

2010

Trimestrale
Anno XV
Numero 50

ENCO
JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

MATERIALI INNOVATIVI PER COSTRUZIONI SOSTENIBILI E DURABILI





Sistema **PENETRON® ADMIX** il Calcestruzzo Impermeabile !

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

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



PENETRON®

INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

Sistema Integrale di Protezione del Calcestruzzo per Cristallizzazione

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

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



 **Penetron Italia**

Distributore esclusivo del sistema Penetron®

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



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



MANINI
PREFABBRICATI

dal 1962

l'Evoluzione continua

Sede Generale:
S. MARIA DEGLI ANGELI
Tel. 075-8041018
e-mail: com@manini.it
<http://www.manini.it>

Centri produttivi:
BASTIA UMBRA / PG
APRILIA / LT
PERUGIA



SOMAGLIA / LO



www.manini.it



Calcestruzzi
Italcementi Group

*f*onisocal® e *f*onisocal® PLUS®

IN SINTONIA CON L'AMBIENTE



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

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

Contattaci per conoscere Fonisocal® e Fonisocal Plus®.

www.calcestruzzi.it

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Trimestrale - Anno XV - Numero 50

Direttore Mario Collepari

SOSTENIBILITA' E DURABILITA'

Enco Journal festeggia i 15 anni di vita e il cinquantesimo numero con una edizione speciale dedicata ai due argomenti attualmente di maggior interesse: la sostenibilità e durabilità delle strutture in C.A.

Nell'articolo del **Harald Justness** del SINTEF, prestigioso centro di ricerca norvegese, si illustrano le proprietà di un additivo finora conosciuto e impiegato quasi esclusivamente per accelerare l'indurimento del calcestruzzo soprattutto nei climi invernali: il nitrato di calcio. Oltre a queste proprietà Justness ha scoperto che il nitrato di calcio, se dosato ad almeno il 3% sul peso del cemento, è un eccellente inibitore di corrosione delle armature metalliche al pari del suo simile nitrito di calcio molto più costoso e di difficile reperimento. In sostanza Justness propone una durabilità a più buon mercato.

Fabio Iucolano, Barbara Liguori e Carmine Colella, dell'Università Federico II di Napoli, hanno studiato l'influenza di fibre minerali (in vetro e basalto) per rinforzare malte di calce idraulica nel restauro delle costruzioni di interesse storico ed artistico: i risultati mostrano che le fibre riducono leggermente la resistenza meccanica a compressione, ma -cosa più importante- ne migliorano il comportamento post-fessurativo grazie alla transizione di un comportamento fragile in uno duttile favorendo così una riparazione più durabile.

Gianlorenzo Valenti, dell'Università della Basilicata, presenta una vasta carrellata di dati sperimentali per dimostrare che si può impiegare un cemento (calcio solfo-alluminato) che rispetto al cemento Portland presenta i seguenti vantaggi:

- dal punto di vista della sostenibilità: minor consumo di combustibile e minore emissione di CO₂ (meno 60 %);
- dal punto di vista della durabilità: minor ritiro igrometrico (2/3 in meno);
- dal punto di vista applicativo: più rapido indurimento (20-30 MPa a 3 ore) vantaggioso soprattutto per il restauro.

Fabio Picariello del Laboratorio LTP di Ferrara esamina i capitolati delle pavimentazioni stradali in conglomerati bituminosi che purtroppo presentano una lunga lista di regolamenti difficilmente rispettati nella pratica esecutiva per vari motivi (che includono anche l'imperizia e la disinformazione del Direttore dei Lavori) con grave nocimento della durabilità delle pavimentazioni stradali.

Francesca Tittarelli e Giacomo Moriconi dell'Università Politecnica delle Marche presentano un articolo che è un inno alla sostenibilità proponendo il riutilizzo di scarti in vetroresina finemente macinati in luogo del cemento (fino al 10 % di sostituzione) o degli aggregati (fino al 20 % in volume) per confezionare calcestruzzi autocompattanti: si registra un lieve abbattimento della resistenza meccanica con una forte riduzione dell'assorbimento capillare e del ritiro igrometrico a tutto vantaggio della durabilità del calcestruzzo.

Da ultimo, ma non ultimo per importanza, **Roberto Troli** della Enco presenta uno straordinario esempio di costruzione durabile attraverso la messa a punto di calcestruzzi senza ritiro igrometrico in una platea per un parcheggio multipiano con le pavimentazioni prive completamente di giunti di costruzione e di qualsiasi fessura che avrebbero potuto pregiudicare la durabilità della costruzione a causa della penetrazione di sali disgelanti, a base di cloruro, trascinati in periodo invernale dall'esterno all'interno del parcheggio attraverso le ruote delle autovetture.

Mario Collepari

In copertina: Città delle Arti e delle Scienze, Santiago Calatrava, Valencia

S **OMMARIO**

IL NITRATO DI CALCIO COME
ADDITIVO MULTIFUNZIONALE
PER IL CALCESTRUZZO
di H. Justnes

(pag. 6)

MALTE DI CALCE
FIBRO-RINFORZATE DI
POTENZIALE IMPIEGO NEL RIPRI-
STINO DEL PATRIMONIO EDILIZIO
di F. Iucolano, B. Liguori e C. Colella

(pag. 10)

LEGANTI IDRAULICI PER
CALCESTRUZZI ECO-COMPATIBILI
E CEMENTI INNOVATIVI A BASE DI
SOLFOALLUMINATO DI CALCIO
di G. Valenti

(pag. 14)

Pavimentazioni e conglomerati bituminosi:
LA CRISI DEI CAPITOLATI DELLE
PAVIMENTAZIONI STRADALI
di F. Picariello

(pag. 20)

RIUTILIZZAZIONE DI SCARTI IN
VETRORESINA IN MATERIALI
CEMENTIZI
di F. Tittarelli e G. Moriconi

(pag. 21)

CALCESTRUZZI A RITIRO
COMPENSATO PER STRUTTURE
SPECIALI - Parte II - Applicazione
pratica in una platea di fondazione
di R. Troli

(pag. 28)

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

**Direttore
Responsabile**

MARIO COLLEPARDI

Redazione

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

EDITORE

ENCO SRL

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

COMPOSIZIONE

ISABELLA CAPOGNA
ALESSANDRA GALLETTI
MARA MENEGHEL

Grafica e Stampa

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

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

IL NITRATO DI CALCIO COME ADDITIVO MULTIFUNZIONALE PER IL CALCESTRUZZO



Harald Justnes

SINTEF Building and Infrastructure, Norway - Harald.Justnes@sintef.no

Il nitrato di calcio può essere utilizzato come additivo per il calcestruzzo in diversi modi:

1. Accelerante di presa
2. Aumenta la lavorabilità, quando usato in associazione a componenti che riducono la velocità di idratazione
3. Additivo anticongelante o additivo invernale
4. Incrementa la resistenza meccanica a medio termine
5. Inibitore di corrosione delle armature ferrose

Le prestazioni riportate ai punti 1 e 2 possono essere ottenute mediante bassi dosaggi (da 0,2 a 1,0% di additivo sulla massa di cemento), quelle identificate ai punti 3 e 4 mediante dosaggi moderati (1,0 – 3,0%), mentre il punto 5 può essere ottenuto con dosaggi superiori al 3%.

Il nitrato di calcio usato come accelerante di presa è conosciuto da molti anni e la sua efficacia è ben consolidata, mentre l'azione come inibitore della corrosione è stata verificata solo in seguito.

In tutto il mondo numerosi produttori di additivi per il calcestruzzo usano il nitrato di calcio da molti anni. Secondo Dean Clarke, della Oscrete Construction Products (UK) "I benefici del nitrato di calcio sono ben noti nell'industria, esso permette continuità nella produzione di calcestruzzi anche in condizioni di temperature proibitive. Usato come inibitore di corrosione rappresenta una valida alternativa economica a più noti inibitori come il nitrito di calcio"

A differenza del nitrito di calcio, però, il nitrato di calcio è inoffensivo per l'ambiente, più economico e facilmente disponibile.

ACCELERANTE DI PRESA

In passato, un accelerante per calcestruzzi era sinonimo di un additivo che incrementava la resistenza meccanica a un giorno. Soltanto negli ultimi anni, con l'introduzione degli standard europei, si è cominciato a distinguere tra acceleranti di presa e di indurimento, portando a un utilizzo pratico di entrambi gli effetti in maniera indipendente.

In base allo standard europeo EN 934-2 del 2001, un accelerante di presa deve garantire un tempo di presa iniziale di 30 minuti a 20°C e al massimo il 60% del tempo di presa iniziale del materiale di riferimento a 5°C, misurato su impasto con caratteristiche simili. Un accelerante di indurimento

dovrebbe permettere di raggiungere come minimo il 120% della resistenza alla compressione, rispetto al campione di riferimento, dopo un giorno a 20°C e minimo il 130% in confronto al riferimento dopo 2 giorni a 5°C, sempre riferendosi a calcestruzzo con caratteristiche simili. Precisi parametri sono definiti anche per la resistenza a lungo termine e per l'aerazione.

Nella ricerca di sostanze acceleranti esenti da cloro, disponibili a costi relativamente bassi, il nitrato di calcio, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, è emerso come una delle più valide alternative al cloruro di calcio, CaCl_2 , per il calcestruzzo armato, ma è emersa anche la necessità di combinarne l'uso con altri componenti (ad esempio il sodio tiocianato, NaSCN) per validarlo come accelerante di indurimento. L'accelerazione di presa in un impasto cementizio a 5°C determinato dalla presenza del 1,5% di calcio nitrato (in seguito soltanto CN) è dimostrata nella Fig. 1 dai test con ago Vicat.

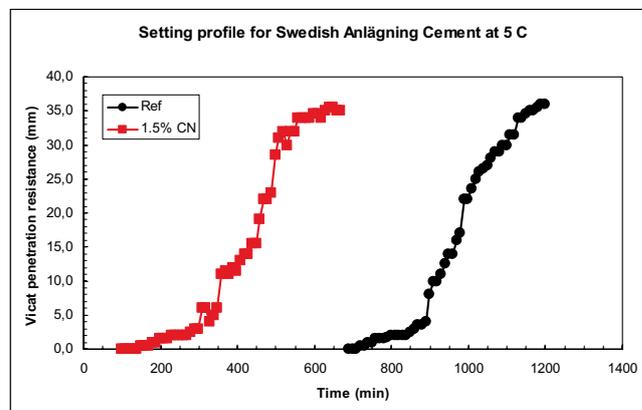


Fig. 1 – Profilo penetrazione ago di Vicat per CEM I 42.5 N (a/c=0.50) a 5°C con e senza 1.5% CN.

L'evoluzione della temperatura nel calcestruzzo termoisolato (metodo semiadiabatico), riportata in Fig. 2, e la resistenza alla compressione dei cubetti di calcestruzzo (Fig. 3) stagionati a 20°C sono state misurate a diverse quantità di CN aggiunto. La composizione di calcestruzzo (rapporto acqua/cemento) corrisponde a: $a/(c+s) = 0,45$ e 4% di fumo di silice in sostituzione del cemento per le composizioni definite CEM I 52,5R-LA e CEM I 42,5R. L'azione accelerante di CN è stata messa a confronto con l'aggiunta di acetato di

Tabella 1 - Rapporto acqua - cemento (a/c) e tempi di presa, per paste con uguale consistenza, a 5 °C senza additivi, con nitrato di calcio (CN), con un superfluidificante (SP) e in combinazione. Evidente l'effetto sinergico ottenuto.

MIX	RIFERIMENTO	1% CN	0.5% SP	1% CN - 0.5% SP
Flow (mm)	162	156	162	157
a/c	0.500	0.501	0.456	0.450
Presa iniziale	8 h 37 min	5 h 19 min	7 h 35 min	3 h 40 min
Presa finale	12 h 22 min	9 h 54 min	10 h 55 min	7 h 10 min

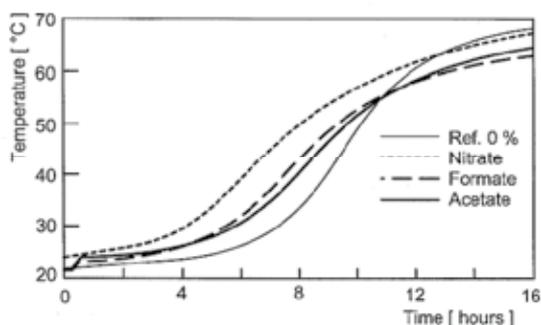


Fig. 2 – Curva della temperatura in relazione all'indurimento (in funzione del tempo) per calcestruzzo CEM I 42,5R, con dosaggi equivalenti di calcio solubile derivato da nitrato, acetato o formiato, in confronto a un campione di riferimento.

calcio, $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, e formiato di calcio, $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$, a concentrazioni equimolari corrispondenti a Ca^{2+} pari al 3.5 % $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ addizionato al calcestruzzo tipo CEM I 42,5R.

L'acetato e il formiato di calcio forniscono all'incirca lo stesso effetto di accelerazione, in funzione dell'andamento della temperatura (Fig. 2), mentre CN ha mostrato un maggiore effetto di accelerazione, nonostante il calcio solubile giochi un ruolo importante nell'effetto di accelerazione. Da notare che le curve delle temperature sono spostate verso tempi ridotti (presa più rapida) senza incrementi nella temperatura massima, ciò è importante per prevenire la formazione di crepe in strutture "robuste".

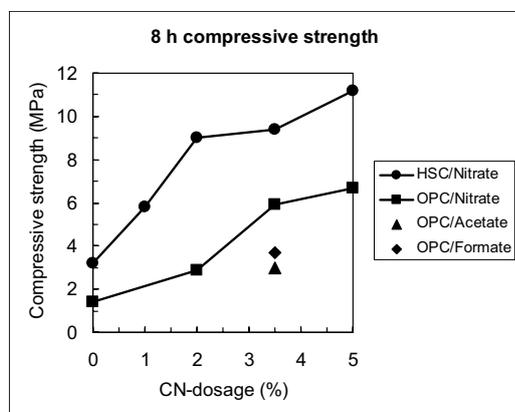


Fig. 3 – Resistenza iniziale alla compressione (8 h) per calcestruzzo CEM I 52,5R-LA (HSC) e CEM I 42,5R (OPC) con dosaggi differenti di nitrato di calcio (CN).

Effetti sinergici tra CN e i moderni superfluidificanti a base di polycarbosilati sono stati osservati sia in termini di leggeri miglioramenti reologici, sia in tempi di presa più rapidi, come evidenziato nella Tabella 1

CONTRASTA IL RITARDO DI PRESA CAUSATO DAI FLUIDIFICANTI

Uno degli utilizzi pratici degli additivi acceleranti è la minimizzazione dell'effetto ritardante dei fluidificanti. Rettvin and Masdal⁽¹⁾ hanno dimostrato che l'aggiunta di una soluzione al 50% di nitrato di calcio tecnico al calcestruzzo fornisce un'accelerazione di presa proporzionale al dosaggio a partire da 0,50% sul peso di cemento. Essi hanno descritto anche l'applicazione del nitrato di calcio (0,25% in peso) per garantire una velocità ottimale di formazione, utilizzando la tecnica definita *slip forming*, durante la costruzione dei piloni alti 369 metri della Troll Gravity Base Structure (piattaforma marina per estrazione gas naturale) nel Mare del Nord (Fig.4) contrastando efficacemente l'effetto ritardante determinato dal ligninsulfonato di sodio utilizzato come fluidificante. CN è utilizzato in grandi quantità come ingrediente nelle formulazioni delle aziende che producono additivi, che solitamente vengono venduti con un loro marchio commerciale; quindi non è facile identificare quali strutture sono state realizzate con il nitrato di calcio. Tuttavia si sa per certo che strutture come la Norwegian Opera House di Oslo e l'Anzac Bridge di Sidney sono state costruite utilizzando CN.

Justnes e Petersen^(2, 3) hanno dimostrato che CN può con-



Fig. 4 – Troll Gravity Base Structure (piattaforma marina per estrazione gas naturale) nel Mare del Nord. I piloni sono stati realizzati con la tecnica Slip forming, usando ligninsulfonato come fluidificante e nitrato di calcio per ottimizzare la velocità di formazione, senza dover modificare la temperatura di lavoro.

Tabella 2 - Viscosità e punto di deformazione, per paste 1:3 (a/c = 0.5) con diverse combinazioni di additivi, misurati 10 minuti dopo l'aggiunta di acqua.

DOPO 10 MINUTI	VISCOSITA' μ_p [Pa·s]	PUNTO DI DEFORMAZIONE τ_0 [Pa]	FATTORE DI REGRESSIONE r_2
0.3% Borresperse (BSP) Ca	1.43	56.5	0.9978
0.3% BSP Ca / 0.5% CN	1.47	58.8	0.9949
0.3% BSP Ca / 1% CN	1.57	67.2	0.9982
0.3% BSP Ca / 1% CN / 0.2% NaSCN	1.53	53.1	0.9968
0.3% BSP Ca / 1% CaCl ₂	1.55	65.0	0.9930
0.3% Wafex P	1.26	49.5	0.9976
0.3% Wafex P / 1% CN	1.51	52.2	0.9966

Tabella 3 - Resistenza alla compressione (MPa) per paste 1:3 (a/c = 0.5) con diverse combinazioni di additivi in funzione del tempo.

