FA ed agente espansivo;
- ***FA-3 Mix*** → con FA e fibre in PVA

Prove

Le seguenti prove sono state eseguite sui calcestruzzi:

- resistenza meccanica a compressione di provini cubici (15 cm) stagionati a 20°C con U.R. di 95%:
- penetrazione d'acqua sotto pressione (3 atm) per 5 giorni (secondo la norma EN 12390/8) sui calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni;
- diffusione del cloruro nei calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni e quindi conservati sotto acqua contenente 3.5% di NaCl;
- penetrazione della CO_2 in calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni e quidni esposti all'aria;
- ritiro libero di provini (10x10x50 cm) non armati in calcestruzzi con e senza macrofibre in PVA scasserati a 3 giorni e quindi esposti per 3 mesi in ambiente molto asciutto con U.R. di 55%;
- espansione contrastata di provini armati (con barra in acciaio lunga 240 mm con diametro da 6 mm) in calcestruzzi con e senza agente espansivo;
- prove di campo su lastre (lunghe 8 m, larghe 40 cm e spesse 6 cm) esposte all'aria senza alcuna stagionatura umida e bloccate alle estremità per favorire la fessurazione indotta dal ritiro igrometrico.

Tabella 2 - Composizione dei calcestruzzi SCC tutti con uno *slump-flow* di 720 mm ed un rapporto (*a*/ *c*+*mcp*) di 0.42

MIX	CEMENTO PORTLAND (kg/m^3)	AGGIUNTE MINERALI (kg/m^3)				INERTI* (kg/m^3)	ACQUA** (kg/m^3)	SPC (kg/m^3)	SRA (kg/m^3)	CaO (kg/m^3)	PVA (kg/m^3)
		LS	GBA	SF	FA						
Control	398	99	---	---	---	697	166	12	4	---	---
GBA-1	350	97	48	---	---	700	167	12	4	---	---
GBA-2	349	70	49	---	---	698	168	13	4	30	---
GBA-3	351	93	49	---	---	695	167	12	4	---	4
SF-1	349	98	---	47	---	700	167	15	4	---	---
SF-2	348	69	---	48	---	698	167	16	4	30	---
SF-3	348	94	---	47	---	698	167	15	4	---	4
FA-1	302	99	---	---	95	698	168	11	4	---	---
FA-2	305	70	---	---	94	698	167	12	4	30	---
FA-3	301	96	---	---	94	697	167	11	4	---	4

*Sabbia 0-4 mm = 40% in peso; ghiaia 4-16 mm = 60% in peso

**Include anche l'acqua dello *slurry* di GBA

RISULTATI

Resistenza meccanica a compressione

La Fig. 3 mostra l'andamento della resistenza meccanica a compressione da 1 a 180 giorni dei calcestruzzi SCC tipo ***Control Mix***, ***GBA-1 Mix***, ***SF-1 Mix*** ed ***FA-1 Mix***. La resistenza meccanica dell'***FA-1 Mix*** è molto più bassa del ***Control Mix*** alle stagionature fino a 28 giorni, mentre raggiunge quasi gli stessi valori alle stagionature più lunghe (60-180 giorni). D'altra parte i calcestruzzi con fumo di silice (***SF-1 Mix***) e cenere pesante macinata (***GBA-1 Mix***) si comportano molto meglio del calcestruzzo di riferimento (***Control Mix***) soprattutto alle brevi stagionature. Questi risultati concordano con quelli ottenuti in un precedente lavoro (4) dove furono impiegate GBA con diversi gradi di macinazione e solo quella con dimensioni delle particelle di circa 1.7 µm, come quella impiegata in questa ricerca, si comportava come il fumo di silice.

Risultati simili sono stati ottenuti (Fig. 4) nei calcestruzzi contenenti l'agente espansivo con una maggiore resistenza meccanica nei calcestruzzi ***GBA-2 Mix***, ***SF-2 Mix*** ed ***FA-2 Mix*** per la presenza dell'agente espansivo CaO che reagisce con l'acqua e riduce l'effettiva acqua d'impasto rispetto al ***Control Mix*** che non contiene l'agente espansivo.

In presenza di fibre PVA le resistenze meccaniche (Fig. 5) dei calcestruzzi ***GBA-3 Mix***, ***SF-3 Mix*** ed ***FA-3 Mix*** sono molto simili a quelle ottenute in assenza di fibre (Fig. 3).

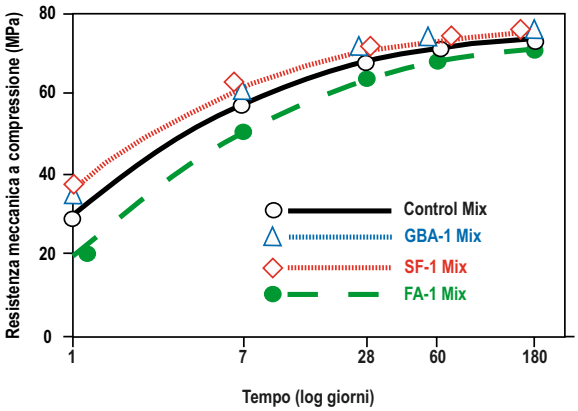


Fig. 3 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi Control Mix, GBA-1 Mix, SF-1 Mix ed FA-1 Mix in funzione del tempo

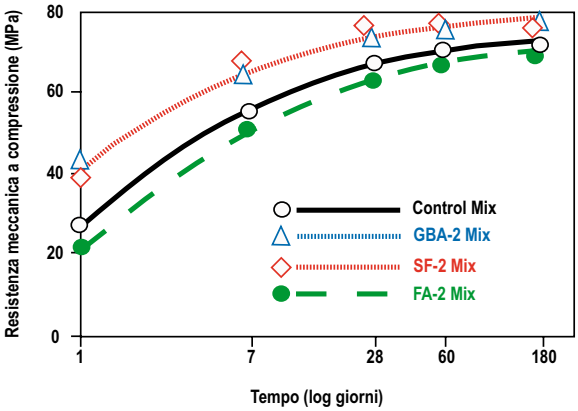


Fig. 4 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi Control Mix, GBA-2 Mix, SF-2 Mix ed FA-2 Mix in funzione del tempo

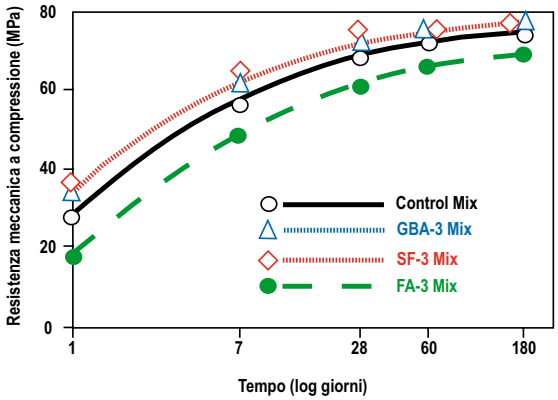


Fig. 5 - Resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi Control Mix, GBA-3 Mix, SF-3 Mix ed FA-3 Mix in funzione del tempo

Penetrazione dell'acqua

La Tabella 3 mostra lo spessore penetrato dall'acqua sotto pressione. Secondo la norma EN 12390/8 un calcestruzzo è considerato impermeabile se lo spessore medio penetrato dall'acqua non super 20 mm e la penetrazione media dell'acqua non supera 50 mm. I risultati mostrati in Tabella 3 indicano che tutti i calcestruzzi provati sono impermeabili a causa del basso rapporto $a/(c+mcp)$ (0.42). Tuttavia, la penetrazione dell'acqua nel calcestruzzo con cenere pesante da RSU (***GBA-1 Mix***) è simile a quella che si verifica nel calcestruzzo con fumo di silice (***SF-1 Mix***) e molto più bassa di quella che avviene nel calcestruzzo con cenere volante (***FA-1 Mix***).

Tabella 3 - Penetrazione dell'acqua in calcestruzzi stagionati 28 giorni

TIPO DI SCC	SPESSORE DI CALCESTRUZZO PENETRATO DALL'ACQUA	
	VALORE MASSIMO	VALORE MEDIO
Control-Mix	5 mm	2 mm
GBA-1 Mix	5 mm	1 mm
SF-1 Mix	5 mm	1 mm
FA-1 Mix	8 mm	4 mm

Diffusione del cloruro

La Tabella 4 mostra la diffusione dello ione Cl^- attraverso il calcestruzzo. I risultati indicano che lo spessore di calcestruzzo penetrato dal cloruro è minore nel ***GBA-1 Mix*** e nell'***SF-Mix*** rispetto al ***Control Mix*** ed all'***FA-1 Mix***.

Penetrazione della CO_2

I risultati mostrati nella Tabella 5 indicano che la penetrazione della CO_2 nel ***GBA-1 Mix*** è simile a quella che avviene nell'***SF-1 Mix*** e che entrambi questi calcestruzzi resistono meglio alla penetrazione della CO_2 che non il ***Control Mix*** e l'***FA-1 Mix***.

Tabella 4 - Diffusione del cloruro (Cl^-) in calcestruzzi stagionati 28 giorni

TIPO DI MIX	SPESSORE DI CALCESTRUZZO PENETRATO DAL CL^- DOPO:		
	1 MESE	1.5 MESI	4 MESI
Control-Mix	1.3 mm	6.0 mm	6.6 mm
GBA-1 Mix	1.1 mm	4.0 mm	4.4 mm
SF-1 Mix	1.0 mm	3.9 mm	4.3 mm
FA-1 Mix	2.3 mm	5.8 mm	5.9 mm

Tabella 5 - Penetrazione della CO_2 in calcestruzzi stagionati 28 giorni

TIPO DI MIX	SPESSORE DI CALCESTRUZZO PENETRATO DALLA CO_2 DOPO:		
	1 MESE	1.5 MESI	4 MESI
Control-Mix	0.9 mm	1.8 mm	3.0 mm
GBA-1 Mix	0.7 mm	1.0 mm	2.0 mm
SF-1 Mix	0.6 mm	1.0 mm	2.0 mm
FA-1 Mix	1.8 mm	2.6 mm	4.5 mm

Ritiro igrometrico

Le Fig. 6-8 mostrano l'influenza delle fibre in PVA sul ritiro igrometrico libero provocato dall'essiccamento dei provini in ambiente insaturo di vapore (U.R.=55%). I risultati ottenuti indicano che in presenza dell'aggiunte pozzolaniche in tutti i calcestruzzi (***GBA-1 Mix***, ***SF-1 Mix*** e ***FA-1 Mix***) il ritiro è significativamente ridotto rispetto al ***Control Mix*** privo di aggiunte di materiale pozzolanico. D'altra parte, l'aggiunta di fibre in PVA ai calcestruzzi con aggiunte pozzolaniche (***GBA-3 Mix***, ***SF-3 Mix*** e ***FA-3 Mix***) non provoca alcuna ulteriore riduzione del ritiro igrometrico.

