

2004

Quadrimestrale

Anno IX

Numero 26

ENCO JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE



UN PONTE E' MEGLIO DI
UN MURO



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



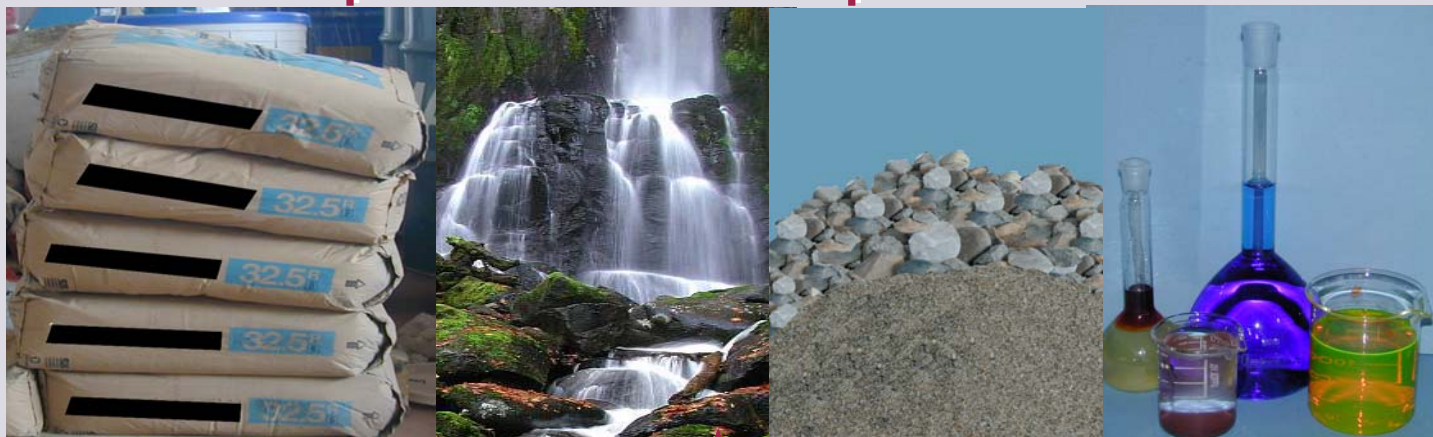
SOMAGLIA / LO



Mario Collepari

Silvia Collepari

Roberto Troli



IL CALCESTRUZZO LOGICO

Manuale del Mix Design



Finalmente è disponibile il nuovo Manuale del Mix Design
Per informazioni sul manuale e sul software:

Enco s.r.l. - Via delle Industrie 18 - 31050 Ponzano Veneto (TV)
Tel. 0422 963 771 Fax 0422 963 237 - www.enco-journal.com - www.encosrl.it - info@encosrl.it

Sicurezza è avere un Partner che capisca i tuoi desideri.



Betonrossi: Tecnologia, Impianti, Servizi e Prodotti. Un modello produttivo per il settore dei calcestruzzi e per tutto il mondo delle costruzioni: orientato alla qualità totale, che si basa sulla ricerca, sullo sviluppo, su continui controlli della produzione, ma anche sull'evoluzione commerciale, tecnologica e distributiva del calcestruzzo. Un nuovo modello competitivo che affronta il tema della produzione a 360°. Un partner affidabile con prodotti innovativi e servizi efficienti. Perché Betonrossi è all'avanguardia nell'assistenza a progettisti e imprese: competente, agile e scattante. Nessun problema per il cantiere!

Betonrossi: Uomini, Tecnologie, Mezzi e... Soluzioni!



COSTRUIAMO CON VOI

Via Caorsana 11
29100 PIACENZA
Tel. 0523.603011
www.betonrossi.it

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Quadrimestrale - Anno IX - Numero 26

Direttore Mario Collepardi

IL PONTE E' MEGLIO DEL MURO

Non credo ci sia alcuno che possa preferire il *Muro* al *Ponte*. Il *Muro* - che si tratti di quello di Berlino o d'Israele - è sintomo di Stato autoritario che, con metodi polizieschi, vuol impedire di vedere il mondo che esiste dall'altra parte o di fare entrare, da questa parte, gente considerata ostile. Il *Ponte*, invece, è simbolo di congiunzione. Esso collega due versanti opposti per favorirne contatti, scambi, informazioni. Il *Ponte* può essere trasparente come il vetro: non mi risulta che si sia mai costruito un *Muro* in vetro, perché fallirebbe istituzionalmente al suo scopo.

Sulla struttura del *Ponte* e sul materiale vetroso si incentra questo numero di *Enco Journal*. Il *Ponte* di **Santiago Calatrava** a Venezia, foto-montato sulla copertina di questo numero di *Enco Journal*, è il simbolo di questo binomio: si tratta di una bellissima struttura in vetro, accompagnata da altri materiali come la pietra d'Istria e le leghe metalliche, oltre che da uno speciale calcestruzzo (SCC) che funge da basamento nella spettacolare fondazione armata sulle due sponde del Canal Grande: **Antonio Borsoi**, **Silvia Collepardi** ed altri riferiscono sulla messa a punta e sul getto di questo particolare SCC.

A proposito di *Ponte*, anche quello per antonomasia da costruire sullo Stretto di Messina, è un'opera assolutamente da realizzare, al di là delle solite beghe partitiche: sbaglia la Sinistra ad attribuirne il merito solo al Governo attuale, perché il *Ponte sullo Stretto* è stato progettato quando **Berlusconi** non era ancora sceso in politica. Il *Ponte sullo Stretto* di Messina rappresenta un'opera unica dell'ingegno italiano ed avrà sicuri riflessi positivi sull'immagine del *made in Italy*, come la **Ferrari**, **Armani** e la **Torre di Pisa**. Mi viene in mente la **Torre Eiffel** a Parigi, e mi verrebbe voglia di chiedere ai seguaci di **Pecoraro Scanio**: a cosa è servita? Non sarebbe stato meglio costruire qualche ospedale o scuola in più, invece che erigere quel *mostro* in acciaio deturpando il centro storico parigino?

Ma in questo numero si parla anche e soprattutto di vetro. Oltre che nell'articolo sul summenzionato *Ponte* in vetro sul Canal Grande a Venezia, parlano di vetro - ed esattamente di un nuovo modo di far vetro, con la tecnica del *sol-gel*, **Giovanna Brusatin** e **Massimo Guglielmi** dell'Università di Padova. Parlano ancora di vetro - come tecnica innovativa per vetrificare le scorie degli inceneritori dei rifiuti municipali - **Pietro Appendino** ed i suoi colleghi del Politecnico di Torino, in collaborazione con **Luigi Buzzi** ed i tecnici della Buzzi Unicem, per trovare utili applicazioni a questo materiale vetroso nel settore delle piastrelle ceramiche o dei materiali cementizi. Sullo stesso argomento, ma con un approccio diverso, **Luca Bertolini** ed i suoi colleghi del Politecnico di Milano, insieme ad **Alessandro Quadrio Curzio** della Solena, descrivono nel loro articolo come trovare utili applicazioni alla cenere pesante degli inceneritori dei rifiuti urbani, come materiale pozzolanico per i conglomerati cementizi.

Per terminare, in questo numero si interpretano con un approccio **micro-poro-meccanico**, dati sperimentali che riguardano le prestazioni (resistenza meccanica e aderenza all'acciaio), le deformazioni da ritiro, quelle elastiche e quelle viscosse dell'SCC rispetto al corrispondente calcestruzzo ordinario con classe di consistenza S4, a pari *a/c* e dosaggio di cemento.

Mario Collepardi

In copertina: Il Ponte di Calatrava a Venezia (fotomontaggio)

Copie stampate: 17.500 delle quali 16.500 distribuite a mezzo posta

SOMMARIO

MICRO-PORO-MECCANICA APPLICATA ALL'SCC

di M. Collepardi e J.J.O. Olagot

(pag. 7)

CONVERSAZIONE CON MICHELE VALENTE

di M. Collepardi

(pag. 14)

LA DURABILITA' DELLE STRUTTURE PROTETTE CON MEMBRANE CEMENTIZIE ELASTICHE

di F. Simonelli, F. Favero e R. Troli

(pag. 17)

IL PONTE SUL CANAL GRANDE DI SANTIAGO CALATRAVA

di A. Borsoi, G. Bianchin,

S. Collepardi, E. Menegaldo e A. Rigon

(pag. 24)

VETRIFICAZIONE E RIUTILIZZO DI CENERI PROVENIENTI DA INCENERITORI DI RIFIUTI SOLIDI URBANI

di P. Appendino, M. Ferraris, I. Matkovits, M. Salvo, L. Buzzi e M. Veglia

(pag. 27)

USO DELLE CENERI PESANTI DA RSU COME AGGIUNTE MINERALI

di L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Quadrio Curzio, M. Collepardi

(pag. 32)

APPLICAZIONI DELLE TECNICHE SOL-GEL

di G. Brusatin e M. Guglielmi

(pag. 36)

I MATERIALI LAPIDEI IMPIEGATI NELL'EDILIZIA

di E. Croce e G. Fazio

(pag. 40)

ENCO Journal

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Ponzano Vto (TV) - Via delle Industrie, 18/20
Tel. 0422.963771 - Fax 0422.963237
info@enco.srl

Direttore Responsabile

MARIO COLLEPARDI

Redazione

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

EDITORE

FOCUS

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

COMPOSIZIONE

ISABELLA CAPOGNA
ALESSANDRA GALLETTI
MARA MENEGHEL

Grafica e Stampa

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

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

editing

consulting

research

laboratorio

re-structura

forense

education

enco

L'universo enco:

re-structura → diagnosi, progetto e direzione lavori di strutture nuove ed esistenti

laboratorio → laboratorio ufficiale prove materiali

education → corsi di formazione ed aggiornamento sui materiali da costruzione

editing → libri e software sui materiali da costruzione

forense → arbitrati ed assistenza tecnica nelle contestazioni

consulting → consulenza tecnica per specifiche di capitolato

research → ricerca e sviluppo di materiali e tecnologie

enco

Via delle Industrie 18/20 - Ponzano Veneto (TV) - www.encosrl.it -
info@encosrl.it - Tel. 0422 963 771 - Fax 0422 963 237



MICRO-PORO-MECCANICA APPLICATA ALL'SCC

Mario Collepardi,* J. Jacob Ogoumah Olagot**

*Politecnico di Milano-mario.collepardi@polimi.it

**Enco s.r.l.-info@encosrl.it

1. INTRODUZIONE : cosa è la micro-poro-meccanica

La micro-poro-meccanica (**MPM**) è la scienza che studia la micro-porosità per interpretare le prestazioni fisico-meccaniche dei materiali. I primi studi della **MPM** furono incentrati sul comportamento termodinamico di alcuni gas ma soprattutto dell'acqua nei micropori di supporti solidi e sfociarono in equazioni divenute poi famose, quali:

- le leggi di Kelvin e di Wheeler sulla tensione del vapore acqueo in funzione del raggio dei micropori;
- l'equazione di Brunauer Emmet e Teller - più nota come **BET** - per lo studio dell'area superficiale specifica in un solido micro-poroso attraverso l'adsorbimento di acqua o di azoto;
- l'equazione di Washburn per calcolare la pressione che spinge l'acqua nei pori capillari di un solido idrofilo (suzione e risalita capillare).

Più recentemente la **MPM** è diventata uno strumento molto importante per affrontare le ricerche sul comportamento meccanico dei solidi porosi che vanno dal calcestruzzo al legno, dai laterizi alle malte, dai supporti catalitici ai materiali argillosi. I numeri di Gennaio e Maggio 2004 della rivista **Materials and Structures** (1, 2) sono stati interamente dedicati ad approfondire gli sviluppi recenti della **MPM** nel settore dei materiali da costruzione e le possibili ricadute sul progresso delle costruzioni.

2. SCC: micro-porosità del materiale e prestazione della struttura

In questo articolo verranno esaminati due aspetti (uno micro-strutturale, e l'altro prestazionale) che, grazie all'approccio micro-poro-meccanico, possono portare ad un approfondimento della micro-struttura del calcestruzzo autocompattante, più noto come **SCC** (da **Self-Compacting Concrete**), e ad un miglioramento delle sue prestazioni strutturali. Questi aspetti sono:

- la micro-struttura della matrice cementizia che avvolge gli inerti e le barre di armatura nell'**SCC** in confronto all'analoga situazione in un calcestruzzo "ordinario";
- le prestazioni dell'**SCC**, in confronto sempre ad

un calcestruzzo "ordinario", per il comportamento strutturale in termini di resistenza meccanica, ritiro igrometrico, deformazione viscosa, ed aderenza ferro-calcestruzzo.

3. PARTE SPERIMENTALE: preparazione dei calcestruzzi

Il primo problema che si pone in questo confronto è: quale è il calcestruzzo "**ordinario**" con cui confrontare l'**SCC**? La scelta qui adottata è stata la seguente: un calcestruzzo che possiede lo stesso rapporto acqua-cemento (**a/c**) e lo stesso dosaggio di cemento Portland (**c**) dell'**SCC**; nel caso specifico è stata adottata una classe di consistenza (**S4**), tipica di un calcestruzzo fluido (**slump** = 180 mm), ma non assimilabile al comportamento reologico dell'**SCC** (**slump flow** = 750 mm).

Tabella 1 - Composizione e lavorabilità dei calcestruzzi

Ingredienti/Proprietà		MIX		
		S4	SCC/L	SCC/P
CEM I 52.5R (kg/m³)		400	400	400
Filler (kg/m³)		—	calcare 160	cen. volante 135
Inerti	Sabbia 0-4 mm (kg/m³)	760	785	785
	Ghiaia 4-20 mm (kg/m³)	1040	845	845
Acqua (kg/m³)		180	180	180
Super* (kg/m³)		2,4	4,5	5,2
VMA** (% cem)		—	0,25	0,20
a/c		0,45	0,45	0,45 (0,34) ☒
i/c		4,5	4,1 (4,5) ■	4,1 (3,1) ☒
Slump (mm)		180	—	—
Slump flow (mm)		—	750	740

*Superfluidificante policarbossilico (30% di attivo)

** VMA = Viscosity Modifying Agent

■ Valore tra parentesi calcolato considerando il filler come finissimo dell'inerte

☒ Valori tra parentesi calcolati considerando la cenere come pozzolana e quindi come materiale cementizio

Nella Tabella 1 sono mostrati i dettagli composizionali dei vari ingredienti espressi nei tradizionali dosaggi in kg/m³ di conglomerato con due varianti per l'**SCC**: nel primo (**SCC/L**), il filler è costituito da calcare macinato (< 63 μ); nel secondo (**SCC/P**), il filler è costituito da cenere volante (anch'essa < 63 μ) che notoriamente, rispetto al calcare considerato inerte (**L**), si comporta invece da pozzolana (**P**) e modifica, quindi, chimicamente la microstruttura della matrice cementizia.

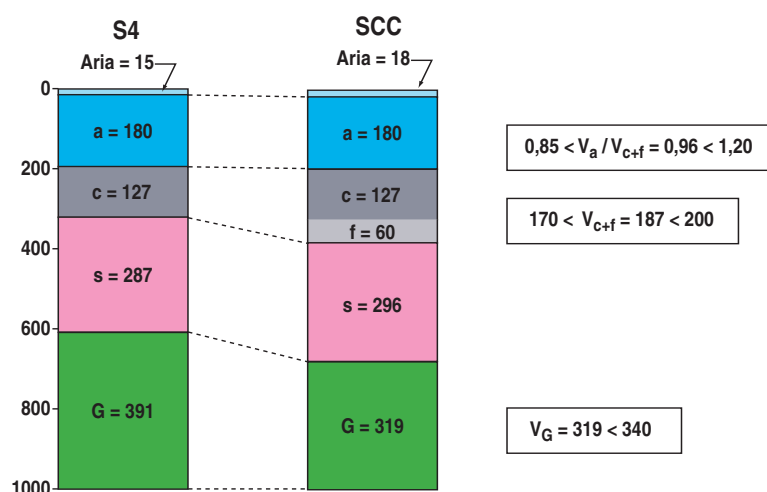


Fig. 1 - Composizione in volume (L/m³) degli ingredienti nell'S4 e nell'SCC

La cenere è stata introdotta in volume pari a quello del calcare e, tenendo presente la minor massa volumica (2,25 contro 2,65 kg/L), il dosaggio della cenere è leggermente inferiore a quello del calcare (135 contro 160 kg/m³). L'impiego dei due filler (calcare e cenere) negli **SCC** è avvenuto a spese di un pari volume di aggregato (soprattutto quello grosso) in modo da poter mantenere gli stessi dosaggi di cemento (*c*) e di acqua (*a*), e quindi lo stesso *a/c*. Queste modifiche hanno consentito di rispettare le tre "regole" fondamentali (4)* per produrre **SCC** con un **slump flow** di oltre 700 mm, senza segregazione in accordo alle disequazioni [1-3]:

$$0,85 < V_a / V_{c+f} < 1,20 \quad [1]$$

$$170 \text{ L/m}^3 < V_{c+f} < 200 \text{ L/m}^3 \quad [2]$$

$$V_G < 340 \text{ L/m}^3 \quad [3]$$

dove V_a rappresenta il volume di acqua, V_{c+f} è il volume dei fini (cemento + filler), e V_G è il volume di inerte grosso tutti espressi in litri (L) per metro cubo di calcestruzzo.

* La quarta "regola" consiste nel bilanciare i dosaggi dell'additivo superfluidificante e di quello viscosizzante in modo da portare la lavorabilità al massimo (slump flow = 650-750 mm) senza problemi di segregazione

La Fig. 1 mostra sinteticamente le principali variazioni nella composizione in termini di volume dei due calcestruzzi (**S4** ed **SCC**): si può notare come, per rispettare le tre disequazioni [1], [2] e [3], nell'**SCC** si sia dovuto - rispetto al calcestruzzo **S4** - aumentare il volume dei fini (in sostanza aggiungere il filler) e ridurre il volume di aggregato grosso.

Con i tre calcestruzzi, due **SCC** (non vibrati) ed uno ordinario (**S4** vibrato per 15 secondi), caratterizzati dalla composizione indicata nella Tabella 1, sono stati stagionati a 20 °C:

- provini cubici per determinare la resistenza meccanica in ambiente con UR >95 % da 1 a 28 giorni;
- travetti non armati sformati a 1 giorno per misurare il ritiro igrometrico in ambiente con UR del 65 % fino a 180 giorni;
- provini cilindrici non armati sformati a 1 giorno, e sottoposti da 7 a 180 giorni (UR del 65 %) a sollecitazioni permanenti pari ad 1/4 della resistenza meccanica a compressione posseduta a 7 giorni;
- provini cubici armati* con barra in acciaio (ad aderenza migliorata e con diametro di 8 mm) sottoposti a sfilamento dopo stagionatura di 28 giorni in ambiente con UR > 95%. Nella Fig. 2 è mostrato schematicamente la metodologia della prova di sfilamento in accordo al metodo RILEM-FIP-CEB (3).

Da ciascun calcestruzzo a diverse stagionature è stata prelevata un frammento di matrice cementizia sottoposta ad osservazione con microscopia elettronica a scansione (**SEM** da **Scanning Electron Microscopy**) per caratte-

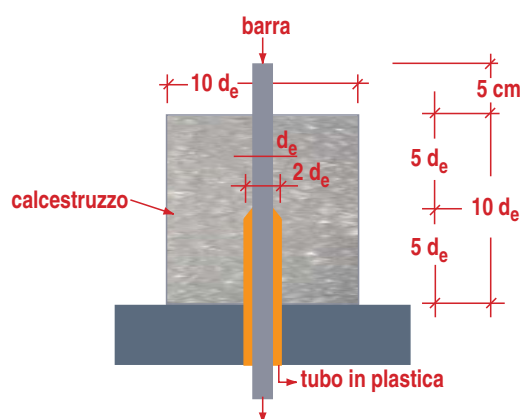


Fig. 2 - Provino per la prova di aderenza ferro-calcestruzzo secondo le raccomandazioni RILEM-FIP-CEB (3)

* Per i provini armati di calcestruzzo **S4** la vibrazione è stata fatta variare: 0-15-30 secondi

rizzarne visivamente la microstruttura da confrontare con la modellazione micro-poro-meccanica.

4. RISULTATI

Nei paragrafi che seguono sono mostrati i risultati sperimentali ottenuti per confezionare i due **SCC** ed il calcestruzzo di riferimento **S4**, e le proprietà di questi conglomerati allo stato indurito.

4.1 Composizione dei calcestruzzi e proprietà reologiche

Nella Tabella 1 sono mostrate le composizioni dei tre calcestruzzi, tutti ad alte prestazioni (**HPC**, *High Performance Concrete*), progettati per elementi prefabbricati maturati senza vapore per conseguire i seguenti tre obiettivi:

- raggiungere a 1 giorno una resistenza meccanica di almeno 25 MPa;
- ottenere una R_{ck} di almeno 60 MPa;
- non superare per a/c il valore di 0,45 per ragioni di durabilità (classe di esposizione XS3).

Il dosaggio di cemento Portland CEM I 52.5 R per raggiungere queste prestazioni nel calcestruzzo **S4** (*slump* = 180 mm) è stato di circa 400 kg/m³ con un dosaggio di additivo superfluidificante a base acrilica (polimero attivo = 30%) di circa 0,6 % sul peso di cemento.

Nei due **SCC** - di pari a/c e di pari dosaggio di cemento rispetto al calcestruzzo di riferimento **S4** - è stato aumentato il dosaggio di superfluidificante a 1,1% sul cemento, in presenza del filler calcareo, ed a 1,3 % quando si è impiegata la cenere volante.