MIX	1 GIORNO	3 GIORNI	7 GIORNI	28 GIORNI
RIFERIMENTO (0%)	18.4 ± 0.6	34 ± 2	44 ± 2	54 ± 2
0.3% Borresperse ¹ (BSP) Ca	5.8 ± 0.1	31 ± 1	46 ± 2	59 ± 2
0.3% BSP Ca / 0.5% CN	10.3 ± 0.2	34 ± 1	46 ± 1	65 ± 2
0.3% BSP Ca / 1% CN	13.2 ± 0.3	33 ± 2	43 ± 1	59 ± 2
0.3% BSP Ca / 1% CN / 0.2% NaSCN	15.4 ± 0.3	35 ± 1	47 ± 1	66 ± 3
0.3% BSP Ca / 1% CaCl ₂	15 ± 1	39 ± 1	49 ± 2	61 ± 3
0.3% Wafex P ²	0.5 ± 0.3	30 ± 1	44 ± 1	59 ± 1
0.3% Wafex P / 1% CN	8.3 ± 0.2	28 ± 1	40 ± 2	58 ± 3

¹Ligninsulfonato a basso tenore zucchero - ²Ligninsulfonato con zuccheri naturali

tribuire a contrastare l'effetto ritardante dei fluidificanti pur mantenendo le caratteristiche reologiche del calcestruzzo, come evidenziato dalla viscosità plastica e dal punto di deformazione determinati con il modello di Bingham per paste con differenti ligninsulfonati e CN (Tabella 2). Cloruro di calcio, CaCl₂, e sodio tiocianato, NaSCN, sono stati usati nel confronto. La resistenza a 1 giorno di queste paste, mostrata in Tabella 3, è una chiara indicazione della minimizzazione dell'effetto ritardante.

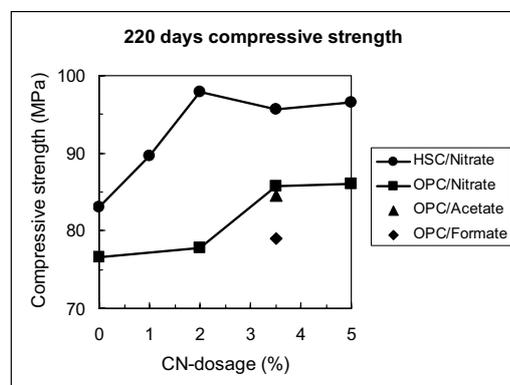


Fig. 5 – Resistenza alla compressione a lungo termine (220 giorni) per calcestruzzo CEM I 52,5R-LA (HSC) e CEM I 42,5R (OPC) con diversi dosaggi di nitrato di calcio (CN).

INCREMENTA LA RESISTENZA A LUNGO TERMINE

Se il nitrato di calcio puro viene usato come accelerante di presa, la resistenza meccanica immediata viene incrementata, ma non quella misurata a 1 giorno. Tuttavia, spesso la resistenza a lungo termine (dai 28 giorni in poi) viene incrementata come viene mostrato, dopo 220 giorni, nella Fig. 5 (stessi impasti di Fig. 3).

AGEVOLA LE LAVORAZIONI INVERNALI

In Polonia il nitrato di calcio (CN) è approvato come additivo antigelo per l'inverno, con un dosaggio di 0,5 – 1% di CN secco sul peso di cemento. Tuttavia non esiste un test standardizzato per gli antigelo e i test adottati spesso prevedono il congelamento di materiale fresco e lo scongelamento prima del test di resistenza. In questo modo l'effetto antigelo, pur essendo una delle prestazioni più pratiche

per il nitrato di calcio, è una conseguenza dell'accelerazione di presa. Il calcestruzzo "caldo" che viene trasportato sul cantiere in betoniera, venendo scaricato in casseforme "fredde" comincia a solidificare prima, creando calore di idratazione che ne previene il congelamento, rispetto al calcestruzzo che non contiene nitrato di calcio.

AGISCE COME INIBITORE DI CORROSIONE

Justnes⁽⁴⁾ ha fatto una valutazione di varie sostanze usate come inibitori contro la corrosione indotta dai cloruri nelle armature del calcestruzzo, e in particolare ha confrontato le prestazioni del nitrato di calcio con l'inibitore più diffuso: il nitrato di calcio. Tra le altre prove, è stato eseguito un semplice test su tondini per cemento armato all'interno di cilindri di cemento, dove i cloruri facevano parte della formulazione dell'additivo usato. I cilindri sono stati esposti all'aria a 38°C e 90% di umidità relativa per anni, e periodicamente venivano ispezionate le crepe formatesi a seguito della formazione di ruggine. Quando il blocchetto di riferimento ha cominciato a creparsi anche i cilindri creati con aggiunta di CN sono stati aperti e i tondini estratti per l'ispezione.

In Fig. 6 vengono mostrati i tondini per cemento armato dopo 3 anni di prova.

L'acciaio senza nitrato di calcio presentava gravi fenomeni corrosivi, il campione con il 2% di CN solo macchie di ruggine



Fig. 6 – Tondini rimossi da cilindri di calcestruzzo prodotti con 3.2 % NaCl (cloruro di sodio) dopo esposizione di 3 anni a 38°C e 90% RH (umidità relativa). Il tondino in alto è il campione di riferimento, in mezzo quello da calcestruzzo con + 2 % CN, in basso il tondino da calcestruzzo con + 4% CN.

in superficie e quello con il 4% non presentava alcun segno di corrosione sulla superficie (marginalmente sulle costole). Si è concluso che il nitrato di calcio (CN) è altrettanto efficiente del nitrito di calcio come inibitore di corrosione, ma oltre a essere più conveniente è anche meno nocivo.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il nitrato di calcio è un additivo per il calcestruzzo che funziona come:

- 1) Accelerante di presa
- 2) Contrastando l'effetto ritardante dei fluidificanti mantenendo la reologia
- 3) Incrementando la resistenza meccanica a lungo termine
- 4) Additivo anticongelante o additivo invernale
- 5) Inibisce la corrosione delle armature causata dai cloruri

Di conseguenza il nitrato di calcio può a buon diritto essere definito un additivo multifunzionale per il calcestruzzo.

BIBLIOGRAFIA

1. Rettvin, Å. and Masdal, T., "Use of Calcium Nitrate Solution as Set-Accelerating Admixture in Slip forming of High Strength Concrete", Proc. ERMCO'95, Istanbul, Turkey, 1995.
2. Justnes, H. and Petersen, B.G.: "Counteracting Retardation of Cement Setting by Other Admixtures with Calcium Nitrate", Proc. 5th CANMET/ACI Int. Symp. Advances in Concrete Technology, July 29 – August 1, 2001, Singapore, ACI SP 200-3, pp. 39-49.
3. Justnes, H. and Petersen, B.G.: "Counteracting Plasticizer Retardation of Cement Setting with Calcium Nitrate", Proc. Int. Conf. Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction, Dundee, Scotland, 9-11 September, 2002, p. 259-267
4. Justnes, H.: "Corrosion Inhibitors for Concrete", Proceedings of the International Symposium on Durability of Concrete I Memory of Prof. Dr. Raymundo, Rivera", 12-13 May, 2005, Monterrey, N.L. México, pp. 179-199.



Non lasciare che il freddo fermi il tuo lavoro!

Nitcal® è il componente multifunzionale che migliora le prestazioni degli additivi per il calcestruzzo.

Commercializzato da Yara, il maggiore produttore mondiale di nitrati, Nitcal® è una speciale miscela di nitrati aggiunto come ingrediente fondamentale in un gran numero di additivi. Il prodotto offre un elevato grado di compatibilità con gli altri componenti. Nitcal® è stato scelto dalle più importanti aziende che producono additivi per calcestruzzo per le sue proprietà, quali:

- Accelerante di presa
- Anticongelante
- Inibisce la corrosione
- Migliora la lavorabilità (usato in combinazione con un fluidificante)
- Prodotto non pericoloso

Per maggiori informazioni sulle proprietà del nitrato di calcio, fate riferimento all'articolo riportato in questa rivista.

MALTE DI CALCE FIBRO-RINFORZATE DI POTENZIALE IMPIEGO NEL RIPRISTINO DEL PATRIMONIO EDILIZIO



Fabio Iucolano, Barbara Liguori, Carmine Colella
Università Federico II, Dip. di Ingegneria dei Materiali e della Produzione, Napoli
fabio.iucolano@unina.it - barbara.liguori@unina.it
carmine.colella@unina.it



Articolo tratto da: "Atti IV Convegno Monitoraggio e Conservazione preventiva dei Beni Culturali", a cura di G. Mascolo, Università di Cassino, 27-29 maggio 2010, p. 249-256. Autorizzazione alla ristampa concessa.

RIASSUNTO

Allo scopo di mettere a punto materiali leganti adatti al ripristino di manufatti edilizi di interesse nei beni culturali, si sono studiate le proprietà fisico-meccaniche di malte di calce idraulica rinforzate mediante aggiunta di fibre corte di vetro e di basalto. All'uopo sono state valutate, in funzione della tipologia e della concentrazione delle fibre nel manufatto, la porosità accessibile all'acqua e le resistenze a compressione e flessione. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli relativi ad una malta di calce idraulica convenzionale non rinforzata. Lo studio è stato completato da una caratterizzazione morfologica in microscopia elettronica a scansione (SEM) dell'interfaccia fibra-matrice, per indagare sul meccanismo di rottura dei provini.

Le malte fibro-rinforzate, pur denunciando resistenze meccaniche mediamente inferiori al riferimento, hanno di converso mostrato un netto miglioramento nel comportamento post-fessurativo. L'aggiunta di fibre, indipendentemente dalla tipologia e dalla concentrazione, ha comportato il passaggio da un meccanismo di rottura di tipo fragile ad uno di tipo duttile. I migliori risultati sono stati ottenuti con campioni di malta rinforzati col 2% di fibre di vetro, che, oltre ad aver guadagnato in termini di tenacizzazione, hanno evidenziato una resistenza a flessione più elevata della malta convenzionale.

1. INTRODUZIONE

Pur costantemente rinnovato per lo sviluppo di nuove tecnologie e soluzioni costruttive, così come per il miglioramento di materiali e tecniche, quello dell'edilizia resta pur sempre un mondo fortemente legato alle proprie radici.

In quest'ottica, per arginare il progressivo invecchiamento del patrimonio edilizio, si è recentemente registrato un ritorno a metodologie, sia in termini di materiali che di tecniche, passate in secondo piano con il boom edilizio degli anni '50 e '60 e con il successivo avvento di materiali innovativi. Ha fatto da traino la costante crescita del mercato del restauro e del recupero dell'edilizia storica e la connessa esigenza di materiali che garantissero compatibilità e coerenza con le tecniche costruttive originarie. Crescente attenzione si è anche rivolta all'impatto ambientale, con la proposizione di soluzioni che meglio si armonizzassero con l'esistente costruito. Dalla sintesi di queste tendenze emerge l'interesse a rivolgersi a materiali e tecniche tipici della più genuina tradizione. In tale contesto le malte a base

di calce possono rappresentare un'importante risorsa, sia per le loro proprietà tecniche, sia soprattutto per le indiscutibili doti di compatibilità con il costruito storico (1-3). La calce idraulica di origine naturale può, infatti, sostituire in molti casi il cemento, garantendo alle opere restaurate, principalmente intonaci, una migliore regolazione termoigrometrica (maggiore traspirabilità, capacità deumidificanti, coibenza), e quindi condizioni microclimatiche interne ottimali ed equilibrate (4). Le malte a base di calce sono peraltro soggette, ancor di più di quelle cementizie, al grave inconveniente della fessurazione da ritiro plastico, soprattutto in ambiente secco, a causa della rapida evaporazione dell'acqua. Mutuando i risultati ottenuti negli ultimi anni per le malte cementizie, tale problema può essere superato con l'aggiunta di fibre, in grado di resistere alle tensioni da ritiro plastico e allo stesso tempo migliorare alcune prestazioni del manufatto, quali la duttilità, la resistenza a flessione e agli urti, e la durabilità (in particolare, la resistenza ai cicli di gelo/disgelo).

In considerazione del fatto che dimensione e tipologia delle fibre condizionano le prestazioni dell'opera, negli ultimi anni sono state utilizzate fibre corte di diversa natura, disperse all'interno della matrice legante, in grado di realizzare una microarmatura tridimensionale che contrasti le tensioni da ritiro plastico e riduca la formazione di micro-fessurazioni (5,6).

L'obiettivo del presente lavoro è stato pertanto quello di valutare tipologia e concentrazione di fibre corte, atte al confezionamento di malte rinforzate di calce idraulica per potenziali impieghi nel campo del recupero e ripristino di edifici storici

2. MATERIALI E METODI

Per il confezionamento delle malte sono stati utilizzati i seguenti materiali: calce idraulica bianca, comunemente impiegata in edilizia per la preparazione di malte per intonaco, per allettamento o per massetti, prodotta dalla MGN, Schio (VI), sabbia silicea fine della Gras Calce di Trezzo sull'Adda (MI), latex (lattice polimerico) e fibre di vetro, entrambi prodotti Mapei, fibre di basalto (Basaltex, Wevelgem, Belgio), acqua distillata.

Leganti e inerti sono stati analizzati mediante analisi termogravimetrica (TG, Netzsch, modello 409ST Luxx) ed analisi diffrattometrica ai raggi X (XRD, Philips PW 1730, rad. $\text{CuK}\alpha 1$). La distribuzione granulometrica della sabbia silicea di fiume (lavata e selezionata) è stata valutata mediante setacciatura, in accordo alla norma Europea (7). La calce è risultata composta per il 23% di $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e il 25% di CaCO_3 . Il resto è costituito da silicati e alluminati di calcio, sui quali peraltro non si è approfondita l'analisi quali- e quantitativa. La sabbia è composta per la quasi totalità da quarzo. Componenti

assolutamente minori sono l'albite e la calcite (circa 4%). La sua composizione granulometrica è compresa tra 0 e 1 mm con un passante a 0,5 mm pari al 90%.

Le fibre di vetro utilizzate, comunemente impiegate per il rinforzo di malte cementizie, calcestruzzi, intonaci e gesso, hanno le seguenti caratteristiche: sono derivate per taglio da filati in vetro trattati con appretto (di natura acrilica) solubile in acqua (*chopped strands*), sono di tipo "E" (rapporto medio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ prossimo a 6,25, modificatori di reticolo di natura alcalino-terrosa), hanno lunghezza media di circa 10 mm e diametro medio di circa 13 μm . Le fibre cosiddette di basalto, anch'esse vetrose, sono ottenute dalla fusione di rocce vulcaniche di composizione basaltica ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 5,2$), tagliate (*chopped strands*), aventi lunghezza media di 4-5 mm, diametro medio di 8-10 μm , modulo elastico E pari a 84 GPa, non apprettate, comunemente utilizzate per il rinforzo di materiali compositi in genere.

Per il confezionamento di tutte le miscele, sono state rispettate le prescrizioni dettate dalla vigente norma europea (8), nella quale vengono indicate sia le modalità di confezionamento delle malte che quelle di esecuzione delle successive prove meccaniche. In particolare, sono stati prodotti provini con rapporto calce idraulica-sabbia pari a 1:3, di dimensioni 160x40x40 mm, rinforzati con fibre di vetro (campioni indicati con le sigle V1 e V2, a seconda delle percentuali di fibre immerse nella malta, 1% o 2%) e con fibre di basalto (campioni indicati con le sigle B1 e B2). Il lattice è stato costantemente aggiunto nella misura dell'1,5%. I provini di riferimento, costituiti unicamente da malta e sabbia, sono indicati con la sigla TQ.

Dopo il confezionamento dei provini, si è proceduto con la fase di stagionatura in cella climatica (MSL, mod. Humichamber EC 125), in modo da controllare la temperatura (20°C) e l'umidità (95% per i primi 7 giorni e 65% per i successivi 21 giorni).

La prova di resistenza a flessione è stata eseguita con un'apparecchiatura Instron 5566, dotata di cella di carico da 5 kN e provvista di un apposito dispositivo per prova di flessione a tre punti. La prova di resistenza a compressione è stata invece eseguita con un'apparecchiatura Instron 8501, dotata di cella di carico da 50 kN e provvista di un apposito dispositivo per lo schiacciamento del provino.

Entrambe le prove sono state condotte in controllo di spostamento, con velocità pari a 0,6 mm/min.

Lo studio morfologico dei campioni di malta dopo indurimento è stato effettuato sottoponendo all'analisi in microscopia elettronica a scansione (SEM, Cambridge S440) superfici di frattura delle malte indurite, recuperate dalle prove di misura delle resistenze meccaniche.

Su tutte le malte prodotte è stata effettuata la valutazione della porosità accessibile all'acqua, attraverso valutazione, secondo norma (9), del volume dei pori esterni (porosità "aperta") e del volume apparente del campione.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

La Tab. 1 riassume il complesso dei parametri fisico-meccanici relativi alle malte considerate. Le malte rinforzate presentano una porosità accessibile all'acqua, compresa tra il 44% del campione V2 ed il 55% del campione B2, decisamente più elevata di quella della malta di riferimento (35%) (vedi 2a colonna). L'aggiunta di fibre, infatti, modifica la lavorabilità della malta e favorisce la formazione di micro-vuoti, ai quali è inibito l'accesso dei prodotti di idratazione dell'impasto.

La micrografia elettronica in Fig. 1, che evidenzia le caratteristiche morfologiche dell'interfaccia fibra-matrice, conferma i dati della tabella, ponendo in risalto la presenza di spazi vuoti, cui è addebitabile l'aumento della porosità.

I dati della Tab. 1 suggeriscono in aggiunta che l'incremento di

Tabella 1 - Proprietà fisico-meccaniche delle malte dopo stagionatura a 28 giorni

MALTA	POROSITA' (%)	CARICO COMPR. (KN)	R _c (MPa)	CARICO FLESS. (KN)	R _f (MPa)
V1	47,4	5,00	3,12	0,67	1,58
V2	44,2	5,79	3,62	1,03	2,41
B1	52,4	5,63	3,52	0,92	2,16
B2	55,2	3,55	2,22	0,71	1,65
TQ	35,6	8,87	5,55	0,91	2,15

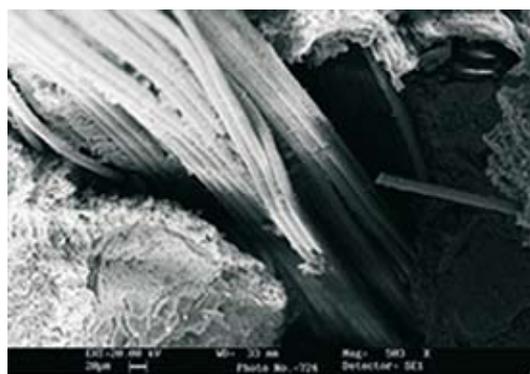


Fig. 1 - Micrografia al SEM del campione V1.

porosità si registra principalmente con le fibre di basalto, in sostanziale accordo con la maggiore difficoltà riscontrata per la miscelazione dei due componenti.