Espansione contrastata

L'espansione contrastata dei calcestruzzi contenenti l'agente espansivo CaO è stata misurata sui provini armati sformati dopo la loro presa (4-8 ore). A questo tempo si è misurata la lunghezza iniziale della barra metallica prima che avvenisse l'espansione. Quindi i provini sono stati avvolti da un telo di plastica per evitare l'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo simulando la situazione del calcestruzzo conservato dentro i casseri. A causa dell'adesione del calcestruzzo indurito alla barra metallica, l'espansione del calcestruzzo provoca un allungamento della barra in acciaio che è stato misurato a 1 giorno subito dopo aver rimosso il telo di plastica e a tempi successivi durante i quali i provini sono stati lasciati in ambiente molto asciutto con U.R. del 50%. La Fig. 9 mostra le variazioni di lunghezza della barra metallica annegata nei tre SCC con agente espansivo (CaO) e additivo antiritiro SRA in funzione del tempo: tutti i calcestruzzi espandono durante i primi 2-3 giorni, ma il ***GB-2 Mix*** e l'***SF-2 Mix*** espandono molto di più dell'***FA-2 Mix***. Questo diverso comportamento è causato dalla maggiore adesione dei calcestruzzi con GBA o SF alla barra metallica che, a sua volta, dipende dalla maggiore resistenza meccanica iniziale (2-3 giorni) dei calcestruzzi con GBA ed SF rispetto al calcestruzzo con FA, come è mostrato nella Fig. 4. In altre parole, maggiore è la resistenza meccanica, maggiore è l'adesione alla barra metallica e maggiore è l'espansione contrastata dei provini armati.

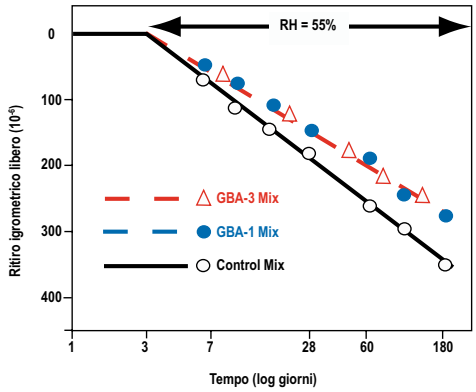


Fig. 6 - Ritiro igrometrico libero del Control Mix, del GBA-1 Mix e del GBA-3 Mix (con fibre in PVA)

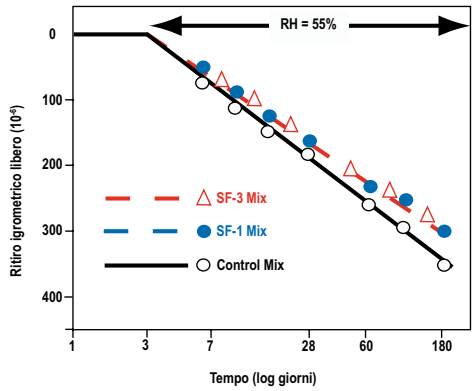


Fig. 7 - Ritiro igrometrico libero del Control Mix, dell'SF-1 Mix e dell'SF-3 Mix (con fibre in PVA)

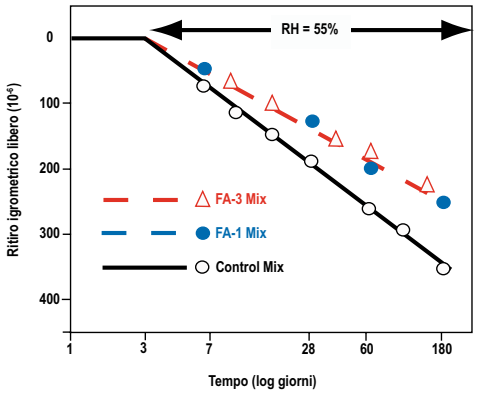


Fig. 8 - Ritiro igrometrico libero del Control Mix, dell'FA-1 Mix e dell'FA-3 Mix (con fibre in PVA)

Prove di campo sulle lastre in calcestruzzo all'aria

Le prove di campo sono state eseguite per verificare la formazione di fessure provocate dal ritiro contrastato, favorite dalla forma geometrica delle lastre (molto lunghe, poco larghe e molto sottili) e bloccate alle due estremità come è mostrato in Fig.10. Il numero e la larghezza media delle fessure sono state monitorate a 14 giorni mediante un microscopio ottico appoggiato sulla superficie delle lastre. La Tabella 6 mostra i risultati di queste prove di campo che possono essere così

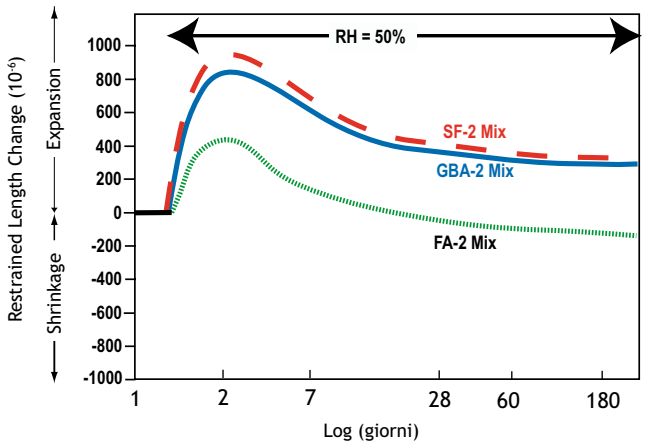


Fig. 9 - Variazione di lunghezza contrastato nei calcestruzzi con agente espansivo (CaO) ed additivo SRA nel GBA-2 Mix, nell'SF-2 Mix e nell'FA-2 Mix

riassunti:

- in presenza di GBA, SF ed FA il numero e la larghezza delle fessure sono minori di quelle osservate nel ***Control Mix***, in particolare se si impiega la cenere volante FA;
- in tutti i calcestruzzi con agente espansivo non si sono verificate fessure a causa dell'azione espansiva contrastata che ha compensato il ritiro igrometrico;
- in presenza delle macrofibre in PVA non si sono formate fessure sebbene le fibre non abbiano provocato alcuna variazione nel ritiro igrometrico (Fig. 6-8): questo effetto potrebbe essere messo in relazione con un rinforzo della matrice cementizia da parte delle fibre in PVA.

Fig. 10 - Lastre (lunghe 8 m, larghe 40 cm e spesse 6 cm) bloccate alle estremità e lasciate all'aria esposte al ritiro igrometrico contrastato

CONCLUSIONI

La cenere pesante (GBA) da inceneritori di rifiuti solidi urbani (RSU) è stata macinata sotto acqua per produrre uno *slurry* molto fluido con un 40% di materiale solido e con una dimensione massima delle particelle macinate di 1.7 µm. Questo *slurry* è stato impiegato per produrre calcestruzzi SCC in sostituzione del 12,5% di cemento Portland CEM I 52.5 R. Il comportamento della cenere pesante da RSU è stato confrontato con un fumo di silice e una cenere volante disponibili sul mercato.

Sono state misurate la resistenza meccanica a compressione oltre alla durabilità attraverso prove di penetrazione d'acqua sotto pressione, diffusione del cloruro e penetrazione della CO_2.

Calcestruzzi con un additivo antiritiro SRA ed agente espansivo a base di CaO sono stati preparati per ridurre il ritiro igrometrico e le conseguenti fessure in tutti i calcestruzzi.

Inoltre, si è trovato che anche con l'impiego combinato di SRA e macrofibre in PVA sono state ridotte le fessure per numero e larghezza.

I risultati ottenuti hanno mostrato che i calcestruzzi con GBA si comportano in termini, di resistenza meccanica e durabilità come quelli con fumo di silice e meglio di quelli con cenere volante.

Tabella 6 - Numero e massima larghezza delle fessure provocate dal ritiro igrometrico contrastato nelle lastre di calcestruzzo bloccate alle estremità (Fig.10)

OSSIDI (%)	Numero di fessure	Ampiezza massima delle fessure
Control Mix	3	1.5 mm
GBA-1 Mix	2	1.2 mm
SF-1 Mix	2	1.3 mm
FA-1 Mix	1	1.0 mm
GBA-2 Mix	---	---
SF-2 MIx	---	---
FA-2 Mix	---	---
GBA-3 Mix	---	---
SF-3 Mix	---	---
FA-3 Mix	---	---

BIBLIOGRAFIA

1. Macias A., Fernandez E., Goñi S., Guerrero A., "Valorizacion de las cenizas de inceneracion de residuos solidos urbanos en los materiales de construction" (2001), Papel de los sectores cementero y de la construcciòn en la gestiòn y reciclado de residuos, CSIC, Madrid.
2. Paine K.A., Dhir R.K., Doran V.P.A., "Unprocessed and processed incinerator bottom ash as a cement bound material" in R.K.Dhir, T.D.Dyer, K.A. Paine (Eds.) "Use of incinerator ash" Proceedings of the International Symposium organized by the Concrete Technology Unit, University of Dundee (UK) 20-21/3/2000.
3. Bertolini L., Carsana M., Cassago D., Quadrio Curzio A. and Collepardi M., "MSWI ashes as mineral additions in concrete", Cement and Concrete Research, 34, 1899-1906, 2004.
4. Collepardi M., Collepardi S., Ongaro D., Quadrio Curzio A. and Sammartino M., "Concrete with bottom ash from municipal solid wastes incinerators", 4th Non-Traditional Cement and Concrete Symposium, Brno Czech Republic, June 2011.

LA BELLISSIMA PRAGA

EVENTI DELLE CONFERENZE DI PRAGA

ESORDIO COME CHAIRPERSON

Tre italiani che hanno esordito come Chairperson che hanno presieduto le sessioni delle Conferenze di Praga:

Silvia Collepardi
Enco

Giorgio Ferrari
Mapei

Roberta Magarotto
Basf

AWARD

Salvatore Tavano legge la presentazione della sua relazione dopo la nomina dell'Award

CENA SOCIALE DELLE DUE CONFERENZE

EVENTO MUSICALE OPERISTICO

Un complesso musicale ha allietato la cena sociale con musiche di Mozart, Donizetti, Rossini e Verdi

MARIO COLLEPARDI INCANTATO DA 'O SOLE MIO (EDUARDO DI CAPUA)

Commento di Adam Neville:
Mario why did you waste your time in concrete?

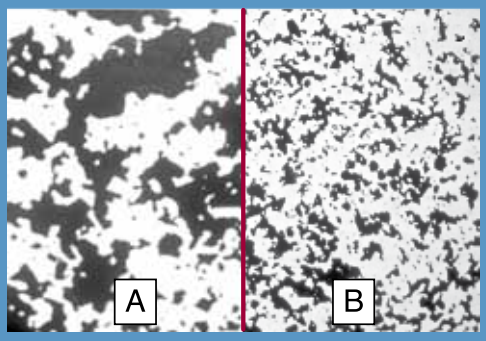
I COMPLIMENTI DEL GRANDE ADAM NEVILLE

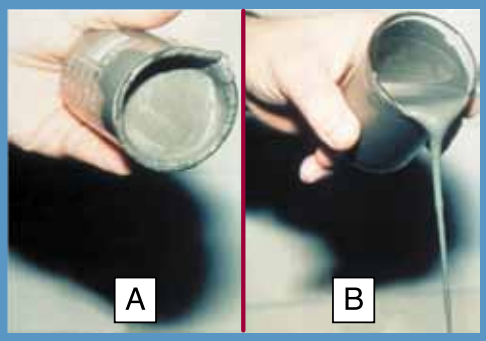
Neville si complimenta con Silvia Collepardi e Valeria Corinaldesi per la loro presentazione

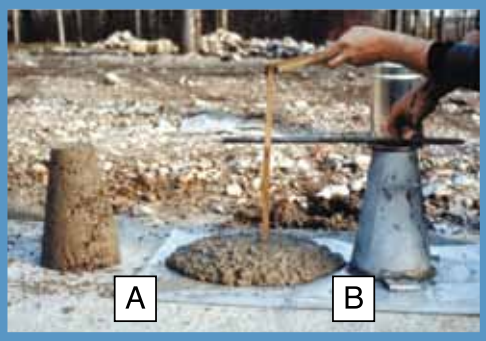
SE VUOI CONOSCERE COME SI MIGLIORA IL CALCESTRUZZO