4.2 Proprietà nello stato indurito.

Nei paragrafi che seguono sono mostrati i risultati sperimentali ottenuti sui calcestruzzi induriti.

4.2.1 Microstruttura della matrice cementizia

Nella Fig. 3 è mostrata la microstruttura della matrice cementizia del calcestruzzo **S4** in confronto a quella delle matrici cementizie dei due **SCC** (Fig. 4-5). Per quanto la differenza sia attenuata dal basso rapporto a/c (0,45), che porta ad una ridottissima microporosità in tutte le matrici cementizie, si osserva che in presenza del filler - anche di quello calcareo che non presenta alcuna attività pozzolanica - la micro-porosità risulta ancor più bassa rispetto a quella del calcestruzzo di riferimento con beneficio di tutte le prestazioni meccaniche dell'**SCC** allo stato indurito.

4.2.2 Resistenza meccanica a compressione

Nella Fig. 6 è mostrato l'andamento della resistenza meccanica a compressione da 1 a 28 giorni: i dati evidenziano un incremento di circa il 20% nella resi-

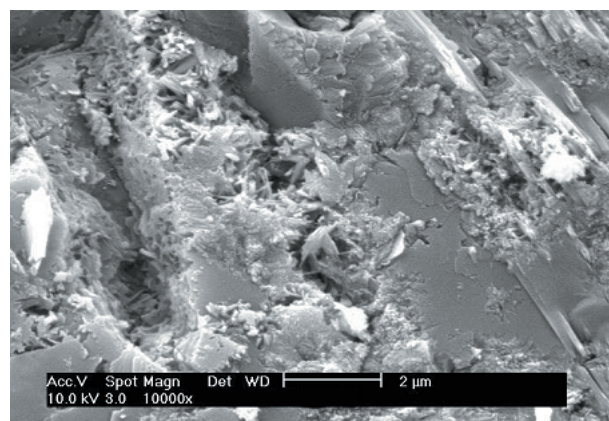


Fig. 3 - Osservazione SEM della matrice cementizia del calcestruzzo S4

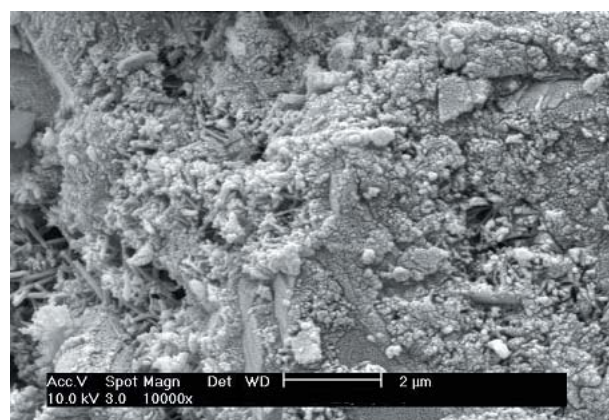


Fig. 4 - Osservazione SEM della matrice cementizia dell'SCC/L

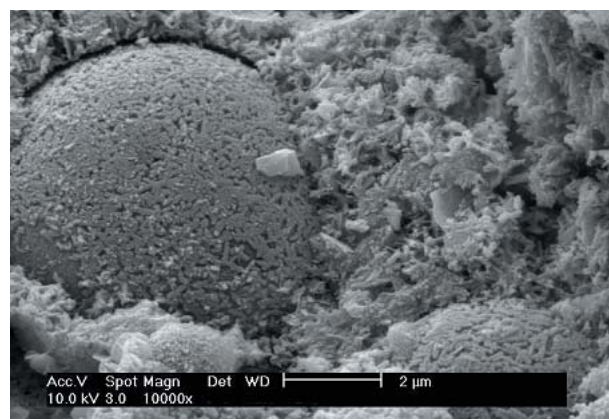


Fig. 5 - Osservazione SEM della matrice cementizia dell'SCC/P

stenza meccanica a tutte le stagionature passando dal calcestruzzo di riferimento **S4** a quella degli **SCC** nonostante il rapporto a/c (0,45) ed dosaggio di cemento (circa 400 kg/m³) siano gli stessi.

4.2.3 Comportamento deformazionale

Nelle Fig. 7, 8 e 9 sono rappresentate rispettivamente

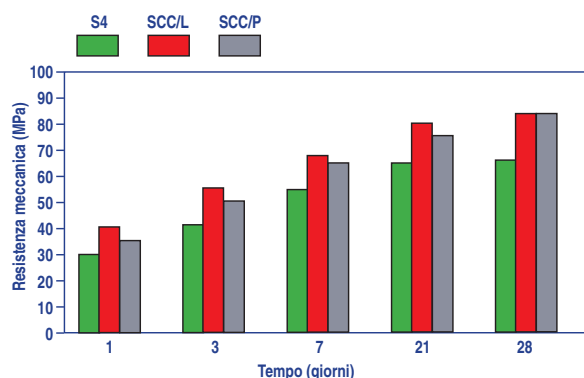


Fig. 6 - Resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo S4 e degli SCC con filler calcareo (L) e cenere volante (P)

te le deformazioni (ϵ) dei provini di calcestruzzo S4, SCC/L, ed SCC/P. La curva rossa rappresenta la deformazione totale. In ciascun grafico sono mostrate:

a) la deformazione da creep (ϵ_c) in ambiente con UR del 65% a seguito della sollecitazione - 1/4 della resistenza -applicata a 7 giorni (area rossa);

b) la deformazione da ritiro igrometrico (ϵ_s) in ambiente con UR = 65% registrata da 7 a 180 giorni in assenza di sollecitazione (area verde);

c) la deformazione elastica (ϵ_e) registrata immediatamente all'applicazione della sollecitazione a 7 giorni dalla confezione dei provini (area grigia).

Nella Tabella 2 sono mostrati comparativamente la deformazione elastica immediata (ϵ_e) misurata a 7 giorni e quella da ritiro (ϵ_s) insieme a quella viscosa (ϵ_c) registrate dopo 180 giorni.

Tabella 2 - Deformazioni a 180 giorni del calcestruzzo S4 e di quelli autocompattanti con calcare SCC/L o cenere volante (SCC/P)

Deformazione (10^{-6})	S4	SCC/L	SCC/P
ϵ_e	265	260	270
ϵ_s	470	470	470
ϵ_c	275	270	430
ϵ_t	1010	1000	1170

Per esempio la deformazione totale ϵ_t a 180 giorni in Fig. 7 per il calcestruzzo S4 sollecitato a compressione con 13,8 MPa è 1010 $\mu\text{m/m}$: sottraendo la deformazione elastica che si verifica subito dopo l'applicazione del carico (265 $\mu\text{m/m}$), rimane una deformazione viscosa di $1010 - 265 = 745 \mu\text{m/m}$.

Tuttavia a questo valore misurato in ambiente insaturato di vapore (UR = 65%), occorre sottrarre il ritiro

igrometrico (470 $\mu\text{m/m}$), misurato a parte su travetti prismatici non armati in assenza di sollecitazione, e pertanto la deformazione viscosa "depurata" dal ritiro diventa $735 - 470 = 275 \mu\text{m/m}$.

Passando dall'S4 all'SCC/L (Fig. 8) non si registra alcuna variazione né nella deformazione viscosa, né in quella da ritiro sebbene il rapporto inerte/cemento sia leggermente inferiore (4,1 contro 4,5) come è mostrato in Tabella 1. Tuttavia, se si considera nell'SCC/L il filler calcareo come una parte finissima dell'inerte, il passaggio dal calcestruzzo S4 all'SCC/L (con meno aggregato grosso e più finissimo) comporta una mo-

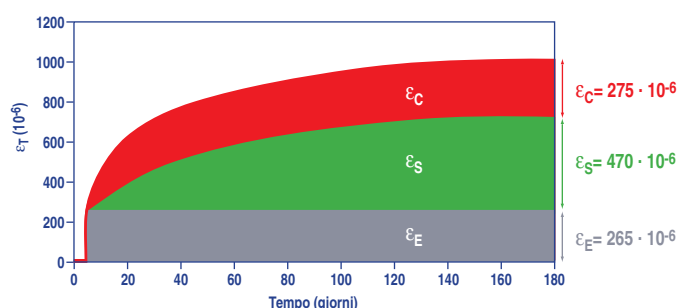


Fig. 7 - Calcestruzzo S4: deformazione elastica (ϵ_e), da ritiro igrometrico (ϵ_s) e viscosa (ϵ_c) in ambiente con UR = 65% con sollecitazione di 13,8 MPa applicata a 7 giorni pari a 1/4 di R_f (55 MPa)

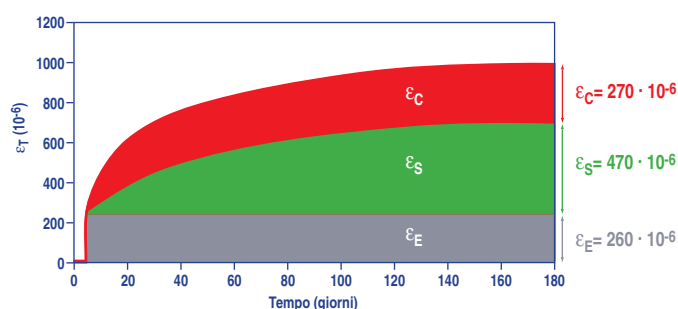


Fig. 8 - SCC/L: deformazione elastica (ϵ_e), da ritiro igrometrico (ϵ_s) e viscosa (ϵ_c) in ambiente con UR = 65% con sollecitazione di 17 MPa applicata a 7 giorni pari a 1/4 di R_f (68 MPa)

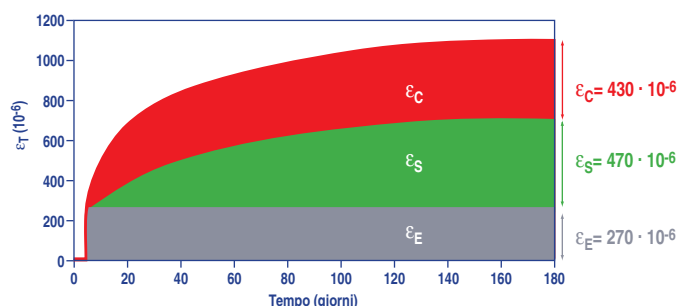


Fig. 9 - SCC/P: deformazione elastica (ϵ_e), da ritiro igrometrico (ϵ_s) e viscosa (ϵ_c) in ambiente con UR = 65% con sollecitazione di 16,3 MPa applicata a 7 giorni pari a 1/4 di R_f (65 MPa)

difica nella distribuzione granulometrica ma non nel rapporto i/c che rimane 4,5 per entrambi i calcestruzzi (Tabella 1). Escludendo l'azione chimica della reazione che si verifica con filler pozzolanici come la cenere volante, il passaggio di un calcestruzzo ordinario **S4** all'**SCC/L** con filler calcareo consiste sostanzialmente nella modifica - a pari a/c ed i/c - della distribuzione granulometrica (Fig. 10) che si arricchisce delle parti microniche ($<100 \mu m$) a spese di quelle grosse (4-20 mm). Ciò comporta, come si è visto in Fig. 6, un aumento della resistenza meccanica di circa il 20% proprio per l'azione fillerizzante delle particelle microniche di calcare nella micro-porosità della matrice cementizia, senza sostanziali modifiche nel comportamento deformazionale in presenza ed in assenza di carico (ϵ_c ed ϵ_s) governato dai valori di a/c ed i/c che sono rimasti immutati.

Quando, invece, si considera l'**SCC/P** con cenere volante (Fig. 9) la deformazione totale (ϵ_t) risulta leggermente maggiore rispetto alle corrispondenti variazioni dimensionali nel calcestruzzo **S4** (Fig. 7). In particolare il ritiro (ϵ_s) a 180 giorni (470 $\mu m/m$) è sostanzialmente eguale a quello dell'**S4**, mentre la deformazione viscosa ϵ_c è maggiore (430 $\mu m/m$ contro 275 $\mu m/m$). Nel caso dell'**SCC/P**, la cenere volante non è assolutamente assimilabile, come il filler calcareo, alla parte finissima dell'inerte, ma piuttosto ad una componente pozzolanica aggiuntiva del materiale cementizio: in altre parole, il rapporto i/c ed a/c , considerando la cenere come un materiale cementizio e non inerte, diventano rispettivamente 3,1 e 0,34 contro i valori di 4,5 e 0,45 per il calcestruzzo **S4** (Tabella 1). Così pure la distribuzione granulometrica dell'inerte dell'**SCC/P** - considerando la cenere come legante e non come inerte - diventa molto più vicina a quella dell'**S4** che non a quella dell'inerte dell'**SCC/L** (Fig. 10).

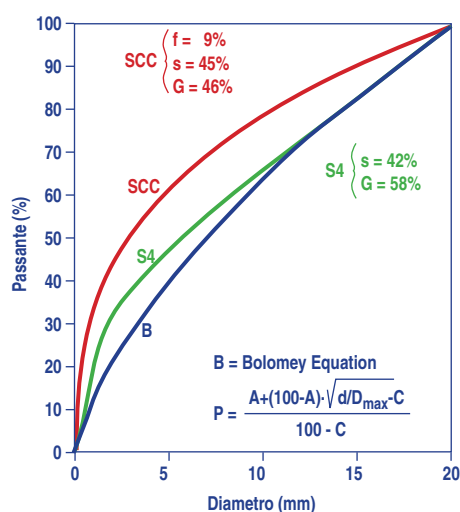


Fig.10 - Distribuzione granulometrica degli inerti nell'SCC/L nell'S4 e nella curva teorica di Bolomey (A=12; C=19%)

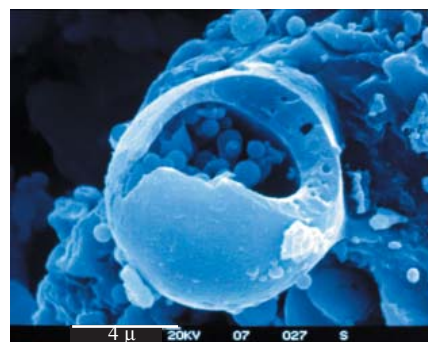


Fig. 11 - Morfologia di cenosfere e pleurosfe di cenere volante al microscopio elettronico a scansione

Analizzando la situazione da questa prospettiva si giustifica che il ritiro igrometrico nell'**SCC/P** sia equivalente a quello dell'**S4** (470 $\mu m/m$ a 180 giorni) perché il minor rapporto i/c (3,1 contro 4,5) è compensato dalla minore porosità della matrice cementizia per il minor valore di a/c (0,34 contro 0,45). D'altra parte, la maggiore deformazione viscosa dell'**SCC/P** rispetto a quella dell'**S4** (430 $\mu m/m$ contro 265 $\mu m/m$ a 180 giorni) è giustificabile dal rapporto i/c molto più basso (3,1 contro 4,5) e dalla maggiore deformabilità delle particelle di cenere in forma di cenosfere, cioè sfere vuote, o di pleurosfe parzialmente vuote (Fig. 11).

4.2.4 Aderenza del calcestruzzo dell'acciaio

Nella Fig. 12 è rappresentata l'aderenza tra il calcestruzzo e la barra in acciaio misurata attraverso la forza applicata per unità di superficie di contatto per lo sfilamento della barra metallica (Fig. 2). I risultati indicano che l'aderenza all'acciaio migliora significativamente passando dal calcestruzzo ordinario (**S4**) all'**SCC** con calcare ed ancor più all'**SCC** con cenere volante: l'incremento di aderenza è dovuto ad un miglior contatto fisico all'interfaccia metallo-matrice cementizia (effetto parete, *wall effect* in inglese) a causa delle particelle di filler che riempiono meglio i vuoti interstiziali in prossimità della superficie metalli-

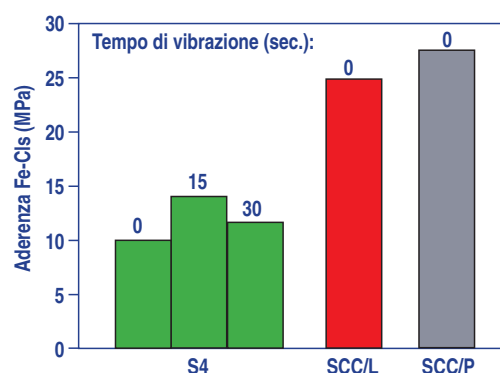


Fig. 12 - Aderenza ferro-calcestruzzo per il calcestruzzo S4 (vibrato 0-15-30 secondi) e per SCC/L ed SCC/P senza vibrazione

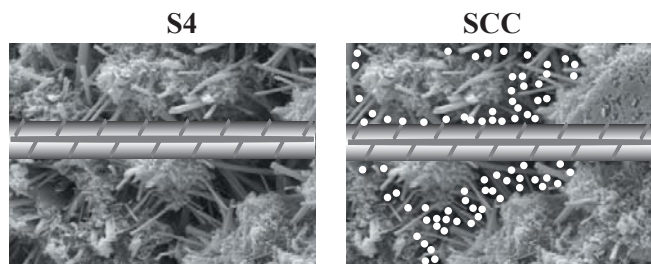


Fig. 13 - A sinistra modello schematico di adesione tra barra d'acciaio e matrice cementizia dell'S4; a destra il modello con il calcestruzzo SCC con particelle di filler nei micropori della zona di transizione

ca (Fig. 13). In presenza delle particelle di cenere volante, all'effetto fillerizzante vero e proprio si aggiunge anche un maggior contenuto di matrice cementizia a causa della reazione pozzolanica della cenere che produce una quantità aggiuntiva di **C-S-H**.

E' interessante notare come per il calcestruzzo ordinario (**S4**) l'aderenza all'acciaio sia fortemente dipendente dal tempo di vibrazione: in assenza di vibrazione l'aderenza è bassa (10 MPa) per la presenza di macro-vuoti (aria intrappolata) all'interfaccia ferro-matrice cementizia che riduce la superficie di contatto; d'altra parte se si eccede nella vibrazione (da 15 a 30 secondi in Fig. 12) si raccoglie l'acqua di *bleeding* all'interfaccia ferro-calcestruzzo che provoca una riduzione nella superficie di contatto ferro-matrice cementizia e quindi di aderenza da 14 MPa a 12 MPa.

Nel caso dell'**SCC**, invece, che per definizione non deve essere vibrato né deve segregare, l'adesione della matrice cementizia alle barre d'acciaio (25-27 MPa) è favorita dalla presenza di un maggiore volume di materiale fino (V_{C+F}) come è mostrato in Fig. 13.

4. CONCLUSIONI

La presenza di filler nell'**SCC**, ancorché inerte come nel caso del calcare macinato, provoca una modifica nel comportamento micro-poro-meccanico del materiale con conseguenze nelle prestazioni del calcestruzzo in servizio. Rispetto ad un calcestruzzo di riferimento con classe di consistenza **S4**, confezionato con pari **a/c**, con pari dosaggio di cemento e vibrato a rifiuto, l'**SCC** con filler calcareo non vibrato presenta:

- un comportamento deformazionale nel ritiro igrometrico e viscoso sostanzialmente equivalente nonostante il minor contenuto apparente di aggregato e quindi del rapporto inerte-cemento (**i/c**) (4,1 contro 4,5); in realtà questo rapporto non è modificato ove si consideri il filler calcareo come parte finissima dell'inerte;
- una migliore aderenza all'acciaio ed una maggiore resistenza meccanica a compressione alle brevi ed alle lunghe stagionature, nonostante sia stato adottato lo

stesso **a/c** e lo stesso dosaggio di cemento.

Queste prestazioni - non prevedibili solo sulla base dei rapporti **a/c** ed **i/c** - sono in linea con l'approccio micro-poro-meccanico. Infatti:

- negli **SCC** il ruolo del filler, anche quello del calcare considerato "inerte" dal punto di vista delle reazioni chimiche, provoca una riduzione della micro-porosità della matrice cementizia che favorisce una migliore adesione agli aggregati ed alle barre di acciaio (**transition zone**); l'effetto del filler (sull'aderenza all'acciaio) è ovviamente migliore se è costituito da materiale pozzolanico come la cenere volante.
- d'altra parte, nel comportamento deformazionale il minor rapporto **i/c** dell'**SCC/P** con cenere - che di per sé provocherebbe una maggiore deformazione da ritiro - è compensato dalla minore micro-porosità, rispetto al corrispondente calcestruzzo "ordinario", e quindi ad una minore fuoriuscita di acqua provocata sia dall'ambiente insaturo (ritiro igrometrico);
- per quanto attiene, invece, il comportamento a seguito dell'applicazione di una sollecitazione permanente, si registra una maggiore deformazione dell'**SCC/P** rispetto al calcestruzzo ordinario **S4** (ed all'**SCC/L** con calcare) per una maggior quota di matrice cementizia (cemento + pozzolana + acqua) meno rigida rispetto all'inerte calcareo, e per la presenza di micro-granuli vuoti o parzialmente vuoti di cenere e quindi più deformati.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia Antonio Borsoi e Glenda Fazio del Laboratorio Enco per la confezione dei calcestruzzi, le misure meccaniche e per le misure di variazione dimensionali.

Si ringraziano Tiziano Cerulli e Davide Salvioni del Laboratorio Mapei per le osservazioni al microscopio elettronico a scansione.