Come era da attendersi e come si evidenzia dai dati relativi alle resistenze a compressione (3a e 4a colonna) e a flessione (5a e 6a colonna), riassunti nella Tab. 1, l'aumento della porosità influisce negativamente sulle proprietà meccaniche delle malte fibro-rinforzate. Si nota infatti che i valori di picco delle resistenze a compressione dei provini fibro-rinforzati sono sempre inferiori a quelli relativi al campione di riferimento. Anche nel comportamento a flessione, l'aggiunta di fibre di entrambe le tipologie si traduce in resistenze di picco più basse del riferimento, con una sola eccezione (V2, con una R_f pari a 2.41 MPa, rispetto a 2.15 MPa del campione di riferimento). Gli altri tre provini (V1, B1, B2) danno valori prossimi o comunque inferiori a quelli relativi al campione senza fibre.

L'inclusione di fibre, seppur responsabile di risultati negativi nella fase pre-fessurativa, determina al contrario notevoli miglioramenti nella fase post-fessurativa, in dipendenza del fatto che le fibre corte svolgono un'azione di "cucitura" delle fessure (5). Poiché in una malta idraulica indurita la fessurazione ha luogo come risultato di una propagazione di micro-fessure all'interno della matrice o sull'interfaccia matrice-aggregato e di un successivo allineamento delle micro-fessure a dar luogo a delle macro-fessure, il meccanismo di azione delle fibre si risolve in una "interruzione" della continuità della matrice, con conseguente rallentamento della propagazione delle micro-fessure.

Quanto detto è confermato dai risultati delle prove a flessione su tre punti, riportati nella Fig. 2. Dall'analisi dell'andamento delle curve carico-spostamento appare evidente che l'aggiunta di fibre comporta il passaggio da una curva tipica di un materiale fragile (curva TQ) a curve caratteristiche di materiali duttili.

Le fibre di vetro sembrano, peraltro, avere scarsa influenza sul comportamento elastico del materiale (la pendenza del tratto iniziale delle curve TQ, V1, V2 è sostanzialmente la stessa), con una più decisa influenza sui valori di picco delle resistenze a flessione.

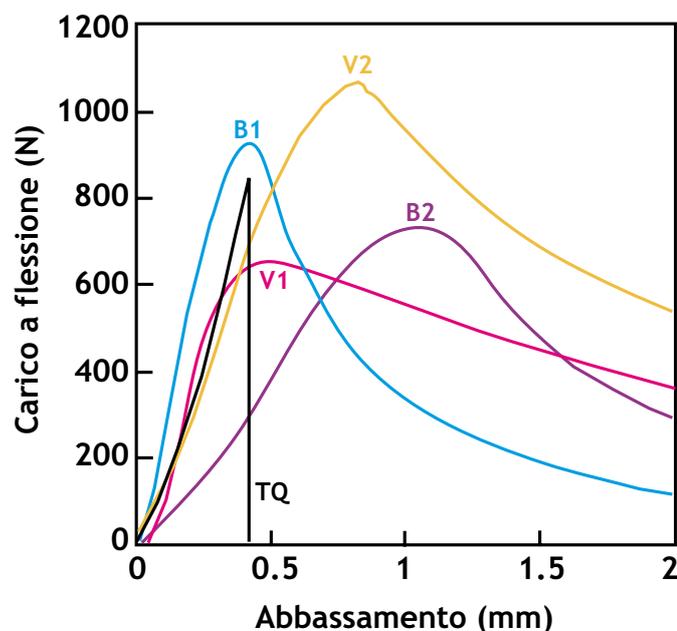


Fig. 2 - Comportamento a flessione delle malte rinforzate con fibre di vetro all'1% (V1) e al 2% (V2) e di basalto all'1% (B1) e al 2% (B2), in confronto a quello della malta non rinforzata (TQ).

Viceversa, la presenza di fibre di basalto non si traduce in sostanziali modifiche sui valori di picco delle resistenze a flessione, mentre sembra influenzare il comportamento del materiale in fase elastica (la curva B2, in particolare, presenta una pendenza del tratto iniziale decisamente inferiore rispetto alle altre).

Complessivamente, i migliori risultati sono stati ottenuti con il campione V2, che tra tutti i campioni esaminati ha mostrato sia il valore di picco più elevato (circa 1100 N) che la più ampia area sottesa dalla curva in Fig. 2 (valore correlabile alla tenacità del materiale).

Ulteriori informazioni relative al meccanismo di rottura delle malte sono state ottenute dall'analisi morfologica dell'interfaccia fibra-matrice. Come si può rilevare dalla Fig. 3, nel campione V2 la fibra di vetro ha subito un fenomeno di *pullout* dalla matrice legante, dovuto al superamento dello sforzo di ancoraggio, registratosi prima del raggiungimento della resistenza meccanica della fibra stessa (10). Si noti anche l'ottima aderenza tra fibra e matrice; non si rileva, infatti, alcun evidente "scollamento" tra le due fasi, a conferma che la buona tenacizzazione dei campioni di malta fibro-rinforzati è dovuta alla natura del legame fibra-matrice.



Fig. 3 - Micrografia al SEM del campione V2.

CONCLUSIONI

I risultati della presente sperimentazione pongono in rilievo l'at-

titudine delle fibre di vetro e di basalto a contribuire al miglioramento di alcune caratteristiche meccaniche delle malte idrauliche a base di calce. Si è infatti messo in evidenza che, indipendentemente dalla tipologia e concentrazione delle fibre, si consegue un deciso miglioramento della resistenza a flessione e della tenacità delle malte indurite nella fase post-fessurativa. Tale comportamento è significativamente marcato con l'aggiunta del 2% di fibre di vetro.

Se ne deduce che materiali di tal fatta possono essere d'interesse nel ripristino del patrimonio edilizio, quando si debbano far coincidere esigenze di compatibilità dei materiali con l'adeguatezza del comportamento meccanico nella fase post-fessurativa. La sostanziale riduzione dei valori di picco delle resistenze a flessione e a compressione non pregiudica peraltro le possibilità d'impiego, ove esso venga orientato soprattutto al ripristino d'intonaci o di opere che non abbiano funzione portante.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Sig. Giovanni Albano per la collaborazione prestata nell'esecuzione della parte sperimentale.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K., "Investigation of the technology of historic mortars", J. Cult. Herit., (2000) 1 45-58.
- (2) Biscontin G., Pellizon Birelli M., Zendri E., "Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars", J. Cult. Herit., (2002) 3 31-37.
- (3) Fassina V., Favaro M., Naccari A., Pigo M., "Evaluation of compatibility and durability of a hydraulic lime-based plaster applied on brick wall masonry of historical buildings affected by rising damp phenomena", J. Cult. Herit., (2002) 3 45-51.
- (4) Lanas, J., Perez Bernal, J.L., Bello, M.A., Alvarez Galindo, J.I., "Mechanical properties of natural lime-based mortars", Cem. Conc. Res. (2004) 34 2191-2201.
- (5) Betterman, L.R., Ouyang, C., Shah, S.P., "Fiber - matrix interaction in microfiber-reinforced mortar", Advan. Cem. Bas. Mat., 1995, 2, 53-61.
- (6) Pigeon, M., Pleau, R., Azzabi, M., Banthia, N., Durability of microfibre-reinforced mortars, Cem. Conc. Res. (1996) 4 601-609.
- (7) UNI EN 933-1 (2009) "Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per setacciatura".
- (8) UNI EN 1015-11(2007) "Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita"
- (9) RILEM Commission 25-PEM (1980) "Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods: Test n.1.1: Porosity accessible to Water" J. Mater. Struct., 13 75, 177-179.
- (10) Silva, F.J., Thaumaturgo, C., "Fibre reinforcement and fracture response in geopolymeric mortars", Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 2003, 26, 167-172

CHRYSO® FLEXÓ

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

CHRYSO

LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI
MATERIALI DA COSTRUZIONE

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

www.chrysoitalia.com

LEGANTI IDRAULICI PER CALCESTRUZZI ECO-COMPATIBILI E CEMENTI INNOVATIVI A BASE DI SOLFOALLUMINATO DI CALCIO

Gianlorenzo Valenti

Dip. di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Università degli Studi della Basilicata

gianlorenzo.valenti@unibas.it

I calcestruzzi eco-compatibili contengono rifiuti speciali in sostituzione di aggregati naturali e/o leganti idraulici a ridotto impatto ambientale, come i cementi a base di solfoalluminato di calcio (cementi CSA), che meritano indubbia considerazione, grazie anche al loro valido comportamento tecnologico. Rispetto ad un clinker Portland, un clinker CSA può consentire risparmi di circa il 68% ed il 40% nel fabbisogno di calcare e nel consumo di combustibile, rispettivamente; inoltre, si può ottenere una riduzione del 62% nell'emissione specifica di CO₂ ed impiegare un'ampia gamma di rifiuti e sottoprodotti industriali nel ciclo tecnologico di produzione. L'elevata resistenza meccanica iniziale dei cementi CSA e il loro basso ritiro all'essiccazione rappresentano proprietà di base molto utili in applicazioni quali riparazioni urgenti, manufatti e pavimentazioni in calcestruzzo.

1. INTRODUZIONE

Si definiscono eco-compatibili quei materiali da costruzione la cui produzione comporta un basso impatto ambientale associato sia ad un minor fabbisogno di materie prime ed energia sia ad una diminuita esigenza di smaltimento di rifiuti ed una ridotta emissione in atmosfera di inquinanti e gas-serra. La sostenibilità del processo di produzione di materiali eco-compatibili può essere implementata mediante l'impiego, nell'ambito del ciclo produttivo, di rifiuti provenienti da altre attività industriali. I rifiuti possono essere utilizzati come fonti di energia o di materia prima; nel secondo caso, insieme con l'evitata messa a discarica, si realizza un ulteriore considerevole beneficio per la collettività: la riduzione del degrado ambientale connesso all'estrazione di materie prime naturali.

Si può ottenere un calcestruzzo sostenibile attraverso l'impiego di componenti eco-compatibili: il cemento, l'aggregato o entrambi. In qualità di sostituti degli aggregati naturali si possono utilizzare svariati sottoprodotti quali rifiuti di costruzione e demolizione oppure residui solidi generati da industrie metallurgiche e chimiche, impianti di produzione di energia elettrica, attività estrattive e così via.

La presente Nota è incentrata sull'esame delle caratteristiche di cementi eco-compatibili ed, in particolare, di leganti idraulici innovativi contraddistinti inoltre da un interessante comportamento tecnologico.

2. CEMENTI ECO-COMPATIBILI

La produzione di cemento è uno dei processi industriali a più largo consumo di materie prime ed energia (Mehta 1978). Inoltre il suo contributo all'emissione antropogenica globale di CO₂ è stimato intorno al 5% (Hendriks et al. 1998): la generazione di tale importante gas-serra è connessa sia alla decomposizione termica del calcare sia alla combustione del combustibile fossile (Gartner 2004).

Tabella 1 - Materie prime e requisiti di energia per produrre 1 tonnellata di cemento di Portland

Calcare	1.20 ton
Argilla	0.30 ton
Gesso	0.05 ton
Combustibile di fossile (petrolio equivalente)	0.07 ton
Energia elettrica	103.00 KWh

La Tabella 1 fornisce i dati di consumo specifico in termini di materie prime ed energia associati alla produzione di cemento Portland (Mehta 1978), il legante idraulico maggiormente impiegato, costituito da una miscela del prodotto di cottura (clinker Portland, intorno al 95% in massa) con gesso.

La concentrazione di calcare nella miscela prima generatrice è all'incirca 80%: tale elevata percentuale implica che sia il fabbisogno termico del forno (in larga misura dipendente dalla decomposizione termica del carbonato di calcio) sia l'emissione di CO₂ (dovuta per il 60% circa alla calcinazione del calcare) sono relativamente alti.

Al fine di ridurre nell'industria cementiera sia l'energia termica di alimentazione al forno di cottura sia la generazione di CO₂, si possono individuare tre possibili approcci.

Il primo approccio si basa sull'impiego di fonti non carbonatate di calce, quali scorie siderurgiche o ceneri volanti ad alto tenore di ossido di calcio, in sostituzione parziale del calcare nella miscela cruda per la produzione di clinker Portland (Marroccoli et al. 2007a; Perkins & Wortley 2003).

Il secondo approccio consiste in un'implementata produzione di cementi di miscela contenenti materiali cementizi supplementari che sostituiscano in parte il clinker Portland (Bilodeau & Malhotra 2000; Mehta & Folliard 1995; Sivasundaram & Malhotra 1992; Wolsiefer et al. 1995): cementi pozzolanici o alla loppa, basati su pozzolane naturali, ceneri di carbone e di pula di riso, fumi condensati di silice o loppa d'altoforno ed altre scorie metallurgiche non soltanto migliorano le prestazioni del cemento, soprattutto in termini di diminuito calore di idratazione e di più elevata resistenza chimica nei confronti di svariati ambienti aggressivi, ma consentono una significativa diluizione del clinker, riducendo sia il fabbisogno di materie prime ed energia sia l'emissione in atmosfera di inquinanti e di CO₂.

Il terzo approccio è orientato ad una maggiore utilizzazione di cementi speciali ottenuti da clinkers non Portland. In particolari applicazioni, i cementi speciali si comportano meglio dei cementi

Portland e di miscela, ma la loro peculiare composizione può anche essere sfruttata per conferire un più pronunciato carattere eco-compatibile al loro processo di produzione (Chatterjee 1992; Muzhen et al. 1922; Scrivener 2003; Marroccoli et al. 2007b; Marroccoli et al. 2010a). Sotto tale profilo, caratteristiche importanti sono: a) temperature di sintesi inferiori a quelle occorrenti per la produzione di clinkers di cemento Portland ordinario; b) clinkers più friabili che richiedono una minore energia di macinazione; c) più larga impiegabilità di rifiuti e sottoprodotti industriali il cui utilizzo o smaltimento è alquanto complicato; d) ridotta concentrazione del calcare nella miscela cruda di alimentazione al forno.

Tutte le succitate caratteristiche appartengono ai cementi a base di solfoalluminato di calcio (cementi CSA) che contengono $4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$ (solfoalluminato di calcio, componente principale), solfato di calcio (contenuto nel clinker CSA o aggiunto ad esso come anidrite o gesso, rispettivamente) ed una serie di silicati di calcio ($2CaO \cdot SiO_2$, $5CaO \cdot 2SiO_2 \cdot SO_3$, $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) ed alluminati di calcio ($3CaO \cdot Al_2O_3$, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, $12CaO \cdot 7Al_2O_3$, $CaO \cdot Al_2O_3$), in parte presenti anche nel clinker Portland (Mehta 1980; Mudbahatkal et al. 1986; Beretka et al. 1992, 1993, 1996; Majling et al. 1993; Beltz et al. 1995; Ikeda et al. 1997; Arjunan et al. 1999; Bernardo et al. 2003; Marroccoli et al. 2008; Marroccoli et al. 2010b, c).

Tabella 2 - Composizione mineralogica del cemento CSA

FASE	MASSA (%)
$4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$	47.6
$2CaO \cdot SiO_2$	18.6
Gesso	15.0
$CaSO_4$	9.9
$CaSO_4 \cdot Al_2O_3$	4.3
$CaSO_4 \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	2.6
TOTALE	98.00

Una tipica composizione di cemento CSA è illustrata in Tabella 2, da cui si può evincere che l'aggiunta di gesso è molto più alta di quella relativa al cemento Portland, consentendo in tal modo una maggiore diluizione del clinker ed un ulteriore beneficio ambientale.

3. ASPETTI AMBIENTALI DEL PROCESSO DI PRODUZIONE DI CEMENTI CSA

Le temperature necessarie all'ottenimento di $4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$ ($1250^\circ - 1350^\circ C$) sono più basse di quelle ($1400^\circ - 1500^\circ C$) richieste dai clinkers di cemento Portland che sono inoltre meno porosi e più difficili da macinare, in virtù della considerevole quantità di fase liquida formata alla massima temperatura di sintesi (Taylor 1997).

Un'ampia gamma di rifiuti e sottoprodotti industriali può essere adoperata per la produzione di cementi CSA. Di particolare interesse sono quelli capaci di fornire allumina reattiva, consentendo in tal modo di realizzare un significativo risparmio di una costosa materia prima naturale quale la bauxite. A questo riguardo, scorie d'altoforno e d'acciaieria, fanghi rossi, ceneri volanti di carbone, rifiuti della combustione del carbone in letto fluido, polveri di allumina e fanghi di anodizzazione meritano una notevole considerazione (Beltz et al. 1995; Bernardo et al. 2003; Marroccoli et al. 2007a, b 2008, 2010b, c).

Il fabbisogno specifico di CaO (riferito all'unità di massa del composto) per la sintesi di $4CaO \cdot 3Al_2O_3 \cdot SO_3$ è pari a 0.368 ossia, rispettivamente, il 50%, 56%, 59% e 80% di quello necessario per $3CaO \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$, $3CaO \cdot Al_2O_3$ e $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$, i quattro principali componenti del cemento Portland.

Un rapporto in massa calcare/clinker pari a 1.25 circa è frequente nella produzione di cemento Portland. Per un cemento CSA sintetizzato da una miscela di 24.1% calcare, 14.9% gesso naturale e 61.0% fango di anodizzazione (Marroccoli et al. 2010c), il rapporto calcare/clinker è pari a 0.4. Si può quindi ottenere un risparmio del 68% nel fabbisogno di calcare.

Il fabbisogno termico teorico del forno per la produzione di clinker si basa sull'assunzione che la quantità di calore recuperabile dal raffreddamento dei gas del forno e del clinker sia pari a quella assorbita dalla cottura della miscela cruda di alimentazione al forno fino alla temperatura di clinkerizzazione. Esso può praticamente essere imputato alla calcinazione del calcare (Mehta 1978), in quanto il calore assorbito durante la cottura dei componenti della miscela cruda differenti dal calcare è compensato da quello generato durante la sintesi dei costituenti del clinker: se il fabbisogno termico per il clinker Portland risulta pari a 1988 kJ per kg, quello per il clinker CSA è il 32% di tale valore, ossia 636 kJ per kg.