GLI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO

Come funzionano e come si impiegano





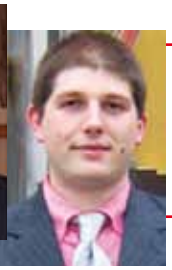


MARIO COLLEPARDI

ACI Honorary Member

Enco srl - Via delle Industrie 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)
Tel. 0422 963 771 - Fax 0422 963 237 - info@encosrl.it
acquistabile dal sito www.encoshop.com

VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI REOLOGICHE E MECCANICHE DI UN ADDITIVO SUPERFLUIDIFICANTE INNOVATIVO A BASE FOSFONICA



Luigi Coppola[1], Sergio Lorenzi[1], Alessandra Buoso[1], Maurizio Bellotto[2]

[1]Università degli studi di Bergamo - [2]Giovanni Bozzetto SpA

1. INTRODUZIONE

L'utilizzo degli additivi superfluidificanti per il calcestruzzo ha trovato un'ampia diffusione negli ultimi 30-40 anni nei paesi sviluppati per produrre calcestruzzi ad alte prestazioni e caratterizzati da un'elevata durabilità. In particolare, negli ultimi anni, i prodotti tradizionali a base di naftalensolfonato (NSF) sono stati progressivamente sostituiti dai prodotti a base policarbossilica (PCE), caratterizzati da un'efficacia in termini di riduzione d'acqua fino a 2-3 volte maggiore; questi ultimi offrono un mantenimento della lavorabilità decisamente più lungo. La diversa efficacia delle due famiglie di additivi è sicuramente connessa al diverso meccanismo d'azione: la dispersione delle particelle di cemento per repulsione elettrostatica nel caso degli NSF e per ingombro sterico per i PCE [1,2]. Inoltre, gli additivi PCE si sono dimostrati estremamente versatili, in quanto una modifica nei parametri di sintesi del polimero permette di ottimizzare le prestazioni del polimero per soddisfare applicazioni sempre più specifiche. Ed è proprio questa specificità che, in alcuni casi, si traduce in un peggioramento della compatibilità rispetto al tipo/classe [3,4] e lotto di produzione [5] del legante. L'incompatibilità porta, in alcuni casi, all'esigenza di incrementare fortemente il dosaggio di additivo per ottenere la lavorabilità prefissata al temine della miscelazione; in altri casi si sono osservati fenomeni di bleeding e segregazione del conglomerato con sviluppi d'aria anomali. Talvolta si è osservato un drastico peggioramento nel mantenimento della lavorabilità nel tempo ed effetti collaterali di ritardo nei processi di idratazione del cemento. La compatibilità diventa, di conseguenza, un obiettivo fondamentale per lo sviluppo di un additivo innovativo, in grado di garantire uniformità prestazionali al variare sia dei parametri composizionali sia tecnologici del calcestruzzo.

Gli additivi a base fosfonica sono utilizzati nella tecnologia del calcestruzzo come ritardanti della presa ad elevata efficacia: a dosaggi compresi tra 0,03% e 0,05% producono un ritardo dei processi di idaratazione da 12 a 24 ore [6].

2. MATERIALI E METODI

Sono stati confezionati calcestruzzi con rapporto acqua-cemento pari a 0,52, utilizzando due additivi superfluidificanti commerciali, uno a base acrilica (ACR1) ed uno a base naftalinica (NSF3) da confrontare con il prodotto sperimentale a base fosfonica (PNH1). I valori di riferimento dei prodotti utilizzati sono riportati in Tabella 1. Il dosaggio dell'additivo è stato modulato al fine di conseguire una lavorabilità in classe di consistenza S5 (UNI EN 206-1) al termine della miscelazione. Sono stati utilizzati 13 cementi presenti sul territorio italiano, cercando di rendere il campione sperimentale il più eterogeneo possibile: quattro diversi cementi tipo II/A-LL 42.5R, un cemento tipo II/A-LL 32.5 R, due cementi II/B-LL 32.5 R, un cemento CEM II/B-S 32.5R, un cemento CEM III/A 32.5 N, un cemento CEM IV/A (P) 42.5 R, un cemento IV/A (V) 42.5 R e due cementi tipo IV/A (V) 32.5R. Le misure di mantenimento della lavorabilità sono state condotte in accordo alla norma UNI EN 12350-2 a 0, 30 e 60 minuti. La misura della massa volumica del calcestruzzo fresco e la tendenza ad intrappolare aria sono state determinate in accordo, rispettivamente, alle norme UNI EN 12350-6 and UNI EN 12350-7. Tutte le misure sul calcestruzzo fresco sono state effettuate in ambiente climatizzato a 20°C e umidità relativa pari al 65%. Sono state, inoltre condotte prove di compressione a 1, 7 e 28 giorni dal confezionamento.

Tabella 1 - Principali proprietà degli additivi utilizzati

PROPRIETA'	NSF3	ACR1	PNH1
Peso molecolare (MW) (g/mol)	1400	35000	3000
MW/Mn	10	2.7	1.2
Lunghezza della catena laterale (g/mol)		3000-5000	1000
Tipo di monomero		Estere di acido acrilico o metacrilico	Poliammina
Gruppi ionici/non-ionici nella catena laterale		5	3

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Il grafico in Figura 1 riporta la correlazione tra dosaggio di additivo necessario per conseguire la lavorabilità prefissata al termine della miscelazione e lo slump a 60 minuti per i tre additivi considerati. Si osserva che l'additivo a base fosfonica presenta un'efficacia in termini di riduzione d'acqua intermedia fra NSF3 e ACR1. Il prodotto a base naftalinica si conferma il meno efficace e, generalmente, mostra valori di lavorabilità a 60 minuti nettamente inferiori rispetto sia al policarbossilato che all'additivo sperimentale PNH1. Si osserva, inoltre, come l'additivo PNH1 mostri la minore variabilità prestazionale sia in termini di dosaggio che di mantenimento della lavorabilità nel tempo. Seppure non sia ancora ben nota l'origine della variabilità prestazionale legata al sistema additivo/cemento, è possibile supporre che sia legata all'energia di adsorbimento che per i prodotti a base policarbossilica è bassa, mentre per i prodotti a base fosfonica è maggiore [7]; in questo contesto, si può spiegare come le prestazioni dei PCE possano essere più sensibili dei fosfonati rispetto alle variazioni di composizione del cemento e alla solubilità dei solfati, che modificano la concentrazione ionica della soluzione. Tutti i prodotti esaminati non hanno mostrato intrappolamenti di aria anomali; i valori si attestano, infatti, nell'intorno di valori fisiologici (1-1,5%) per calcestruzzi confezionati utilizzando aggregati con diametro massimo pari a 20 mm (Figura 2). I valori di massa volumica sul calcestruzzo fresco e su quello indurito confermano, sostanzialmente, quanto appena affermato ed escludono difetti di compattazione.

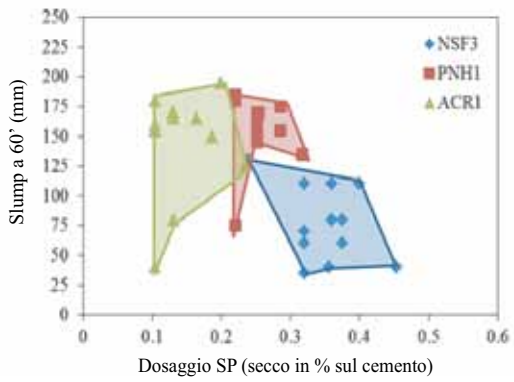


Fig. 1 -Valori di slump a 60 minuti in funzione del dosaggio di additivo superfluidificante (SP)

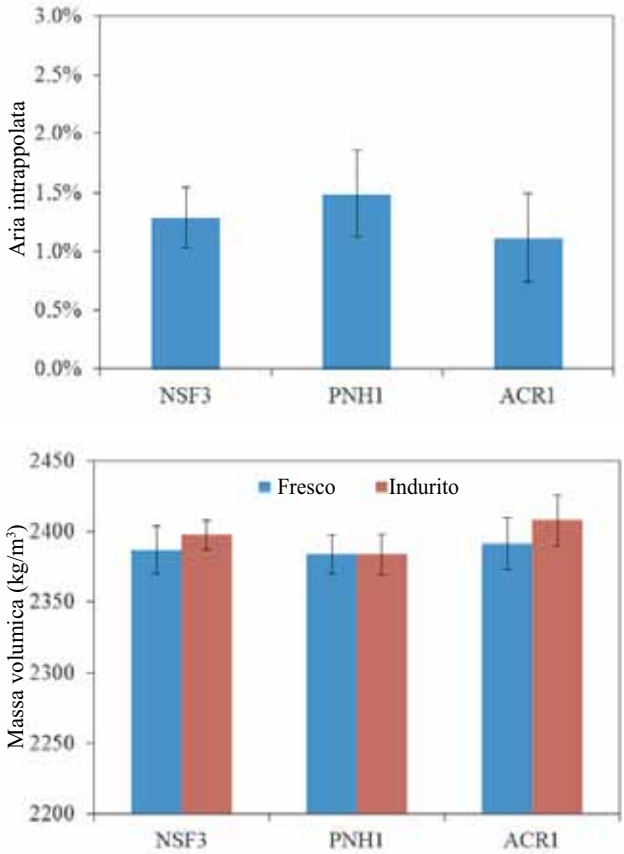


Fig. 2 -Valori medi dell'aria intrappolata e della massa volumica

I dati della resistenza a compressione alle diverse stagionature sono stati normalizzati rispetto ai valori ottenuti sul conglomerato confezionato utilizzando l'additivo a base naftalinica NSF3 (Figura 3). I calcestruzzi confezionati con NSF3 hanno mostrato resistenze a compressione ad un giorno mediamente più elevate rispetto a quelli contenenti gli altri additivi. Il calcestruzzo con l'additivo acrilico ACR1 fa registrare valori di resistenza alle medie e lunghe stagionature sostanzialmente paragonabili a quelli riscontrati per NSF3. Il calcestruzzo con l'additivo a base fosfonica PNH1 mostra valori di resistenza alle brevi stagionature modesti, mediamente pari al 50% della resistenza registrata per i calcestruzzi con gli additivi a base naftalinica. Questo effetto è di certo legato alla natura ritardante dei fosfonati [6]. Dopo 7 giorni, l'effetto ritardante è completamente compensato e si osserva un incremento quantificabile in circa il 10% della resistenza a com-

pressione misurata sui prodotti commerciali anche dopo 28 giorni dal confezionamento. In sostanza, alle brevi stagionature, l'elevata energia di adsorbimento e la diminuzione della velocità di dissoluzione del C_3S produce un forte effetto di ritardo sul processo di idratazione che, una volta innescato, procede come per un impasto non additivato. Alle medie e lunghe stagionature prevale, di contro, la migliore microstruttura e distribuzione delle porosità promossa dal fosfonato.