Bibliografia

- (1) O. Coussy and G. Schere, Guest Editors, of Special Issue of *Concrete Science and Engineering* on Poromechanics of Cement - Based Materials;
- (2) O. Coussy and G. Schere, Guest Editors, of Special Issue of *Concrete Science and Engineering* on Poromechanics of Concrete - Part II;
- (3) M. Collepari, A. Borsoi, S. Collepari, F. Simonelli e R. Troli, "3 SELF CONCRETE (3SC): LA PROSSIMA SFIDA Parte I. Calcestruzzo autocompattante: produzione, messa in opera e prescrizioni", *Enco Journal*, N° 24, pp. 15-21, 2003.
- (4) M. Collepari, "Scienza e Tecnologia del Calcestruzzo" 3^a Ed., Hoepli, Milano, pg 513-519, 1996;

CONVERSAZIONE CON MICHELE VALENTE

Mario Collepari intervista Michele Valente

M. C. — Caro Michele, mi fa proprio piacere, durante questo periodo di tranquilla pausa estiva, conversare con te sullo sviluppo cui tende il settore nel quale siamo impegnati da oltre trent'anni, e cioè del calcestruzzo e dei materiali ad esso collegati.

Tu ti sei conquistato un generale riconoscimento per la tua capacità di gestione strategica delle aziende, anticipando i cambiamenti.

Vorrei quindi chiederti quali sono i cambiamenti che dobbiamo aspettarci o per lo meno ai quali dovremmo prepararci per cogliere le future opportunità che il nostro settore ci presenterà.

M. V. — Caro Mario, ti ringrazio per le tue parole, ma devo dire che dietro ogni sviluppo scientifico e tecnologico relativo al nostro settore ci sei sempre stato tu, e nella nostra conversazione ti chiederò qualche riflessione sugli sviluppi più promettenti della tecnologia del calcestruzzo e dei materiali ad essa collegati.

Io farò la mia parte con alcune considerazioni relative all'evoluzione della struttura del settore come conseguenza dell'evoluzione del mercato, della tecnologia, della disponibilità delle materie prime e delle normative (tecniche e sicurezza e ambiente).

M. C. — Bene, cominciamo dal mercato. Ti ho sentito già altre volte mettere in relazione l'evoluzione della domanda con l'evoluzione dei prodotti e dei servizi, ma soprattutto con lo sviluppo del mercato ed in particolare del tipo e della dimensione delle opere.

Cosa intendi con questo?

M. V. — Il calcestruzzo preconfezionato ha ormai sostituito l'autoproduzione di cantiere. Dopo questa affermazione, l'industria si è prevalentemente impegnata nello sviluppo del mercato dei prodotti speciali: calcestruzzi leggeri, calcestruzzi con fibre, calcestruzzi colorati, ecc. Fra tutti questi gli unici che hanno avuto una diffusione di massa sono stati i calcestruzzi reoplastici, cioè calcestruzzi con slump S4-S5. E la tecnologia si sta evolvendo ancora con l'SCC e gli additivi superfluidificanti di ultima generazione.

Le ragioni sono chiare: questi soddisfano un vasto bisogno tecnologico, come si dice oggi, di valore trasversale a

tutto il mercato, miglioramento della qualità (basso *a/c*) e riduzione della fatica (alta lavorabilità).

Credo però che oggi l'evoluzione del mercato sia trainata da altri fattori collegati più con la dimensione e la tipologia dell'opera che con la specializzazione dei prodotti.

In pratica opere piccole (fino a 5.000 m³), medie (fino a 50.000 m³) e di grandi dimensioni (oltre i 50.000 m³) costituiscono tre segmenti diversi di mercato che richiedono livelli di capacità aziendali, tecnologiche e di servizio differenti.

M. C. — Vorrei che tu elaborassi ulteriormente questo concetto con degli esempi concreti.

M. V. — Nel caso di piccole opere (mercato ordinario) tutti i produttori hanno le capacità di base necessarie per affrontarne la fornitura: organizzazione, *know-how* operativo, tecnologia di base (prodotti), servizi (ATB e pompe) e capacità finanziaria (limitata).

Qui va fatta una considerazione importante e cioè che questa diffusa capacità ha reso affollato e competitivo questo mercato,

con forte pressione sulla redditività.

In questo mercato andrebbero rivalutati sia i prodotti che i servizi che vengono dati. La nostra è "l'industria delle opportunità perse": usiamo infatti le prestazioni più alte, la lavorabilità maggiore, il servizio più accurato, il pompaggio, solo per competere contro il produttore concorrente, non per aggiungere valore a quello che produciamo!

Nel secondo caso, opera di medie dimensioni (50.000 m³ in 2 anni) la capacità organizzativa, il *know-how* operativo e tecnologico e le capacità di servizio e finanziario cominciano a crescere. Qui la vince chi ha dimensioni maggiori, magari con più impianti in posizione utile per la fornitura e con attrezzature che possano soddisfare le richieste delle punte. E ancora, un servizio tecnologico capace di dialogare con direzione lavori più avanzate, e dare risposte concrete ed applicative a richieste specifiche dei capitolati.

Quindi, dimensioni, capacità finanziarie, *know-how* maggiori.

Nel terzo caso le capacità finanziarie, organizzative ed il *know-how* diventano fattori discriminanti. O uno li possiede, o si prepara per questa esigenza, oppure è fuori da questo mercato.

Attenzione che talvolta spinti dalla "voglia" o "necessi-



tà” di acquisire commesse di queste dimensioni si finisce per accettare contratti di fornitura che fanno riferimento a capitolati estremamente avanzati, rigorosi e irrealistici, che sono quasi impossibili da soddisfare. L'impresa è ben lieta di “scaricare” queste difficoltà sul produttore. Il produttore nella trattativa deve essere ben consapevole di questo. Ma lo sarà solo se avrà avuto precedenti esperienze in questo tipo di lavoro ed il relativo *know-how* tecnologico ed esecutivo.

Per questo terzo segmento ci si trova di fronte al classico circolo vizioso: se non si fa un grande lavoro non si acquisisce la relativa esperienza, ma se non si ha l'esperienza non si può acquisire il grande lavoro. E la barriera resta.

Per fortuna questa si può superare con una buona organizzazione nella quale siano presenti produttori e personale esperto che abbia già servito questo mercato.

M. C. — Quali allora le conclusioni a questo punto?

M. V. — Queste scaturiscono da due considerazioni. La prima è che il mercato piccolo e frammentato avrà in futuro una sempre maggior pressione sulla redditività, per costi crescenti (mancanza di economia di scala) per ricavi unitari calanti (grande concorrenzialità). La semplificazione del mercato (agglomerazioni) diventerà inesorabile.

La seconda è che nei prossimi anni, dopo decenni di assenza di investimenti in infrastrutture medie e grandi, la costruzione di queste grandi opere sarà prioritaria nel paese. Questo segmento è quindi destinato a crescere.

Di conseguenza per cogliere questa enorme opportunità del mercato, è indispensabile raggiungere la “dimensione”, e quindi intendo “dimensione” in senso ampio (capacità organizzativa, finanziaria, tecnologica e operativa) necessaria per affrontare questo tipo di lavori.

Dimensione che si può raggiungere in vario modo, anche attraverso agglomerazioni di diverso tipo.

Ho voluto parlarti delle “capacità” di una azienda che fa calcestruzzo che voglia stare con successo e in maniera sostenibile nel tempo, nel nostro mercato.

M. C. — Come sono pronti gli impianti per affrontare i problemi ambientali?

M. V. — Gli impianti di calcestruzzo da un lato stanno attrezzandosi sempre di più per essere un’ “industria verde”. Definisco questi impianti a “emissione zero”. Sono impianti nei quali le polveri e le acque vengono captate, trattate e riciclate, il calcestruzzo di ritorno è trattato e riutilizzato e il rumore è abbattuto.

Dall'altro lato il calcestruzzo e gli impianti stanno diventando elementi sempre più importanti nella catena del riciclo di materiali riutilizzabili. Parlo quindi dell'uso delle aggiunte pozzolaniche, degli inerti da demolizione o di altri prodotti secondari.

Qui sarebbe utile che le normative seguissero più da vicino questi aspetti e soprattutto, date tutte le garanzie del caso, consentissero la rapida introduzione di nuove tecnologie basate sull'uso di questi materiali.

M. C. — Sull'evoluzione del settore in conseguenza della disponibilità di materie prime non hai ancora fatto

nessuna considerazione.

M. V. — Nel calcestruzzo le materie prime fondamentali, oltre alle risorse umane, al *know-how* e alla capacità finanziaria sono ovviamente due, il legante e gli inerti. Entrambi sono di enorme valore strategico.

Ma mentre attorno al cemento si vede una logica di filiera industriale, nulla si fa in relazione agli inerti, che restano una questione limitata a un ristretto ed esasperato localismo.

Non esiste alcun produttore di soli inerti di livello per lo meno nazionale, cioè che abbia cave situate in varie parti del territorio nazionale. La ragione è ovvia: la competitività è basata sul *know-how* locale (legislativo, ambientale, normativo) e sulla disponibilità finanziaria.

Per ora questa situazione viene considerata sufficientemente “sostenibile” per la continuità delle operazioni. Ma io non credo che lo sarà ancora per molto tempo. Ci sono aree sempre più estese nelle quali non vengono più date autorizzazioni all'estrazione, e i produttori sono costretti a far venire il materiale da territori sempre più distanti. Anche in questo settore quindi dovremo assistere ad agglomerazioni che faranno passare almeno da livello provinciale a livello regionale la dimensione delle aziende estrattive.

Un'indicazione del risveglio del settore è rappresentata dal fatto che l'associazione di categoria, l'ANEPLA (Associazione Nazionale Estrattori Produttori Lapidei ed Affini), è, con il nuovo Presidente, il Geom. Vezzola, in piena attività con un'azione di coordinamento e rappresentanza presso Confindustria e gli Organi Centrali dello stato delle esigenze dei produttori.

In ogni caso gli inerti dovranno far parte di qualsiasi programma di sviluppo futuro sostenibile della struttura del nostro settore.

M. C. — Conclusioni

Provo a trarre alcune conclusioni a questa conversazione che certo riprenderemo e amplieremo ad altri protagonisti del nostro settore.

L'evoluzione del mercato è a favore dei lavori medi e grandi che richiedono alle aziende maggiori capacità organizzative, finanziarie, tecnologiche e operative.

L'evoluzione della struttura del nostro settore va quindi nella direzione di agglomerazioni fra produttori, in modo da acquisire queste capacità.

Anche per gli inerti, il cui valore strategico è già di rilevanza enorme, si assisterà ad operazioni di aggregazione di vario tipo.

L'evoluzione delle normative su sicurezza e ambiente prevederà da un lato l'uso sempre più vasto di materie prime pozzolaniche e di materiali da riciclo, e dall'altro l'adeguamento degli impianti di produzione di calcestruzzo alla regola della “zero emissione”.

L'evoluzione della tecnologia richiederà polimeri più efficaci per ottenere una maggior riduzione del rapporto a/c ed un mantenimento dell'alta lavorabilità per ottenere, per esempio, calcestruzzi particolarmente fluidi (SCC) con alte R_{ck} iniziali, anche in presenza di forti aggiunte pozzolaniche.

Riduzione
dei tempi di posa

Riduzione
dei tempi
di costruzione

Riduzione
dell'inquinamento

Qualità
estetica dell'opera

REOCAL S.C.C.

Calcestruzzo Autocompattante

Tecnica ed
Innovazione



Calcestruzzi
Italcementi Group

www.calcestruzzi.it



LA DURABILITA' DELLE STRUTTURE PROTETTE CON MEMBRANE CEMENTIZIE ELASTICHE

Francesca Simonelli, Francesco Favero, Roberto Troli
Enco srl, Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it

1. RIASSUNTO

Nel presente lavoro vengono illustrati i risultati di una campagna sperimentale tesa a valutare, mediante prove accelerate, la capacità delle membrane elastiche in polimero-cemento di incrementare la durabilità delle strutture in cemento armato. L'esecuzione di prove di elasticità e di adesione al substrato, condotte nell'arco di dieci anni ha, inoltre, consentito di verificare il mantenimento nel tempo di queste proprietà, da parte delle membrane, nei vari ambienti di esposizione.

Vengono, infine, riportati alcuni dei risultati ottenuti, nell'ambito di una più vasta campagna, da prove di invecchiamento accelerato condotte su elementi in cemento armato rivestiti con membrane cementizie sia in presenza che in assenza di fessure.

2. DURABILITÀ DEL CALCESTRUZZO E DURABILITÀ DELLE STRUTTURE

Tra le cause di degrado delle strutture in cemento armato, le più diffuse e ricorrenti sono, certamente, quelle legate alla penetrazione nel calcestruzzo dell'anidride carbonica e degli ioni cloruro.

L'ingresso nel calcestruzzo di queste sostanze ha come risultato la promozione di un'intensa corrosione delle armature metalliche e la conseguente espulsione del copriferro per effetto dell'aumento di volume connesso alla formazione dei prodotti di ossidazione.

La velocità di penetrazione dell'anidride carbonica e del cloruro è funzione crescente della porosità del calcestruzzo e, quindi, in ultima analisi, del suo rapporto a/c .

La norma UNI EN 206-1 "Calcestruzzo. Specificazione, prestazione, produzione e conformità", emanata nell'ottobre del 2001, definisce quattro diverse classi di esposizione ambientale (XC1 ÷ XC4) per le strutture soggette a rischio di corrosione indotta da carbonatazione, tre classi di esposizione per strutture esposte a corrosione indotta dai cloruri presenti nell'acqua di mare (XS1 ÷ XS3) e tre classi di esposizione per strutture soggette a corrosione da cloruri non provenienti dall'acqua di mare (XD1 ÷ XD3).

Per ciascuna di queste classi di esposizione, la UNI EN 206-1 suggerisce il valore del rapporto acqua/cemento che occorre non superare per garantire una durabilità di almeno 50 anni alle strutture esposte a tali ambienti.

In realtà, l'adozione di un calcestruzzo con basso rapporto acqua/cemento rappresenta una condizione ne-

cessaria ma non sufficiente per garantire la durabilità di una struttura.

La presenza di fessure nel conglomerato cementizio comporta, infatti, il più delle volte, una riduzione della durabilità effettiva della struttura rispetto a quella potenziale legata al valore del rapporto acqua/cemento del calcestruzzo adottato. A queste si devono aggiungere le macroporosità indotte da difetti di costipazione (i cosiddetti vespai) e le riprese di getto mal eseguite.

Tutte queste soluzioni di continuità rappresentano delle vere e proprie "autostrade" per l'ingresso delle sostanze aggressive all'interno della struttura con conseguente notevole accelerazione dei fenomeni di degrado.

Se è sempre possibile eliminare la presenza di difetti di costipazione e di ripresa di getto con una accurata posa in opera, non è altrettanto semplice eliminare del tutto la presenza di fessure nelle strutture in servizio. Le cause che possono promuovere la fessurazione in esercizio delle strutture in cemento armato sono, infatti, molteplici e non sempre eliminabili. Fra queste le più ricorrenti sono: i gradienti termici che si producono nei getti massivi in conseguenza dello sviluppo del calore di idratazione del cemento; le contrazioni legate al ritiro plastico e igrometrico del calcestruzzo impedito dalla presenza di vincoli o delle armature metalliche; i carichi accidentali straordinari.

3. I RIVESTIMENTI PROTETTIVI ELASTICI

La soluzione migliore per garantire la durabilità delle strutture in cemento armato anche negli ambienti più aggressivi è l'adozione di un adeguato rivestimento protettivo facile da applicare ed eventualmente rinnovabile nel tempo.

Un buon rivestimento protettivo deve possedere le seguenti caratteristiche:

- impermeabilità all'acqua e alle soluzioni saline;
- buona impermeabilità a gas come l'anidride carbonica e l'ossigeno (necessario nei processi di corrosione);
- capacità di *crack-bridging** di almeno 1 millimetro;
- tensione limite di adesione al substrato in calcestruzzo

*Il *crack-bridging* è la capacità della membrana di fare da ponte ad eventuali fessure o soluzioni di continuità che si possono instaurare nel sottofondo senza rompersi e garantendo, comunque, l'impermeabilità della struttura.

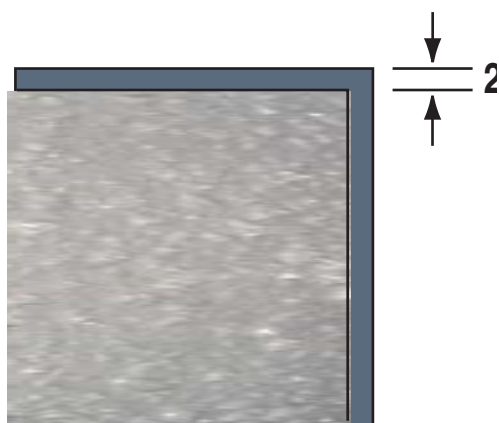


Fig. 1 - Realizzazione dei provini rivestiti da destinare alle prove di penetrazione accelerata

di almeno $0,7 \div 0,8$ MPa.

Alcuni rivestimenti, come le resine epossidiche, posseggono grande capacità di bloccare l'ingresso dei liquidi e dei gas nel calcestruzzo ma sono dotati di scarsa elasticità per cui tendono a fessurarsi insieme al substrato. Altri tipi di rivestimento, come le pitture acriliche, pur essendo dotati di notevole elasticità, non possiedono una sufficiente capacità di crack-bridging in ragione dell'esiguo spessore ($100 \div 200 \mu\text{m}$) con cui vengono applicati.

I rivestimenti elastici in polimero-cemento, detti anche membrane cementizie elastiche, sono dotati di notevole capacità di crack-bridging in virtù della notevole elasticità e tenacità che li contraddistinguono e del discreto spessore ($1 - 3 \text{ mm}$) con cui vengono applicati. Alcuni di questi rivestimenti, inoltre, sembrano dotati di eccellente capacità di bloccare l'ingresso nel calcestruzzo di gas e liquidi aggressivi e di sufficiente adesione al sottofondo.

Le membrane cementizie elastiche, pertanto, rappresentano, probabilmente, il miglior sistema attualmente disponibile per garantire una sufficiente durabilità alle opere in calcestruzzo.

4. ATTIVITA' SPERIMENTALE

Nell'ambito di una estesa campagna di prove, iniziata nei primi anni '90 e tesa all'ottimizzazione della formulazione di un prodotto da rivestimento impermeabilizzante per strutture in calcestruzzo, sono state eseguite prove di durabilità, accelerate e a lungo termine, su provini in calcestruzzo rivestiti o meno con una membrana elastica bi-componente in polimero-cemento.

In particolare sono stati realizzati:

- I. provini cubici $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ con un calcestruzzo avente rapporto acqua/cemento = $0,40$;
- II. provini cubici $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ con un calcestruzzo avente rapporto acqua/cemento = $0,80$;
- III. travi prismatiche $15 \times 15 \times 60 \text{ cm}$ con un calcestruzzo avente rapporto acqua/cemento = $0,60$.

Metà dei provini cubici appartenenti alle serie I. e II. sono stati completamente rivestiti con la membrana in



polimero cemento applicata in un unico strato di 2 mm . (Fig. 1). L'altra metà di provini è stata lasciata tal quale. Sui provini, rivestiti e non, sono state condotte le seguenti prove:

1. determinazione della penetrazione accelerata di anidride carbonica;
2. determinazione della penetrazione accelerata dei cloruri.

Le travi prismatiche appartenenti alla serie III. sono state realizzate inserendo, nella zona extradossale, un'armatura metallica costituita da tre $\varnothing 10$. All'intradosso delle travi, invece, è stato applicato uno strato di 2 mm della membrana elastica da testare (Fig. 2). Le travi così realizzate sono state esposte per 10 anni a tre diversi ambienti:

- a. laboratorio ($T = 20^\circ\text{C}$; U.R. = 70%);
- b. ambiente esterno ($T = -3^\circ\text{C} \div 35^\circ\text{C}$; U.R. = $30\% \div 100\%$);
- c. costantemente sott'acqua ($T = 20^\circ\text{C}$).

A varie scadenze le travi esposte ai tre ambienti sono state sottoposte alle seguenti prove di laboratorio:

- determinazione della capacità di crack-bridging residua;
- determinazione della tensione di aderenza residua.

Nei paragrafi che seguono vengono descritti e commentati i risultati di suddette prove.

4.1 Prove di penetrazione accelerata dell'anidride carbonica

Provini cubici appartenenti alle serie I. e II., tal quali e rivestiti con la membrana elastica, sono stati inseriti per 90 giorni in una camera di carbonatazione accelerata.

All'interno della camera è stato creato un ambiente arricchito di anidride carbonica (30% in volume di CO_2). Precedenti esperienze ed estrapolazioni avevano permesso di determinare che 30 giorni di esposizione in questo ambiente corrispondono, dal punto di vista della penetrazione dell'anidride carbonica in un medio calcestruzzo, a 20 anni di esposizione all'atmosfera mentre 75 giorni di esposizione in camera corrispondono a circa 50 anni di esposizione all'atmosfera.