Il consumo globale di energia termica è la somma del fabbisogno termico teorico del forno e delle perdite totali di calore. Per un clinker Portland prodotto a $1400^\circ C$, esso ammonta a 3349 kJ per kg (Mehta 1978); per il clinker CSA, risulta pari a 1997 kJ per kg, assumendo che le perdite totali di calore siano le medesime in ambedue i casi, cioè 1361 kJ per kg. Tali perdite sono sovrastimate per il clinker CSA (ottenuto ad una temperatura di sintesi più bassa) e pertanto il pertinente consumo globale di calore dovrebbe in realtà essere minore di 1997 kJ per kg.

Se un pet-coke con un Potere Calorifico Inferiore di 35162 kJ/kg è impiegato come fonte di energia, consumi globali di calore pari a 3349 e 1997 kJ per kg implicano consumi specifici di combustibile di 0.095 e 0.057 per kg di clinker Portland e CSA, rispettivamente, con un risparmio del 40% di combustibile per quest'ultimo. I quantitativi specifici di CO_2 generati dalla calcinazione del calcare e dalla combustione del combustibile per la produzione di clinkers e cementi (Portland e CSA) sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3 - Emissione di CO_2 nella produzione del cemento Portland e nel CSA (clinker e cementi)

	CO_2 da calcinazione di calcare ^a	CO_2 da combustibile ^b	CO_2 Totale
Clinker Portland [kg/(kg clinker)]	0.51	0.31	0.82
Clinker CSA [kg/(kg clinker)]	0.16	0.18	0.34
Cemento Portland ^c [kg/(kg cemento)]	0.48	0.29	0.77
Cemento CSA ^d [kg/(kg cemento)]	0.14	0.15	0.29

^a Concentrazione di $CaCO_3$ uguale al 93% da massa

^b Contenuto di carbone ossidabile a CO_2 uguale all'88% da massa

^c Composto dal 95% di clinker e 5% di gesso

^d Composto dall'85% di clinker e 15% di gesso

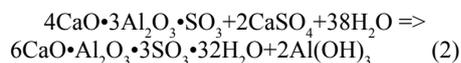
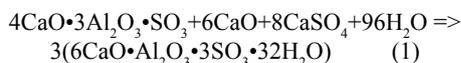
Sia per il clinker che per il cemento CSA si raggiunge la medesima emissione totale ridotta (0.48 kg/kg) con risparmi di CO_2 , in confronto a clinker e cemento Portland, pari a 58 e 62%, rispettivamente.

4. IDRATAZIONE E PROPRIETA' TECNICHE DEI CEMENTI CSA

Il comportamento tecnico dei cementi CSA è principalmente

connesso alla generazione di ettringite, $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\text{H}_2\text{O}$, a seguito dell'idratazione del loro componente chiave, $4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$, che può reagire con acqua secondo le seguenti modalità:

- i) insieme con calce e solfato di calcio per generare solo ettringite, reazione (1);
- ii) con il solo solfato di calcio per dare ettringite e idrossido di alluminio, reazione (2):



L'ettringite prodotta secondo la reazione (1) ha caratteristiche espansive che possono essere impiegate nei cementi a ritiro compensato e self-stressing (Mehta 1973; Kurdowski et al. 1986; Muzhen et al. 1992).

L'ettringite ottenuta in assenza di calce (reazione (2)) non è espansiva ed è in grado di promuovere elevate resistenze meccaniche già alle brevi stagionature. Le caratteristiche di rapido indurimento e stabilità dimensionale dei cementi CSA ad elevate prestazioni sono dovute alla reazione (2); questi cementi, sviluppati per la prima volta dalla China Building Materials Academy negli anni '70, possono essere utilmente impiegati per applicazioni strutturali, grazie anche alla loro elevata impermeabilità e resistenza chimica (Mudbhalkar et al. 1986; Wang & Glasser 1996; Muzhen et al. 1997; Glasser & Zhang 1999; Zhang & Glasser 1999; Glasser 2002; Bernardo et al. 2007; Marroccoli et al. 2007c).

I principali aspetti del processo di idratazione di $4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$ sono i seguenti: a) la velocità di formazione dei prodotti è alta; b) la stechiometria della reazione detta il meccanismo di idratazione (Hanic et al. 1989); c) la formazione completa di ettringite e idrossido d'alluminio richiede un elevato quantitativo di acqua (il rapporto stechiometrico acqua/solido in massa è pari a 0.78). Le caratteristiche a) e b) conducono al repentino raggiungimento di una peculiare condizione contraddistinta da prodotti d'idratazione stabili, potenzialmente utili alla durabilità dei cementi induriti. La caratteristica c) determina i seguenti fenomeni: 1) un precoce arresto dell'idratazione in quanto l'acqua è rapidamente impiegata per la formazione dei prodotti; 2) una ridotta porosità capillare dovuta al consumo di acqua libera; 3) una persistenza di fasi anidre stabili al pari dei loro prodotti d'idratazione; 4) un ambiente privo di umidità che si instaura rapidamente a seguito del processo di auto-essiccazione.

La microstruttura e il comportamento tecnico dei cementi CSA idratati sono del tutto differenti da quelli dei cementi Portland stagionati. Per questi ultimi, le proprietà leganti sono principalmente dovute alla generazione di silicati di calcio idrati, di composizione e microstruttura variabile, costituiti da particelle multistrato in grado di trattenere acqua sia all'esterno che all'interno dei vuoti che li separano. Questa situazione determina una notevole sensibilità del sistema idratato al ritiro per essiccazione e al creep (Mehta 1986; Oberholster 1986). Inoltre, la persistente acqua libera e la relativa porosità capillare, che influenzano considerevolmente le proprietà tecniche dei cementi Portland idratati (i quali richiedono un ammontare di acqua di gran lunga superiore a quello stechiometrico), giocano un ruolo molto limitato nel regolare il comportamento idraulico dei cementi CSA.

Nelle Figure 1-3 sono presentati i risultati delle indagini microstrutturali condotte, su un cemento CSA ad alte prestazioni in via di idratazione, mediante analisi termica differenziale (DTA), microscopia a scansione elettronica (SEM) e porosimetria a mercurio (MIP) (Marroccoli et al. 2008).

Dai termogrammi di Figura 1 si può osservare la rapida forma-

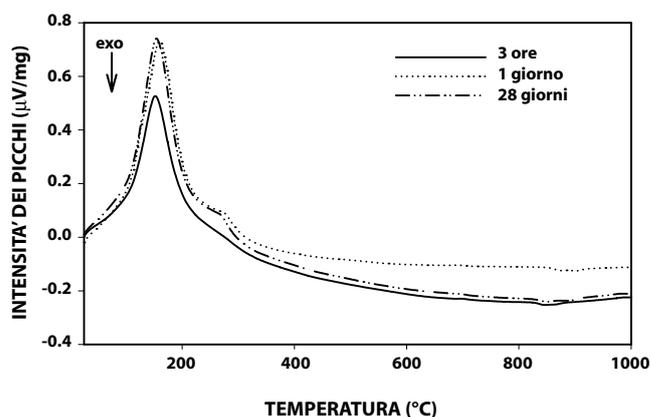


Fig. 1 - DTA per paste di cemento CSA stagionate a 3 ore, 1 giorno e 28 giorni.

zione iniziale di ettringite: gli effetti endotermici a circa 160°-170°C e 270°-280°C sono dovuti alla presenza di ettringite e di idrossido di alluminio, rispettivamente.

Le osservazioni SEM riportate nella Figura 2 indicano chiaramente la rapida crescita, nel periodo di stagionatura 3-72 ore, di cristalli prismatici di ettringite a sezione esagonale.

Per quanto concerne l'andamento della porosità dei sistemi idratati, il comportamento dei cementi CSA è marcatamente diverso da quello dei cementi Portland (Figura 3)

Durante l'idratazione del cemento Portland, è ben nota l'evoluzione delle curve porosimetriche in funzione del tempo di stagionatura e del rapporto acqua/cemento (Bentur 1980; Midgley & Illston 1983; Garboczi 1990; Cook & Hover 1999; Diamond 2000; Bernardo et al. 2006). Sia l'aumento del tempo di stagionatura, sia la diminuzione del rapporto a/c determinano una riduzione della porosità totale e della dimensione di soglia dei pori.

Le curve differenziali a brevi tempi di stagionatura mostrano un singolo picco che indica una distribuzione unimodale della dimensione dei pori. All'aumentare del tempo di stagionatura, appare un secondo picco nella zona di minor porosità (distribuzione bimodale). Il primo picco è connesso alla minima dimensione di pori in grado di connettere un sistema continuo. Il secondo picco è legato alla pressione richiesta per sfondare le barriere formate dai prodotti d'idratazione che isolano lo spazio interno dei pori.

Come previsto, per paste di cemento Portland ad alta resistenza e rapido indurimento, la distribuzione delle dimensioni dei pori è risultata unimodale alle brevi stagionature e bimodale a quelle più lunghe (Figure 3A-3B, grafico cumulativo e derivativo).

Per le paste di cemento CSA si rileva la rapida instaurazione di una distribuzione bimodale (Figure 3C-3D, grafico cumulativo e derivativo).

La regione di bassa porosità dopo 2 ore di idratazione, contribuisce per il 25% del mercurio intruso mentre, a tempi più lunghi di stagionatura, il ruolo dei pori più piccoli diventa predominante. Lo sviluppo della struttura dei pori è inizialmente molto rapido e presenta una prevalente regione di più bassa porosità a seguito della veloce formazione di prodotti d'idratazione che riducono e isolano lo spazio interno. Per periodi di stagionatura più lunghi l'evoluzione della porosità è molto lenta, a causa del pressoché totale arresto dell'idratazione.

Il confronto fra i risultati ottenuti con paste di cementi Portland e CSA a 12 ore di stagionatura chiaramente mostra la forte differenza nelle caratteristiche porosimetriche. In un periodo di stagionatura compreso tra 1 e 28 giorni, l'evoluzione della porosità delle paste di cemento CSA è completamente differente da quella osservata per le paste di cemento Portland, anche se per stagionature di 7 e 28 giorni il volume totale intruso, la prima e la seconda dimensione di soglia dei pori non variano significativamente. È interessante notare

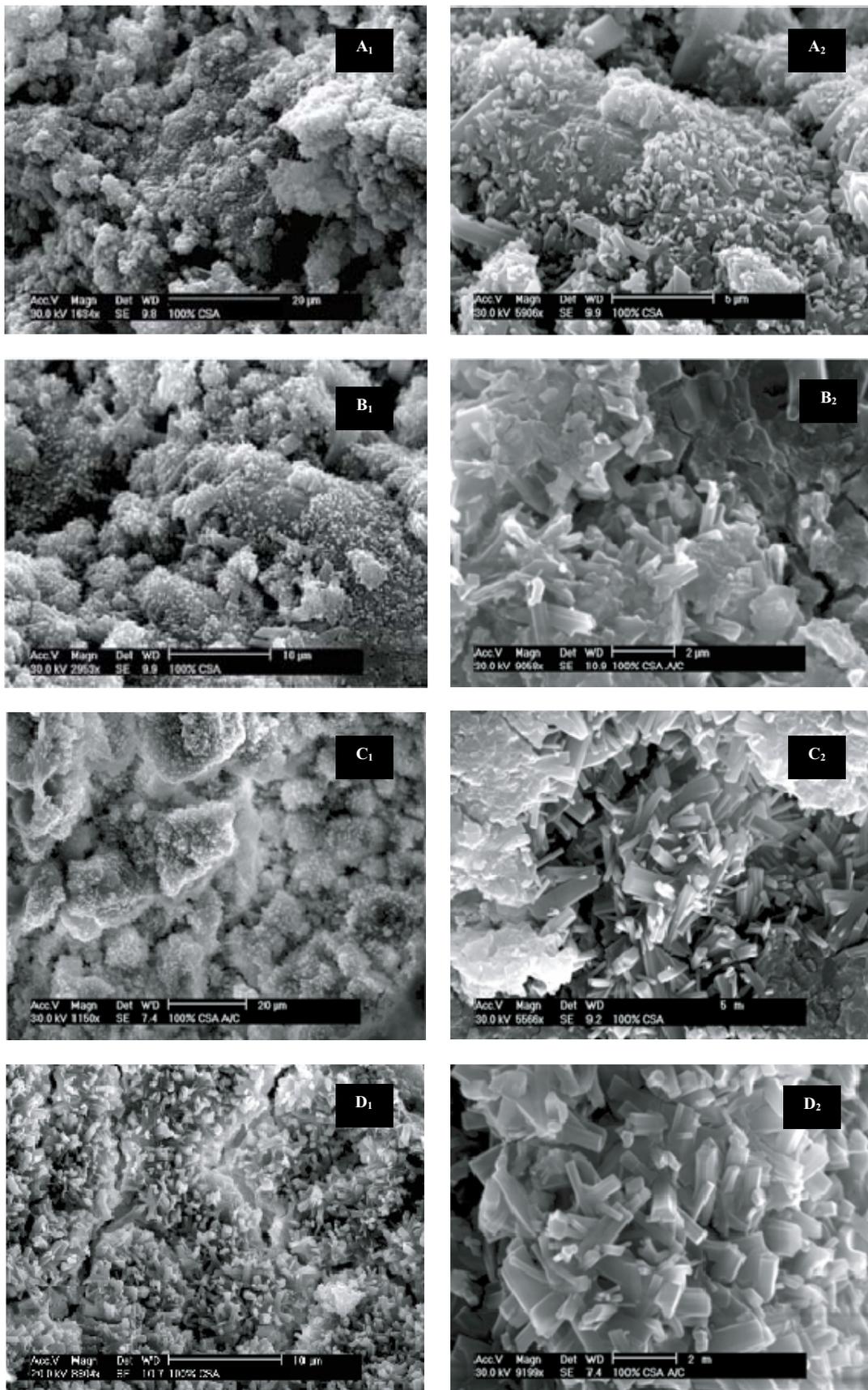


Fig. 2 - SEM per paste di cemento CSA stagionate a 3 ore (A), 8 ore (B), 16 ore (C) e 72 ore (D).

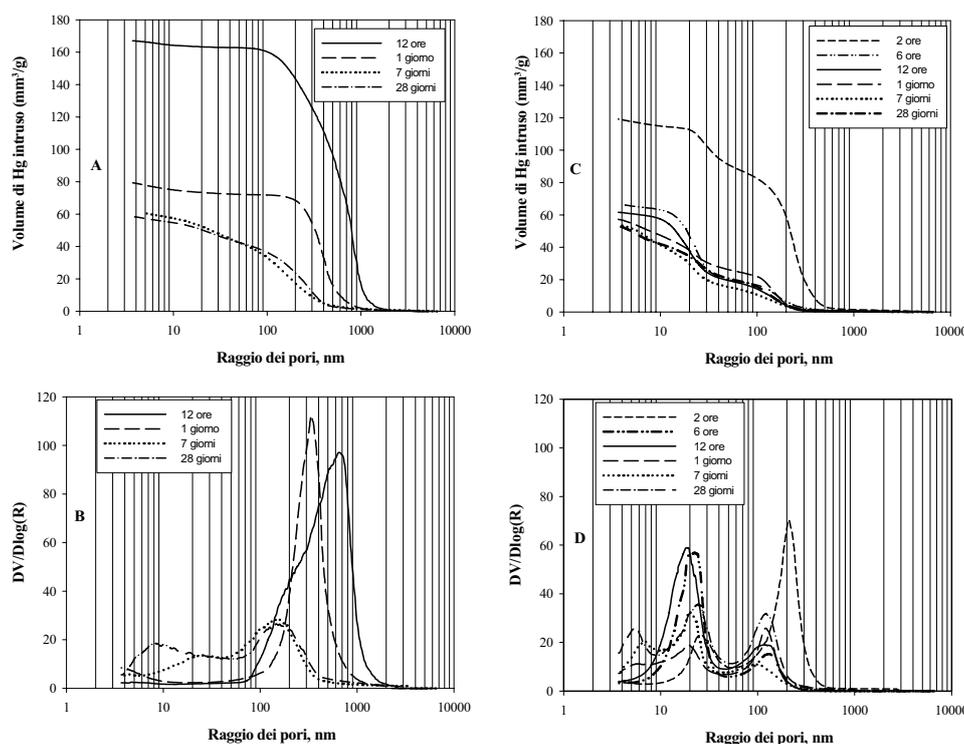


Fig. 3 - Volume di mercurio intruso nelle paste di cemento a vari tempi di stagionatura: (A) Volume totale intruso nella pasta di cemento Portland; (B) derivata del mercurio intruso nel cemento Portland; (C) volume totale intruso nelle paste di CSA; (D) derivata del mercurio intruso nel CSA.

la comparsa di una distribuzione trimodale in quanto la regione di più bassa porosità si divide in due zone con dimensioni del diametro di soglia comprese tra 20 e 25 nm e tra 5.5 e 7 nm.

Per i cementi CSA ad alte prestazioni, sia la rapida formazione di ettringite sia la caratteristica distribuzione dei pori del sistema idratato, evidenziate dalle tecniche d'indagine microstrutturale, promuovono il rapido indurimento iniziale e il considerevole potenziale di durabilità.

Rispetto ai cementi Portland, i cementi CSA presentano, in particolare alle brevi stagionature, resistenze meccaniche più elevate (Tabella 4) e ridotto ritiro (Figura 4).

Tabella 4 - Resistenza meccanica a compressione (MPa) alle varie stagionature per le malte CSA (a/c= 0.5, sabbia/cemento=3.0) e calcestruzzo (legante 400 kg/m³, acqua 180 kg/m³, Sabbia 5-15 mm 741 kg/m³, Sabbia 10-25 mm 1097 kg/m³)

PERIODO DI STAGIONATURA	MALTA CSA	CALCESTRUZZO CSA
3 ORE	19.6	27.3
5 ORE	30.2	33.2
8 ORE	34.4	35.7
1 GIORNO	39.6	41.5
7 GIORNI	56.3	44.3
28 GIORNI	61.7	53.5
90 GIORNI	70.5	65.3

Se si desidera un'ulteriore riduzione del ritiro, i cementi CSA possono utilmente essere miscelati con cemento Portland, al fine di sfruttare il forte ambiente alcalino creato da $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (originato

dall'idratazione del cemento Portland) e di promuovere pertanto, secondo la reazione (1), la formazione di ettringite espansiva che determina una considerevole compensazione del ritiro (Bianchi et al. 2009).