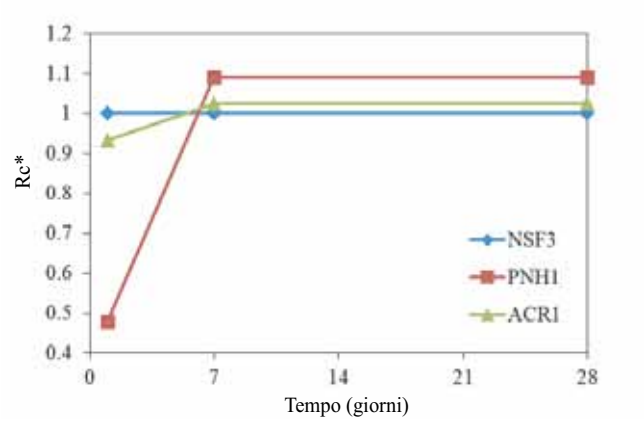


Fig. 3 -Valori medi della resistenza a compressione normalizzata ($R^*=R_{C1,7,28gg}/R_{C,NSF,1,7,28gg}$)

4. CONCLUSIONI

È stato sviluppato un additivo superfluidificante di nuova sintesi a base fosfonica (PNH1). Sono state studiate le prestazioni reologiche e meccaniche di calcestruzzi confezionati utilizzando due additivi superfluidificanti commerciali a base naftalinica (NSF3) e acrilica (ACR1) per confronto con il prodotto innovativo PNH1. Sono stati utilizzati 13 diversi cementi diffusi sul territorio italiano al fine di valutare la compatibilità del sistema additivo/cemento. L'additivo a base fosfonica ha mostrato un'efficacia in termini di riduzione d'acqua intermedia rispetto ai prodotti commerciali, inferiore tuttavia a quella dei prodotti PCE. Si è osservata una minore variabilità in termini di dosaggio e mantenimento della lavorabilità rispetto sia ai prodotti PCE sia NSF. Di contro, il prodotto sperimentale ha fatto registrare una penalizzazione media del 50% della resistenza meccanica alle brevi stagionature, che si traduce alle medie e lunghe in un beneficio quantificabile mediamente in circa il 10%. Il fosfonato ha mostrato una bassa variabilità in termini di mantenimento della lavorabilità nel tempo e di dosaggio; questo rende il loro studio di forte interesse nell'ambito delle problematiche di compatibilità del sistema additivo cemento. L'additivo sviluppato può essere convenientemente utilizzato nei casi di getti in clima caldo, in modo da compensare l'effetto collaterale di ritardo nei processi di idratazione.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] H.UCHIKAWA, S.HANEHARA, D. SAWAKI, The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh pastes prepared with organic admixture. Cem. Con. Res., 27 (1997), 37-50.

[2] C. JOLICOEUR, M. SIMARD, Cem. Con. Comp. 20 (1998) 87-101

[3] L.M MEYER., W.F. PERENCHIO, Theory of Concrete Slump Loss as related to the Use of Chemical Admixtures, Concr. Intl., Vol. 1, No. 1, 1979, 36-43.

[4] P.-C. AITCIN, C. JOLICOEUR AND J.G. MAC GREGOR, Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. Concr. Intl. 5, 16 (1994), 45–52.

[5] L. COPPOLA, A. BUOSO, S. LORENZI, Compatibility issues of nsf-pce superplasticizers with several lots of different cement types (long-term results)", Journal of the Chinese Ceramic Society 38(9), 2010, 1631-1637

[6] P. GU et al."Electrochemical behavior of Portland cement pastes containing phosphonates"Advanced Cement Based Materials, 2(5), 1995, 182-188

[7] J.PLANK, B.SACHSENHAUSER, J.DEREESE, "Experimental determination of the thermodynamic parameters affecting the adsorption behavior and dispersion effectiveness of PCE superplasticizers." Cem. and Con. Res., 40 (2010) 699-709

Rabinder Sing Khurana

Il 2 Ottobre 2012 è mancato all'affetto dei suoi cari, dei suoi amici e dei suoi colleghi l'Ing. Rabinder Sing Khurana nato in India il 22 Giugno 1942. Giunto in Italia, aveva seguito un corso di specializzazione sulle strutture in C.A. presso il Politecnico di Milano.
Dopo aver lavorato con la Sika a Milano, ha raggiunto la Mac Master Builders (oggi BASF) a Treviso nel 1976 dove ha concluso la sua carriera nel 2011.
Le sue ceneri sono state sparse nella Laguna di Venezia il 30 Novembre 2012.

Addio Rabinder da parte di tutti i tuoi amici della Enco che hanno apprezzato la tua competenza professionale e la tua grande generosità.

CARATTERIZZAZIONE DI CALCESTRUZZI AUTOCOMPATTANTI COLORATI

Valeria Corinaldesi, Saveria Monosi
Università Politecnica delle Marche, Ancona

INTRODUZIONE

La realizzazione di un calcestruzzo autocompattante (SCC) richiede un'attenta combinazione dei vari ingredienti che permetta il raggiungimento di una lavorabilità particolarmente elevata da consentirne la completa compattazione per peso proprio in assenza di fenomeni di segregazione.

In termini reologici un calcestruzzo SCC deve possedere un basso valore del limite di scorrimento mentre la viscosità plastica può variare entro un certo intervallo. Dalla corretta combinazione di questi due parametri si può ottenere un materiale molto lavorabile, ma anche di elevata stabilità (1).

In particolare, il presente lavoro riguarda la messa a punto di SCC colorati.

Sono stati presi in esame due differenti pigmenti inorganici in polvere, aggiunti in sostituzione del filler calcareo. Uno dei due pigmenti è costituito da silicato doppio di alluminio e sodio e impartisce una colorazione blu, mentre l'altro pigmento è un ossido di ferro e consente di ottenere una colorazione rosso mattone. Ovviamente la presenza tra le aggiunte minerali fini dei pigmenti colorati in polvere va ad incidere sulla fluidità e sulla coesione delle miscele. Quindi per ottimizzarne le proprietà reologiche è stato necessario apportare modifiche nelle proporzioni degli ingredienti. Anche altri autori hanno visto come i pigmenti siano in grado di aumentare la coesione delle malte (2) e, di conseguenza, quando vengono aggiunti alle miscele la quantità di filler può essere opportunamente ridotta (3).

Gli SCC sono stati esaminati sia allo stato fresco mediante prove di "slump flow" e di tempo di svuotamento al V-funnel, sia allo stato indurito mediante prove di resistenza meccanica a compressione e misure di ritiro igrometrico. Sono state anche seguite prove reologiche preliminari sulle paste cementizie per poter individuare gli eventuali effetti dell'aggiunta dei pigmenti.

Infine, sono stati studiati SCC a ritiro nullo impiegando espansivo a base di CaO in combinazione con un additivo SRA (Srhinkage Reducing Admixture).

PARTE SPERIMENTALE

Materiali

Sono stati impiegati un cemento di miscela tipo CEM II A-L 42.5R (finezza Blaine 0,41 m^2/g e massa volumica 3,05 g/cm^3), ed un filler calcareo, prodotto di scarto della lavorazione delle pietre calcaree (finezza Blaine 0,58 m^2/g e massa volumica 2,68 g/cm^3).

E' stato aggiunto un pigmento inorganico a base di Fe_2O_3 (finezza Blaine 0.60 m^2/g e massa volumica 4,80 g/cm^3) per ottenere una colorazione rossa e un pigmento a base di silicato doppio di alluminio e sodio (finezza Blaine 0,77 m^2/g e massa volumica 2,35 g/cm^3), presente in natura come componente dei lapislazzuli, per conseguire una tinta blu oltremare.

L'influenza dell'aggiunta dei pigmenti sulla durabilità dei calcestruzzi e del loro eventuale effetto sull'ambiente sono stati valutati in un precedente lavoro (4) per mezzo del "leaching test" in soluzione acquosa di NaOH (ph 13) e in acqua deionizzata, per riprodurre rispettivamente le condizioni della soluzione presente nella porosità della matrice cementizia e l'effetto dell'acqua meteorica. I risultati ottenuti in (4) hanno mostrato come l'influenza dei pigmenti in termini di ioni con effetti positivi o negativi sulla durabilità del calcestruzzo è praticamente trascurabile.

Per migliorare la durabilità degli SCC, è stata impiegata anche cenere volante (finezza Blaine 0,43 g/m^2, massa volumica 2,20 g/cm^3) in sostituzione del 10% del cemento. Purtroppo è stato possibile impiegarla solo nel caso di aggiunta del pigmento blu, perché il colore grigio scuro della cenere non ne comprometteva la tonalità (a differenza di quanto accadeva invece con il pigmento rosso).

Come aggregati sono stati utilizzati una sabbia quarzifera (0-4 mm) e una ghiaia (2-16 mm), opportunamente combinate.

L'elevata fluidità è stata raggiunta con l'ausilio di un additivo superfluidificante a base acrilica, in soluzione acquosa al 30%. Per ridurre il rischio di fessure da ritiro igrometrico è stato impiegato un additivo SRA costituito da glicole polietilenico che diminuisce la tensione superficiale dell'acqua presente nei pori della matrice cementizia così da ridurne la contrazione. Per avere "ritiro nullo", l'additivo SRA è stato usato anche in combinazione di un agente espansivo a base di CaO "cotto a morte", essendo ormai noto l'effetto sinergico dei due (5).

Proporzionamento delle paste cementizie per le prove reologiche

Lo studio del comportamento reologico delle paste cementizie è un passo essenziale per ottimizzare la composizione di un calcestruzzo SCC (6). Lo studio è stato effettuato su 10 paste cementizie preparate tenendo in mente le proporzioni tipiche degli SCC (il proporzionamento di tali paste è riportato in Tabella 1). Le paste cementizie di riferimento sono due e sono costituite da acqua, cemento (a/c=0.45), filler calcareo (LP) a due differenti dosaggi, e superfluidificante (SP) aggiunto all'1% in peso sul cemento più filler calcareo.

La pasta cementizia con filler calcareo a dosaggio più basso è relativa ad un SCC con un volume di parti fini di 190 l/m^3, mentre quella a dosaggio maggiore ad un SCC con 200 l/m^3. Sono state anche studiate paste cementizie dove una parte di cemento è stata sostituita dalla cenere volante al 10% in peso, paste contenenti alternativamente i pigmenti blu e rosso in quantità pari a 5 g (che corrisponde a 20 kg al metro cubo di calcestruzzo). Nel caso della pasta con cenere volante è stato testato anche un dosaggio più basso di superfluidificante (0.9% al posto dell'1%), perché la cenere sembra favorire la fluidità dell'impasto.

Prove reologiche

Il comportamento reologico delle paste cementizie è stato valutato dopo 10 minuti e dopo 25 minuti dalla miscelazione; i dati presi in esame sono quelli relativi alla seconda serie di misure.

Lo strumento di misura è un reometro a cilindri coassiali con velocità di rotazione da 1 a 100 s^{-1}. Bui et al (7) hanno trovato che la velocità all'interno di quel range è la più adatta per il modello reologico di un SCC; velocità di rotazione più elevate sono eccessive, mentre un'indagine limitata fino ad un valore massimo di 50 s^{-1} non fornirebbe risultati significativi. Le pareti dei cilindri concentrici del reometro impiegato non sono lisce, ma presentano delle scanalature in modo da ridurre il fenomeno di stratificazione, come per esempio la formazione di uno strato ricco d'acqua in prossimità del cilindro che ruota con effetto "lubrificante"; questo fenomeno renderebbe lo scorrimento più facile e quindi non rappresentativo dell'intero sistema (8).

Il modello reologico è stato descritto ricorrendo alla relazione di Bingham:

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot D \qquad [1]$$

dove τ è la tensione di scorrimento, τ_y è il limite di scorrimento e D è il gradiente di scorrimento. La pendenza della curva di ritorno è stata usata per calcolare la viscosità plastica (η), mentre il suo valore in prossimità di velocità di scorrimento nulla ha consentito di calcolare il limite di scorrimento.

Proporzionamento delle miscele di SCC

Sono state preparate sei differenti miscele di SCC, le relative ricette sono riportate in Tabella 2. Tutte le miscele sono caratterizzate dallo stesso rapporto acqua/cemento di 0,45 ed il loro proporzionamento si è basato sui risultati (di seguito discussi), ottenuti dalle prove reologiche condotte su paste cementizie.