A varie scadenze, i provini sono stati rotti a metà e su di essi si è proceduto a determinare la profondità di penetrazione dell'anidride carbonica mediante la prova

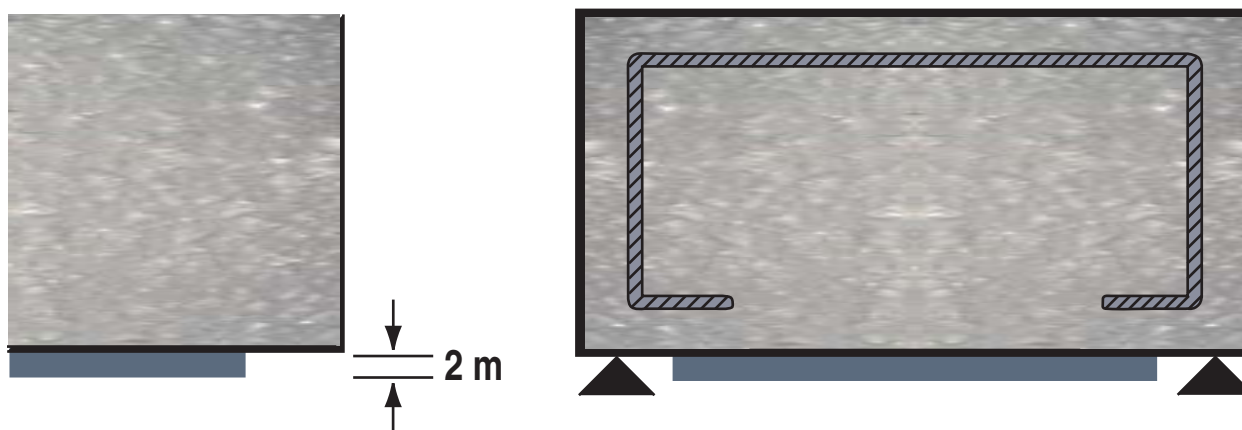


Fig. 2 - Realizzazione dei travi prismatiche da sottoporre alle prove a lungo termine

colorimetrica alla fenolftaleina. I risultati delle prove colorimetriche sono riportati in Fig. 3.

Come si può notare, dopo soli 28 giorni di esposizione, i provini tal quali realizzati con calcestruzzo avente rapporto $a/c = 0,80$ sono stati completamente carbonatati (penetrazione di 50 mm). I provini tal quali realizzati con

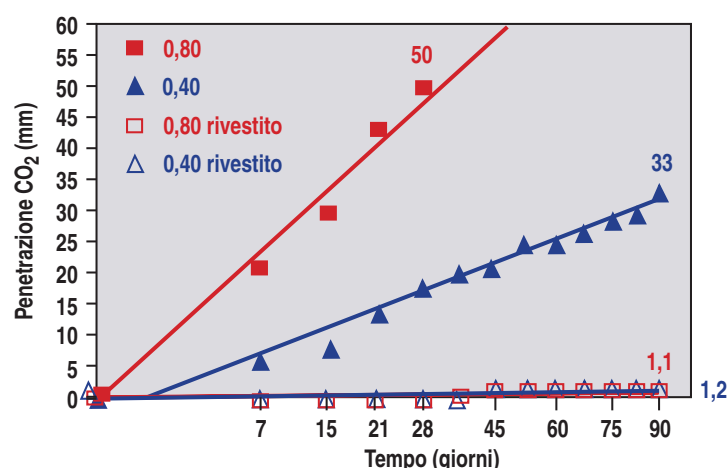


Fig. 3 - Risultati della prova di carbonatazione accelerata

calcestruzzo avente rapporto $a/c = 0,40$, invece, hanno subito una penetrazione di circa 30 mm dopo 90 giorni di esposizione. I provini rivestiti, infine, indipendentemente dal rapporto a/c del calcestruzzo con cui erano stati confezionati, hanno subito una penetrazione quasi impercettibile (poco più di 1 mm) dopo 90 giorni di esposizione.

Da quanto sopra si può dedurre che il rivestimento elastico testato è in grado di incrementare notevolmente la durabilità delle strutture in cemento armato nei confronti della carbonatazione, indipendentemente dal rapporto a/c del calcestruzzo.

4.2 Prove di penetrazione accelerata dei cloruri

Provini cubici appartenenti alle serie I. e II., tal quali e rivestiti con la membrana elastica, sono stati immersi per 180 giorni in una soluzione al 6% di NaCl.

A varie scadenze, i provini sono stati rotti a metà e su di essi si è proceduto a determinare la profondità di penetrazione dei cloruri mediante la prova colorimetrica

alla fluoresceina e nitrato d'argento. I risultati delle prove colorimetriche sono riportati in Fig. 4.

Come si può notare, i provini tal quali realizzati con calcestruzzo avente rapporto $a/c = 0,80$ sono stati completamente penetrati dai cloruri (penetrazione di 50 mm) dopo 120 di esposizione. I provini tal quali realizzati con calcestruzzo avente rapporto $a/c = 0,40$, invece, hanno subito una penetrazione di circa 30 mm dopo 180 giorni di esposizione. Nuovamente, i provini rivestiti, indipendentemente dal rapporto a/c del calcestruzzo con cui erano stati confezionati, hanno subito, dopo 180 giorni di esposizione, una penetrazione di molto inferiore a quella dei provini non rivestiti.

Si può, pertanto, affermare che il rivestimento elastico testato è in grado di incrementare notevolmente la durabilità delle strutture in cemento armato nei confronti della penetrazione dei cloruri, indipendentemente dal rapporto a/c del calcestruzzo.

4.3 Misure della capacità di crack-bridging residua

Le travi appartenenti alla serie III., esposte ai tre diversi ambienti, sono state sottoposte, a varie scadenze, ad una prova di flessione a tre punti. La presenza di un'armatura metallica al lembo superiore della trave ha

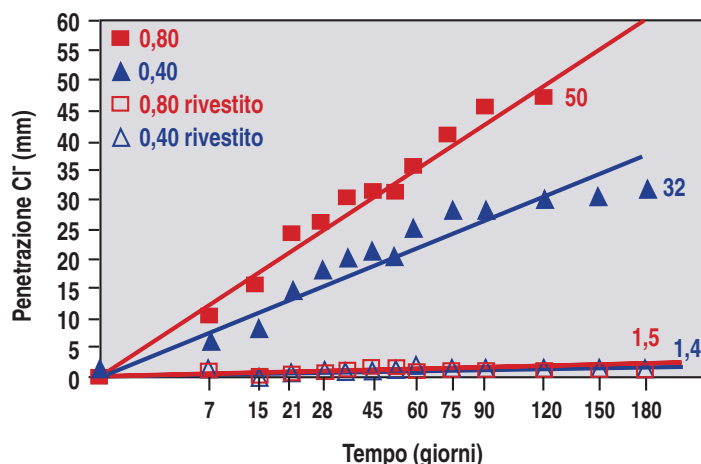


Fig. 4 - Risultati della prova di penetrazione accelerata dei cloruri

favorito la formazione in mezzera di una cerniera plastica all'estradosso e di una fessura nella parte intradosso della trave. Mediante un comparatore millesimale inserito nella parte inferiore della trave, si è provveduto a misurare l'ampiezza della fessura nell'istante in cui il rivestimento subiva un cambiamento di colore (snervamento) prima di arrivare alla lacerazione in corrispondenza della fessura formatasi nel calcestruzzo. Tale valore dell'ampiezza della fessura è stato assunto come capacità di *crack-bridging* residua della membrana a quella scadenza e in quel ambiente di esposizione.

I risultati delle prove di *crack-bridging* sono riportati in Fig. 5.

Come si può notare, le membrane hanno conservato una sufficiente capacità di *crack-bridging* anche dopo 10 anni di esposizione all'ambiente peggiore, rappresentato dalla costante immersione in acqua. Questo tipo di ambiente, infatti può portare alla riduzione di elasticità di alcuni rivestimenti di questo tipo, per idrolisi del polimero utilizzato per confezionare la malta bi-componente. La

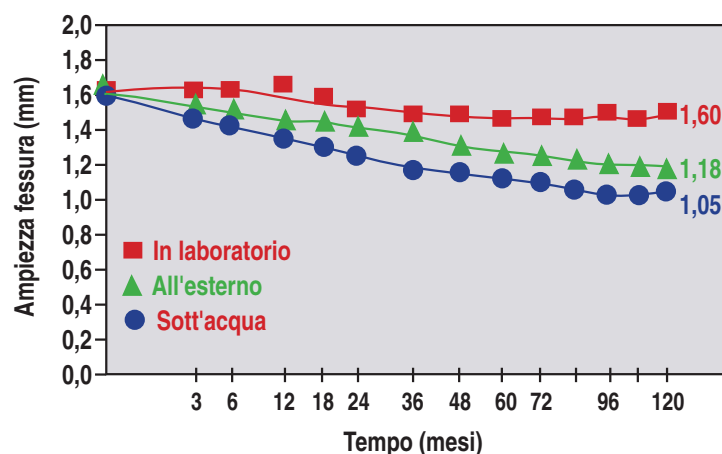


Fig. 5 - Risultati delle prove di crack-bridging

riduzione della capacità di *crack-bridging* dal valore iniziale (1,6 mm) è risultata quasi impercettibile nelle travi esposte all'ambiente interno (laboratorio) e inferiore a quella ottenuta sott'acqua per le travi esposte all'ambiente esterno, caratterizzato dall'alternanza di situazioni di asciutto e bagnato.

La membrana testata, pertanto, possiede spiccate doti di mantenimento nel tempo della capacità iniziale di *crack-bridging* pur negli ambienti più aggressivi.

4.4 Misure della tensione di aderenza residua

Successivamente alla prova di crack-bridging, sul rivestimento applicato alle travi della serie III., sono state eseguite misure della tensione di aderenza mediante dinamometro a trazione (Fig. 6). La prova consiste nell'eseguire un intaglio nel rivestimento mediante carotatrice a disco diamantato, nell'incollare un disco metallico nella zona carotata mediante mastice epossidico e nel tirare questo disco mediante apposito dinamometro a trazione fino ad ottenere la rottura o il



Fig. 6 - Prova di strappo per la determinazione della tensione di aderenza residua

debonding del rivestimento. La forza di strappo, divisa per l'area del disco metallico, rappresenta la tensione di aderenza del rivestimento stesso.

I risultati delle prove di strappo sono riportati in Fig. 7. come si può notare, la tensione di strappo è rimasta pressoché invariata nelle travi mantenute permanentemente sott'acqua mentre è andata leggermente crescendo nel tempo nelle travi esposte all'ambiente esterno e, in misura maggiore, in quelle mantenute in laboratorio. I valori ottenuti di aderenza ottenuti sono, in ogni caso, accettabili per un rivestimento protettivo del calcestruzzo.

5. CONCLUSIONI

Le membrane elastiche bi-componenti in polimerocemento sono in grado di aumentare la durabilità delle strutture in cemento armato nei confronti della corrosione promossa dalla carbonatazione e dai cloruri.

Il livello di durabilità raggiunto è pressoché indipendente dalla porosità del calcestruzzo della struttura e dalla presenza o meno di fessure.

Le prove a lungo termine (10 anni) hanno evidenziato che le membrane cementizie elastiche conservano una sufficiente capacità di crack bridging anche negli ambienti più aggressivi

L'adesione delle membrane al calcestruzzo è ottima e tende ad aumentare o a rimanere pressoché costante nel tempo nei vari ambienti di esposizione.

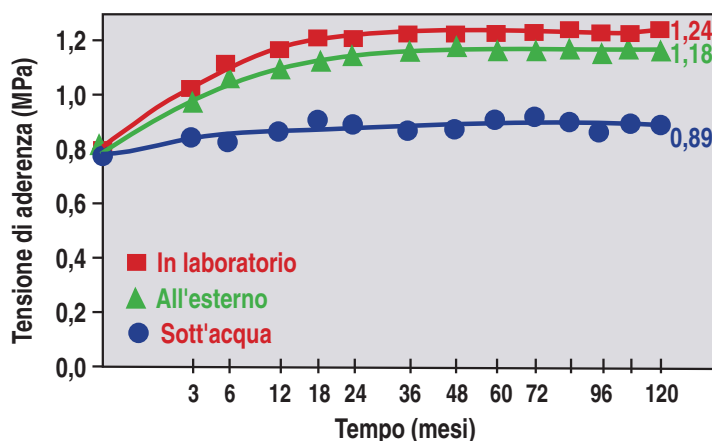


Fig. 7 - Risultati delle prove di aderenza



Via delle Industrie 18/20 - 31050 Ponzano V.to (TV)
Tel. 0422 963771 - Fax 0422 963237
E-mail: info@encosrl.it

Con il patrocinio di:
Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Messina
Ordine degli Architetti
della Provincia di Messina

Seminario ENCO sul

RESTAURO DEGLI EDIFICI STORICI E DELLE OPERE IN C.A.

RESTAURO DEGLI EDIFICI STORICI E DELLE OPERE IN C.A.

PROGRAMMA LAVORI

- ore 14.45 Registrazione e distribuzione
del materiale tecnico illustrativo
- ore 15.45 Inizio dei lavori:
Saluti e Benvenuto
Ing. Arturo Alonci
- ore 16.00 Presentazione del Seminario
Prof. Mario Collepari
- ore 16.15 Degrado e Restauro **Conservativo**
degli Edifici Storici e delle opere in C.A.
Prof. Mario Collepari
- ore 16.45 Diagnosi del Degrado delle
Opere in C.A. e delle Murature
Ing. Francesca Simonelli
- ore 17.15 Degrado e Restauro **Statico**
delle Strutture in Muratura e in C.A.
Ing. Roberto Troli
- ore 17.45 Diagnostica e Restauro Conservativo
dei Manufatti Lapidei e Litici
di interesse storico ed artistico
Dott. Emanuela Croce
- ore 18.15 Dibattito e chiusura lavori
- ore 18.30 Cocktail

Messina, 5 NOVEMBRE 2004
Sala Rappresentanze del
Comune di Messina
Via Libertà, Messina



Per informazioni rivolgersi a:

Impresa RICCIARDELLO CARMELO - Vico Trento 33 - 98061 Brolo (ME)
Tel. e Fax 0941 563018 - E-mail: riccardellolocarmelo@virgilio.it

Corsi Enco - Pro

MIX-DESIGN COMPUTERIZZATO

Destinatari:

Il corso è destinato ai tecnici coinvolti nella progettazione, nella costruzione e nella produzione di calcestruzzo preconfezionato o prefabbricato che non abbiano una conoscenza approfondita del mix design. E' richiesta una conoscenza di base della tecnologia del calcestruzzo.

Contenuto:

Calcolo della composizione del calcestruzzo sulla base delle prestazioni (durabilità, permeabilità, resistenza meccanica a compressione e flessione). Trasporto del calcestruzzo e perdita di lavorabilità. Impiego degli additivi. Combinazione degli inerti (curve granulometriche). Ottimizzazione del ciclo produttivo del calcestruzzo gettato in cantiere (influenza del clima) o maturato a vapore in impianto di prefabbricazione. Calcolo del ritiro, della deformazione viscosa e dei gradienti termici. La progettazione del calcestruzzo mediante software: esempi applicativi al computer.

Data:

6 Ottobre 2004 (ore 10-18) - 7 Ottobre 2004 (ore 9-18) - 8 Ottobre 2004 (ore 9-16)

Costo:

€ 600,00 (inclusivo di 3 Lunch e 5 Coffee Break)

Materiale Didattico:

Libro "IL CALCESTRUZZO LOGICO , Il Manuale del Mix Design"; Software CMD EN 206

SCC ED ALTRI CALCESTRUZZI SPECIALI

Destinatari:

E' destinato ai progettisti delle strutture, ai tecnici delle imprese di costruzione, ai prefabbricatori, ed ai fornitori di calcestruzzo preconfezionato. Si richiede una conoscenza di base della tecnologia del calcestruzzo. Il corso è finalizzato all'approfondimento del calcestruzzo auto-compattante (Self-Compacting Concrete) per le opere dell'Architettura e dell'Ingegneria Civile.

Contenuto:

Proprietà reologiche coesione e viscosità plastica. Metodi di misura per la valutazione del self-compacting concrete (SCC): slump flow, V-Funnel, U-Box, L-box. Additivi e aggiunte minerali per l'SCC: superfluidificante, agente modificatore di viscosità, filler calcareo, cenere volante, fumo di silice. Regole pratiche per l'utilizzo dell'SCC in cantiere. Mix-Design dell'SCC mediante il software EXS. Calcestruzzi ad alta resistenza, fibro-rinforzati, RPC, a ritiro compensato, e leggeri. Dimostrazioni pratiche di laboratorio.

Data:

28 Ottobre 2004 (ore 9-18) - 29 Ottobre 2004 (ore 9-18)

Costo:

€ 450,00 (inclusivo di 2 Lunch e 4 Coffee Break)

Materiale Didattico:

Dispensa "SELF-COMPACTING CONCRETE", Libro "IL NUOVO CALCESTRUZZO", Software EXS

PAVIMENTAZIONI INDUSTRIALI IN CALCESTRUZZO

Destinatari:

Il corso è destinato ai tecnici della progettazione, delle imprese e dei fornitori di materiali coinvolti nella costruzione dei pavimenti industriali in calcestruzzo.

Contenuto:

Modello di interazione terreno-sottofondo. Classificazione dei terreni. Resistenza a trazione per flessione: normativa per il calcolo del modulo di rottura. Resistenza a fatica e fattori di sicurezza per il progetto delle pavimentazioni. Classificazione dei carichi uniformemente distribuiti e carichi concentrati su piedritti e ruote veicolari. Dimensionamento dei giunti di contrazione: ritiro plastico e igrometrico. Esempi pratici di giunti di contrazione: calcolo della armatura metallica; imbarcamento dei pavimenti; barriera a vapore. Giunti di isolamento e di costruzione. Esame dei difetti nei pavimenti.

Data:

4 Novembre 2004 (ore 9-18) - 5 Novembre 2004 (ore 9-13)

Costo:

€ 400,00 (inclusivo di 1 Lunch e 3 Coffee Break)

Materiale Didattico:

Libro "PAVIMENTAZIONI INDUSTRIALI IN CALCESTRUZZO" - Seconda Edizione

programma 2004

MATERIALI NEGLI EDIFICI STORICI: DEGRADO E RESTAURO

Destinatari:

E' un corso di base destinato ai tecnici del restauro (architetti, ingegneri, geometri) nel settore degli edifici storici che intendano migliorare la conoscenza sui materiali e sulle tecnologie applicative soprattutto per le murature. Non richiede alcuna preliminare conoscenza sull'argomento.

Contenuto:

Cause di degrado chimiche, fisiche, meccaniche e biologiche degli edifici storici. Tecniche di diagnosi in sito (prove non distruttive) ed in laboratorio. Scelta dei materiali per il restauro delle strutture in legno e delle murature in pietra e mattone: calce, gesso, calce idraulica, cemento, idrorepellenti, vernici, impregnanti. Dimostrazioni pratiche in laboratorio.

Data:

18 Novembre 2004 (ore 9-18) - 19 Novembre 2004 (ore 9-18)

Costo:

€ 450,00 (inclusivo di 2 Lunch e 4 Coffee Break)

Materiale Didattico:

Dispensa "MATERIALI NEGLI EDIFICI STORICI: DEGRADO E RESTAURO" - Dispensa "IL LEGNO"

:

DURABILITA' E RESTAURO DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO

Destinatari:

Il corso è fortemente specializzato e destinato ai tecnici della progettazione (liberi professionisti, studi di ingegneria, enti pubblici e committenti) ed agli addetti nel settore del restauro e consolidamento delle opere in calcestruzzo degradate (imprese, industrie, ecc.). Si richiede una conoscenza di base della tecnologia del calcestruzzo.

Contenuto:

Cause di degrado di tipo chimico, fisico e meccanico. Prevenzione del degrado utilizzando le norme nazionali ed europee finalizzate alla durabilità delle opere in calcestruzzo. Diagnosi del degrado: prove in sito (non distruttive) e di laboratorio. Restauro delle opere degradate con materiali cementizi e resine. Tecniche applicative di restauro (iniezioni, colaggio, spritz beton, trattamenti superficiali, FRP). Esempi pratici di restauro e consolidamento. Dimostrazioni pratiche in laboratorio.

Data:

2 Dicembre 2004 (ore 9-18) - 3 Dicembre 2004 (ore 9-18)

Costo:

€ 450,00 (inclusivo di 2 Lunch e 4 Coffee Break)

Materiale Didattico:

Libro "DURABILITA' E RESTAURO DELLE OPERE IN CALCESTRUZZO" - Seconda Edizione - Dispensa sull'FRP - Software Easy & Quick EN 206

Docenti:

Prof. Mario Collepari, Ing. Roberto Troli, Ing. Silvia Collepari, Ing. Francesca Simonelli

SEDE DEI CORSI: Sala Conferenze della Enco Srl - Via delle Industrie 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV) - Tel. 0422/963771 - Fax 0422/963237 - Sito web: www.encosrl.it - E-mail: info@encosrl.it (Alessandra Galletti - Mara Meneghel) -

PAGAMENTO: *Da effettuarsi prima dell'inizio del corso mediante bonifico bancario sul c/c 000001085060 (Codice CIN: J Codice ABI 03069 - Codice CAB 12031) intestato a Enco Srl presso Banca Intesa, Filiale 525 Treviso.*

IL PONTE SUL CANAL GRANDE DI SANTIAGO CALATRAVA

Antonio Borsoi, Silvia Collepari*, Gianluca Bianchin**, Ettore Menegaldo**, Antonio Rigon****

Enco, Ponzano Veneto (TV), ** Mapei, Milano, *Calcestruzzi Mosole, Mosole (PD)*

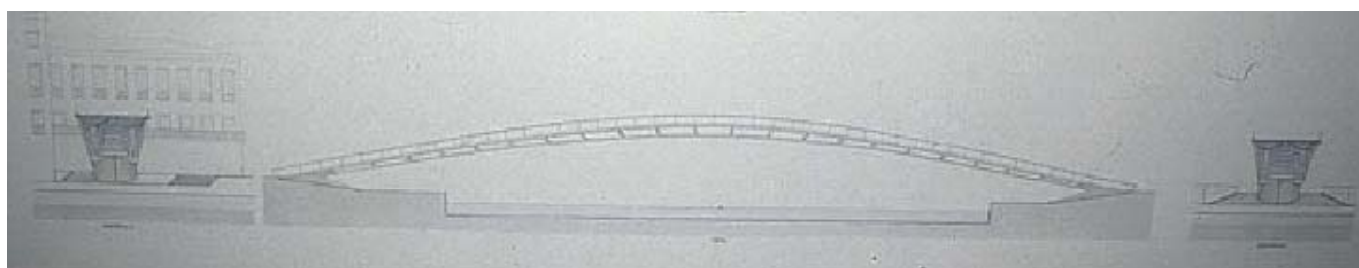
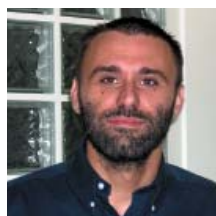


Fig. 1 - Il Quarto ponte sul Canal Grande a Venezia progettato da Santiago Calatrava

INTRODUZIONE

Il Quarto Ponte sul Canal Grande di Venezia (www.venice.today.it) progettato dal grande architetto-ingegnere Santiago Calatrava unisce le due sponde del Canale tra la Stazione di S. Lucia e Piazzale Roma.