Di regola, vi sono due tipologie di cementi CSA commerciali: la prima, basata sul solo cemento CSA; la seconda, costituita da una miscela di cemento CSA e cemento Portland. La prima formulazione può essere impiegata come cemento rapido per riparazioni urgenti ovvero per prodotti in calcestruzzo prefabbricato e, in genere, allorché siano richieste resistenze elevate alle brevi stagionature; la seconda formulazione è soprattutto indirizzata alle pavimentazioni in calcestruzzo (Buzzi et al. 2010).

5. CONCLUSIONI

Si possono realizzare calcestruzzi sostenibili mediante l'impiego di componenti eco-compatibili: il cemento, l'aggregato o entrambi. Rifiuti e sottoprodotti industriali possono essere utilmente sfruttati in sostituzione degli aggregati naturali. In qualità di leganti idraulici si possono adoperare cementi a ridotto impatto ambientale, la cui produzione richiede un minore fabbisogno

di risorse naturali e/o implica una diminuita esigenza di smaltimento di rifiuti ed una ridotta emissione in atmosfera di inquinanti e gas-serra.

Cementi a base di solfoalluminato di calcio (cementi CSA) non solo manifestano interessanti caratteristiche di eco-compatibilità, ma esibiscono anche un valido comportamento tecnologico. Rispetto ai cementi Portland, essi richiedono: 1) una più bassa temperatura di sintesi; 2) una ridotta concentrazione di calcare nella miscela cruda di alimentazione al forno e, di conseguenza, un diminuito fabbisogno termico ed una ridotta emissione di CO_2 ; 3) un maggior numero di rifiuti e sottoprodotti industriali da impiegare come materie prime per la loro produzione.

Le proprietà ingegneristiche più interessanti sono l'elevato indurimento iniziale e il basso ritiro all'essiccazione, unitamente all'alta impermeabilità e alla considerevole resistenza chimica.

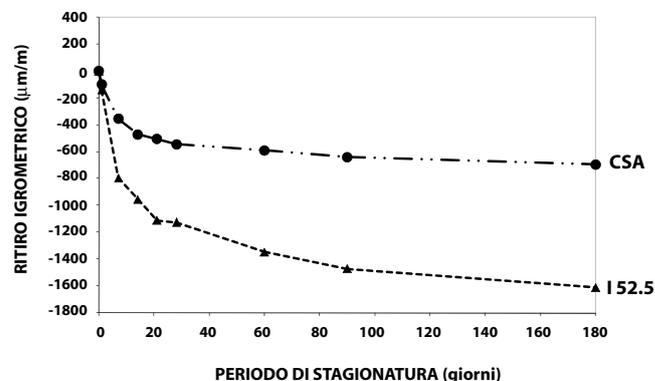


Fig. 4 - Ritiro igrometrico in funzione del tempo (µm) per la miscela contenente CSA e CEM I 52.5 R.

6. BIBLIOGRAFIA

- Arjunan, P., Silsbee, M.R., Roy, D.M. 1999. "Sulfoaluminate-belite cement from low-calcium fly ash and sulfur-rich and other industrial by-products". *Cement and Concrete Research*, 29(8): 1305-1311.
- Belz, G., Beretka, J., Marroccoli, M., Santoro, L., Sherman, N., Valenti, G.L. 1995. "Use of fly ash, blast furnace slag and chemical gypsum for the synthesis of calcium sulfoaluminate based cements". In Malhotra (ed.), *Fly Ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, 513-530 (vol.1). Proc. of the 5th CANMET/ACI intern. conf., Milwaukee, 4-9 June 1995.
- Bentur, A. 1980. "The pore structure of hydrated cementitious compounds of different chemical composition". *Journal of American Ceramic Society*, 63 (7-8): 381-386.
- Beretka, J., Santoro, L., Sherman, N., Valenti, G.L. 1992. "Synthesis and properties of low energy cements based on $4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$ ". In Mullick (ed.), *Chemistry of Cement*, 195-200 (vol.3). Proc. of the 9th intern. congr., New Delhi, 23-28 November 1992.
- Beretka, J., de Vito, B., Santoro, L., Sherman, N., Valenti, G.L. 1993. "Hydraulic behaviour of calcium sulfoaluminate-based cements derived from industrial process wastes". *Cement and Concrete Research*, 23(5): 1205-1214.
- Beretka, J., Cioffi, R., Marroccoli, M., Valenti, G.L. 1996. "Energy-saving cements obtained from chemical gypsum and other industrial wastes". *Waste Management*, 16: 231-235.
- Bernardo, G., Marroccoli, M., Montagnaro, F., Valenti, G.L. 2003. "Use of fluidized bed combustion wastes for the synthesis of low-energy cements". In Grieve & Owens (eds.), *Chemistry of Cement*, 1227-1236 (vol.3). Proc. of the 11th intern. congr., Durban, 11-16 May 2003.
- Bernardo, G., Telesca, A., Valenti, G. L. 2006. "A porosimetric study of calcium sulfoaluminate cement pastes cured at early ages". *Cement and Concrete Research*, 36(6): 1042-1047.
- Bernardo, G., Buzzi, L., Canonico, F., Paris, M., Telesca, A. and Valenti, G. L. 2007. "Microstructural investigations on hydrated high-performance cements based on calcium sulfoaluminate". *Chemistry of Cement*, W3-11.4, Proc. 12th int. congr., Montréal, 8-13 July 2007.
- Bianchi, M., Canonico, F., Capelli, L., Pace, M. L., Telesca, A., Valenti, G.L. 2009. "Hydration properties of calcium sulfoaluminate-Portland cement blends". In Gupta, Holland & Malhotra (eds.), *Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, 186-200, Proc. of the 10th CANMET/ACI intern. conf., Seville, 14-16 October 2009.
- Bilodeau, A., Malhotra, V.M. 2000. "High-volume fly ash system: concrete solution for sustainable development". *ACI Materials Journal*: 97: 41.
- Buzzi, L., Canonico, F., Telesca, A., Valenti, G.L. 2010. "High-performance and low-CO₂ cements based on calcium sulfoaluminate". *Zement Kalk Gips*. In press.
- Chatterjee, A.K. 1992. "Special and new cements". In Mullick (ed.), *Chemistry of Cement*, 177-212 (vol.1). Proc. of the 9th intern. congr., New Delhi, 23-28 November 1992.
- Cook, R.A., Hover, K.C. 1999. "Mercury porosimetry of hardened cement pastes". *Cement and Concrete Research*, 29(6): 933-943.
- Diamond, S. 2000. "Mercury porosimetry – An inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials". *Cement and Concrete Research*, 30(10): 1517-1525.
- Garboczi, E.J. 1990. "Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: A critical review". *Cement and Concrete Research*, 20(4): 591-601.
- Gartner, E. 2004. "Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements". *Cement and Concrete Research*, 34(9): 1489-1498.
- Glasser, F.P., Zhang, L. (1999). "High-performance cement matrices based on calcium sulfoaluminate-belite compositions." *Cement and Concrete Research* 31(12): 1881-1886.
- Glasser, F.P. 2002. "Advances in sulfoaluminate cements". *Cement and concrete*, 14-24 (vol.1), Proc. of the 5th Intern. Symp., Shanghai, China. Shanghai: China Building Materials Academy.
- Hanic, F., Kapralik, I., Gabrisova, A. 1989. "Mechanism hydration reactions in the system $4\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3 - \text{CaSO}_4 - \text{CaO} - \text{H}_2\text{O}$ referred to hydration of sulfoaluminate cements". *Cement and Concrete Research*, 19(5): 671-682.
- Hendriks, C.A., Worrell, E., Price, L., Martin, N., Ozawa Meida, L., De Jager, D., Riemer, P. 1998. "Emission reduction of greenhouse gases from the cement industry". *Greenhouse Gas Control Technologies*, 503-508. Proc. of the 4th intern. conf., Interlaken 30 August–2 September, 1998.
- Ikeda, K., Fukuda, K., Shima, H. 1997. "Calcium sulfoaluminate cements prepared from low-alumina waterworks slime". In Justnes (ed.), *Chemistry of Cement*, 11025 (vol.1). Proc. of the 10th intern. congr., Göteborg, 2-6 June 1997.
- Kurdowski, W., George, C.M., Sorrentino, F.P. 1986. "Special cements". *Chemistry of Cement*, 292-318 (vol.1), Proc. of the 8th intern. congr., Rio de Janeiro, 22-27 September 1986.
- Majling, J., Sahu, S., Vlna, M., Roy, D.M. 1993. "Relationship between raw mixture and mineralogical composition of sulfoaluminate belite clinkers in the system $\text{CaO}\cdot \text{SiO}_2\cdot \text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{Fe}_2\text{O}_3\cdot \text{SO}_3$ ". *Cement and Concrete Research*, 23(3): 1351-1356.
- Marroccoli, M., Nobili, M., Telesca, A., Valenti, G.L. 2007a. "Use of electric arc furnace slag as a raw feed component for Portland clinker manufacture". In Malhotra (ed.), *Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, 91-98, Proc. of the 9th CANMET/ACI intern. conf., Warsaw, 20-25 May 2007.
- Marroccoli, M., Nobili, M., Telesca, A., Valenti, G.L. 2007b. "Early hydration of calcium sulfoaluminate-based cements for structural applications". In Claisse, Sadeghi-Pouya, Naik, Chun (eds.), *Sustainable construction materials and technologies*, 389-395, Proc. of the conf., Coventry, 11-13 June, 2007.
- Marroccoli, M., Montagnaro, F., Nobili, M., Telesca, A., Valenti, G.L. 2007c. "Synthesis, hydration properties and environmentally friendly features of calcium sulfoaluminate cements". *Chemistry of Cement*, W3-11.2, Proc. of the 12th intern. congr., Montreal, 8-13 July 2007.
- Marroccoli, M., Nobili, M., Telesca, A., Valenti, G.L. 2008. "Use of wastes generated within coal-fired power stations for the synthesis of calcium sulfoaluminate cements". In Dhir, Newlands, Jones, Halliday (eds.), *Concrete, Construction's Sustainable Option; Role for concrete in global development*, 299-310, Proc. of the 7th intern. congr., Dundee, 8-9 June 2008.
- Marroccoli, M., Montagnaro, F., Telesca, A., Valenti, G.L. 2010a. "Environmental implications of the manufacture of calcium sulfoaluminate-based cements". *Sustainable Construction Materials and Technologies*, Proc. of Second Int. Conf., Ancona, 28th -30th June 2010. In press.
- Marroccoli, M., Pace, M.L., Telesca, A., Valenti, G.L. 2010b. "Synthesis of calcium sulfoaluminate cements from Al₂O₃ rich by-products of the secondary aluminium manufacture". *Sustainable Construction Materials and Technologies*, Proc. of Second Int. Conf., Ancona, 28th -30th June 2010. In press.
- Marroccoli, M., Pace, M.L., Telesca, A., Valenti, G.L. 2010c. "Synthesis of calcium sulfoaluminate cements from by-products of the manufacturing process of anodized aluminium." *Le Nuove Frontiere del Calcestruzzo Strutturale*. Università degli Studi di Salerno-ACI Italy Chapter, Proc. Workshop, Salerno, 22-23 aprile 2010. In press.
- Mehta, P.K. 1973. "Mechanism of expansion associated with ettringite formation". *Cement and Concrete Research*, 3(1): 1-6.
- Mehta, P.K. 1978. "Energy, resources and the environment - A review of the US cement industry". *World Cement Technology*: 144-160.
- Mehta, P.K. 1980. "Investigations on energy-saving cements". *World Cement Technology*, 11 (4):166-177.
- Metha, P.K. 1986. "Hardened cement paste – Microstructure and its relationships to properties". *Chemistry cement*, 113-121 (vol.1), Proc. of the 8th intern. congr., Rio de Janeiro, 22-27 September 1986. Brazil. Brazil: Abla Gráfica e Editore Ltda.
- Mehta, P.K., Folliard, K.J. 1995. "Rice husk ash - A unique supplementary cementing material: durability aspects". In Malhotra (ed.), *Advances in Concrete Technology*, 531, Proc. of the 2nd CANMET/ACI intern. symp., Las Vegas, 11-14 June 1995.
- Midgley, H.G., Illston, J.M. 1983. "Some comments on the microstructure of hardened cement pastes". *Cement and Concrete Research*, 13(2): 197-206.
- Mudbhalkar, G.A., Parmeswaran, P.S., Heble, A.S., Pai, B.V.B., Chatterjee, A.K. 1986. "Non-alitic cement from calcium sulfoaluminate clinker - Optimisation for high-strength and low-temperature application". *Chemistry of Cement*, 364-370 (vol. IV), Proc. of the 8th intern. congr. Rio de Janeiro, 22-27 September 1986. Brazil. Brazil: Abla Gráfica e Editore Ltda.
- Muzhen, S., Kurdowski, W., Sorrentino, F.P. 1992. "Developments in non Portland-cements". *Chemistry of Cement*, 317-354 (vol. 1), In Mullick (ed.), Proc. of the 9th int. congr., New Delhi, 23-28 November 1992.
- Muzhen, S., Yanmou, W., Liang, Z., Dedong, L. 1997. "Preliminary study on the durability of sulfo/ferro-aluminate cements". In Justnes (ed.), *Chemistry of cement*, 4iv029 (vol.4), Proc. of the 10th intern. congr., Göteborg, 2-6 June 1997.
- Oberholster, R.E. 1986. "Pore structure, permeability and diffusivity of hardened cement paste and concrete in relation to durability: status and prospects". *Chemistry of Cement*, 323-335 (vol.1), Proc. of the 8th intern. congr., Rio de Janeiro, 22-27 September 1986. Brazil. Brazil: Abla Gráfica e Editore Ltda.
- Perkins, D., Wortley, M. 2003. "Process efficiency and operational improvement through the CEMSTARSM technology". *Chemistry of Cement*, 1313-1321 (vol.3), Proc. of the 11th intern. congr. Durban, South Africa.
- Scrivener, K.L. 2003. "Properties, application and practicalities of special cements", In Grieve & Owens (eds.), *Chemistry of Cement*, 84-93 (vol.1), Proc. of the 11th intern. congr., Durban, 11-16 May 2003.
- Sivasundaram, V., Malhotra, V.M. 1992. "Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag". *ACI Materials Journal*, 89 (6): 554-563.
- Taylor, H.F.W. 1997. "Cement Chemistry". London: Academic Press.
- Wang, L., Glasser, F.P., 1996. "Hydration of calcium sulfoaluminate cements". *Advances in Cement Research*, 8(31): 127-134.
- Wolsiefer, J., Sivasundaram, V., Malhotra, V.M., Carette, G.G. 1995. "Performance of concretes incorporating various forms of silica fume". In Malhotra (ed.), *Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, 591 (vol.2), Proc. of the 5th CANMET/ACI intern. conf., Milwaukee, 4-9 June 1995.
- Zhang, L., Glasser, F.P. 1999. "New concretes based on calcium sulfoaluminate cement". In Dhir, R.K., Dyer, D. (eds.), *Modern concrete materials, Binders, Additions and admixtures*, 261. London: Thomas Telford.

LA CRISI DEI CAPITOLATI DELLE PAVIMENTAZIONI STRADALI



Fabio Picariello

Elletipi, Ferrara - info@elletipi.it

Il capitolato speciale d'appalto di una sovrastruttura stradale può essere oggi definito l'elemento di discordia tra imprese esecutrici e stazioni appaltanti. L'ossimoro di questa affermazione risiede nella definizione stessa di capitolato che rappresenta il documento tecnico (con valenza contrattuale) nel quale, divisi per capitoli, sono riportate le descrizioni di tutte le lavorazioni, dei controlli, delle modalità di posa, delle caratteristiche dei materiali che devono essere attuati dall'impresa per costruire l'opera secondo la regola dell'arte e nel rispetto delle normative vigenti.

Ad oggi, la maggior parte dei capitolati delle pavimentazioni riporta una lunga lista di regolamenti che, quando applicabili, vengono difficilmente rispettati nella pratica costruttiva a causa di:

- motivi economici;
- incompatibilità con le tempistiche dei lavori;
- incompatibilità con il contesto normativo vigente;
- imperizia e disinformazione della Direzione Lavori.

Per il primo punto, è evidente la responsabilità delle imprese, che rimangono con budget limitati in conseguenza dei forti ribassi per l'aggiudicazione delle gare; la causa dei restanti è in carico alle stazioni appaltanti, poiché, se da un lato non pretendono il rispetto delle prescrizioni, dall'altro, pur costatando l'inadeguatezza dei capitolati alle lavorazioni e alle normative, non hanno competenze adeguate a redigere un documento rinnovato.

L'entrata in vigore di normative europee recepite dall'organismo UNI e l'applicazione delle direttive nazionali sui prodotti da costruzione, seppur abbiano notevolmente modificato le regole per l'accettazione ed il controllo dei materiali impiegati nelle costruzioni stradali, non hanno avuto seguito in un'azione di aggiornamento dei capitolati che, invece, riportano riferimenti a obsolete normative del Consiglio nazionale delle ricerche o alle ASTM; non è, tuttora, infrequente imbattersi in voci di capitolato per la conformità degli aggregati con riferimento a regi decreti che risalgono al 1953!!

I produttori di materiali da costruzione per uso stradale, per poter apporre il marchio CE ed immettere sul mercato i propri prodotti, hanno l'obbligo di eseguire specifici controlli sui processi produttivi dell'impianto e prove di laboratorio sui materiali stessi, con metodi e frequenze richiamati in normative UNI -pena una denuncia di frode in commercio da parte degli Organi di controllo - che però non soddisfano i requisiti delle norme CNR del capitolato, anche nel caso in cui il materiale sia, effettivamente, conforme alla lavorazione.