Al fine di ottimizzare la distribuzione dimensionale delle particelle solide nel calcestruzzo, le due frazioni di aggregato fine e grosso, sono state opportunamente combinate, tenendo in mente i suggerimenti riportati nella letteratura scientifica e riguardanti il proporzionamento delle miscele di SCC, con un volume massimo di aggregato grosso pari a 340 litri per metro cubo di calcestruzzo.

In questo lavoro i dosaggi delle particelle fini (sotto 150 micron) sono stati molto elevati (190-200 l/m^3), soprattutto per l'assenza di additivo viscosizzante. Nel caso del calcestruzzo di riferimento oltre al cemento (420 kg/m^3) sono stati impiegati 170 kg di filler calcareo. Quando è stato aggiunto il pigmento rosso (20 kg/m^3) il filler calcareo è stato ridotto a 120 kg e il volume delle parti fini è sceso a 190 l/m^3. Queste scelte sono state effettuate sulla base dei risultati raggiunti con le prove reologiche sulle paste di cemento. In presenza di agente espansivo a base di CaO, con dosaggio di 30 kg/m^3, la quantità di "fini" è di nuovo salita a 200 l/m^3. E' stato impiegato un superfluidificante di tipo acrilico dosato all'1% in peso sulle parti fini (cemento, filler calcareo, pig-

Tabella 1 – Proporzionamento delle paste cementizie.

	Acqua	Cemento	Cenere volante (FA)	Filler calcareo (LP)	Superfluid. (SP)	Pigmento
LP(low)-SP(1%)	50	110	0	37	1.5	0
LP(high)-SP(1%)				45		
LP(high)-SP(1%)+FA		100	10			
LP(high)-SP(0.9%)+FA					1.4	
LP(low)-SP(1%)+red		110	0	32	1.5	5
LP(high)-SP(1%)+red				40		
LP(low)-SP(1%)+blue				32		
LP(high)-SP(1%)+blue				40		
LP(high)-SP(0.9%)+blue					1.4	
LP(high)-SP(0.9%)+blue+FA		100	10			

Tabella 2 – Proporzionamento dei SCC.

	RIF	BLU	BLU+FA	ROSSO	ROSSO+SRA	ROSSO+SRA+CaO
A/C	0.45					
Acqua	190					
Cemento	420		380	420		
Cenere volante (FA)	0		40	0		
Filler calcareo (LP)	170	150		120		
Pigmento blu	0	20	20	0		
Pigmento rosso	0	0	0	20		
Superfluidificante (SP)	5.9	5.9	5.3	5.6		5.9
SRA	0	0	0	0	4	4
CaO	0	0	0	0	0	30

mento, ossido di calcio); solo nel caso di aggiunta di cenere volante il dosaggio di additivo è stato ridotto a 0.9%, grazie all'effetto positivo sulla fluidità esercitato da questa aggiunta minerale. L'additivo SRA è stato impiegato in due casi, con e senza agente espansivo, ad un dosaggio pari a 4 kg/m^3.

Preparazione dei provini, modalità di stagionatura e metodi di prova dei calcestruzzi allo stato fresco e indurito

Per valutare l'autocompattabilità delle miscele allo stato fresco sono state condotte prove di slump flow e di V-funnel dopo 10 minuti dalla miscelazione degli ingredienti.

Invece, per valutarne le prestazioni meccaniche allo stato indurito sono state condotte prove di compressione dopo 3, 7 e 28 giorni di stagionatura su 9 provini cubici di lato 100 mm, stagionati in condizioni umide ad una temperatura di 20°C. Inoltre, sono state condotte prove di ritiro igrometrico libero su tre provini prismatici per ogni miscela, mantenuti in un ambiente con umidità relativa del 50% e temperatura di 20°C fino a 90 giorni di esposizione (dopo un giorno di stagionatura umida).

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Prove reologiche su paste

In Figura 1 sono riportati i valori medi (calcolati su tre campioni per ogni miscela) del limite di scorrimento. I risultati riportati in figura mostrano come l'aggiunta sia di cenere volante sia di superfluidificante a dosaggio maggiore (1% anziché 0,9%) produca una diminuzione del limite di scorrimento; invece l'aggiunta dei due pigmenti ed un aumento del dosaggio di filler calcareo tendono ad aumentarlo. Questi risultati in realtà confermano le aspettative ed i vari ingredienti sono stati dosati proprio per ottenere valori bassi ma comunque positivi del limite di scorrimento, per ottenere SCC fluidi senza segregazione (9).

In Figura 2 sono riportati i valori medi della viscosità plastica. L'aggiunta di cenere volante, di un maggior dosaggio di filler calcareo, così come di un minor dosaggio di additivo superfluidificante determinano un aumento del valore di viscosità plastica. L'effetto dei pigmenti non è chiaramente interpretabile, comunque i valori ottenuti sono tutti racchiusi entro un intervallo piuttosto stretto (0,1-0,25 Pa•s), e quindi tale effetto è poco significativo.

In Figura 3 sono riportati i valori medi della tixotropia, definita come la proprietà che hanno certi gel, come la pasta cementizia, di comportarsi rigidamente quando lasciati in quiete e, invece, di acquistare una crescente fluidità quando posti in movimento. Il valore della tixotropia è stato calcolato come l'area racchiusa tra le 2 curve ottenute rispettivamente per velocità di rotazioni crescenti e decrescenti, e fornisce una stima dell'energia necessaria per movimentare il calcestruzzo fresco, nonché della spinta laterale sui casseri subito dopo il getto: maggiore sarà la tixotropia, e quindi la coesione dell'impasto, e minore sarà la spinta laterale (10). Comunque, per un SCC l'elevata fluidità conseguibile grazie ad un basso valore di tixotropia è un requisito importante, forse più della leggera influenza che essa ha sull'entità del-

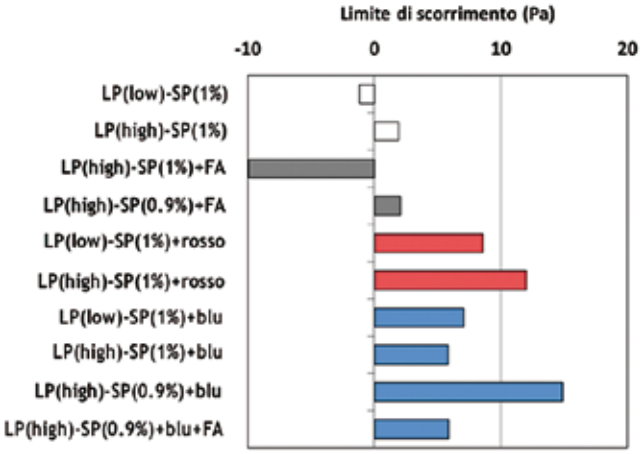


Fig. 1 -Valori del limite di scorrimento

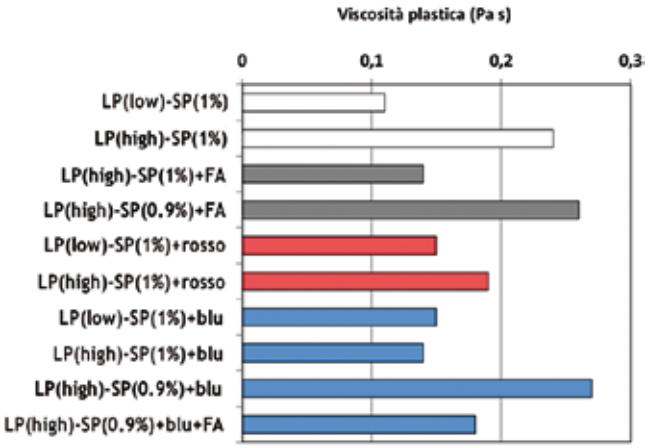


Fig. 2 -Valori della viscosità plastica

la spinta. In questa sperimentazione si sono ottenuti valori bassi di tixotropia, indipendentemente dal segno (comportamento più o meno antitixotropico), per le quattro paste sulle quali poi è stato basato il proporzionamento delle miscele degli SCC (Tabella 2), che sono rispettivamente:

'LP(high)-SP(1%)' per la miscela REF,

'LP(low)-SP(1%)+red' per la miscela RED,

'LP(high)-SP(1%)+blue' per la miscela BLEU,

'LP(high)-SP(0.9%)+blue+FA' per la miscela LEU+FA.

Ovviamente queste quattro paste sono state anche scelte sulla base dei risultati ottenuti in termini di limite di scorrimento e viscosità plastica (vedi Figure 1 e 2), per i quali sono risultate ottimali.

Infine, l'effetto sulla reologia delle paste dovuto all'aggiunta di SRA e dell'agente espansivo (ossido di calcio), che andava studiato per ottimizzare le miscele'ROSSO+SRA' e 'ROSSO+SRA+CaO' è stato già indagato in un altro lavoro (11), in cui si è visto come esso non sia significativo, per entrambi i tipi di aggiunta.

Prove dello Slump flow e V-funnel

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 3 ed in Figura 4. Tutte le miscele hanno mostrato un adeguato livello di fluidità dopo 10 minuti dalla miscelazione degli ingredienti (in assenza di segregazione) per poter essere definite autocompattanti. Anche in termini di viscosità, valutabile mediante la prova di svuotamento dell'imbuto a V, le miscele sono risultate adeguate (tempi di svuotamento entro i limiti di accettabilità: 5-12 secondi).

Prove di resistenza a compressione

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 5. Rispetto alla miscela di riferimento, l'aggiunta di entrambi i pigmenti colorati ha prodotto una certa riduzione della resistenza meccanica, comunque mai maggiore di 3 MPa. Inoltre, l'impiego di SRA con agente espansivo ha permesso di recuperare pienamente la perdita di resistenza dovuta all'aggiunta del pigmento rosso. Come ci si poteva aspettare, l'aggiunta di cenere volante ha determinato un leggero ritardo nello sviluppo della resistenza a brevi stagionature, con un recupero completo dopo 28 giorni.

Prove di ritiro igrometrico

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 6. Rispetto alla miscela di riferimento l'aggiunta di entrambi i pigmenti (rosso e blu), così come quella di cenere volante, ha determinato un leggero aumento del ritiro igrometrico, mentre l'aggiunta

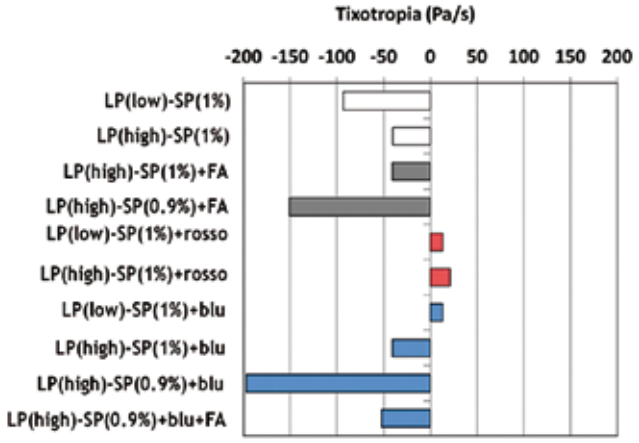


Fig. 3 -Valori della tixotropia

Tabella 3 – Risultati dellle prove allo stato fresco.