Fino al 1850 sul Canal Grande esisteva solamente il ponte Rialto. Nel giro di 10 anni, gli austriaci, che a quel tempo governano la città, costruiscono altri due ponti: uno, oggi in pietra, di fronte alla stazione ferroviaria (Ponte degli Scalzi) ed un altro, oggi in legno, nell'area delle Gallerie dell'Accademia. Due ponti originariamente in ferro successivamente modificati nelle forme e nei materiali.

Il tessuto storico-architettonico di Venezia non si addice ad una "contaminazione" da parte di strutture moderne che possono prevalere sul paesaggio del centro lagunare pre-esistente.

E così Santiago Calatrava ha disegnato un ponte leggerissimo lungo 90 metri in acciaio e cristalli di vetro (Fig. 1) per congiungere Piazzale Roma con la stazione di Santa Lucia (Fig. 2). Per non compromettere la "bellezza" del Quarto Ponte la commissione di salvaguardia ha approvato il progetto ancorché privo di un servoscala che lo rendesse accessibile ai disabili.

Accanto alla "leggerezza del Ponte, appena accennato per essere integrato al paesaggio architettonico di Venezia, esiste, però, una "pesantezza" non vista rappresentata dalla fondazione in calcestruzzo talmente armata (Fig. 3) da rendere impossibile il getto di un normale conglomerato (Fig. 4).

PARTE SPERIMENTALE

Per tener conto dell'interferro previsto nel progetto è stato studiato un calcestruzzo auto-compattante (*Self-Compacting Concrete, SCC*) con aggregato lapideo

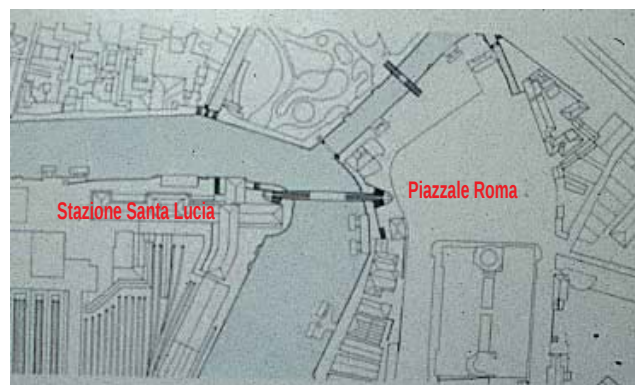


Fig. 2 - Vista in pianta del Ponte di Calatrava lungo 91 metri



Fig. 3 - Vista d'insieme della fondazione armata prima del getto



Fig. 4 - Particolare della fondazione armata

caratterizzato da un diametro massimo di 16 mm.

Gli altri vincoli compositivi determinati dalla progettazione dell' SCC sono stati:

- Volume dei fini (cementi+filler): $V_f \geq 170 \text{ L/m}^3$;
- Volume di acqua/volume dei fini: $V_a/V_f \geq 0,85$;
- Volume di inerte grosso (ghiaia): $V_g \leq 340 \text{ L/m}^3$.

Per ragioni di durabilità (ambiente marino) il conglomerato deve anche soddisfare il seguente requisito:

- $a/c \leq 0,45$ (opera in classe di esposizione XS2).

L'insieme di questi vincoli compositivi determinati da ragioni di durabilità e da criteri reologici necessari all'ottenimento dell' SCC sono mostrati in Tabella 1:

Tabella 1: Composizione dell' SCC studiato in laboratorio per la realizzazione della fondazione armata del Ponte di Calatrava sul Canal Grande di Venezia

CEM II A-LL 42.5R.....	330 kg/m ³ $\Rightarrow$ 108 L/m ³	$V_f = 178 \text{ L/m}^3 > 170 \text{ L/m}^3$
FILLER CALCAREO.....	190 kg/m ³ $\Rightarrow$ 70 L/m ³	
GHIAIA (4-12 mm).....	710 kg/m ³ $\Rightarrow$ 263 L/m ³ $< 340 \text{ L/m}^3$	$D_{max} (\text{mm}) = 12 < 25$
SABBIA (0,125-4mm).....	1060 kg/m ³	
ACQUA.....	145 kg/m ³	
SUPERFLUIDIFICANTE.....	5 kg/m ³	$V_a/V_f = 0,86 > 0,85$
VISCOSIZZANTE.....	7 kg/m ³	
a/c.....	0,44 $< 0,45 \Rightarrow$ XS2	
R_{ck}	60 MPa $> 45 \text{ MPa}$	

In conseguenza del basso rapporto a/c adottato (0,44) la R_{ck} è risultata particolarmente elevata (60 MPa).

A causa dell'impiego del cemento CEM II A/LL 42.5R – l'unico disponibile presso il produttore di calcestruzzo al momento della fornitura – l'effettivo valore di R_{ck} è risultato 60 MPa, e quindi molto maggiore di quello indicato nella UNI-EN 206 (45 MPa) che si riferisce all'impiego di un cemento di classe 32.5 con un rapporto a/c di 0,45.

PROVE DI CAMPO

Dopo alcune prove di campo, mirate soprattutto a verificare la pompabilità dell' SCC, la composizione del conglomerato è stata "ritoccata" per aumentare il volume di acqua senza tuttavia superare il rapporto a/c di 0,45 richiesto per ragioni di durabilità: ciò ha comportato un ritocco nel dosaggio di cemento da 330 a



Fig. 5 - Aspetto eccessivamente coloso dell' SCC iniziale che rallentava la portata del getto

350 kg/m³.

Inizialmente l'SCC si presentava fluido (*slump flow* ≥ 700 mm) ma troppo coesivo come è mostrato nella Fig. 5.

GETTO DELL'SCC

Per questo motivo l'ultimo aggiustamento è consistito in un lieve aumento dell'additivo superfluidificante ed in una lieve riduzione dell'additivo viscosizzante



Fig. 6 - Getto di SCC molto fluido

(Tabella 2): la foto della Fig. 6 mostra un tipico comportamento reologico dell'SCC in fase di getto, con ottima fluidità (*slump low* > 750 mm) ed assenza di segregazione.

Il riempimento delle armature è avvenuto in modo completo e rapido in quattro gettate notturne, eseguite in occasione di giorni festivi per consentire la sospensione del transito dei vaporette con il minor pregiudizio per l'utenza pubblica.

STAGIONATURA DELL'SCC

Al termine del getto la superficie a vista del calcestruzzo è stata protetta con telo impermeabile e successivamente inumidita con acqua per diversi giorni al fine di assicurare la migliore stagionatura possibile.

Tabella 2: Composizione dell'SCC modificato dopo le prove di campo

CEM II A-LL 42.5R..... 350 kg/m ³ $\Rightarrow$ 112 L/m ³	$V_f = 186 \text{ L/m}^3 > 170 \text{ L/m}^3$
FILLER CALCAREO..... 200 kg/m ³ $\Rightarrow$ 74 L/m ³	
GHIAIA (4-12 mm)..... 700 kg/m ³ $\Rightarrow$ 259 L/m ³ $< 340 \text{ L/m}^3$	$D_{max} \text{ (mm)} = 12 < 25$
SABBIA (0,125-4mm)..... 1075 kg/m ³	
ACQUA..... 158 kg/m ³	
SUPERFLUIDIFICANTE..... 5,5 kg/m ³	$V_a/V_f = 0,86 > 0,85$
VISCOSIZZANTE..... 5,5 kg/m ³	
a/c..... 0,44 $> 0,45 \Rightarrow$ XS2	
R_{ck} 50 MPa $> 45 \text{ MPa}$	

TUTTI A SORRENTO !

In anteprima assoluta comunichiamo ai lettori di Enco Journal che nel **Novembre 2006** si terrà, nel magico Golfo di Sorrento, la "Ottava Conferenza Internazionale sui Superfluidificanti ed Altri Additivi", organizzata dall'accoppiata CANMET di Ottawa (Canada) e American Concrete Institute (ACI) di Detroit (USA).

Il general manager di tutte le conferenze CANMET-ACI, il Dr Mohan Malhotra, è rimasto incantato dallo splendido paesaggio del Golfo di Sorrento in occasione di un incontro tenutosi nel 2003 per la preparazione degli articoli offerti alla conferenza svoltasi a Las Vegas nel maggio scorso.

Per tutti i tecnici delle costruzioni in c.a. la Conferenza CANMET-ACI di Sorrento è un evento da non perdere, se si vuole rimanere al passo delle evoluzioni e dei progressi nel settore del calcestruzzo. Ma soprattutto per i giovani ricercatori nel settore del cemento, del calcestruzzo, degli additivi, è una eccellente occasione per mettersi in mostra presentando un buon articolo sulle loro ricerche in corso.

Anche per le aziende del settore è un'occasione da non perdere sponsorizzando la manifestazione con l'acquisto di spazi per la esibizione dei loro prodotti e servizi, o con l'offerta di servizi ai partecipanti: cocktail, cene sociali, gite turistiche, ecc.

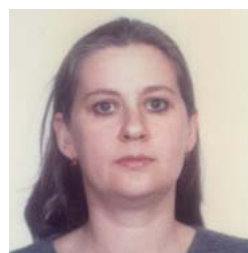
Per l'invio dei riassunti degli articoli ci si può rivolgere alla Enco (info@encosrl.it; tel.: 0422 963 771 fax: 0422 963 237).

I.C.

Vetrificazione e riutilizzo di ceneri provenienti da inceneritori di rifiuti solidi urbani

Pietro Appendino*, Monica Ferraris*, Ildiko Matekovits*, Milena Salvo*, Luigi Buzzi, Massimo Veglia****

***Dipartimento di Scienza dei Materiali e Ingegneria chimica, Politecnico di Torino**
pietro.appendino@polito.it, monica.ferraris@polito.it, ildiko.matekovits@polito.it, ilena.salvo@polito.it
****Buzzi Unicem S.p.A. -** *MBuzzi@buzziunicem.it, LVeglia@buzziunicem.it*



1. INTRODUZIONE

In Europa si produce più di un chilogrammo di rifiuti solidi urbani pro capite ogni giorno, pari a circa 200 milioni di tonnellate l'anno; a questa enorme quantità di rifiuti devono essere aggiunti i rifiuti di altro tipo (industriali, speciali, ecc.) il cui quantitativo è in continuo aumento (1).

In Italia, circa il 70% dei rifiuti viene stoccato in discarica: le discariche legali si stanno rapidamente esaurendo e il rischio di inquinare il terreno e le falde acquifere con metalli pesanti e sostanze tossiche rappresenta un'emergenza ambientale molto impegnativa per il futuro. L'alternativa allo stoccaggio dei rifiuti solidi urbani in discarica, soprattutto per quanto concerne i cosiddetti rifiuti non riciclabili, è quella dell'incenerimento. Questa tecnica permette di ridurre il volume dei rifiuti del 70-80% e il loro peso del 60-70%; è inoltre possibile sviluppare impianti di cogenerazione nei quali una parte del calore utilizzata per l'incenerimento viene recuperata per essere utilizzata nel teleriscaldamento o per produrre energia elettrica.

L'incenerimento non risolve, comunque, radicalmente il problema delle discariche in quanto dall'incenerimento di una tonnellata di rifiuti si ottengono circa 30 kg di ceneri volanti e 300 kg di ceneri pesanti (2). Le ceneri volanti contengono quantità rilevanti di metalli pesanti (Zn, Pb, Cd, Cr, ecc.) e devono essere disposte in discarica controllata.

Le ceneri pesanti, in Italia, vengono, nella maggioranza dei casi, poste in discarica ad un costo di circa 0.08÷0.10 €/kg e in percentuale minima utilizzate come materia prima nell'industria cementiera per la produzione di clinker (come previsto dai D.M. 5/2/97 "Decreto Ronchi" e D.M. 5/2/98). La recente normativa che regola la disposizione in discarica dei rifiuti (DLGS 13/01/03 n. 36 e DL 13/03/03) renderà necessaria, in molti casi, l'introduzione di costosi trattamenti di stabilizzazione delle ceneri prima della loro collocazione in discarica. Infatti, oltre al costo e allo spazio occupato, esistono altri problemi connessi al collocamento delle ceneri pesanti in discarica: ad esempio il rilascio di sostanze tossiche negli eluati, l'emissione di gas (ad es. idrogeno), e di polveri contenenti cloruri, solfati e metalli pesanti; si registra inoltre un aumento della temperatura che può raggiungere i 90°C (2).

In Europa, la percentuale di ceneri pesanti riciclate in materiali da costruzione (sottofondi stradali, conglomerati bituminosi, cemento, ecc.) è variabile (100% in Olanda, 50% in Francia e Germania, 70% in Danimarca). Il problema principale legato all'utilizzo delle ceneri pesanti tal quali consiste negli effetti dannosi diretti e indiretti nei confronti dell'ambiente e della salute umana. Alcuni ricercatori (3) hanno dimostrato l'ecotossicità delle ceneri pesanti riutilizzate in materiali da costruzione. In realtà, se le ceneri subiscono opportuni trattamenti, i rischi di ecotossicità possono ridursi in misura significativa (3). Ricerche in questo settore sono ancora in corso.

Le ceneri pesanti sono formate sostanzialmente da ossidi di metalli; esse possono pertanto essere considerate come materie prime per la preparazione di vetri. La loro vetrificazione raggiunge il primo obiettivo di ridurne il volume dell'80% circa, prolungando la vita delle discariche, ma soprattutto il vetro prodotto è un **materiale assolutamente inerte ed eco-compatibile**.

In Giappone, il processo di vetrificazione è stato adottato da 24 inceneritori di rifiuti solidi urbani ed è allo studio il riutilizzo del vetro ottenuto (4). In Europa vi sono almeno due esempi di vetrificazione e riutilizzo delle scorie provenienti da inceneritori: a Bordeaux, Francia, ad un inceneritore è stato affiancato un impianto di vetrificazione con torcia al plasma che può trattare l'intera produzione di ceneri volanti del sito (5); a Karlsruhe, Germania, un inceneritore di rifiuti solidi urbani equipaggiato con un sistema di vetrificazione produce granulato vetroso, utilizzabile come materiale inerte per calcestruzzo (6). Anche in Italia è stato sviluppato un impianto pilota per la vetrificazione di rifiuti (Sveda srl, Treviso).

Recentemente, si è studiata la possibilità di utilizzare le scorie pesanti e le ceneri volanti per la produzione di vetri e vetro-ceramici (7-9), di fibre vetrose (10), di compositi a matrice vetrosa (11) o come materia prima per la produzione di cementi (12, 13).

Lo scopo di questo progetto, condotto presso il Politecnico di Torino e la Buzzi Unicem S.p.A., è quello di vetrificare, a costi relativamente contenuti, le ceneri pesanti provenienti da inceneritori di rifiuti solidi urbani e di studiare le potenzialità di utilizzo del vetro ottenuto, da solo o insieme ad altre scorie industriali, come materia prima per la fabbricazione di prodotti nel settore delle infrastrutture civili: produzione di piastrelle ceramiche, impiego nei cementi come materiale pozzolanico, aggregato e/o filler nei conglomerati cementizi e bituminosi.

2. PARTE SPERIMENTALE

2.1 Preparazione delle piastrelle ceramiche

La composizione chimica della cenere pesante, proveniente dall'inceneritore di rifiuti solidi urbani di

Vercelli (Vercelli Forno S.r.l. - Vercelli), è stata determinata mediante la spettroscopia di assorbimento atomico e la fluorescenza a raggi X. La vetrificazione di circa due tonnellate di ceneri pesanti è stata effettuata (presso la ditta Effetre, Murano-VE) in seguito a riscaldamento a 1400°C, senza l'aggiunta di alcun additivo e con un tempo di permanenza a questa temperatura di un'ora.

Le scorie industriali utilizzate in aggiunta al vetro, per la preparazione di piastrelle vetroceramiche, provengono da industrie della lavorazione di materiali ceramici, minerarie e delle leghe leggere.

La preparazione dei materiali vetroceramici (vetro + scoria industriale) è stata effettuata per sinterizzazione dei prodotti "verdi" in seguito allo studio del loro ritiro lineare in funzione della temperatura. I provini "verdi" sono stati preparati a partire da miscele di polveri contenenti 75% in volume di vetro e 25% in volume di scoria industriale per consolidazione mediante pressatura uniassiale a temperatura ambiente. Sono state determinate le condizioni ottimali per il processo di sinterizzazione dei "verdi", variando temperature e tempi di sinterizzazione.



Fig. 1 - Cenere pesante proveniente dall'inceneritore di Vercelli prima del processo di vetrificazione

È stata effettuata l'analisi morfologica (microscopia elettronica a scansione) dei campioni sinterizzati e l'analisi con diffrazione di raggi X. Per valutare la resistenza a flessione dei campioni è stata utilizzata la flessione a tre punti. Il modulo di Young del vetro e dei materiali sinterizzati è stato determinato con un metodo non distruttivo. La porosità totale dei materiali sinterizzati è stata misurata mediante porosimetria a mercurio. La durezza Vickers (HV) è stata misurata con un durometro (Volpert); infine, il coefficiente di dilatazione termica ed il rammollimento dilatometrico sono stati determinati mediante dilatomia.

2.2. Impiego in conglomerati cementati

Un campione significativo della produzione pilota di vetro effettuata presso la Effetre di Murano è stato consegnato ai laboratori di Trino della Buzzi Unicem S.p.A..

Sono state avviate due diverse sperimentazioni per valutare possibili impieghi, alla luce della potenziale reattività del vetro in miscela con il clinker da cemento

portland: utilizzo come “aggregato” per calcestruzzo (in sostituzione di ghiaia/pietrisco naturali) e come filler pozzolanico nei cementi. Le prove sono state condotte secondo le normative UNI vigenti.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1. Piastrelle ceramiche

In Fig. 1 è riportata una fotografia della cenere pesante prima del processo di vetrificazione. In Tabella 1 è riportata la composizione elementare, determinata con l'assorbimento atomico, della cenere pesante proveniente dall'inceneritore di Vercelli. Il contenuto di cloruri è pari allo 0,8%. Le ceneri pesanti sono costituite principalmente da ossidi di silicio, calcio, sodio, alluminio e ferro. Questi ossidi sono i costituenti tipici dei vetri.

Tabella 1 - Analisi chimica (% peso) delle scorie pesanti provenienti dall'inceneritore di rifiuti solidi urbani di Vercelli

Elemento	% peso
Si	19,1
Al	4,9
Fe	4,0
Cu	0,2
Mn	0,1
Pb	0,3
Cr	$5 \cdot 10^{-2}$
Ni	$5 \cdot 10^{-2}$
Zn	0,3
Ca	8,7
Mg	1,9
Na	8,1
K	1,5
Ti	0,7
altro	resto

Il processo di vetrificazione delle ceneri pesanti ha determinato una riduzione in volume di circa il 70% e ha portato all'inertizzazione dei potenziali agenti inquinanti, come è stato dimostrato dalle prove di rilascio effettuate secondo le normative UNI (14).

Il vetro ottenuto è di colore marrone scuro (Fig. 2) e la sua composizione chimica è riportata nella Tabella 2. I vetri contengono prevalentemente SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , CaO e Fe_2O_3 come è prevedibile dai risultati dell'analisi chimica delle ceneri pesanti.



Fig. 2 - Vetro ottenuto dalla vetrificazione delle ceneri pesanti provenienti dall'inceneritore di Vercelli

Tabella 2 - Analisi composizionale (% peso degli ossidi) del vetro ottenuto dal processo di vetrificazione di ceneri pesanti provenienti dall'inceneritore di Vercelli

Ossido	% peso
SiO_2	52,7
Al_2O_3	10,9
Fe_2O_3	5,5
MnO	0,1
CaO	14,8
MgO	3,3
Na_2O	7,4
K_2O	1,4
TiO_2	0,7
BaO	0,2
SO_3	0,4
altro	resto

Le temperature caratteristiche e le proprietà meccaniche del vetro ottenuto dalla vetrificazione della cenere sono confrontabili con quelle di molti vetri commerciali (14).

Questo vetro è stato utilizzato come materia prima per la produzione di piastrelle vetroceramiche in aggiunta ad altri materiali di scarto provenienti da industrie metallurgiche e minerarie.