Uno dei più rappresentativi esempi di incongruenza tra prescrizioni e contesto normativo è la determinazione della distribuzione granu-

lomtrica di miscele di aggregati per conglomerati bituminosi, misti granulari o terreni che, secondo i capitolati, deve essere valutata secondo le norme CNR con una setacciatura con crivelli (griglie a maglia tonda) e setacci (griglie con apertura a maglia quadra), mentre, secondo la prescrizione della marcatura CE, deve essere valutata con le norme UNI mediante una pila di soli setacci aventi, per di più, aperture (base + 1 oppure base +2) diverse da quelle CNR.

I capitolati in vigore nel nostro Paese, nel regolamentare l'uso e le caratteristiche dei conglomerati bituminosi, richiamano vecchie tecniche di prova legate alla determinazione di caratteristiche teoriche dedotte dall'esperienza americana che mal si prestano a fornire una caratterizzazione dei materiali con nuove tipologie di leganti, aggregati riciclati, prodotti 'eco-friendly' o ad alte prestazioni.

I tentativi di aggiornamento dei capitolati da parte di alcune Amministrazioni o Enti gestori delle strade non sono stati sufficienti a far convergere le esigenze delle Imprese con quelle della committenza: la mera sostituzione dei riferimenti normativi dei test di laboratorio o in sito, e l'accostamento dei metodi classici di prova a quelli moderni (che invece sono da tempo esistenti nella maggior parte delle realtà internazionali), porta ad errate valutazioni sulle caratteristiche dei materiali poiché, per uno stesso

requisito, diverse sono le procedure CNR/UNI EN e diversa è l'espressione dei risultati.

Un capitolato tecnico ha il compito di unire le esigenze progettuali alle modalità di costruzione e, la sua compilazione, prevede una profonda conoscenza dei regolamenti in vigore, delle tempistiche di cantiere, delle caratteristiche meccaniche e compositive dei materiali da impiegare.

Il moderno capitolato delle sovrastrutture stradali deve, quindi, essere adattato perfettamente al contesto del progetto esecutivo, soprattutto se, questo, deriva da un approccio di tipo razionale (empirico meccanicistico) della pavimentazione, in cui, il dimensionamento, avviene con l'analisi diretta delle caratteristiche fondamentali degli elementi costruttivi secondo tensioni e deformazioni, piuttosto che attraverso indici sperimentali che hanno poca attinenza con il reale comportamento della strada.

Il processo di adeguamento oltre a introdurre metodi di controllo conformi alle vigenti norme UNI EN, necessita di requisiti in grado di fornire informazioni sulle performance dei materiali e dell'opera finita, ma anche nuove regole per il collaudo e per le detrazioni pecuniarie nel caso di difformità.



Foto 1 - Un vaglio a crivelli ed un setaccio a confronto

RIUTILIZZAZIONE DI SCARTI IN VETRORESINA IN MATERIALI CEMENTIZI



Francesca Tittarelli, Giacomo Moriconi

Univ. Politecnica delle Marche

f.tittarelli@univpm.it - g.moriconi@univpm.it



È stata analizzata la possibilità di riutilizzazione di scarti in vetroresina (GRP, Glass Reinforced Plastic) in materiali cementizi attraverso la parziale sostituzione della parte più fine dell'aggregato (filler) con la polvere ottenuta come sottoprodotto dalla lavorazione della vetroresina (GRPWP, GRP Waste Powder), preliminarmente caratterizzata sia fisicamente sia chimicamente. È stata quindi valutata l'influenza dell'aggiunta di GRPWP sui tempi di presa di malte e sulle proprietà reologiche di paste cementizie confezionate sostituendo fino al 10% del cemento con la polvere di scarto in vetroresina, ottenendo un allungamento dei tempi di presa, ma anche una diminuzione della viscosità plastica e del limite iniziale di scorrimento, che ne suggeriscono un possibile impiego come filler nel calcestruzzo autocompattante. Successivamente sono stati determinati il comportamento meccanico, l'assorbimento capillare di acqua ed il ritiro igrometrico di malte cementizie confezionate sostituendo fino al 20% del volume di aggregato e di calcestruzzi autocompattanti confezionati sostituendo fino al 50% del volume del filler calcareo con la polvere di scarto in vetroresina. I risultati ottenuti mostrano che, a fronte di una diminuzione della resistenza meccanica a compressione, si ottiene una significativa diminuzione dell'assorbimento di acqua capillare e del ritiro igrometrico, presupposto di una maggiore durabilità del materiale cementizio contenente lo scarto in vetroresina

1. INTRODUZIONE

Uno sviluppo sostenibile delle costruzioni prevede l'uso razionale delle risorse naturali, conseguito anche attraverso l'impiego di sottoprodotti industriali e materiali di scarto, che comporta un minor impatto ambientale conseguente alla ridotta esigenza sia di attività estrattiva sia di aree per discarica [1, 2]. Il calcestruzzo costituisce una possibile soluzione di tali problemi ambientali per la sua capacità di incorporare scarti solidi di diversa provenienza mantenendo un accettabile e talora addirittura migliore livello qualitativo [3]. In particolare, nella produzione del calcestruzzo autocompattante, è necessario impiegare un elevato volume di materiali molto fini per conferire coesività al calcestruzzo molto fluido, impedendone la segregazione.

La vetroresina (GRP, Glass Reinforced Plastic) è un materiale composito costituito da fibre di vetro disperse in una matrice di resina generalmente poliestere, largamente impiegata in molti settori, dall'edilizia all'arredamento ed alla nautica. La lavorazione della vetroresina produce ogni anno 40.000 tonnellate di scarti industriali nell'Europa occidentale [4]. In Italia questo scarto, classificato come non pericoloso, viene conferito in discarica a causa della difficoltà di separare la componente vetrosa dalla matrice polimerica e della natura termoindurente di quest'ultima, ma anche dalla scarsa conoscenza delle potenzialità di riciclo e riutilizzazione. In lettera-

tura esistono già molteplici proposte di calcestruzzo confezionato con vetro riciclato [5-10] o con aggiunte polimeriche [11-20], e pertanto sembra lecito studiare la fattibilità della riutilizzazione di scarti in vetroresina in manufatti cementizi [21-23].

In particolare, vengono attualmente prodotte tre tipologie di scarto in vetroresina:

- barre lunghe circa 1 m e spesse 1-2 cm;
- piccoli pezzi delle dimensioni di 1-2 cm;
- una polvere fine della dimensione massima di circa 0,1 mm.

In questo lavoro, la polvere di scarto in vetroresina è stata fisicamente e chimicamente caratterizzata allo scopo di verificarne eventuali problemi di compatibilità con il cemento. Successivamente, malte cementizie e calcestruzzi autocompattanti, rispettivamente confezionati con parziale sostituzione del volume di aggregato e di filler calcareo con la polvere di scarto in vetroresina, sono stati caratterizzati in termini di comportamento meccanico, assorbimento d'acqua per capillarità e ritiro igrometrico.

2. PARTE SPERIMENTALE

2.1 Materiali

È stata utilizzata una polvere di scarto in vetroresina (Figura 1) proveniente direttamente da un cantiere nautico come sottoprodotto della lavorazione.

È stato inoltre utilizzato un cemento Portland al calcare tipo CEM II/A-L 42,5 R secondo la norma europea EN 197/1, con finezza Blaine di 0,415 m²/g e massa volumica di 3,05. La composizione chimica del cemento è riportata in Tabella 1

Tabella 1 - Analisi chimica del cemento

SiO ₂	29.67
Al ₂ O ₃	3.74
Fe ₂ O ₃	1.80
TiO ₂	0.09
CaO	59.25
MgO	1.15
SO ₃	3.25
K ₂ O	0.79
Na ₂ O	0.26
Perdita al fuoco a 1000 °C (%)	11.62



Fig. 1 - Polvere di scarto in vetroresina.

Come aggregato è stata utilizzata una sabbia calcarea naturale, con dimensione massima di 5 mm, massa volumica di 2620 kg/m³ ed assorbimento d'acqua del 3,0%.

Un superfluidificante a base acrilica in soluzione acquosa al 30% è stato aggiunto quando necessario per mantenere una determinata lavorabilità.

Nel confezionamento del calcestruzzo autocompattante si sono anche utilizzati un pietrisco calcareo con diametro massimo di 12 mm, un filler calcareo con massa volumica di 2,70 g/cm³ ed un additivo modificatore di viscosità (VMA) a base di biopolimeri.

2.2 Proporzionamento delle miscele di malta e calcestruzzo autocompattante

Per il confezionamento delle malte sono state preparate miscele con rapporto cemento/aggregato di 1/3 in peso e rapporto acqua/cemento di 0,50, con sostituzione di 0, 10, 15 e 20% del volume di sabbia con polvere di scarto in vetroresina. A livelli di sostituzione del 15 e 20%, l'aggiunta della polvere di scarto in vetroresina ha ridotto significativamente la lavorabilità della miscela, per cui è stato necessario aggiungere l'additivo superfluidificante con dosaggio di 0,25 e 1,0% in peso del cemento rispettivamente, in modo da raggiungere la stessa lavorabilità delle altre miscele.

Tabella 2 - Proporzionamento delle miscele di calcestruzzo autocompattante (kg/m³) con relativi valori di spandimento

Miscela	SCC-0%	SCC-25%	SCC-50%
Acqua	188	188	188
Cemento	305	305	305
Sabbia naturale	660	660	660
Pietrisco	900	900	900
Filler calcareo	236	177	118
Polvere di scarto	---	28	56
Superfluidificante	3	4	5.5
VMA	0.3	0.3	0.3
ϕ_{fin} (mm)	670	630	630
t_{500} (s)	1	2	2
t_{fin} (s)	7	9	10

Per il confezionamento dei calcestruzzi autocompattanti sono state preparate miscele con rapporto acqua/cemento di 0,60, con

sostituzione di 0, 25 e 50% del volume di filler calcareo con polvere di scarto in vetroresina. Il proporzionamento delle miscele è riportato in Tabella 2.

Il valore ϕ_{fin} dello spandimento ed i tempi per il raggiungimento del diametro di 500 mm (t_{500}) e della configurazione finale (t_{fin}) sono stati determinati secondo la norma UNI 11041:2003 [24]. Come indicato in Tabella 2, tutti i calcestruzzi hanno mostrato valori accettabili di autocompattabilità, anche per effetto di un adeguato dosaggio di additivo superfluidificante.

2.3 Prove sulla polvere di scarto in vetroresina

La spettroscopia FT-IR, l'analisi termogravimetrica la diffrattometria dei raggi X sono state utilizzate per la caratterizzazione della polvere di scarto in vetroresina. La microscopia elettronica in scansione è stata anche impiegata per l'osservazione morfologica dei granuli di polvere. Inoltre, la densità apparente e l'assorbimento di acqua sono stati determinati secondo la norma UNI EN 1097-6:2002 [25]. La distribuzione granulometrica della polvere è stata valutata mediante diffrazione laser. Infine, a causa della presenza di vetro, la reattività alcali-silice è stata determinata seguendo le indicazioni della ASTM Standard C289-94 [26].

2.4 Prove sui materiali cementizi contenenti la polvere di scarto in vetroresina

Per ogni miscela sono stati confezionati provini prismatici (40x40x160 mm) stagionati ad umido per 28 giorni a temperatura ambiente, utilizzati per la caratterizzazione meccanica. Le resistenze meccaniche a compressione e flessione sono state misurate dopo 2, 7 e 28 giorni di stagionatura.

Le prove di assorbimento di acqua per capillarità sono state condotte secondo la procedura riportata nella norma UNI 10859 [27].

Per ogni miscela sono stati, inoltre, confezionati provini prismatici (100x100x500 mm) in accordo alla norma UNI 6555:1973 [28] per la valutazione del ritiro igrometrico. Dopo 1 giorno di stagionatura umida i provini sono stati conservati a temperatura costante (20±2°C) ed umidità relativa costante (50±2%).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Prove sulla polvere di scarto in vetroresina

L'analisi termogravimetrica (Figura 2) ha mostrato che la polvere è costituita da circa il 20% in volume di fibra di vetro e l'80% in volume di matrice organica, identificata come resina poliesteri mediante spettroscopia FT-IR. L'assorbimento d'acqua e la densità apparente della polvere sono risultati rispettivamente del 20% e di 1,3 g/cm³. Poiché la densità apparente della sabbia calcarea naturale o del filler calcareo è di circa 2,6 g/cm³, la loro parziale sostituzione con la polvere produce una diminuzione della massa volumica del materiale cementizio in cui essa viene riutilizzata. La diffrazione laser ha mostrato una granulometria della polvere di scarto in vetroresina leggermente più grossolana rispetto ad un filler o un cemento commerciali presi come riferimento (Figura 3). L'osservazione al microscopio elettronico in scansione con microanalisi EDXA (Figura 4) ha messo in evidenza particelle di forma e dimensioni irregolari costituite da granuli polimerici disposti attorno a fibre di vetro a basso contenuto di alcali, di lunghezza variabile da 0,02 a 20 mm. L'analisi diffrattometrica dei raggi X non ha rilevato alcuna fase cristallina e per questo motivo non viene qui riportata.

La determinazione della potenziale reattività alcali-silice, a causa della frazione vetrosa amorfa, condotta secondo le indicazioni della ASTM Standard C289-94, ha mostrato che non esiste

alcun rischio in tal senso (Figura 5). Peraltro, in letteratura viene generalmente riportata una buona resistenza della resina poliesteri agli attacchi alcalini [12].

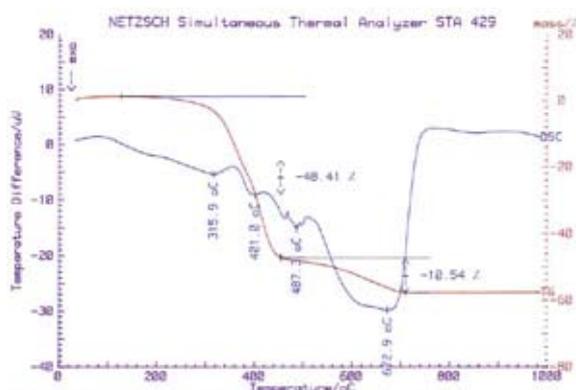


Fig. 2 - Analisi termogravimetrica della polvere di scarto in vetroresina.

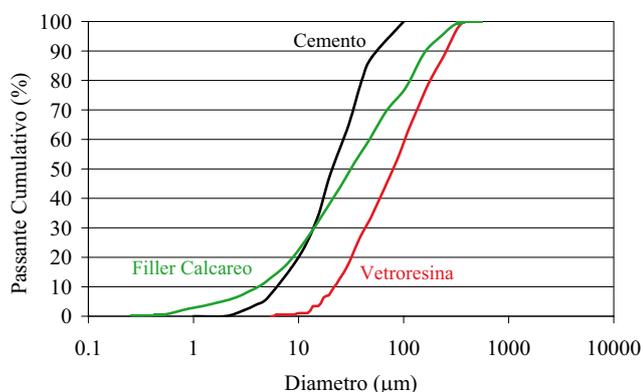


Fig. 3 - Analisi granulometrica per diffrazione laser della polvere di scarto in vetroresina, di un filler commerciale e di un cemento di riferimento.

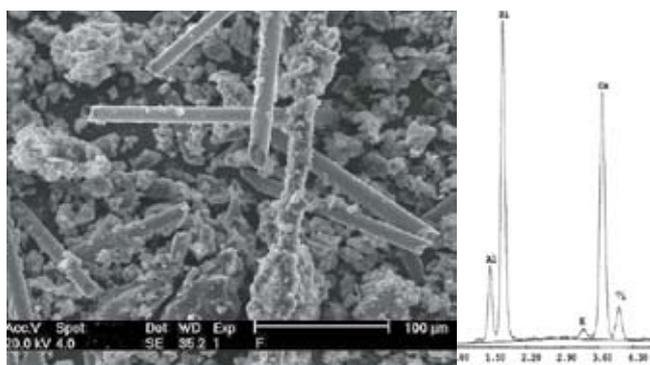


Fig. 4 - Osservazione al microscopio elettronico in scansione con microanalisi EDXA della polvere di scarto in vetroresina.

L'influenza dell'aggiunta della polvere di scarto in vetroresina sui tempi di presa del cemento è stata valutata su malte cementizie confezionate sostituendo fino al 10% del cemento con la polvere di scarto in vetroresina. Tale aggiunta provoca un allungamento dei tempi di presa del cemento, che può essere parzialmente recuperato preriscaldando la polvere alla temperatura di 70°C, tanto più quanto più lungo è il tempo di riscaldamento (Figura 6). Questo comportamento potrebbe essere attribuito al monomero ancora presente nella matrice polimerica, che tende a diminuire per polimerizzazione per

effetto del riscaldamento.

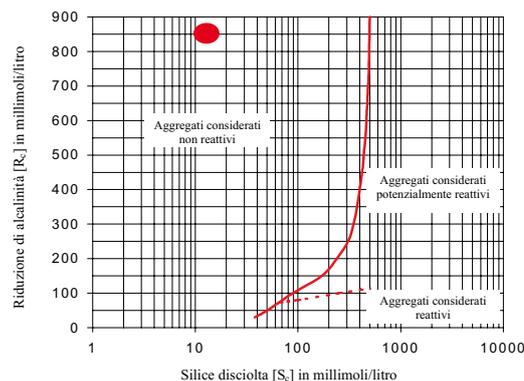


Fig. 5 - Determinazione della potenziale reattività alcali-silice della polvere di scarto in vetroresina secondo ASTM Standard C289-94.

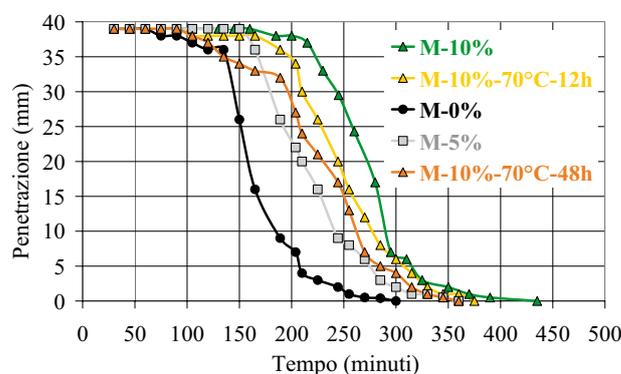


Fig. 6 - Valutazione mediante ago di Vicat dei tempi di presa di malte cementizie contenenti fino al 10% di polvere di scarto in vetroresina, preriscaldata a 70°C o meno.