	SLUMP FLOW		V-FUNNEL
Tempo di prova (minuti)	10		10
Miscele	Φ_{fin} (mm)	t_{fin} (sec)	t_{fin} (sec)
RIF	680	10	11
BLU	650	10	9
BLU+FA	660	9	8
ROSSO	710	8	8
ROSSO+SRA	720	9	8
ROSSO+SRA+CaO	690	10	9

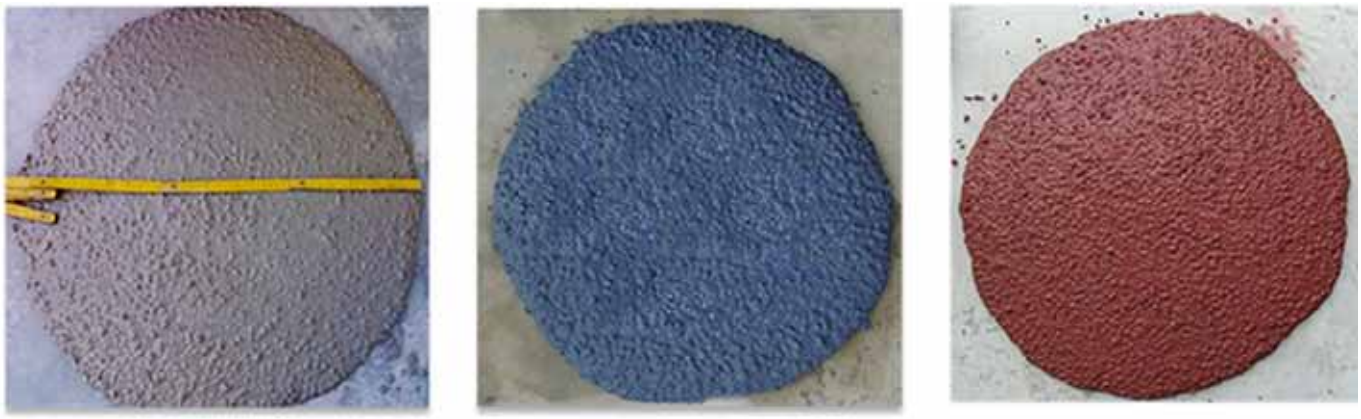


Fig. 4 - Slump flow delle miscele SCC.

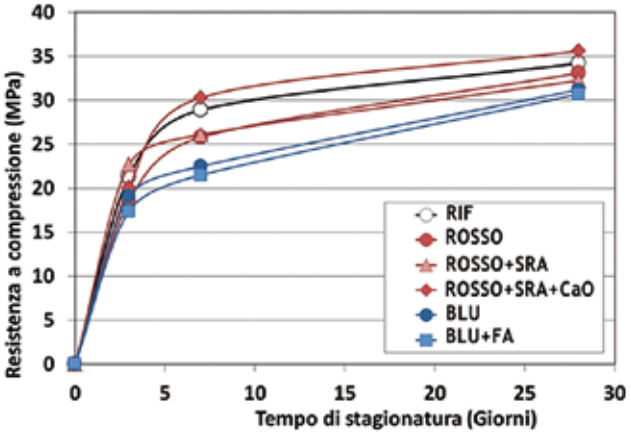


Fig. 5 - Resistenza meccanica in funzione del tempo

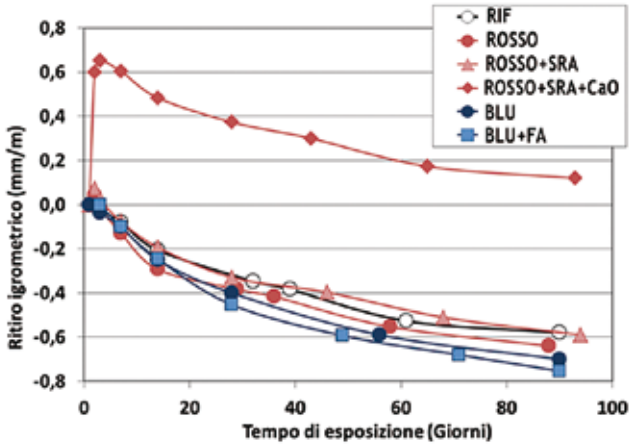


Fig. 6 - Ritiro igrometrico in funzione del tempo

di SRA ne causa una certa riduzione. Invece, l'impiego combinato di SRA e ossido espansivo è risultato molto efficace nel contrastare il ritiro igrometrico, grazie ad una considerevole espansione iniziale che poi si è gradualmente ridotta pur restando positiva dopo 90 giorni di esposizione in un ambiente con U.R. del 50%.

CONCLUSIONI

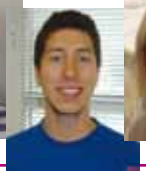
In base ai risultati sperimentali ottenuti si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. i risultati ottenuti mediante prove reologiche su paste hanno permesso di ottimizzare il proporziona mento delle miscele dei calcestruzzi SCC colorati; e quindi l'aggiunta dei pigmenti colorati non ha influenzato in modo significativo il comportamento reologico dei calcestruzzi allo stato fresco;
2. l'impiego di entrambi i pigmenti ha ridotto leggermente le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi;
3. sulla base dei risultati ottenuti dalle misure di ritiro igrometrico, l'impiego di pigmenti inorganici non ha influenzato la durabilità dei SCC;
4. l'impiego di SRA e ossido di calcio come espansivo ha dimostrato di essere efficace nella riduzione del rischio di fessurazione del calcestruzzo e, inoltre, è in grado di fornire un certo contributo positivo in termini di resistenza compressione del calcestruzzo.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Nelson, I., Wallevik, Ó.H., "Rheologycal evaluation of some empirical test methods–preliminary results", Self Compacting Concrete, PRO 33, Ó.H. Wallevik, I.i Níelsson, eds., RILEM Publication s.a.r.l, Bagneux, France, 2003, pp. 59–68.
2. López, A., Tobes, J.M., Giaccio, G., Zerbino, R., "Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete", Cement and Concrete Composites, 31(10), 754–761, 2009.
3. Collepardi, M., Passuelo, A., "The best SCC: stable, durable and colourable", Proc.s IV Int. ACI/CANMET Conf. on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing, P. Helene, T.C. Holland, E. Pazzini, R. Bittecourt, eds., Furnas Centrais Elйtricas S.A.–Civil Engineering Technological Center–Goiвnia, Brasil, 2005, p. 9.
4. Corinaldesi, V., Monosi, S., Ruello, M.L. "Influence of inorganic pigments' addition on the performance of coloured SCC", Construction and Building Materials 30(5), 289-293, 2012.
5. Collepardi, M., Troli, R., Bressan, M., Liberatore, F., Sforza, G., "Crack-free concrete for outside industrial floors in the absence of wet curing and contraction joints", Cement and Concrete Composites, 30(10), 887-891, 2008.
6. Saak, A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P., "New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete", ACI Materials Journal, 98(6), 429-439, 2001.
7. Bui, V.K., Akkaya, Y., Shah, S.P., "Rheological Model for Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, 99(6), 549-559, 2002.
8. Saak, A.W., Jennings, H.M., Shah, S.P., "The influence of Wall Slip on Yield Stress and Viscoelastic Measurements of Cement Paste", Cement and Concrete Research, 31(2), 205-212, 2001.
9. Wallevik, Ó.H., "Rheology – A scientific approach to develop Self Compacting Concrete", Self Compacting Concrete, PRO 33, Ó.H. Wallevik, I.i Níelsson, eds., RILEM Publication s.a.r.l, Bagneux, France, 2003, pp. 23-32.
10. Assaad, J., Khayat, K.H. and Mesbah, H., "Variation of Formwork Pressure with Thixotropy of Self-Consolidating Concrete", ACI Materials Journal, 100(1), 29-37, 2003.
11. Corinaldesi V., "Combined Effect of Expansive, Shrinkage Reducing and Hydrophobic Admixtures for Durable Self Compacting Concrete", Construction and Building Materials, 36(11), 2012, pp. 758-764.

AGGREGATI DAL CALCESTRUZZO RESIDUO



Giorgio Ferrari[1], Alberto Brocchi[1], Fiorenza Cella[1], Maria Chiara Dalconi[2] e Federico Longhi[1]

[1]Mapei, Milano - [2]Università di Padova

INTRODUZIONE

La quota maggiore del calcestruzzo utilizzato nei cantieri viene prodotta negli impianti di preconfezionamento e trasportata al luogo di utilizzo in autobetoniera. Molto spesso, il calcestruzzo che non viene posto in opera viene restituito all'impianto di produzione con la stessa autobetoniera. Negli Stati Uniti, si stima che la quota di calcestruzzo reso sia compresa tra il 2 e il 10 % (in media il 5%) della quantità totale prodotta[1], mentre in Germania, il volume annuo di calcestruzzo reso è stimato in circa 1.8 milioni di metri cubi, pari a circa il 3% della produzione nazionale[2]. Questi dati confermano che il calcestruzzo residuo costituisce un pesante aggravio per gli impianti di preconfezionamento. Infatti, questo materiale di risulta si somma alle acque reflue prodotte dal lavaggio delle autobetoniere e agli altri rifiuti prodotti all'impianto. Da uno studio condotto nel Regno Unito, risulta che la produzione mensile di rifiuti presso un impianto di preconfezionamento può variare da 20 a 80 tonnellate al mese, con una pesante incidenza sui costi di smaltimento e un rilevante impatto sull'ambiente[3].

La Direttiva Europea 2008/98/EC indica chiaramente che la Comunità Europea deve evolvere verso una "società del riciclo" cercando di perseguire la riduzione della produzione dei rifiuti e il loro utilizzo come risorsa. In particolare, il calcestruzzo reso dovrà essere sottratto al flusso dei rifiuti a condizione che esso si conformi a specifici requisiti tecnici, ambientali ed economici[4].

Nel presente studio, viene presentata una nuova tecnologia in grado di trasformare, integralmente e senza produzione di rifiuti, il calcestruzzo reso in un materiale granulare, che può essere riutilizzato come aggregato per la produzione di calcestruzzo.

DESCRIZIONE DELLA NUOVA TECNOLOGIA

Il calcestruzzo reso viene trattato direttamente nel miscelatore dell'autobetoniera con due additivi: il primo basato su un polimero assorbitore d'acqua (SAP), il secondo su un accelerante di presa (SET ACC). Il dosaggio del polimero varia da 0.2 a 0.6 kg per metro cubo di calcestruzzo reso, mentre l'accelerante di presa è aggiunto in ragione di 4 – 8 kg per metro cubo. Il dosaggio degli additivi dipende da molteplici fattori, quali fluidità e il rapporto acqua/cemento del calcestruzzo reso e dal tipo di cemento. Subito dopo l'aggiunta, il polimero inizia a rigonfiare e a disciogliersi lentamente nel calcestruzzo. Attraverso complessi meccanismi chimico-fisici, la maggior parte dell'acqua libera viene trattenuta dal polimero e l'impasto appare sempre più asciutto. Dopo circa tre minuti di mescolamento, il calcestruzzo è trasformato in un materiale granulare, in cui la maggior parte dei granuli consiste di un nucleo centrale, costituito dall'aggregato originale, ricoperto da uno strato di materiale composito, formato dal polimero, l'acqua, il cemento, la sabbia e gli eventuali filler. L'aggiunta dell'additivo accelerante produce la rapida formazione di ettringite, che consolida i granuli e conferisce loro sufficiente resistenza per lo scarico e la maturazione in mucchio, senza rischi di riagglomerazione. L'intero processo dura meno di 10 minuti. Il risultato finale è migliorato dall'aggiunta supplementare di aggregato vergine nella betoniera - variabile dal 50 al 150% in peso rispetto al calcestruzzo reso - prima dell'aggiunta degli additivi. La funzione dell'aggiunta supplementare di aggregato è quella di aumentare la superficie su cui lo strato di materiale composito si distribuisce, riducendo così il suo spessore attorno all'aggregato. Come conseguenza, le proprietà fisiche e meccaniche dei nuovi aggregati risultano notevolmente migliorate. A presa avvenuta, il materiale deve essere movimentato con pala meccanica per rompere le superfici di contatto tra i granuli e, dopo maturazione di qualche giorno, il nuovo aggregato può essere riutilizzato per la produzione di nuovo calcestruzzo. Un vantaggio accessorio del processo è che l'interno della betoniera si presenta generalmente pulito dopo lo scarico del materiale, a causa dell'effetto combinato di asciugatura del calcestruzzo e di agglomerazione delle parti fini da parte del polimero. Questo permette di poter riutilizzare la betoniera per un nuovo carico di calcestruzzo senza procedere al suo lavaggio. La **Fig. 1** mostra (a) la parte esterna di un nuovo aggregato ottenuto dal recupero del calcestruzzo reso ricoperta dallo strato cementizio indurito e (b) la sezione dello stesso.