Il processo di sinterizzazione è stato ottimizzato per i diversi provini “verdi” in base ai risultati di ritiro lineare, densità, resistenza a flessione, modulo elastico, durezza, etc., ottenuti variando i tempi e le temperature di trattamento; maggiori dettagli sperimentali sono riportati negli articoli (14) e (15). Nelle Fig. 3 e 4 sono riportate rispettivamente una micrografia al SEM e una fotografia di una piastrella prodotta a partire da cenere

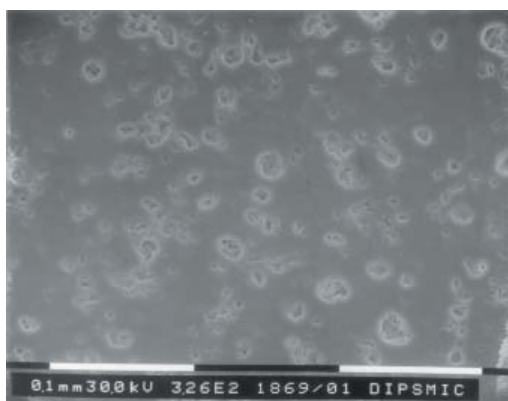


Fig. 3 - Micrografia al SEM di un vetro ottenuto dalla vetrificazione della cenere pesante

pesante vetrificata e da una scoria dell'industria metallurgica a base di allumina: il campione appare omogeneo e con una ridotta porosità. Il colore della piastrella può essere eventualmente modificato applicando una vetrinatura.

In Tabella 3 sono riportate le proprietà termiche, meccaniche e la densità delle piastrelle sinterizzate. Da questi risultati si deduce che il materiale ottenuto soddisfa le caratteristiche richieste dal settore piastrellifero (ad esempio la resistenza a flessione è molto maggiore del limite minimo richiesto di 12 MPa). Su alcuni campioni state effettuate misure preliminari di assorbimento di acqua: è stato misurato un assorbimento d'acqua pari a 2,6%; questo risultato corrisponde a piastrelle del tipo B1b secondo la classificazione delle piastrelle ceramiche UNI EN 87.

Tabella 3 - Caratteristiche e proprietà di piastrelle vetroceramiche ottenute a partire da materiale di scarto (ceneri pesanti vetrificate e scorie dell'industria metallurgica a base di allumina). Il tempo di permanenza alla temperatura di sinterizzazione è 1 ora

Temperatura di sinterizzazione (°C)	950
Densità (g/cm ³)	2,45 ± 0,05
Resistenza a flessione (MPa)	52,4 ± 2
Modulo di Young (GPa)	57 ± 1
Durezza Vickers	142 HV 32,5 ± 5
Porosità (%)	13,2
Coefficiente di dilatazione termica (10 ⁻⁶ · K ⁻¹)	7,4
Rammollimento dilatometrico (°C)	110 ± 20

In conclusione, a partire unicamente da materiali di scarto, si sono ottenuti, con un processo semplice e poco costoso (le temperature non superano i 950°C)

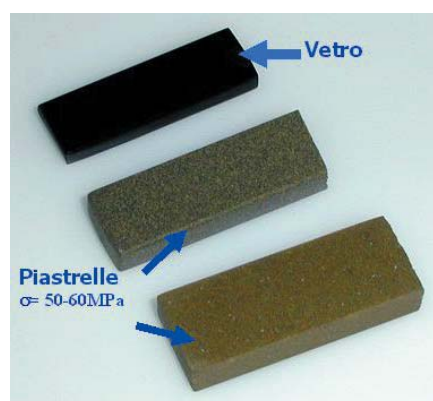


Fig. 4 - Vetro ottenuto dalla vetrificazione della cenere pesante e piastrelle prodotte con il vetro e altre scorie industriali

materiali con caratteristiche tali da renderne ipotizzabile l'utilizzo nel settore piastrellifero. I parametri del processo produttivo (tempo e temperatura) andranno riconsiderati nel caso di un'eventuale produzione industriale di queste piastrelle.

3.2 Impiego in conglomerati cementizi

Il vetro ottenuto dalla vetrificazione delle ceneri pesanti è stato utilizzato in sostituzione dell'aggregato per calcestruzzo (pietrisco, frazione 4/10 mm, pari a circa 600 kg/m³; ghiaia, frazione 10/20 mm, pari a circa 500 kg/m³) in percentuali variabili fino al 100 %. I manufatti sono stati conservati in camera umida (20±1 °C e >90% U.R.) per oltre 2 mesi, non si segnala evidenza di reazione alcali/aggregati, tipica invece quando si utilizza vetro comune.

I risultati delle prove di compressione fino a 28 giorni, effettuati sui provini preparati come descritto sopra con dosaggio di cemento CEM I 42.5 R pari a 290-300 kg/m³ e rapporto acqua/cemento di 0,55-0,60, hanno dato risultati incoraggianti, analoghi a quelli ottenuti per i provini in calcestruzzo preparati con aggregati tradizionali. Anche il modulo elastico, misurato secondo UNI 6556, risulta confrontabile con valori ottenuti da calcestruzzi tradizionali.

Si segnalano da un lato l'assenza di assorbimento di acqua da parte del vetro (aspetto estremamente favorevole per l'incremento delle resistenze a compressione), ma anche una lavorabilità non costante a parità di tutte le altre condizioni. Questo fenomeno è da attribuire alla presenza di spigoli vivi nel vetro utilizzato, a differenza dell'aggregato naturale che ha prestazioni migliori da questo punto di vista: la lavorazione industriale, che sarebbe necessaria per trasformare il vetro in aggregato per calcestruzzo, potrebbe determinare una riduzione di questo fenomeno e un allineamento delle prestazioni (in termini di lavorabilità e di mantenimento nel tem-

po) ai prodotti di normale uso.

Il vetro ottenuto dalla vetrificazione delle ceneri pesanti e' stato inoltre finemente macinato (con granulometrie interamente passanti a 90 e a 50 micron) e utilizzato in sostituzione del clinker da cemento portland fino al 20% per la preparazione di malte.

Il vetro finemente macinato evidenzia un'elevata attività pozzolanica (secondo UNI EN 196/5), nessuna influenza negativa sui tempi di presa e sulla richiesta d'acqua in pasta normale (secondo UNI EN 196/3) e buona attività idraulica.

Le malte preparate in conformità alla UNI EN 196/1, utilizzando le miscele sopra descritte, presentano un leggero miglioramento della lavorabilità (secondo UNI 7044) e resistenze a compressione confrontabili con il CEM I 42,5 R di riferimento, soprattutto nel caso di vetro macinato più finemente, a scadenze superiori ai 7 giorni e con quota di sostituzione non superiore al 10% rispetto al clinker da cemento portland.

In assenza di classificazione specifica delle scorie vetrificate all'interno della norma armonizzata per i cementi comuni UNI EN 197/1 e alla luce di questa prima serie di risultati preliminari, il vetro può essere utilizzato nei leganti idraulici come *filler* pozzolanico.

CONCLUSIONI

È ormai dimostrata la possibilità di vetrificazione e riutilizzo delle ceneri pesanti provenienti da vari inceneritori.

Importanti settori industriali quali per esempio i cementifici, i piastrellifici e le pavimentazioni stradali potrebbero utilizzare il vetro, in ragione di milioni di tonnellate l'anno, con notevoli vantaggi ambientali, quali ad esempio:

- ridurre significativamente il volume di rifiuti da destinare alla discarica, anzi potenzialmente recuperare energia e materia dalle discariche esistenti
- ridurre il consumo di materie prime naturali non rinnovabili, destinate alla produzione di leganti idraulici, conglomerati bituminosi e cementizi materie prime naturali non rinnovabili.

Riferimenti bibliografici

- (1) <http://www.sinanet.anpa.it/aree/Rifiuti/Documentazione/Europa.asp>
- (2) T. Sabbas, A. Poletti, R. Pomi, T. Astrup, O. Hjelm, P. Mostbauer, G. Cappai, G. Magel, S. Salhofer, C. Speiser, S. Heuss-Assbichler, R. Klein, P. Lechner,

- Management of municipal solid waste incineration residue, Waste Management 23 (2003) 61-68.
- (3) N. Lapa et al., Ecotoxicological assessment of leachates from MSWI bottom ashes, waste Management 22 (2002) 583-593.
- (4) S. Sakai and M. Hiraoka, "Municipal solid waste incinerator residue recycling by thermal process", Waste Manag. 20 (2000) 249-258.
- (5) <http://www.europlasma.com>
- (6) <http://www.thermoselect.com>
- (7) M. Romero, R. D. Rawlings and J. Ma. Rincon, "Development of a new glass-ceramic by means of controlled vitrification and crystallisation of inorganic wastes from urban incineration", J. Eur. Ceram. Soc., 19 (1999) 2049-2058.
- (8) L. Barbieri, A. M. Ferrari, I. Lancellotti, C. Leonelli, J. Ma. Rincón and M. Romero, "Crystallization of (Na₂O-MgO)-CaO-Al₂O₃-SiO₂ glassy systems formulated from waste products", J. Am. Ceram. Soc., 83 (10) (2000) 2515-2520.
- (9) M. Romero, R.D. Rawlings and J. Ma. Rincón, "Crystal nucleation and growth in glasses from inorganic wastes from urban incinerator", J. Non-Cryst. Sol., 271(2000) 106-118.
- (10) G. Scarinci, G. Brusatin, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, P. Colombo, S. Hreglich, R. Dall'Igna, "Vitrification of industrial and natural wastes with production of glass fibres", J. Eur. Ceram. Soc., 20 (2000) 2485-2490.
- (11) A. R. Boccaccini, M. Bucker, J. Bossert and K. Marszalek, "Glass matrix composites from coal fly-ash and waste glass", Waste Management, 17 (1) (1997) 39-45.
- (12) R. Kikuchi, "Recycling of municipal solid waste for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker", Res. Cons. and Rec., 31 (2001)137-147.
- (13) F. Andreola, L. Barbieri, A. Corradi, I. Lancellotti, A. Saccani, F. Sandrolini, Utilizzo di scorie vetrificate di inceneritore di RU come frazioni ad attività pozzolanica in conglomerati cementizi, Atti VI Congresso AIMAT, Modena, 2002.
- (14) M. Ferraris Milena Salvo, Federico Smeacetto, Laurent Augier, Luisa Barbieri, Anna Corradi and Isabella Lancellotti, "Glass matrix composites from solid waste materials", J. Eur. Ceram. Soc. 21 (4) (2001) 453-460.
- (15) P. Appendino, M. Ferraris, I. Matekovits and M. Salvo, Production of glass-ceramic bodies from the bottom ashes of municipal solid waste incinerators, J. Eur. Cer. Soc. 24 (5) (2004) 803-810.

USO DELLE CENERI PESANTI DA RSU COME AGGIUNTE MINERALI

Luca Bertolini¹, Maddalena Carsana¹, Davide Cassago¹, Alessandro Quadrio Curzio², Mario Collepari¹

¹Politecnico di Milano, Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica, luca.bertolini@polimi.it - ²Solena, Milano, aleqc@libero.it



INTRODUZIONE

Le ceneri pesanti prodotte dagli inceneritori di rifiuti solidi urbani (RSU) sono prevalentemente composte da silice amorfa (in genere più del 50%) e ossidi di alluminio, ferro e calcio [1-4]. Questi residui hanno, quindi, una composizione simile a quella delle ceneri volanti prodotte dalle centrali termiche a carbone (coal fly ash, FA), tradizionalmente impiegate come aggiunte pozzolaniche in grado di migliorare la durabilità delle opere in calcestruzzo armato. Per questa similitudine, le ceneri pesanti da RSU, una volta macinate finemente, possono manifestare caratteristiche pozzolaniche o idrauliche. L'impatto ambientale dell'industria del calcestruzzo potrebbe notevolmente ridursi se le ceneri pesanti da RSU potessero essere effettivamente utilizzate come aggiunte minerali. In tal caso, infatti, residui come le ceneri pesanti da RSU, che devono essere smaltite in grandi quantità in tutto il mondo, potrebbero essere convertite in una risorsa utile per il confezionamento di calcestruzzi di qualità e durevoli.

Alcuni ricercatori hanno effettivamente mostrato l'attività pozzolanica delle ceneri pesanti da RSU macinate, mostrando la loro reattività con la calce o con il clinker di cemento portland [5,6]. Tuttavia, finora non si sono potute impiegare come aggiunte minerali, principalmente a causa dello sviluppo di gas che si produce in seguito alla loro introduzione negli impasti cementizi. Nell'ambiente alcalino prodotto dall'idratazione del cemento portland, con pH attorno a 13, la corrosione di alcuni metalli, e principalmente dell'alluminio, può produrre in tempi brevi una elevata quantità di idrogeno gassoso. Dopo la posa e la vibrazione del calcestruzzo, questo gas resta intrappolato nel calcestruzzo fresco, portando alla formazione di una rete di bolle che determina una marcata riduzione della resistenza e un aumento della permeabilità

del calcestruzzo indurito.

Questa nota riassume i risultati di una ricerca volta allo sviluppo di trattamenti che consentono l'impiego delle ceneri pesanti da RSU come aggiunte minerali per calcestruzzi strutturali. I dettagli del lavoro sono illustrati nel riferimento [7].

PROVE

Le prove sono state eseguite con ceneri pesanti provenienti da diversi inceneritori del Nord Italia; queste sono state macinate sia a secco, con un mulino a sfere, sia ad umido, con un mulino a microsfele (ottenendo uno slurry con rapporto solido/liquido di 1:1) [7]. L'andamento nel tempo del pH degli slurry dopo la macinazione è stato rilevato con un elettrodo a vetro e un pH-metro. Sono stati confezionati calcestruzzi e malte nei quali si è sostituito il 30% di cemento portland con le ceneri macinate a secco e ad umido. Si sono utilizzati 440 kg/m³ di legante (70% cemento portland CEM I 52.5R e 30% di aggiunta minerale), rapporto acqua/cemento di 0,5 e 1700 kg/m³ di aggregato calcareo frantumato. Si sono inoltre realizzati tre impasti di riferimento rispettivamente con 100% di cemento, 30% delle tradizionali ceneri volanti da carbone e 30% di calcare macinato.

La resistenza a compressione è stata valutata su cubi di lato 100 mm per i calcestruzzi e su prismi 40x40x160 mm per le malte. Si è rilevato inoltre lo sviluppo nel tempo della resistività elettrica nei materiali saturi d'acqua. Per studiare l'effetto delle aggiunte sulla resistenza alla penetrazione dei cloruri, cubi di lato 150 mm sono stati sottoposti a cicli di asciugatura-bagnatura con una soluzione 35 g/L di cloruro di sodio; dopo diversi periodi di esposizione si sono rilevati i profili di penetrazione dei cloruri.

RISULTATI E DISCUSSIONE

La Tabella 1 mostra la composizione chimica delle

Tabella 1 - Composizione dei materiali utilizzati per le prove (percentuale dei principali elementi, esclusi i cloruri, espressa in termini di ossidi)

	Cemento CEM I 52.5R	Ceneri volanti da carbone	Ceneri pesanti RSU di Udine	Ceneri pesanti RSU di Desio	Ceneri pesanti RSU di Trezzo d'Adda	Ceneri pesanti RSU di Bergamo	Ceneri pesanti RSU di Vercelli
Al ₂ O ₃	4,7	6,1	10,3	6,4	10,7	10,3	7,3
Na ₂ O	0,2	0,19	2,5	1,7	2,5	1,9	1,5
K ₂ O	0,84	0,19	0,71	0,4	0,55	0,56	0,7
SO ₃	3,5	0,79	1,21	3,43	0,69	0,7	1,0
CaO	62,7	6,5	13,2	15,9	18,7	15,6	11,5
Fe ₂ O ₃	1,93	4,5	14,2	6,5	9,0	4,2	8,2
MgO	2,0	1,7	2,0	2,0	2,9	1,8	2,1
MnO ₂	0,07	0,05	0,06	0,16	0,21	0,09	0,12
TiO ₂	0,19	0,39	0,38	0,85	—	—	—
SiO ₂	23,7	78,5	53,4	61,9	48,9	62,8	64,2

ceneri da RSU studiate in questo lavoro. Una prima serie di prove è stata effettuata con ceneri prelevate dall'inceneritore di Udine. Dopo la macinazione a secco, queste ceneri hanno raggiunto una finezza corrispondente ad un passante al 50% (d_{50}) di circa 15 μm ; con la successiva macinazione a umido d_{50} è diminuito a circa 3 μm . La Fig. 1 confronta l'andamento nel tempo della resistenza a compressione dei diversi calcestruzzi. Il calcestruzzo di riferimento con 440 kg/m³ di cemento portland e rapporto a/c di 0.5 ha mostrato una resistenza a compressione media a 28 giorni di 64 MPa. La sostituzione del 30% di cemento con calcare (materiale inerte) ha ridotto la resistenza a 43 MPa, mentre la sostituzione con 30% di ceneri volanti da carbone (una tipica aggiunta pozzolanica) ha portato a una resistenza di 53 MPa.

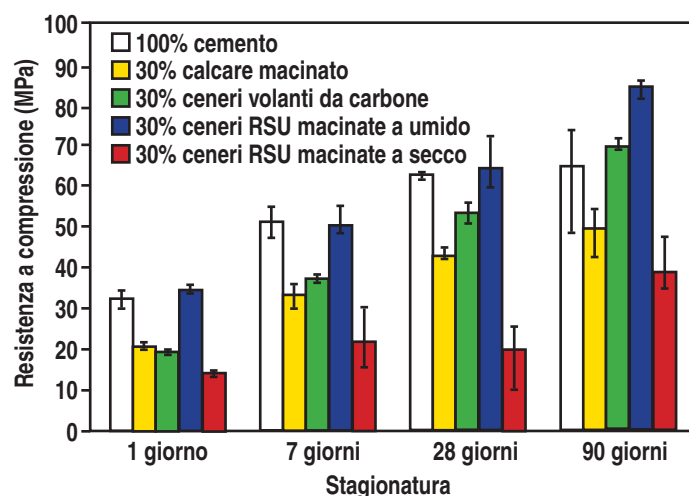


Fig. 1 - Resistenza a compressione in funzione del tempo dei calcestruzzi di riferimento (100% cemento, 30% calcare macinato e 30% ceneri volanti da carbone) e del calcestruzzo con 30% di ceneri pesanti da RSU di Udine macinate a secco e a umido (slurry)

Il calcestruzzo con l'aggiunta di ceneri da RSU macinate a secco ha mostrato una rilevante espansione durante la presa, in seguito all'intrappolamento di bolle di idrogeno prodotto dalla reazione catodica del processo di corrosione delle particelle di alluminio presenti nelle ceneri (Fig. 2). Nel calcestruzzo confezionato con le ceneri da RSU macinate ad umido non si è, invece, osservata alcuna espansione. In questo caso nell'impasto si è introdotto direttamente lo slurry prodotto dalla macinazione (l'acqua dello slurry è stata considerata nel calcolo dell'acqua d'impasto). Il conglomerato ha mostrato una resistenza a compressione media a 28

giorni di stagionatura simile a quella del calcestruzzo di riferimento con 100% di cemento; si sono quindi ottenute prestazioni migliori rispetto al calcestruzzo a cui si sono aggiunte le ceneri volanti da carbone (FA). Anche a lunghe stagionature il calcestruzzo con le ceneri pesanti da RSU macinate ad umido ha evidenziato resistenze superiori di quelle dei calcestruzzi con 100% di cemento e con 30% FA; ad esempio in Fig. 1 sono mostrati i dati ottenuti a 90 giorni.

Il processo di macinazione ad umido ha avuto un ruolo chiave nel prevenire l'espansione durante la presa. Infatti, fin dall'inizio della macinazione ad umido si è osservata un'abbondante produzione di bolle di gas (idrogeno), dovuta alla corrosione delle nuove superfici delle particelle di alluminio prodotte dalla macinazione stessa. Il pH dello slurry si è portato spontaneamente a valori di circa 11.5, sufficienti per promuovere la corrosione dell'alluminio, ancorché a velocità inferiore rispetto a quella che determina la fase liquida della pasta di cemento idrata



Fig. 2 - Bolle prodotte dall'idrogeno intrappolato nella matrice cementizia del calcestruzzo confezionato con le ceneri pesanti da RSU macinate a secco

(che ha pH superiore a 13) [7]. Si è quindi dedotto che, in funzione delle dimensioni delle particelle di alluminio dopo la macinazione, dell'effettiva velocità di corrosione dell'alluminio nello slurry e del tempo trascorso, le particelle di alluminio possano essere in buona parte consumate prima che lo slurry venga introdotto nell'impasto del calcestruzzo. In effetti, se questo accade, non può più avvenire alcuna espansione significativa nel calcestruzzo fresco. Con le ceneri di Udine hanno sono state sufficienti 48 ore di riposo dopo la macinazione a umido per esaurire le reazioni chimiche che portano allo sviluppo di gas.

La progressiva idratazione delle paste di cemento con aggiunta delle ceneri pesanti da RSU macinate ad umido si è potuta verificare indirettamente anche attraverso misure di resistività elettrica. La Fig. 3 mostra, ad esempio, la resistività rilevata dopo 28 giorni di stagionatura sui diversi calcestruzzi (conservati in camera di stagionatura a 23°C). Il calcestruzzo con l'aggiunta delle ceneri macinate ad umido ha mostrato la resistività elettrica più elevata (circa 200 Ω·m), persino superiore a quella del calcestruzzo con 30% FA (circa 150 Ω·m). Questo risultato supporta l'ipotesi che sia avvenuta una reazione pozzolanica anche nel caso delle ceneri da RSU che ha portato all'affinamento dei pori capillari tipico di questa reazione.