Tuttavia, valutando l'influenza dell'aggiunta della polvere di scarto in vetroresina sulle proprietà reologiche delle miscele cementizie allo stato fresco, si può osservare come l'aggiunta del 30% in volume di polvere in sostituzione del cemento provochi una diminuzione della viscosità plastica e del limite iniziale di scorrimento delle paste cementizie (Figure 7 e 8), che ne suggeriscono un possibile impiego come filler nel calcestruzzo autocompattante, ad-

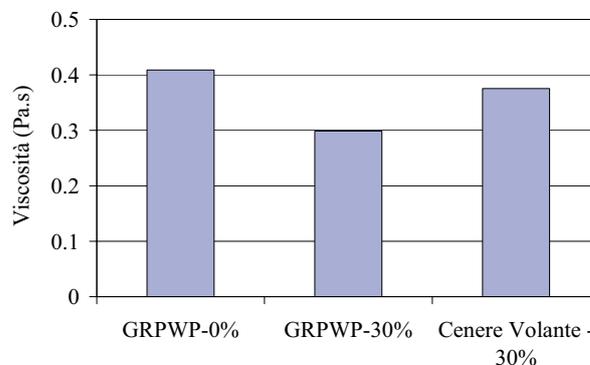


Fig. 7 - Viscosità plastica di paste cementizie allo stato fresco di solo cemento (GRPWP-0%), con polvere di scarto in vetroresina (GRPWP-30%) e con cenere volante.

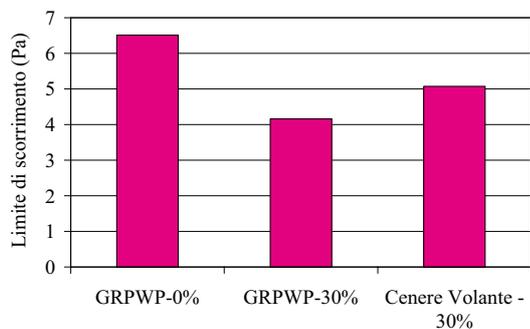


Fig. 8 - Limite di scorrimento di paste cementizie allo stato fresco di solo cemento (GRPWP-0%), con polvere di scarto in vetroresina (GRPWP-30%) e con cenere volante.

dirittura più efficace della cenere volante comunemente impiegata.

Tutti i risultati ottenuti dalle suddette prove sembrano confermare la fattibilità del riutilizzo della polvere di scarto in vetroresina in materiali cementizi.

3.2. Prove sui materiali cementizi

3.2.1 Caratterizzazione meccanica

Lo sviluppo nel tempo delle resistenze meccaniche a flessione e compressione di malte e di calcestruzzi autocompattanti, confezionati con aggiunte crescenti di polvere di scarto in vetroresina in sostituzione del volume rispettivamente di sabbia o di filler, è riportato nelle Figure 9a, 9b, 10a e 10b. I risultati indicano che l'aggiunta

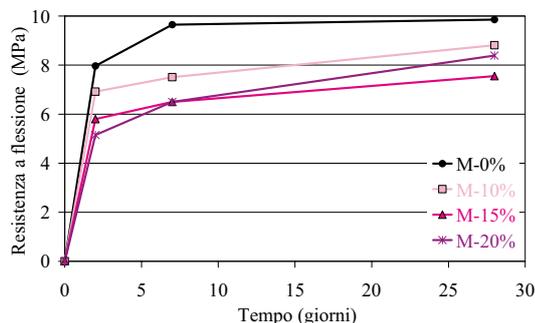


Fig. 9a - Limite di scorrimento di paste cementizie allo stato fresco di solo cemento (GRPWP-0%), con polvere di scarto in vetroresina (GRPWP-30%) e con cenere volante.

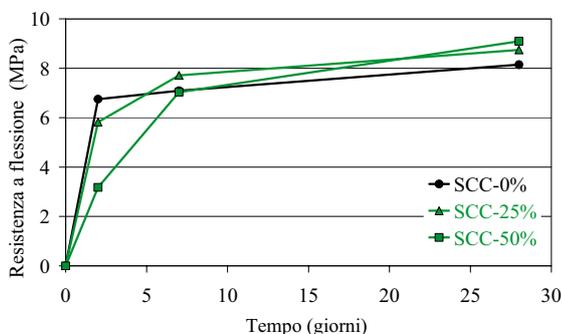


Fig. 9b - Sviluppo nel tempo della resistenza a flessione di calcestruzzi autocompattanti confezionati con parziale sostituzione del volume di filler calcareo con polvere di scarto in vetroresina.

della polvere di scarto in vetroresina provoca una significativa riduzione della resistenza a compressione (Figure 10a e 10b). Un andamento simile è rilevabile per la resistenza a flessione (Figure 9a e 9b), anche se più contenuto a causa della presenza di fibre di vetro. La diminuzione delle prestazioni meccaniche può essere attribuita tanto alla minor resistenza delle particelle polimeriche quanto alla minor adesione di queste ultime alla pasta cementizia [16, 17, 20]. Pertanto il livello di sostituzione accettabile dipenderà dal livello di resistenza ammissibile per il materiale cementizio.

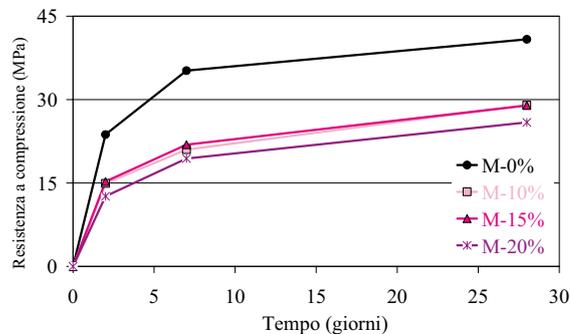


Fig. 10a - Sviluppo nel tempo della resistenza a compressione di malte confezionate con parziale sostituzione del volume della sabbia con polvere di scarto in vetroresina.

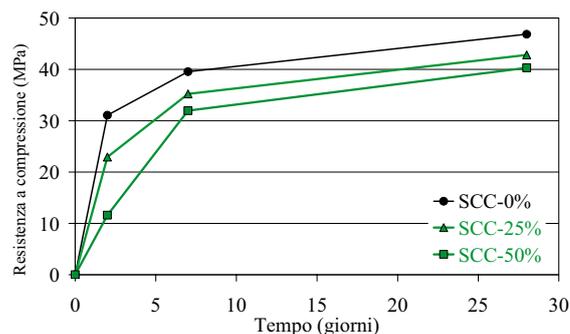


Fig. 10b - Sviluppo nel tempo della resistenza a compressione di calcestruzzi autocompattanti confezionati con parziale sostituzione del volume di filler calcareo con polvere di scarto in vetroresina.

3.2.2 Assorbimento di acqua per capillarità

Le Figure 11a e 11b mostrano i risultati delle prove di assorbimento capillare di acqua effettuate sulle malte e sui calcestruzzi autocompattanti con aggiunte crescenti di polvere di scarto in vetroresina. Appare evidente la diminuzione di assorbimento di acqua per capillarità indotta dall'aggiunta della polvere, nonostante la minor resistenza meccanica a compressione.

In particolare, il coefficiente di assorbimento capillare relativo (CArel), definito come il rapporto fra il coefficiente di assorbimento capillare (CA) del materiale cementizio contenente la polvere di scarto in vetroresina e quello del materiale cementizio senza polvere (Tabelle 3a e 3b), indica che l'aggiunta di polvere di scarto in vetroresina consente di ridurre l'assorbimento capillare di acqua di circa il 70% nelle malte e di circa il 30% nei calcestruzzi autocompattanti. Il coefficiente di assorbimento capillare (CA) è rappresentato dalla pendenza del tratto iniziale (fino a t = 30 min) lineare delle curve di assorbimento di acqua riportate nelle Figure 11a e 11b. Pertanto, sembrerebbe che la presenza della polvere di scarto in vetroresina nel materiale cementizio sia particolarmente efficace

nel contrastarne l'assorbimento di acqua iniziale.

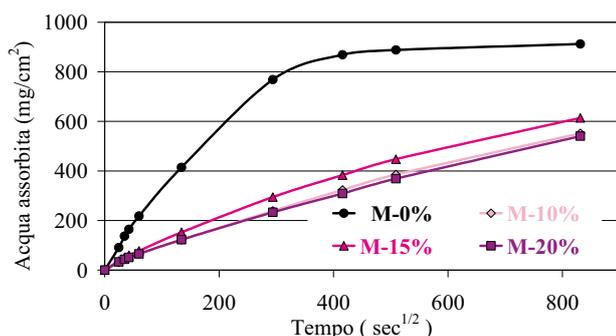


Fig. 11a - Quantità di acqua capillare assorbita per unità di superficie in funzione del tempo da malte confezionate con volume di sabbia parzialmente sostituito con diversi tenori di polvere di scarto in vetroresina.

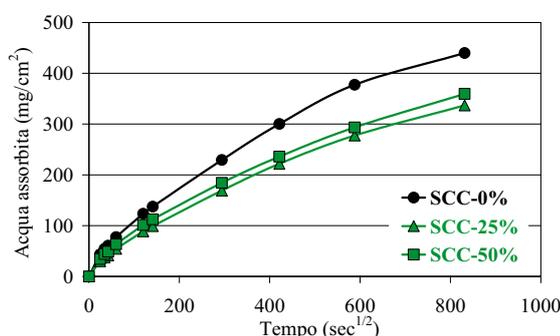


Fig. 11b - Quantità di acqua capillare assorbita per unità di superficie in funzione del tempo da calcestruzzi autocompattanti confezionati con volume di filler calcareo parzialmente sostituito con diversi tenori di polvere di scarto in vetroresina.

Tabella 3a - Coefficienti di assorbimento capillare (CA), coefficienti di assorbimento capillare relativi (CA_{rel}) ed indici di assorbimento capillare relativi (IC_{rel}) per malte confezionate con parziale sostituzione del volume della sabbia con polvere di scarto in vetroresina

Miscela	CA (mg/cm ² s ^{-1/2})	CA _{rel}	IC _{rel}
M-0%	3.87	---	---
M-10%	1.20	0.31	0.43
M-15%	1.41	0.36	0.50
M-20%	1.20	0.31	0.42

L'indice di assorbimento capillare relativo (IC_{rel}) viene definito come il rapporto fra l'area sottesa dalla curva di assorbimento di acqua del materiale cementizio contenente la polvere di scarto in vetroresina e quella del materiale cementizio di riferimento senza polvere (Figure 11a e 11b), e viene messo in relazione alla corrispondente quantità di acqua assorbita durante l'intero periodo di contatto del materiale cementizio con l'acqua. Come mostrato nelle Tabelle 3a e 3b, per contatti prolungati fra acqua e matrice cementizia, il valore di IC_{rel} risulta inferiore a 0,50 e 0,80 rispettivamente per le malte e per i calcestruzzi autocompattanti. Questo significa che la parziale sostituzione della sabbia con la polvere di scarto in vetroresina nelle

malte consente di ridurre l'assorbimento di acqua almeno del 50%, mentre la parziale sostituzione del filler con la polvere di scarto in vetroresina nel calcestruzzo autocompattante consente di ridurre l'assorbimento di acqua almeno del 20%. L'effetto può essere spiegato dal carattere non assorbente delle particelle di polvere, che contribuiscono a rallentare la propagazione del fronte di imbibizione costringendo il flusso dell'acqua ad aggirarle ed aumentando in tal modo la tortuosità capillare [18].

Tabella 3b - Coefficienti di assorbimento capillare (CA), coefficienti di assorbimento capillare relativi (CA_{rel}) ed indici di assorbimento capillare relativi (IC_{rel}) per calcestruzzi autocompattanti confezionati con parziale sostituzione del volume di filler calcareo con polvere di scarto in vetroresina

Miscela	CA (mg/cm ² s ^{-1/2})	CA _{rel}	IC _{rel}
SCC-0%	1.43	---	---
SCC-25%	0.94	0.66	0.74
SCC-50%	0.81	0.81	0.80

3.2.3 Ritiro igrometrico

Le Figure 12a e 12b mostrano i dati di ritiro ottenuti da provini conservati per un mese a temperatura costante (20±2°C) ed umidità relativa costante (50±2%). Appare evidente il benefico effetto dell'aggiunta della polvere di scarto in vetroresina tanto sulle malte, per le quali tuttavia l'effetto diminuisce significativamente all'aumentare della percentuale di aggiunta, quanto sui calcestruzzi autocompattanti, per i quali si attesta a livelli del 67% indipendentemente dalla percentuale di aggiunta. Questo comportamento con-

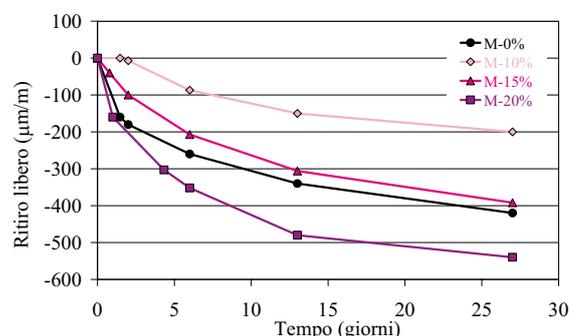


Fig. 12a - Ritiro igrometrico di malte confezionate con parziale sostituzione del volume della sabbia con polvere di scarto in vetroresina.

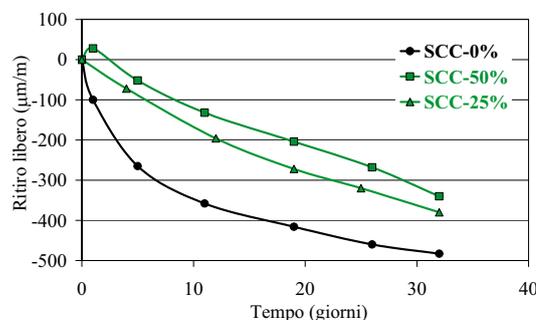


Fig. 12b - Ritiro igrometrico di calcestruzzi autocompattanti confezionati con parziale sostituzione del volume di filler calcareo con polvere di scarto in vetroresina.

ferma alcuni risultati già riportati in letteratura per calcestruzzi confezionati riutilizzando un diverso tipo di rifiuto polimerico [20].

4. CONCLUSIONI

Le principali conclusioni deducibili dal presente studio sulla fattibilità della riutilizzazione della polvere di scarto proveniente dalla lavorazione della vetroresina in materiali cementizi sono:

- la polvere di scarto in vetroresina, costituita da circa il 20% in volume di fibra di vetro e l'80% in volume di matrice polimerica in resina poliesteri, può essere utilmente impiegata come parziale sostituzione della sabbia fine nella preparazione di malte cementizie o del filler nella produzione del calcestruzzo autocompattante;
- tale impiego produce, tuttavia, una significativa diminuzione della resistenza meccanica a compressione ed una più contenuta riduzione della resistenza a flessione;
- per contro, l'aggiunta della polvere di scarto in vetroresina provoca una riduzione dell'assorbimento capillare di acqua, tanto iniziale quanto per tempi prolungati di contatto fra acqua e materiale cementizio, particolarmente significativa per le malte;
- infine, l'aggiunta della polvere di scarto in vetroresina comporta una promettente riduzione della deformazione da ritiro, particolarmente significativa per il calcestruzzo autocompattante.