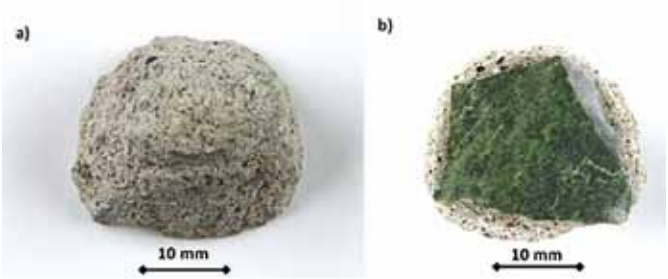


Fig. 1 - (a) Ricopertura esterna e (b) sezione dell'aggregato di recupero

Tabella 1 - Composizione e caratteristiche dell'impasto (50 litri) utilizzato per la produzione dell'aggregato di recupero del calcestruzzo reso

COMPONENTE/PARAMETRO		QUANTITA'
CEMENTO	CEM IV/A-V	15.0 kg
	DOSAGGIO	300 kg/m³
AGGREGATI	SABBIA	8.0 kg
	SABBIA 0/8 mm	48.5 kg
	GHIAIA 10/20 mm	15.9 kg
	GHIAIA 20/30 mm	24.6 kg
SUPERFLUIDIFICANTE	ACRILICO (sol. 21% attivo)	0.13 kg
ACQUA D'IMPASTO		6.9 kg
A/C	COMPRESA UMIDITA' AGGREGATI	0.58
SLUMP	INIZIALE (dopo 7 min.)	190 mm
	FINALE (dopo 60 min.)	65 mm
ACQUA SUPPLEMENTRARE PER RIPRISTINO SLUMP (235 mm)		1.9 kg
AGGREGATO SUPPLEMENTARE	GHIAIA 20/30 mm	117.6 kg
A/C FINALE	COMPRESA UMIDITA' AGGREGATI	0.71
POLIMERO (SAP)	POLYACRYLAMIDE MODIFICATA	0.02 kg
ACCELERANTE PRESA (SET ACC)	SALE D'ALLUMINIO	0.27 kg

Tabella 2 - Composizione del calcestruzzo prodotto con gli aggregati di recupero e del calcestruzzo di riferimento con aggregati naturali (impasti da 25 litri)

COMPONENTE/PARAMETRO		CLS CON AGGREGATI DI RECUPERO	CLS DI RIFERIMENTO
CEMENTO	CEM IV/A-V	7.5 kg	7.5 kg
	DOSAGGIO	300 kg/m³	300 kg/m³
AGGREGATI	SABBIA NATURALE	10.0 kg	27.3 kg
	SABBIA 0/4 mm	5.8* kg	0 kg
	GHIAIA 4/10 mm	10.1* kg	0 kg
	GHIAIA 10/20 mm	7.4* kg	7.8 kg
	GHIAIA 20/30 mm	11.4* kg	12.1 kg
SUPERFLUIDIFICANTE	ACRILICO (sol. 21% attivo)	0.065 kg	0.065 kg
A/C		0.58	0.58

***Aggregati di recupero ottenuti dal calcestruzzo reso di Tabella 1**

Tabella 3 - Composizione del calcestruzzo utilizzato per le prove di riciclo dell'acqua di lavaggio della betoniera

COMPONENTE/PARAMETRO		CLS CON ACQUE DI LAVAGGIO BETONIERA	CLS DI RIFERIMENTO
CEMENTO	CEM IV/A-V	6.0 kg	6.0 kg
	DOSAGGIO	300 kg/m³	300 kg/m³
AGGREGATI	SABBIA NATURALE	23.9 kg	23.9 kg
	GHIAIA 10/20 mm	5.6 kg	5.6 kg
	GHIAIA 20/30 mm	8.7 kg	8.7 kg
SUPERFLUIDIFICANTE	ACRILICO (sol. 21% attivo)	0.047 kg	0.047 kg
A/C		0.60	0.60

PARTE SPERIMENTALE

La nuova tecnologia è stata testata sia a scala di laboratorio che sul campo. In tutte le prove, sono stati realizzati impasti di calcestruzzo con slump 210 mm (consistenza iniziale S4 secondo la norma UNI EN 206-1:2006). La lavorabilità è stata ripristinata dopo 1 ora dall'impasto con l'aggiunta di un'opportuna quantità d'acqua. Questa procedura è stata adottata per simulare le condizioni tipiche del calcestruzzo reso, cui viene normalmente aggiunta, da parte degli autisti, un'aliquota d'acqua in eccesso per evitare l'eccessivo ispessimento del calcestruzzo in betoniera durante il viaggio di ritorno all'impianto.

Sia nelle prove di laboratorio che in quelle di campo, è stata aggiunta un'aliquota supplementare di aggregato vergine pari a1 100% del peso del calcestruzzo reso, prima dell'aggiunta degli additivi.

Prove di laboratorio. La nuova tecnologia è stata provata in laboratorio utilizzando un normale miscelatore a bicchiere. Il prodotto granulare risultante, dopo maturazione per 28 giorni, è stato caratterizzato in termini di distribuzione granulometrica, proprietà fisico-chimiche e meccaniche. Le caratteristiche del calcestruzzo prodotto con i nuovi aggregati sono state confrontate, allo stato fresco e indurito, con quelle di un equivalente impasto prodotto con aggregati naturali. Infine, le acque di lavaggio della betoniera alla fine del processo di produzione dei granuli sono state riutilizzate come acqua di impasto per un nuovo calcestruzzo.

Materiali. Gli aggregati sono stati ottenuti da un calcestruzzo fresco le cui caratteristiche sono riportate in **Tab. 1**. Dopo 28 giorni di maturazione, gli aggregati sono stati suddivisi in 4 frazioni granulometriche: 0-4, 4-10, 10-20 e 20-30 mm. Queste frazioni sono state utilizzate per la produzione di un nuovo calcestruzzo da confrontare con un calcestruzzo equivalente di riferimento, confezionato utilizzando esclusivamente aggregati naturali. Al fine di correggere la curva granulometrica, è stato necessario aggiungere un'aliquota di sabbia naturale agli aggregati di recupero. La composizione dei due calcestruzzi è riportata in **Tab. 2**. Al termine del processo di produzione degli aggregati, la betoniera da laboratorio è stata lavata con 4.5 litri d'acqua, che è stata utilizzata come acqua di impasto per la produzione di un nuovo calcestruzzo. Le caratteristiche di questo calcestruzzo, unitamente a quelle di un calcestruzzo equivalente confezionato con acqua di rete, sono riportate in **Tab. 3**. Tutti i calcestruzzi e le prove in pasta di cemento eseguite per l'indagine sulla cinetica di idratazione in presenza di additivi sono stati realizzati utilizzando un cemento pozzolanico CEM IV/A-V, secondo la norma EN 197/1.

Metodi di prova. Su tutti gli impasti oggetto di indagine sono state eseguite misure dello slump a diversi tempi e delle resistenze meccaniche a compressione a diverse stagionature (1, 7 e 28 giorni). L'effetto degli additivi della nuova tecnologia sulla cinetica di idratazione è stato studiato su pasta di cemento nei primi stadi dell'idratazione e sulla frazione fine degli aggregati prodotti (0-4 mm).

RISULTATI E DISCUSSIONE

Caratteristiche degli aggregati di recupero. Le caratteristiche degli aggregati prodotti con la nuova tecnologia sono riportate in **Tab. 4**. La massa volumica cala e l'assorbimento d'acqua aumenta al diminuire della dimensione dell'aggregato, a causa della maggior proporzione relativa di ricopertura degli aggregati fini rispetto ai grossi. Comunque, gli aggregati con frazione granulometrica superiore a 4 mm risultano conformi

alla norme Europea EN 12620: 2008 e alla norma Italiana UNI 8520-2:2005 per quanto riguarda le caratteristiche fisiche, chimiche, di durabilità e meccaniche e possono pertanto essere utilizzati per la produzione di calcestruzzo. Inoltre, anche i risultati delle prove di gelo/disgelo indicano che gli aggregati prodotti con la nuova tecnologia possono essere utilizzati per la produzione di calcestruzzi in climi freddi.

Proprietà del calcestruzzo prodotto con gli aggregati di recupero del calcestruzzo reso. Le caratteristiche del calcestruzzo allo stato fresco e indurito prodotto con gli aggregati di recupero e quelle del calcestruzzo di riferimento prodotto con aggregati naturali (calcestruzzo di Tab. 2) sono messe a confronto in **Tab. 5**. I risultati indicano che la massa volumica del calcestruzzo prodotto con gli aggregati di recupero è circa il 3 per cento inferiore rispetto al calcestruzzo di riferimento prodotto con gli aggregati naturali, sia allo stato fresco che indurito. Questo effetto non è dovuto ad un diverso inglobamento d'aria, ma alla diversa massa volumica degli aggregati; tuttavia, le resistenze meccaniche non risentono di questo parametro e sono confrontabili a tutte le stagionature, probabilmente grazie al maggiore assorbimento d'acqua degli aggregati di recupero, che riduce il rapporto acqua/cemento all'interfaccia pasta/aggregato e migliora le caratteristiche della zona di transizione (ITZ)[5-6].

Proprietà del calcestruzzo prodotto con l'acqua di lavaggio della betoniera. Le caratteristiche del calcestruzzo fresco e indurito prodotto utilizzando l'acqua di lavaggio della betoniera al termine del processo di produzione degli aggregati di recupero del calcestruzzo reso e del calcestruzzo di riferimento prodotto con acqua di rete (impasti di Tab. 3) sono confrontate in **Tab. 6**. I risultati indicano che il calcestruzzo prodotto con l'acqua di lavaggio della betoniera è equivalente a quello prodotto con l'acqua di rete, sia in termini di massa volumica che di sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione, a conferma che le acque di lavaggio delle betoniere a fine processo possono essere riutilizzate, senza controindicazioni, per la produzione di nuovo calcestruzzo.