L'effetto benefico della reazione pozzolanica si è potuto osservare anche in relazione alla penetrazione dei cloruri. La Tabella 2, ad esempio, riporta i coefficienti di diffusione apparenti calcolati interpolando i profili del contenuto di cloruri misurati sui provini sottoposti a cicli di asciugatura e bagnatura con la soluzione con cloruri. Il calcestruzzo con l'aggiunta delle ceneri pesanti da RSU macinate ad umido mostra il minore coefficiente di diffusione. Questo comportamento può essere ancora spiegato dall'affinamento dei pori e dalla conseguente diminuzione di porosità del calcestruzzo, prodotti dalla reazione pozzolanica (anche se non si può escludere che abbia contribuito un parziale riempimento dei pori da parte delle particelle più fini dello slurry).

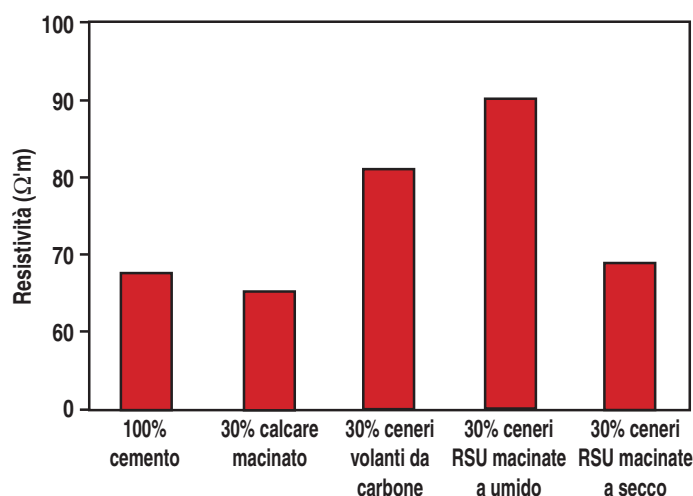


Fig. 3 - Resistività elettrica dei calcestruzzi con diversi tipi di aggiunte minerali dopo 28 giorni di stagionatura

Tabella 2 - Valori del coefficiente di diffusione apparente (D_{app}) e del contenuto superficiale di cloruri (C_s) calcolati interpolando i profili di penetrazione misurati dopo 6 e 15 mesi di esposizione ai cicli di asciugatura e bagnatura con la soluzione 35 g/L di NaCl, utilizzando la relazione:

$$C(x) = C_s \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{\sqrt{2D_{app} \cdot t}} \right)$$

Materiale	6 mesi		15 mesi	
	C_s	D_{app}	C_s	D_{app}
100% cemento	0,63	1,9	1,06	0,86
30% calcare macinato	0,52	11,6	0,48	7,2
30% ceneri volanti da carbone	0,46	1,8	1,27	0,77
30% ceneri pesanti RSU macinate ad umido	0,9	0,58	1,37	0,58
30% ceneri pesanti RSU macinate a secco	0,47	4,2	1,26	2,06

Per confermare i risultati precedenti, sono state effettuate ulteriori prove utilizzando le ceneri provenienti dagli altri inceneritori (Tabella 1). Per quanto riguarda gli effetti legati allo sviluppo di idrogeno si sono osservate notevoli differenze fra i diversi tipi di cenere pesante da RSU. Infatti, il tempo richiesto per consumare l'alluminio contenuto nello slurry (ed eventuali altri metalli che possono contribuire allo sviluppo di gas) è variato da meno di un giorno a diversi mesi. Di conseguenza si è studiato l'effetto di diversi fattori che possono influenzare il tempo per l'esaurimento della reazione di sviluppo di idrogeno nello slurry, allo scopo di individuare dei trattamenti che consentissero di ridurlo a valori accettabili (ad esempio pochi giorni), indipendentemente dalla provenienza delle ceneri e dal campione considerato. Si è studiata l'influenza dei seguenti parametri: a) la finezza delle ceneri pesanti da RSU nello slurry prodotto dalla macinazione ad umido; b) la temperatura dello slurry durante la macinazione e il successivo periodo di riposo; c) le condizioni di agitazione dello slurry durante il periodo di riposo; d) la possibile accelerazione dello sviluppo di idrogeno nello slurry attraverso l'aumento del suo pH; e) la riduzione dei metalli non-ferrosi nelle ceneri pesanti, prima della macinazione a umido. Si è così potuto verificare che il pH dello slurry ha un ruolo fondamentale. Per esempio, con il campione di ceneri provenienti dall'inceneritore di Vercelli, con le quali si è ottenuto uno slurry con pH di solo 9,6 (Fig. 4), la reazione di sviluppo di gas non si è esaurita nemmeno dopo un mese. Tuttavia si è potuto mostrare come una minima aggiunta di cemento allo slurry (70 g/L) consenta di raggiungere e mantenere un pH di circa 12,6. Questo è stato sufficiente per esaurire in alcuni giorni la reazione ed evitare l'espansione quando lo slurry è stato utilizzato per confezionare delle malte. La Fig. 5 mostra come la malta confezionata con l'aggiunta dello slurry di Vercelli trattato con cemento abbia raggiunto una resistenza a compressione superiore a quella di una malta di riferimento con 30% di ceneri volanti da carbone. Dopo 90 giorni di stagio-

natura la resistenza ha persino superato quella della malta con 100% di cemento.

CONCLUSIONI

Le ceneri pesanti prodotte dagli inceneritori di rifiuti solidi urbani (RSU), sottoposte ad un processo di macinazione ad umido, presentano caratteristiche tali da poter essere utilizzate come aggiunte minerali per la produzione di calcestruzzi e malte e contribuiscono attivamente all'aumento della resistenza e alla diminuzione della permeabilità.

Quando le ceneri pesanti da RSU sono aggiunte agli impasti dopo la sola macinazione a secco, sia la resistenza sia la permeabilità del calcestruzzo indurito sono influenzate negativamente dall'intrappolamento di bolle di gas. Questo è la conseguenza dell'idrogeno prodotto dalla reazione catodica della corrosione delle particelle di alluminio che sono contenute nelle ceneri. Viceversa, la macinazione ad umido può consentire di prevenire lo sviluppo di gas negli impasti freschi; in questo caso le reazioni di sviluppo di idrogeno iniziano nello slurry prodotto dalla macinazione e proseguono finché, dopo un certo tempo, si esauriscono, cosicché lo slurry può essere aggiunto in sicurezza agli impasti cementizi. Tuttavia si è osservata una grande variabilità del tempo necessario per l'esaurimento di queste reazioni. Per alcune ceneri sono stati sufficienti due giorni, mentre in altri casi anche tempi più lunghi, dell'ordine di due mesi, non sono stati sufficienti. Ulteriori prove hanno mostrato che il pH dello slurry può avere un ruolo primario e che l'aggiunta di piccole quantità di cemento può essere sufficiente per aumentare il pH dello slurry fino ad esaurire in tempi brevi lo sviluppo di gas.

Nei casi in cui si è potuto prevenire il rigonfiamento dell'impasto, le ceneri pesanti da RSU macinate ad umido hanno evidenziato gli effetti benefici della reazione pozzolanica in termini sia di resistenza a compressione sia di resistenza alla penetrazione delle specie aggressive.

BIBLIOGRAFIA

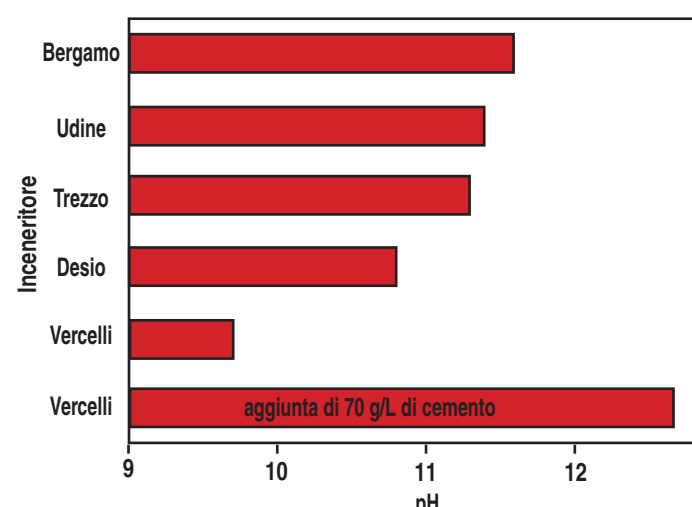


Fig. 4 - Valori di pH misurati sugli slurry (rapporto solido/liquido 1:1) prodotti dalla macinazione a umido delle ceneri pesanti di diversi inceneritori

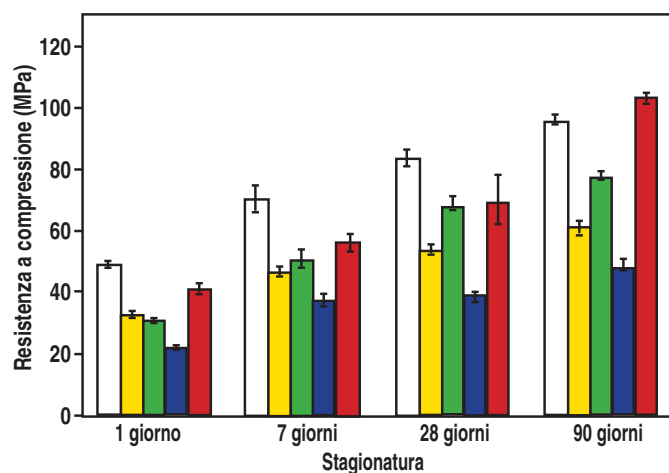


Fig. 5 - Resistenza a compressione in funzione del tempo di malte di riferimento (100% cemento, 30% calcare macinato e 30% ceneri volanti da carbone) e malte con 30% di ceneri pesanti da RSU di Vercelli (prima e dopo l'aggiunta di cemento per aumentare il pH dello slurry)

- [1] J. Pera, L. Coutaz, J. Ambroise, M. Chababbet, *Use of incinerator bottom ash in concrete*, Cement and Concrete Research, 27 (1) (1997) 1-5.
- [2] R. Kikuchi, *Recycling of MSW for cement production: pilot-scale test for transforming incineration ash of solid waste into cement clinker*, Resources, Conservation and Recycling, 31 (2001) 137-147.
- [3] G. Pecqueur, C. Crignon, B. Quénee, *Behaviour of cement-treated MSWI bottom ash*, Waste Management, 21 (2001), 229-233.
- [4] M. M. C. Alkemade, M. M. T. Eymael, *How to prevent expansion of MSWI bottom ash in road construction?* in: J. J. M. Goumans, H. A. Van der Sloot, T. G. Aalbers (Eds.) *Environmental aspects of construction with waste materials*, Studies in environmental science, Elsevier Science, Amsterdam (1994) 863-874.
- [5] K.A. Paine, R.K. Dhir, V.P.A. Doran, *Unprocessed and processed incinerator bottom ash as a cement bound material* in R.K.Dhir, T.D.Dyer, K.A. Paine (Eds.) "Use of incinerator ash" Proceedings of the International Symposium organized by the Concrete Technology Unit, University of Dundee (UK) 20-21/3/2000.
- [6] A. Macias, E. Fernandez, S. Goñi, A. Guerrero, *Valorización de las cenizas de incineración de residuos sólidos urbanos en los materiales de construcción* (2001), Papel de los sectores cementero y de la construcción en la gestión y reciclado de residuos, CSIC, Madrid.
- [7] L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Quadrio Curzio, M. Collepardi, *MSWI ashes as mineral additions in concrete*, Cement and Concrete Research (2004), 34 (10) (2004) 1899-1906.
- [8] M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, *Penetration of chloride ions into cement pastes and concretes*, Journal of the American Ceramic Society, 55 (1972) 534-535.



Applicazioni delle tecniche sol-gel

Giovanna Brusatin, Massimo Guglielmi

Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Meccanica – Settore Materiali - giovanna.brusatin@unipd.it, massimo.guglielmi@unipd.it

1. INTRODUZIONE

Le tecniche tradizionali con cui si produce il vetro prevedono l'utilizzo di alte temperature. Da oltre 20 anni, si è affermato un nuovo campo di ricerca sui materiali che consente di produrre materiali ceramici e vetrosi: la tecnica *sol-gel* (1). Essa consiste in una serie di reazioni di polimerizzazione inorganica che avvengono a basse temperature ($<100^{\circ}\text{C}$) e portano alla formazione di oligomeri e polimeri di ossido metallico (silicio, alluminio, titanio, zirconio, ecc.). La soluzione in cui sono disperse queste strutture polimerizzate è una sospensione colloidale detta *sol*. La conversione della sospensione in un reticolo rigido interconnesso in seguito all'accrescimento e unione di queste strutture polimeriche con la formazione di un reticolo continuo costituisce la trasformazione da *sol* a *gel*. Qui di seguito si descriveranno gli aspetti più generali del processo *sol-gel*, i materiali finora sintetizzati con questo metodo e alcune fra le più importanti applicazioni nel campo dell'edilizia.

Nella Fig. 1 è schematicamente illustrato il processo di trasformazione da *sol* a *gel* e dei prodotti ottenibili (aerogel, xerogel, deposizione di film, ecc.).

A seconda che il *gel* sia di tipo particellare o polimerico si ottengono rispettivamente sferette dense con diametro di circa 100 nm (Fig. 2) o strutture ramificate (Fig. 3).

Nella Fig. 4 sono schematicamente mostrati i vari processi *sol-gel* illustrati in dettaglio nei prossimi paragrafi.

2. XEROGEL

Per essiccazione del gel si ottiene lo *xerogel* che presenta ancora un'elevata concentrazione di OH sulla superficie dei pori nanometrici con porosità del 30-70% per il *gel* polimerico (Fig. 3) e del 70-80% per il *gel* particellare (Fig. 2).

Il successivo trattamento termico ($500-800^{\circ}\text{C}$) delle polveri o dello *xerogel* consente di ottenere la densificazione e, per temperature più elevate, la totale eliminazione dei pori ($800-1200^{\circ}\text{C}$). Un vetro di SiO_2 ottenuto densificando un gel di silice (polimerico) è del tutto equivalente in struttura e densità ad un vetro ottenuto per fusione e sinterizzazione di polveri.

I vetri massivi ottenuti con la tecnica *sol-gel* furono ottenuti già negli anni '70; tuttavia il successo della tecnica *sol-gel* non sta nell'ottenimento di vetri massivi la cui produzione richiede lunghi tempi di essiccazione e processo (infatti essa non si è mai sostituita al processo tradizionale di ottenimento del vetro nella produzione di vetro cavo o piano e di fibre di vetro) ma nella possibilità di ottenere

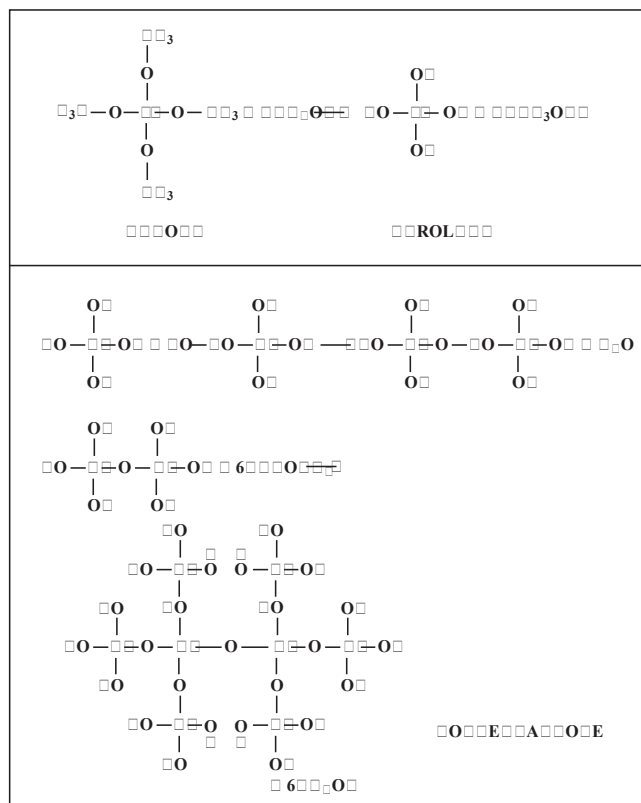


Fig. 1 - Reazione di IDROLISI e CONDENSAZIONE

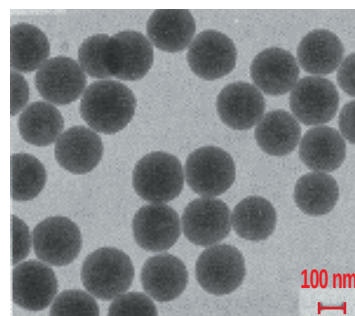


Fig. 2 - Struttura delle particelle ottenute da un sol di silice

ricoprimenti più o meno spessi, polveri ed aerogel.

3 - AEROGEL

I *gel* possono anche essere essiccati, più facilmente, in con-



Fig. 3 - Struttura delle particelle ottenute da un sol polimerico in cui si formano strutture debolmente ramificate

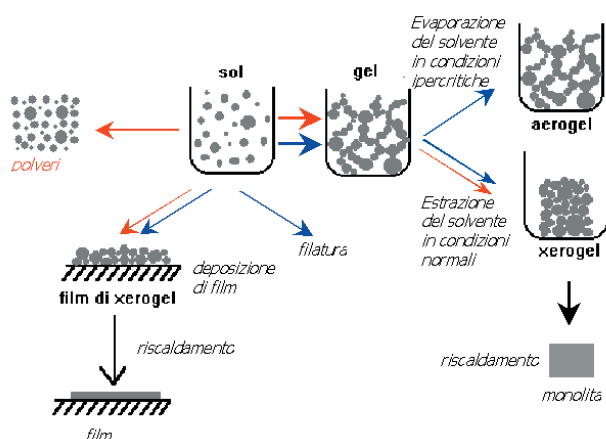


Fig. 4 - Schema del processo sol-gel e dei prodotti ottenibili

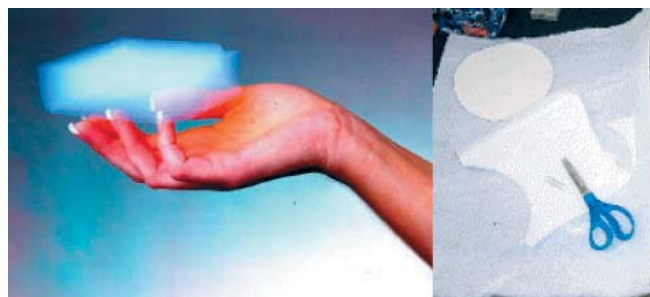


Fig. 5 - Esempi di aerogel

dizioni supercritiche in un'autoclave per ottenere i cosiddetti aerogel (Fig. 5): rimuovendo il liquido dai pori sopra la temperatura e pressione critiche del liquido, non esiste distinzione tra la fase liquida ed il vapore e si elimina ogni interfaccia liquido-vapore; si elimina quindi anche la pressione capillare che è causa di tensioni e fratture. In queste condizioni sono stati preparati gel inorganici di dimensioni 19.5x19.5x3 cm (1).

I Nanogel® sono aerogel di silice i cui pori di dimensione nanometrica determinano eccezionali proprietà di isolamento termico, in svariate applicazioni e vengono utilizzati granuli di aerogel con cui si producono per estrusione o stampaggio pezzi massivi, dopo aggiunta di un legante. L'aggiunta di ossido di Ti o nerofumo può inoltre ridurre il trasferimento di

calore per irraggiamento. Ricerche sviluppate dalla NASA e dalla Aspen Aerogel hanno portato all'utilizzo di questi solidi. Essi sono i più leggeri esistenti sulla terra con densità mille volte inferiori a quelle del vetro e denominati spesso "solid smoke", utilizzati ad esempio per l'isolamento in veicoli spaziali e per dispositivi di raccolta di polveri interstellari.

4 - DEPOSIZIONE DI FILM

La deposizione di film sottili è relativamente semplice e poco costosa e costituisce perciò l'aspetto tecnologicamente più importante del processo *sol-gel* che vede applicazioni in diversi campi: rivestimenti con proprietà ottiche non-lineari, antiriflesso, passivanti, resistenti all'abrasione, conduttori o semiconduttori, porosi come supporto per catalizzatori.

I metodi di deposizione più comunemente utilizzati sono detti per *spinning*, *dipping* e *spraying*. Un nuovo metodo di deposizione sfrutta la formazione di un menisco tra un film di soluzione e il substrato in movimento. Anche la deposizione elettroforetica e termoforetica vengono talvolta impiegate.

Il cosiddetto *dipping* (2) consiste nell'immergere un substrato nella soluzione e nell'estrarlo dal liquido con velocità controllata. Il liquido, soggetto alla forza di gravità, tende a scorrere verso il basso e lo strato, che si è depositato sul substrato, si assottiglia. Contemporaneamente il solvente evapora dalla sua superficie finché il film gelifica e il suo spessore si stabilizza ad un valore determinato. Quest'ultimo dipende principalmente dalla velocità di estrazione, dalla concentrazione e dalla viscosità della soluzione. Con questo metodo di deposizione si possono ricoprire superfici anche molto estese, infatti questo metodo è stato impiegato dalla *Schott Glass Technologies Inc.* per rivestire vetri di finestre di dimensioni fino a 4x5 metri. Questo metodo di deposizione richiede che l'apparato impiegato per estrarre il substrato sia libero da vibrazioni che renderebbero il ricoprimento eterogeneo per spessore. Inoltre, estraendo un substrato con superfici piane e parallele ad angoli variabili per inclinazione è possibile depositare spessori diversi sulle due facce, con la possibilità di realizzare filtri ottici interferenti.