RIFERIMENTI

- [1] Naik T.R., Sustainability of the cement and concrete industries, in "Sustainable Construction Materials and Technologies", Proceedings of the First International Conference, Coventry, U.K., June 11-13, 2007, Ed. by Y.M. Chun, P. Claisse, T.R. Naik and E. Ganjian, Taylor & Francis/Balkema, Leiden, The Netherlands, 19-25, 2007.
- [2] Malhotra V.M., Concrete technology for sustainable development, ACI/CANMET Two-Day International Seminar on "Sustainable Development in Cement and Concrete Industries", Milan, Italy, October 17-18, 2003, 11-18, 2003.
- [3] Hendriks C.F., Janssen G.M.T., Use of recycled materials in constructions, *Materials and Structures*, 36(9), 604-608, 2003.
- [4] Kelderman H., Recycling Manager Europe Thermosets, ER-COM, European Recycling Activities, GPRMC, Brussels, Belgium, November 14, 2000.
- [5] Dyer T.D., Dhir K.R., Chemical reactions of glass cullet used as cement component, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13(6), 412-417, 2001.
- [6] Shao Y., Lefort T., Moras S., Rodriguez D., Studies on concrete containing ground waste glass, *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91-100, 2000.
- [7] Ambroise J., Péra J., Durability of glass-fibre cement composites – Comparison between normal Portland and calcium sulfoaluminate cements, Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, June 6, 2003, ACI Award Presentation, 2003.
- [8] Quian X., Shen B., Mu B., Li Z., Enhancement of aging resistance of glass fibre reinforced cement, *Materials and Structures*, 36(5), 323-329, 2003.
- [9] Shi C., Zheng K., A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete, *Resources, Conservation and Recycling*, 52(2), 234-247, 2007.
- [10] Schwarz N., Cam H., Neithalath N., Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement and Concrete Composites*, 30(6), 486-496, 2008.
- [11] Zhao S., Microstructure and properties of styrene acrylate polymer cement concrete, *Heron*, 40(4), 263-284, 1995.
- [12] B.W. Jo, S.K. Park, C.H. Kim, Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate, *ACI Structural Journal*, 103(2), 219-225, 2006.
- [13] C. Ignacio, V. Ferraz, R.L. Oréface, Study of the behaviour of polyester concretes containing ionomers as curing agents, *Journal of Applied Polymer Science*, 108(4), 2682-2690, 2008.
- [14] Gorninski J.P., Dal Molin D.C., Kazmierczak C.S., Comparative assessment of isophthalic and orthophthalic polyester polymer concrete: Different costs, similar mechanical properties and durability, *Construction and Building Materials*, 21(3), 546-555, 2007.
- [15] Tomas San-Jose J., Ferreira A.J.M., Experimental study of mechanical properties of polyester polymer concrete, application to its flexural response, *Journal of Polymer Engineering*, 26(7), 705-722, 2006.
- [16] Siddique R., Khatib J., Kaur I., Use of recycled plastic in concrete: A review, *Waste Management*, 28(10), 1835-1852, 2008.
- [17] Batayneh M., Marie I., Asi I., Use of selected waste materials in concrete mixes, *Waste Management*, 27(12), 1870-1876, 2007.
- [18] Yazoghli Marzouk O., Dheilly R.M., Queneudec M., Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites, *Waste Management*, 27(2), 310-318, 2007.
- [19] Soroushian P., Plasencia J., Ravanbakhsh S., Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete, *ACI Materials Journal*, 100(3), 203-7, 2003.
- [20] Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L., Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste Management*, 29(2), 621-628, 2009.
- [21] Tittarelli F., Moriconi G., Re-use of GRP industrial waste in cementitious products, in "Young Researchers' Forum", Proceedings of the 6th International Congress on "Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities", Dundee, Scotland, 5-7 July, 2005, Ed. by R.K. Dhir, J.E. Halliday and E. Csetenyi, Thomas Telford, London, U.K., 153-164, 2005.
- [22] Tittarelli F., Moriconi G., Effect of GRP industrial waste on durability of cement mortars, in "Sustainable Construction Materials and Technologies", Proceedings of the First International Conference, Coventry, U.K., June 11-13, 2007, Ed. by Y.M. Chun, P. Claisse, T.R. Naik and E. Ganjian, Taylor & Francis/Balkema, Leiden, The Netherlands, 35-39, 2007.
- [23] Tittarelli F., Moriconi G., Re-use of GRP industrial by-product as new filler for SCC, in "SCC2008: Challenges and Barriers to Application", The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, U.S.A., November 10-12, 2008.
- [24] UNI 11041:2003, Self compacting concrete – specification, characteristics and checking, Milan (Italy): Unicemento, Italian Standardization Board [in Italian].
- [25] UNI EN 1097-6:2002, Tests for mechanical and physical properties of aggregates – determination of particle density and water absorption, Milan (Italy): Unicemento, Italian Standardization Board [in Italian].
- [26] ASTM Standard C289, 1994, "Standard test method for potential alkali-silica reactivity of aggregates (chemical method)", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [27] UNI 10859:2000, Determination of water absorption by capillarity, Milan (Italy): Unicemento, Italian Standardization Board [in Italian].
- [28] UNI 6555:1973, Concrete made with aggregate maximum size 30 mm. hydraulic shrinkage determination, Milan (Italy): Unicemento, Italian Standardization Board [in Italian].

Ha conseguito il Diploma di
Tecnico del Calcestruzzo
 ed il Diploma di
Tecnico del Mix Design
 dei corsi on-line organizzati da Enco:



Geol. Salvatore La Malfa



Ha conseguito il
Master in Ingegneria del Calcestruzzo

Geom. Pasquale Di Domenico



CALCESTRUZZI A RITIRO COMPENSTATO PER STRUTTURE SPECIALI

Parte II - Applicazione pratica in una platea di fondazione



Roberto Troli

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

INTRODUZIONE

Nella prima parte del presente articolo, pubblicata sul numero 47 di *Enco Journal*, sono stati descritti il funzionamento e le caratteristiche dei calcestruzzi a ritiro compensato con particolare riferimento a quelli basati sull'impiego combinato di un agente espansivo a base di ossido di calcio e di un additivo riduttore di ritiro (SRA).

In questa seconda parte dell'articolo viene presentata una *case history* relativo all'impiego di un calcestruzzo di questo tipo nella realizzazione di una platea di fondazione in calcestruzzo monolitica di notevoli dimensioni.

Vengono, inoltre descritte le difficoltà incontrate nella realizzazione del manufatto a causa delle avverse condizioni ambientali in cui è avvenuto il getto e indicate le precauzioni che sono state adottate per superarle.

REALIZZAZIONE DI UNA PLATEA DI FONDAZIONE PER UN PARCHEGGIO

L'esempio trattato riguarda la recente realizzazione della platea di fondazione di un parcheggio a due piani per un ospedale situato nel Nord Italia.

Il progettista aveva ipotizzato la realizzazione di una platea strutturale spessa 300 mm, impermeabilizzata in superficie da una membrana in PVC e sormontata da una pavimentazione in calcestruzzo con spessore 100 mm finita a frattazzo.

Poiché nella esecuzione del lavoro si erano accumulati ritardi ed era necessario portare a termine l'edificio con urgenza, l'impresa richiese di abolire la realizzazione del pavimento da 100 mm e di gettare esclusivamente la platea da 300 mm da finire a frattazzo come un pavimento. La richiesta non era di facile soluzione per questi motivi.

a) La fondazione presentava un'area superficiale di circa 11.000 m² ed era stata concepita dal progettista come una costruzione monolitica, senza giunti di controllo. Secondo il Comitato ACI 223, impiegando un convenzionale calcestruzzo a ritiro compensato (cioè senza l'additivo anti-ritiro SRA) è possibile realizzare lastre su terreno senza giunti di contrazione con superfici non superiori a 650 m² in ambienti esterni o caratterizzati da grandi escursioni termiche come è presumibile che avvenga, in servizio, nel caso in esame. Inoltre, sempre secondo questo Comitato ACI, le lastre così realizzate debbono essere separate da giunti di costruzione in grado di consentire uno spostamento relativo lungo il piano della lastra.

Per questa ragione, le armature metalliche ad aderenza migliorata debbono essere interrotte in corrispondenza dei giunti e le connessioni possono avvenire soltanto attraverso barrotti lisci o chiavi in calcestruzzo.



Fig. 1 - Armature metalliche ad aderenza migliorata che attraversano un giunto di costruzione.

Nel caso in esame, una squadra di operai era in grado di finire fino a 500 m² al giorno di platea, ma le riprese di getto giornaliere non potevano essere assimilate a giunti di contrazione così come concepiti secondo ACI 223 poiché esse dovevano essere attraversate dalle armature strutturali ad aderenza migliorata (Fig. 1) e così non vi era alcuna possibilità di consentire spostamenti relativi tra due porzioni di platea adiacenti.

D'altra parte, la formazione di fessure provocate dal ritiro non era assolutamente consentita per ragioni di durabilità: infatti, la zona in cui sorge la costruzione è frequentemente esposta alla formazione di ghiaccio nei periodi invernali con conseguente trascinarsi di sali disgelanti da parte delle ruote delle autovetture e rischio di percolamento all'interno delle fessure dei cloruri.

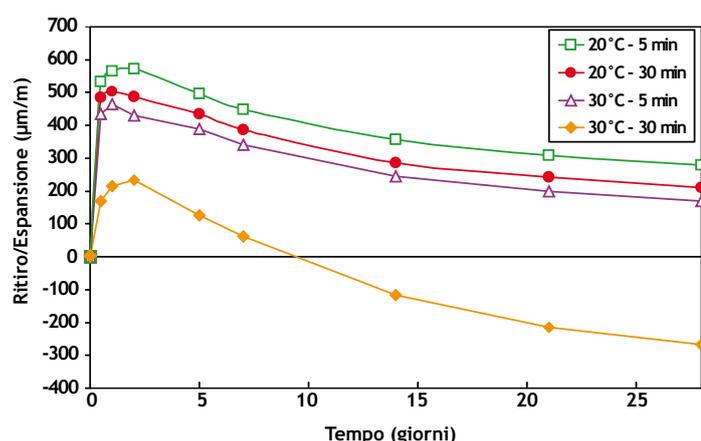


Fig. 2 - Espansione contrastata o ritiro in ambiente con U.R. di 60 % nei provini in funzione della temperatura di stagionatura (5 oppure 30°C) e del tempo di miscelazione del calcestruzzo (5 oppure 30 minuti).

b) Il getto della platea doveva avvenire in periodo caldo (da Giugno a Settembre) con una temperature che raggiungevano 35°C. Questa temperatura elevata, in base a precedenti esperienze, si era rilevata negativa perché accelera l'espansione (inutile) del CaO nella fase plastica durante le prime ore e riduce l'espansione (utile) nella successiva fase di indurimento. In particolare, durante le prove di campo propedeutiche alla realizzazione dei setti in calcestruzzo del MAXXI di Roma (n. 40 di *Enco Journal*) nei quali era stato fatto uso, per la prima volta su larga scala, di un calcestruzzo a ritiro compensato a base di SRA + CaO, si era potuto appurare che, in presenza di temperature ambientali troppo elevate e di tempi di miscelazione eccessivamente lunghi all'interno dell'autobetoniera, la reazione espansiva poteva avvenire troppo rapidamente quando il calcestruzzo era ancora in fase plastica.

Questa situazione era stata confermata, in quell'occasione, mediante prove eseguite secondo la UNI 8148 (Metodo B) destinata alla misura dell'espansione contrastata di provini in calcestruzzo rinforzati da una barra metallica ad aderenza migliorata. Alcuni provini erano stati preparati con calcestruzzo a 20°C e miscelato per 5 oppure 30 minuti. Altri provini erano stati confezionati con lo stesso calcestruzzo a 30°C miscelato per 5 oppure 30 minuti. Dopo 6 ore i provini sono stati sformati, sottoposti a misura della loro lunghezza, e protetti per 24 ore con un foglio di plastica per evitare l'evaporazione dell'acqua simulando la permanenza del calcestruzzo dei setti all'interno dei casseri. I provini privati del foglio protettivo di plastica erano poi stati esposti in ambiente insaturo di vapore (U.R.= 60 %) alla stessa temperatura di confezionamento (20°C oppure 30°C) e sottoposti a misure di lunghezza i cui risultati sono mostrati in Fig. 2: si registrò una buona espansione contrastata nei provini stagionati a 20 °C sia nel caso di miscelazione di 5 minuti che in quello di miscelazione prolungata per 30 minuti. In questo caso, a 28 giorni, l'espansione residua risultò di 210-280 µm/m. Al contra-

rio nei provini stagionati a 30 °C l'espansione contrastata (200 µm/m a 28 giorni) si rivelò accettabile solo nel caso di calcestruzzo mescolato per 5 minuti, mentre l'espansione fu completamente persa, dopo soli 10 giorni dal getto, nei provino realizzati con calcestruzzo mantenuto in miscelazione per 30 minuti

PRESTAZIONI DEL CALCESTRUZZO PER LA PLATEA DI FONDAZIONE

La Tabella 1 mostra le specifiche per il calcestruzzo adottato nella realizzazione della platea di fondazione. In accordo alla norma UNI 11104 e alla UNI EN 206 -1 la struttura è stata considerata in classe di esposizione XD3 (pavimenti di parcheggio esposti a sali disgelanti a base di cloruri). In questa classe di esposizione si richiede un rapporto *a/c* non maggiore di 0,45 ed una resistenza caratteristica cubica di almeno 45 MPa. Per accelerare e semplificare la messa in opera è stato adottato un calcestruzzo a consistenza superfluida S5. Infine era richiesta un'espansione contrastata di 400 µm/ dopo una stagionatura a 30 °C a 28 giorni misurata con il metodo 8148 (Metodo B).

Tabella 1 - Specifiche del calcestruzzo a ritiro compensato da impiegare nella platea di fondazione del parcheggio a due piani.

Classe di esposizione	XD3
<i>a/c</i>	≤ 0.45
Resistenza caratteristica su provini cubici	≥ 45 MPa
Classe di consistenza	S5 (slump ≥ 220 mm)
Espansione contrastata a 24 ore e 30°C secondo il Metodo B della UNI 8148	≥ 400

Tabella 2 - Composizione e principali prestazioni del calcestruzzo impiegato.

INGREDIENTI/PRESTAZIONE	(kg/m³)
Cemento CEM II B/LL 32.5R (*)	360
Ghiaia 8-25 mm	690
Sabbia 0-12 mm	200
Sabbia 0-8 mm	979
Acqua	156
Superfluidificante acrilico	3.6
Acete espansivo (CaO)	45
SRA	5.0
<i>a/c</i>	0.43
Slump	230 mm
Resistenza a compressione media a 28 gg	53 MPa

(*) Cemento di miscela al calcare secondo UNI EN 197-1

La Tabella 2 mostra la composizione del calcestruzzo

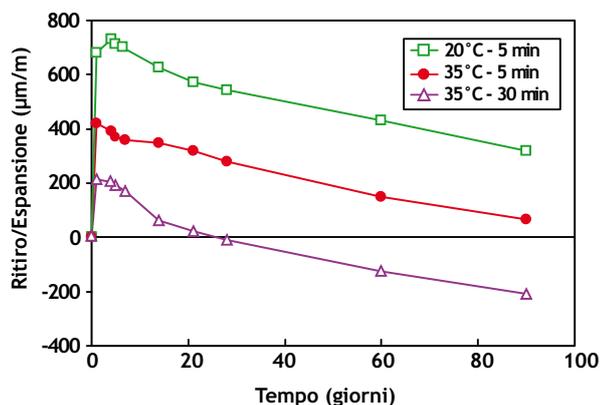


Fig. 3 - Espansione contrastata o ritiro in varie condizioni di confezionamento e stagionatura.

impiegato per soddisfare i requisiti mostrati in Tabella 1. Per assicurare un'accettabile espansione furono impiegati 45 kg/m³ di agente espansivo (CaO) 5 kg/m³ di additivo anti-ritiro SRA.

La Figura 3 mostra il comportamento in termini di espansione contrastata o ritiro dei provini stagionati a diverse temperature (20 oppure 35°C) e differenti tempi di mescolamento (5 oppure 30 minuti) in prove di pre-qualifica in laboratorio della miscela.

In tali prove si è potuto appurare che il comportamento espansivo del calcestruzzo a 35°C risultava accettabile solo nel caso in cui il tempo di miscelazione non superasse i 5 minuti.

Nel caso in esame, l'impianto di betonaggio si trovava a circa 30 minuti di viaggio dal cantiere, pertanto sarebbe stato impossibile garantire un tempo di miscelazione di soli 5 minuti prima del getto.

Per questo motivo, si è deciso di introdurre l'agente espansivo in cantiere, immediatamente prima del getto, installando in sito uno speciale silo automatico posto su celle di carico e programmato in modo da erogare, ad ogni impiego, la quantità esatta di agente espansivo necessaria. Con questo accorgimento è stato possibile sfruttare completamente l'azione espansiva del CaO anche in condizioni termicamente molto sfavorevoli ed eliminare qualsiasi fessurazione sulla superficie della pavimentazione

CONCLUSIONI

Il calcestruzzo a ritiro compensato basato sull'impiego di un agente espansivo contenente calce cotta a morte in combinazione con un additivo anti-ritiro (SRA) presenta numerosi vantaggi rispetto all'impiego dell'agente espansivo tradizionale a base di solfo-alluminato di calcio da impiegare secondo il comitato ACI 223. L'inconveniente di una ridotta espansione in condizioni termiche sfavorevoli (> 25 °C) può essere risolto introducendo l'agente espansivo in autobetoniera sul cantiere poco prima del getto.

Questa tecnologia è stata adottata con successo in molte applicazioni pratiche (tra le quali il Museo MAXXI di Roma ed IL MOSE a Venezia) eliminando qualsiasi

fessurazione che possa pregiudicare la effettiva durabilità delle strutture.



Fig. 4 - Alimentazione automatica dell'agente espansivo dal silo sul cantiere.

NOVITÀ

DIAGNOSI DEL DEGRADO E RESTAURO DELLE STRUTTURE IN C.A.

SECONDA EDIZIONE

M. COLLEPARDI - S. COLLEPARDI - J.J. OGOUMAH OLAGOT
F. SIMONELLI - R. TROLI



fibrosi

- fibrobeton-a** Calcestruzzo fluido a prestazione garantita, rinforzato con fibre in acciaio
- fibrobeton-s** Calcestruzzo fluido a prestazione garantita, rinforzato con fibre in polipropilene
- fibrobeton T.E.** Calcestruzzo fluido a prestazione garantita, rinforzato con fibre sintetiche ad elevata tenacità

a basso ritiro

- controlbeton** Calcestruzzo fluido a prestazione garantita a ritiro controllato
- stabilbeton** Calcestruzzo fluido a prestazione garantita a ritiro compensato

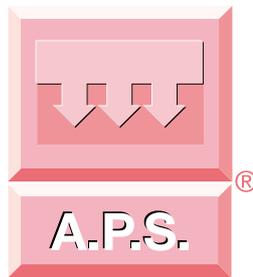
specifici

- pavbeton** Calcestruzzo fluido per pavimentazioni industriali con i tempi di presa controllati
- chromobeton** Calcestruzzo fluido colorato per pavimentazioni ad effetto architettonico

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


colabeton
CALCESTRUZZI DI QUALITÀ

Direzione Generale | via della Vittorina 60 - 06024 Gubbio - Perugia - Italia
t.+39 075 92401 | f.+39 075 9273965 | www.colabeton.it | info@colabeton.it



**Advanced
Pavement
Systems**



Very
High
Durability
Reinforced
Concretes

MICROBETON®
ASPHALT GROUT

RAPI-tec®

STABIL-tec®

REFOR-tec®

SHRINKO-tec®

FIB-energy®

technology

dal Progetto al Cantiere

IL PAVIMENTO DURABILE E SOSTENIBILE

TECNOCHEM assiste dal Progetto alla Posa i vari attori coinvolti nella realizzazione delle pavimentazioni: il Progettista, il Direttore Lavori, il Preconfezionatore, l'Impresa, l'Applicatore. La Linea **A.P.S.** comprende prodotti diversificati e tecnologie per le più avanzate costruzioni di nuove pavimentazioni e per la riparazione valida e durabile di quelle esistenti e degradate.

- ↘ **Pavimenti in Calcestruzzo**
Costruzione Riparazione
- ↘ **Pavimenti Asfalto-Cementizi**
- ↘ **Sottopavimenti Massetti**
- ↘ **Rivestimenti in Resina**
- ↘ **Pavimenti Decorativi**
- ↘ **Altri**



TECNOCHEM ITALIANA SPA **TECNO ECO LOGIC CHEM**