Idratazione del cemento in presenza degli additivi. L'effetto degli additivi della nuova tecnologia sull'idratazione del cemento dopo 30 minuti e 24 ore di mescolamento in pasta di cemento, è stato studiato mediante diffrazione a raggi X (XRPD). 100 grammi del cemento CEM IV/A-V utilizzato per le prove in calcestruzzo sono stati miscelati per 5 minuti con 60 grammi d'acqua (a/c = 0.6). Successivamente, sono stati aggiunti 0.13 grammi di polimero SAP e l'impasto mescolato per 3 minuti, seguiti da 1.8 grammi di accelerante di presa (SET ACC) con ulteriori 2 minuti di mescolamento. Sono stati raccolti campioni della pasta dopo 30 minuti e 24 ore di idratazione, interrompendo la reazione di idratazione mediante eliminazione dell'acqua con lavaggi con acetone. Gli spettri di diffrazione sono stati raccolti mediante diffrattometro PANalytical X'pertPro MPD con geometria theta-theta equipaggiato con detector X'Ce-

Tabella 4 - Caratteristiche degli aggregati di recupero del calcestruzzo reso

PROVA	DIMENSIONE DEGLI AGGREGATI DI RECUPERO (mm)			
	0/4	4/10	10/20	20/30
DENSITA' (kg/L)	2.41	2.48	2.53	2.55
ASSORBIMENTO (%)	3.5	2.8	1.8	1.8
LOS ANGELES (%)	n.m.	24	26	n.m.
MICRO DEVAL (%)	n.m.	31	21	n.m.
SOLFATI SOLUBILI (%)	n.m.	0.35	n.m.	n.m.
ZOLFO TOTALE (%)	n.m.	n.m.	0.16	n.m.
CLORURI SOLUBILI (%)	n.m.	0.0008	n.m.	n.m.
SOSTANZA ORGANICA (%)	n.m.	più chiara del riferimento	n.m.	n.m.
GELO/DISGELO (perdita in peso) (%)	n.m.	0.1	0.2	n.m.

n.m. = non misurato

Tabella 5 - Confronto tra il calcestruzzo con aggregati di recupero e il riferimento con aggregati naturali

STATO	PARAMETRO	TEMPO	CALCESTRUZZO CON AGGREGATO DI RECUPERO	RIFERIMENTO CON AGGREGATO NATURALE
FRESCO	Massa Volumica (kg/m³)	7 min	2.295	2.370
	Aria inglobata (%)	7 min	1.5	1.6
	Slump (mm)	7 min	220	210
		30 min	215	200
		60 min	200	200
INDURITO	Massa Volumica (kg/m³)	24 ore	2.280	2.380
		7 gg	2.280	2.360
		28 gg	2.270	2.350
	Resistenza a compressione (MPa)*	24 ore	10.0	10.3
		7 gg	25.5	26.2
		28 gg	31.5	32.4

*Misurata su provini 15x15x15 maturati in condizioni normali (23°C, 95% U.R.)

Tabella 6 - Confronto tra il calcestruzzo prodotto con l'aqua di lavaggio della betoniera e il riferimento con acqua di rete

STATO	PARAMETRO	TEMPO	CALCESTRUZZO CON AGGREGATO DI RECUPERO	RIFERIMENTO CON AGGREGATO NATURALE
FRESCO	Massa Volumica (kg/m³)	7 min	2.363	2.363
	Aria inglobata (%)	7 min	1.2	1.4
	Slump (mm)	7 min	205	215
		30 min	175	150
		60 min	120	65
INDURITO	Massa Volumica (kg/m³)	24 ore	2.348	2.370
		7 gg	2.296	2.348
		28 gg	2.290	2.330
	Resistenza a compressione (MPa)*	24 ore	13.5	13.8
		7 gg	31.6	32.6
		28 gg	41.8	42.7

*Misurata su provini 15x15x15 maturati in condizioni normali (23°C, 95% U.R.)

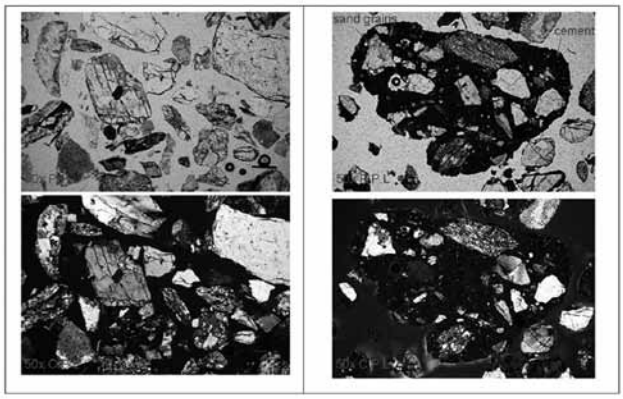


Fig. 2 - Immagini al microscopio in luce polarizzata della sabbia (a sinistra) e della frazione fine dell'aggregato di recupero 0-4 mm (a destra)

lerator a radiazione CuKα (1.54184 Å) nell'intervallo 2theta 5-80, utilizzando un gradiente di 0.017° 2 theta e una velocità di scansione di 102.1 secondi. I risultati indicano che nessuno degli additivi influenza in misura significativa l'idratazione della C_3S, mentre c'è un chiaro effetto dell'accelerante di presa (SET ACC) sull'idratazione della C_3A, tra 30 minuti e 24 ore dal mescolamento. Il maggiore consumo di C_3A sembra essere collegato all'aumento della formazione di ettringite dovuto al SET ACC. Questi risultati confermano quanto già verificato nelle prove in calcestruzzo, che non hanno evidenziato significative riduzioni dello sviluppo delle resistenze meccaniche da parte degli additivi.

Indagini mineralogiche sulla frazione fine dell'aggregato di recupero. La composizione mineralogica della frazione fine (0-4 mm) dell'aggregato di recupero del calcestruzzo reso, dopo 28 giorni di maturazione, e quella della sabbia naturale presente nel calcestruzzo originale sono state studiate mediante analisi XRPD e osservazioni su sezioni sottili al microscopio ottico. I risultati dell'analisi al microscopio (**Fig. 2**) indicano che la sabbia naturale consiste di singoli cristalli silicei, grani feldspatici e altri frammenti litici (scisti, gneiss e fasi carbonatiche). Nella frazione fine dell'aggregato di recupero gli stessi minerali e frammenti litici risultano frequentemente inclusi in una matrice cementizia. L'analisi qualitativa XRPD (non riportata) indica la presenza di quarzo, feldspati, mica, biotite, clorite in entrambi i campioni. La presenza della matrice cementizia nell'aggregato di recupero è indicata principalmente dai picchi dell'ettringite e della portlandite, come mostrato in **Fig. 3**.

Prove di campo. La nuova tecnologia è stata provata sul campo trattando 2 m^3 di calcestruzzo di ritorno, direttamente nell'autobetoniera, con gli stressi dosaggi degli additivi utilizzati per le prove di laboratorio. La **Fig. 4** mostra la fase di scarico degli aggregati di recupero prodotti.

CONCLUSIONI

La nuova tecnologia trasforma il calcestruzzo reso in aggregati di recupero che, dopo maturazione, possono essere riutilizzati per la produzione di calcestruzzo.

Il metodo è basato sull'effetto combinato di un polimero assorbitore d'acqua e di un accelerante di presa. Il polimero è in grado, in pochi minuti, di catturare l'acqua d impasto, creando un "cluster" di un materiale composito costituito dai granuli di cemento, le frazioni fini del calcestruzzo (filler, sabbia) e grandi

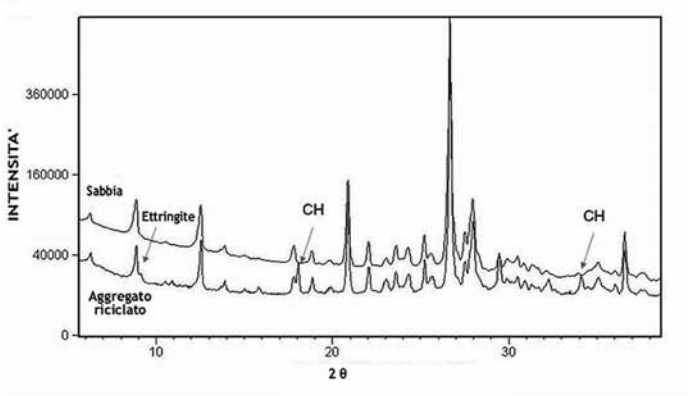


Fig. 3 - Spettri XRPD della sabbia (tracciato superiore) e dell'aggregato di recupero (tracciato inferiore)

quantità d'acqua. L'aggiunta dell'accelerante di presa provoca un ulteriore consumo d'acqua ed una sorta di sinterizzazione chimica del composito, mediante la formazione di ettringite.

La tecnologia proposta possiede molteplici elementi di sostenibilità, in quanto consente di ridurre considerevolmente la produzione di rifiuti agli impianti di preconfezionamento e nel contempo, riducendo il consumo di aggregati di cava, rappresenta un valido contributo per la protezione dell'ambiente e la conservazione delle risorse.

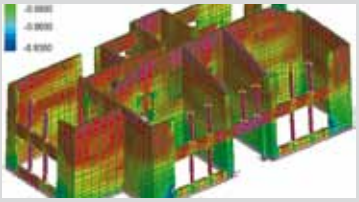
Fig. 4 - Fase di scarico dell'aggregato di recupero del calcestruzzo reso dalla betoniera nel corso della prova di campo

BIBLIOGRAFIA

1. Obla, K., Kim, H., and Lobo, K., "Crushed Returned Concrete as Aggregate for New Concrete – Final Report", RMC Research & Education Foundation, Project 05-13, September 2007.
2. Rickert, J. and Grube, H., "Analysis of Recycled Water Components", Concrete Technology Reports, 2000, pp. 49-60
3. Sealey, B.J., Hill, G.J. and Phillips, P.S., "Review of Strategy for Recycling and Reuse of Waste Materials", International Symposium, Dundee University, Thomas Telford, ISBN 0 7277 29992 6 (ed. Dhir R. K., Limbachyia, M., McCarthy, M.) 19-20 March 2001, pp. 325-335.
4. European Parliament and the Council of the European Union, "Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives", Official Journal of the European Union, L312/3, 22.11.2008.
5. Scrivener, K.L., Crumbie, A.K. and Laugesen, P., "The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete", Interface Science, 12, 411-421, 2004
6. Hu, J. and Stroeven P., "Properties of the Interfacial Transition Zone in Model Concrete", Interface Science, 12, 389-397, 2004

COSA PUÒ FARE ENCO PER VOI

Diagnosticare il degrado e il dissesto delle costruzioni



Riparare le costruzioni danneggiate

Mettere a punto il calcestruzzo per le nuove costruzioni

Assistenza nelle contestazioni legali

Corsi di formazione e di specializzazione on line

SISTEMI

REFOR-tec®

Reactive Forces Technologies

technology

Award of Excellence

Presented to

TECNOCHEM ITALIANA SpA

in recognition of the

Structural Restoration of "Domenico Cotugno" Hospital in Bari - Italy

SEISMIC RETROFITTING OF FLOORS WITH LOW THICKNESS
U.H.P.F.R.C.C. MICROCONCRETE

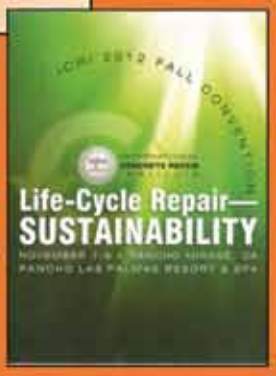
Recognized for Excellence in the Special Projects Category

November 8th, 2012

INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR INSTITUTE

La Giuria Internazionale dell' ICRI
***I**nternational **C**oncrete **R**epair **I**nstitute*
Illinois - USA
assegna -per l'anno 2012- a
TECNOCHEM ITALIANA S.p.A.
il **1° Premio** nella **Categoria**
"Special Projects"
per il **RINFORZO STRUTTURALE**
con **ADEGUAMENTO SISMICO**
dell' **Ospedale Domenico Cotugno**
di Bari

La Premiazione è avvenuta in occasione del *"ICRI 2012 FALL CONVENTION"* nell'universale tema della *SOSTENIBILITÀ*



Ospedale Cotugno di Bari dopo il restauro

Ospedale Cotugno di Bari prima del restauro

U.H.P.F.R.C.C.
Ultra **H**igh **P**erformance **F**iber **R**einforced **C**ementitious **C**omposites

REFOR-tec® GF5/ST-HS

TECNOCHEM ITALIANA SpA — TECNO LOGIC ECO CHEM

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