La deposizione per *spinning* (3) viene generalmente usata nell'industria della microelettronica per ricoprire *wafer* di silicio con *fotoresist*. Questa tecnica è veloce e che richiede una bassa quantità di soluzione per ricoprire il substrato. Anche solo poche gocce, infatti, vengono depositate sulla sua superficie posta in rotazione con una velocità controllata. Questa tecnica, inoltre, è particolarmente adatta al rivestimento di oggetti di piccole dimensioni (oggetti di grandi dimensioni sono difficili da rivestire uniformemente) o leggermente curvi. Il liquido quindi si spande sotto l'azione della forza centrifuga fino a ricoprire tutta la superficie, quello in eccesso viene eliminato ed avviene l'evaporazione del solvente.

5 - MATERIALI IBRIDI SOL-GEL

Tra le possibilità più interessanti offerte dal metodo *sol-gel* vi è la sintesi di materiali ibridi organico-inorganici, in cui, grazie proprio alla metodologia *sol-gel*, è possibile combinare a livello nanometrico componenti inorganiche tipiche dei vetri tradizionali e organiche (ad esempio pigmenti colorati di tipo organico, molecole bio-attive, polimeri). Infatti, i materiali ibridi organico-inorganici sono una classe di materiali con proprietà intermedie tra i vetri ed i polimeri organi-

ci. Essi trovano applicazione in un'ampia gamma di sistemi e dispositivi allo stato solido di nuova generazione con caratteristiche funzionali nanostrutturate, ma anche come rivestimenti protettivi su materie plastiche e, in generale, come rivestimenti funzionali spessi (spessori di parecchie decine di μm , non ottenibili con rivestimenti *sol-gel* inorganici). In particolare le proprietà funzionali possono essere ottenute modificando le caratteristiche della componente organica o variando la composizione anche del reticolo inorganico.

L'interesse scientifico e tecnologico per questi processi di sintesi è attualmente altissimo per le potenzialità che essi sembrano offrire nella preparazione di materiali funzionali, e richiede una conoscenza di base adeguata per il controllo dei prodotti e delle loro proprietà.

6 - APPLICAZIONI DI RIVESTIMENTI SOL-GEL

I rivestimenti *sol-gel* trovano numerose applicazioni. Ricoprimenti porosi antiriflettenti sono stati sviluppati grazie all'utilizzo di film porosi il cui indice di rifrazione può essere abbassato fino a 1,2 o mediante la deposizione di multistrati con indici di rifrazione e spessori controllati (ad esempio come quelli commercializzati dalla Toyota in pannelli strumentali dei cruscotti delle auto).

I rivestimenti con proprietà elettrocromiche (i materiali elettrocromici cambiano colore se sottoposti all'azione di un campo elettrico) sono stati sviluppati da tempo, ma solo di recente hanno raggiunto prestazioni accettabili per la velocità di modifica e intensità di colorazione; ad es. la NTERA Ltd ha sviluppato uno schermo elettrocromico (NanoChromics™) utilizzando film *sol-gel* nanostrutturati di ossidi semiconduttori.

Per quanto riguarda le applicazioni architettoniche, già da molti anni, la Schott produce milioni di metri quadrati all'anno di rivestimenti ottici per finestre (2) riflettenti all'esterno in cui l'assorbimento della luce è controllato mediante inserimento di Pd in film di TiO_2 riflettenti (Fig. 6).

Tra le applicazioni attraenti dei rivestimenti ibridi *sol-gel*, e talune già in commercio, possono essere citate: i rivestimenti "easy to clean" caratterizzati da energia superficiale bassissima (fino a 18 mN/m^2) che conferisce caratteristiche di super-idrofobicità, così come i rivestimenti super-idrofobici con effetto antiappannante, colorazione di bottiglie riciclabili mostrate in Fig. 7, rivestimenti di schermi TV contenenti cromofori organici (4), enzimi intrappolati in matrici ibride *sol-gel* (5) e rivestimenti conduttori e antiriflesso su plastiche come è mostrato in Fig. 8.

BIBLIOGRAFIA

- (1) C. J. Brinker, G. Scherer, Sol-Gel Science, the Physics and Chemistry of Sol-Gel processing. Academic press, San Diego (1989)
- (2) D. Avnir, V. R. Kaufman, J. non-Cryst. Sol. 192 (1987) 180
- (3) B.E. Yoldas, Amer. Ceram. Soc. Bull. 54 (1975) 286
- (4) S. Henning, L. Svesson, Physica Scripta 23 (1981) 697
- (5) L. E. Scriven in Better Ceramics Through Chemistry III, C. J. Brinker, D. E. Clark, D. R. Ulrich Eds. Mater. Res. Soc., Pittsburg, PA, 1988, p. 717
- (6) D. E. Bornside, C. W. Macosko, L. E. Scriven, J. Imaging Tech. 13 (1987) 122

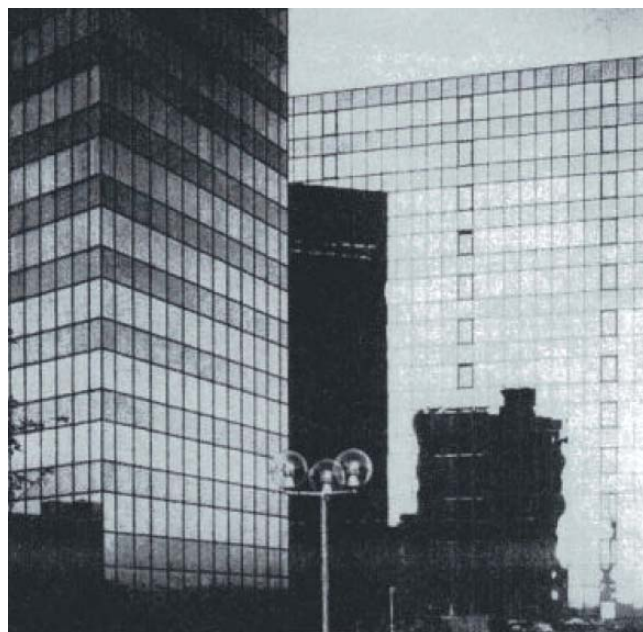


Fig. 6 - Rivestimenti IROX® prodotti dalla Schott: il film di TiO_2 determina il controllo della riflettività, il Pd in esso contenuto determina il controllo

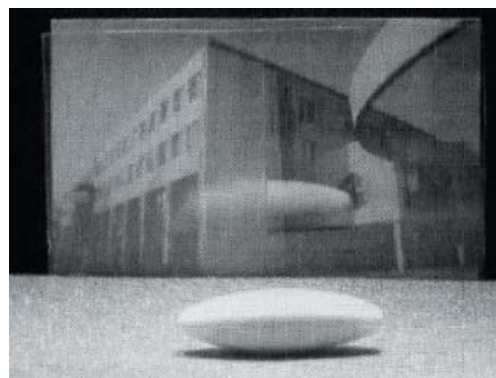


Fig. 7 - Immagine posta dietro un pannello di plastica rivestita per metà (a sinistra) con un film antiriflettente e conduttore



Fig. 8 - Bottiglie di vetro rivestite con film ibridi colorati che ne consentono la riciclabilità poiché non necessitano della classificazione per colore e ne migliorano le proprietà meccaniche



I MATERIALI LAPIDEI IMPIEGATI NELL'EDILIZIA

Emanuela Croce, Glenda Fazio

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

La pietra rappresenta ed ha rappresentato il materiale da costruzione per eccellenza in tutte le epoche storiche; ciò si deve alla sua reperibilità, resistenza e durezza, pregi questi che permettono di mettere in secondo piano le difficoltà di estrazione, lavorazione e trasporto.

L'importanza della roccia e delle formazioni rocciose in generale, si attesta già agli albori della civiltà umana con l'utilizzo di grotte naturali come riparo e abitazione, ma con il progredire dello sviluppo tecnico e tecnologico l'uomo ha imparato a sfruttare le caratteristiche degli affioramenti rocciosi per realizzare delle grotte artificiali da adibire sia ad esigenze abitative, che di culto. Splendidi esempi di tali "scavi nella roccia" si riscontrano in molte civiltà geograficamente e cronologicamente anche molto distanti tra loro: le grandi facciate a ordini sovrapposti delle tombe nabatee di Petra in Giordania scavate nell'arenaria multicolore (Fig. 1), le chiese bizantine della Cappadocia realizzate in formazioni vulcaniche, i "sassi" di Matera, ancora oggi in uso, realizzati negli affioramenti di calcare tenero.

Ma quando le caratteristiche geologiche delle formazioni affioranti lo permettono e quando le esigenze delle popolazioni lo richiedono, le rocce sono utilizzate soprattutto come materiale da costruzione vero e proprio a partire dalle strutture murarie, sia in grandi blocchi, più o meno lavorati e messi in opera senza malta, sia in piccoli blocchi o conci, lavorati e messi in opera con l'ausilio delle malte di allettamento. E proprio queste ultime rappresentano forse il più grande esempio dello sviluppo tecnologico legato all'utilizzo dei materiali lapidei per l'edilizia; l'uomo è riuscito a trasformare le rocce, per realizzare quello che in natura non era disponibile, in base alle proprie esigenze costruttive e alle caratteristiche della materia prima: malte aeree, idrauliche, pozzolaniche, cementizie. Un discorso a parte meritano le malte a "coccio pesto", che mettono insieme almeno due prodotti di trasformazione del materiale lapideo tal quale: la cottura della roccia calcarea per ottenere calce e la realizzazione delle terrecotte, una parte delle quali utilizzate comunque in edilizia (laterizi), a partire dall'argilla (Fig. 2).

La pietra poi è il principale materiale utilizzato per gli elementi edilizi di sostegno, di copertura, di rivestimento, di pavimentazione e di decoro. Elementi di sostegno sono gli archi, le volte, le strutture triliti, i pilastri e le colonne; queste ultime, in particolare, dalle forme e dimensioni diversificate a seconda delle esigenze costruttive, dei luoghi e dei periodi storici, sono costituite da monoliti o da rocchi sovrapposti. (1)

Per quanto riguarda le coperture vengono utilizzate sottili lastre di pietra; in questi casi l'utilizzo è peculiare, a volte persino caratterizzante, di zone geografiche nelle quali affiorano formazioni geologiche che permettono di cavare

il materiale lapideo in grandi e sottili lastre.

Le pavimentazioni, i rivestimenti e le decorazioni in genere, mettono in campo tutta la serie dei materiali lapidei disponibili in natura. In questi contesti, più che in altri, si impiegano materiali lapidei anche di scarse qualità meccaniche, focalizzando l'attenzione sulle caratteristiche estetiche. Se il pregio estetico non è accompagnato dalle qualità fisico-tecniche del materiale, si ricorre a vari espedienti migliorativi che ne adattano le proprietà a soluzioni di messa in posto assai diversificate. Il connubio tra la scelta di materiali lapidei molto belli, ma non dotati di una elevata reperibilità o di prestazioni tecniche elevate, così come l'impossibilità di cavare blocchi o lastre di



Fig. 1 - El Deir, Il Monastero - Petra (Giordania)



Fig. 2 - Sezione lucida di una malta a coccio pesto



Fig. 3 - Opus lapilli, Mosaico di Pella (Macedonia)

grandi dimensioni, ha dato vita ad una grande varietà di pavimentazioni e rivestimenti: tutti i tipi di mosaico, da quello composto da poche tessere monocrome inserite in un battuto di malta a coccio pesto (*opus signinum*), o costruito con ciottoli di fiume (*opus lapilli*) (Fig. 3), fino a quello costituito da tessere lapidee molto piccole disposte a formare disegni estremamente particolareggiati, Fig. 4 (*opus tessellatum*, *opus vermiculatum*); le decorazioni pavimentali o parietali in *opus sectile* (Fig. 5) con l'impiego di materiali lapidei pregiati e rari, sistemati a comporre motivi geometrici; il terrazzo veneziano, originariamente formato da frammenti di materiale lapideo vario di diversa pezzatura, inseriti in modo irregolare all'interno di vari strati di malta a base di coccio pesto e calce aerea. Si potrebbero citare innumerevoli esempi di pavimenti e decorazioni dei tipi suddetti, realizzati in maniera magistrale, tanto da assurgere al livello di opere d'arte, ma non bisogna dimenticare che la spinta iniziale allo sviluppo di quelle che possiamo definire forme d'arte è legata esclusivamente all'esigenza di utilizzare materiali poco reperibili, scadenti, o di riciclo. (1, 2)

CRITERI DI IMPIEGO DELLE ROCCE IN EDILIZIA

I criteri da considerare per la scelta, l'utilizzo e la messa in opera dei materiali lapidei sono essenzialmente: il fattore geologico, riferito alla scala degli affioramenti geologici e delle cave; la qualità petrografica relativa alle



Fig. 4 - Mosaico della Villa del Casale, Piazza Armerina (Enna)

caratteristiche chimiche, mineralogiche e fisiche del materiale impiegato; la convenienza economica relativa allo sfruttamento di un affioramento; le qualità estetiche del materiale. (3, 4)

La valutazione del fattore geologico è determinata dall'estensione e dalla morfologia dell'affioramento, dalla tipologia volumetrica del materiale coltivabile e dalle modalità di estrazione richieste dal materiale stesso.

L'estensione areale degli affioramenti condiziona il numero delle cave da cui estrarre materiale, che deve possedere caratteristiche il più possibile omogenee, subordinando, di fatto, la quantità disponibile alla coltivazione.

La morfologia dell'affioramento dipende dalla disposizione e dallo spessore degli strati lapidei e dalla presenza di pieghe e faglie, caratteristiche che incidono notevolmente sulla qualità e quantità del materiale effettivamente sfruttabile.

Le tipologie volumetriche quali blocchi, conci, lastre, frantumi, sono per lo più determinate dalla genesi delle formazioni affioranti: in un affioramento di roccia ignea ci



Fig. 5 - Opus sectile

si può aspettare la presenza di fessurazioni da contrazione termica che possono essere sfruttate per la coltivazione di una cava a blocchi (10-0,5 m³), mentre in affioramenti di varie tipologie di rocce sedimentarie o metamorfiche, si ricavano lastre grazie alla presenza, rispettivamente, di stratificazioni o di piani di scistosità.

Le caratteristiche petrografiche dell'ammasso roccioso influenzano la durezza, la lavorabilità, la scolpibilità, la lucidabilità.

Sulla durezza influiscono sia le caratteristiche intrinseche del materiale, che la destinazione d'uso dello stesso. Inoltre, al fine di ottenere le massime prestazioni dal materiale impiegato, bisogna considerare le geometrie di giacitura dell'affioramento lapideo: una roccia scistosa, di origine metamorfica, impiegata per una pavimentazione, deve possedere durezza in funzione della resistenza all'usura; tale caratteristica però sarà sfruttata al meglio solo se la posa in opera delle lastre lapidee vedrà la disposizione delle stesse parallelamente ai piani di scistosità. Allo stesso modo tale tipo lapideo svilupperà doti di durezza se posto in opera come elemento por-

tante con carichi perpendicolari ai piani di scistosità. Se, al contrario, la posa in opera vedrà i piani paralleli alla direzione del carico, l'elemento portante tenderà a "sfolgiarsi", Fig. 6 (5).

La lavorabilità, intesa come facilità di coltivazione in cava, in generale è tanto migliore quanto la roccia si presenta "tenera" e quindi porosa, poco compatta e priva di minerali silicatici. E' intuitivo che più un materiale è



Fig. 6 - Colonna in marmo cipollino "sfogliata"

duro e compatto più la sua coltivazione risulta difficoltosa. Questo però non è vero in senso assoluto: si può cavare agevolmente e velocemente un blocco di granito sfruttandone le fessurazioni naturali, mentre si possono incontrare serie difficoltà, legate ai tempi di lavorazione, nel segare un blocco di calcare molto tenero, a causa dell'enorme quantità di materiale che si frantuma e polverizza, impedendo il movimento alle seghe o alle funi diamantate utilizzate per la segagione.

La scolpibilità è largamente favorita dalle dimensioni ridotte e dalle caratteristiche di omogeneità della grana; parimenti sono importanti l'omogeneità mineralogica e tessiturale, la compattezza, l'assenza di venature e di minerali fortemente anisotropi e sfaldabili in lamelle.

La lucidabilità è un parametro estremamente importante ai fini della destinazione d'uso dei vari tipi lapidei. A conferma di ciò, basti dire che i materiali lapidei nell'antica Roma venivano raggruppati in due grandi classi commerciali: i "marmora", cioè tutte le pietre lucidabili, non solo i marmi propriamente detti, cioè i calcari metamorfici, ma anche graniti calcari compatti a grana fine di origine sedimentaria, e i "lapides" cioè quei litotipi quali il tufo, il calcare a grana grossolana, le arenarie, il travertino, che al massimo potevano essere levigati.

Il colore e l'aspetto estetico sono caratteristiche che molto spesso vengono prese in considerazione a prescindere dalle proprietà tecnico-meccaniche dei materiali lapidei. Anche in questo caso il ruolo della tradizione greco romana ha molta influenza sulla scelta delle pietre. Già a partire da Augusto, il prestigio ed il lusso che si accompagnava all'uso dei "marmora", soprattutto di quelli colorati, si traduceva in costi molto alti che potevano

essere sostenuti solo dalle classi sociali più abbienti o, nel caso dell'impiego pubblico, delle città più ricche. I materiali lapidei usati dall'imperatore, che molto spesso era esclusivo proprietario delle cave, univano alle caratteristiche estetiche anche ottime doti meccaniche. Ma in pochi potevano permettersi i "marmora" imperiali, e quindi si ricorreva a materiali dall'aspetto simile e dalle caratteristiche tecniche inferiori, quindi molto più economici, oppure si ricorreva all'utilizzo di piccole quantità di materiale pregiato, messo in risalto all'interno di un contesto caratterizzato da materiali più scadenti.

Le rocce colorate più diffuse sono le rocce calcaree, sia sedimentarie che metamorfiche, dotate di una vasta gamma di colorazioni grazie alla presenza di ossidi e sali che possono conferire tinte che vanno dal giallo al rosso, dal marrone al viola, dal grigio al nero e al verde; ma questi tipi lapidei possono presentarsi anche assolutamente bianchi per l'assenza di pigmenti ed assumendo il colore naturale della calcite, bianco per l'appunto. Oltre alle rocce calcaree, si rinvenivano lapidei colorati nell'ambito delle rocce ignee intrusive o ipo-abissali, le quali presentavano cromie determinate dalla presenza contemporanea di vari tipi di cristalli, ognuno con un colore proprio, tanto da conferire al materiale un aspetto policromo a scala dettagliata, ma globalmente monocroma a causa del minerale predominante: granito rosa, sienite rossa. Tra le caratteristiche legate all'utilizzo dei lapidei colorati si riscontrano notevoli differenze di durabilità dei colori in base sia ai tipi lapidei impiegati, che alle condizioni ambientali di messa in posto. Consideriamo ad esempio un granito rosso ed un marmo rosso: bisogna tener presente che il primo ha tale colorazione grazie alla presenza di cristalli rossi (ortoclasio), mentre il secondo presenta quel cromatismo per la presenza di ossidi di ferro (ematite, Fe_2O_3) nella massa lapidea. In questo caso la risposta dei materiali alle sollecitazioni esterne, ad esempio una messa in opera all'aperto in presenza costante di umidità, sarà molto diversa: mentre il granito conserva la sua colorazione molto a lungo (secoli!!) poiché l'elemento colorante è dato da cristalli che permangono all'interno della struttura della roccia, il marmo perderà presto la sua colorazione a causa della lisciviazione, ad opera dell'acqua, delle minute particelle pigmentanti diffuse nella massa lapidea.

BIBLIOGRAFIA

- 1 P. Pensabene (a cura di); Marmi antichi II – cave e tecnica di lavorazione provenienze e distribuzione. Ed "L'Erma" di Bretschneider, Roma.
- 2 C. Fiori, R. Barboni, L. Saragoni; Marmi e altre pietre nel mosaico antico e moderno. Quaderni IRTEC C.N.R. – Istituto Ricerche Tecnologiche per la Ceramica, Faenza Ravenna.
- 3 G.G. Amoroso; Il restauro della pietra nell'architettura monumentale. Dario Flaccovio Editore.
- 4 V. Paci, M. Mosca; Le pietre delle Marche. Regione Marche, Il Lavoro Editoriale.
- 5 L. Lazzarini, M. Laurenzi Tabasso; Il restauro della pietra. Cedam editore.

Forza di Gruppo

COLACEM

colabeton



12 impianti in Italia e
all'estero per la produzione
di leganti idraulici



120 centrali di betonaggio



22 impianti di
frantumazione, lavaggio
e selezione aggregati



310 mezzi per un
servizio tempestivo



una divisione centrale di ricerca e
7 laboratori di area a
disposizione della clientela



Tecnologia

Qualità

Ricerca e sviluppo

Recupero ambientale

DIREZIONE GENERALE

Via della Vittorina, 60 Gubbio - Perugia

www.colacem.it

www.colabeton.it



Crea il tuo pavimento con ... Portal**Terrazzo**.com

PortalTerrazzo.com nasce dall'idea che ogni scelta sia il risultato di un percorso interiore, l'espressione di un modo d'essere, di una visione personale della realtà. Tue sono le

idee, tuo il gusto, la creatività e la libertà di progettare il pavimento che hai in mente. Nostra l'esperienza, gli strumenti e le conoscenze maturate in anni di attività nel settore

delle pavimentazioni. Un'unione sinergica resa finalmente possibile dalla tecnologia web, perché siamo convinti che nessuno meglio di te possa interpretare il tuo mondo.

Sponsored by:

BAYFERROX
color for life.

breton
Driven by Innovation

Bellinzoni

effetre
FILIALE MURANO

FERRARI

de las
diamond tools

Italcementi
Italcementi Group

ALFACHEM
A KEMCO Company