

2011

Quadrimestrale

Anno XVI

Numero 52

ENCO
JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

SALVIAMO IL COLOSSEO



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



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

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

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



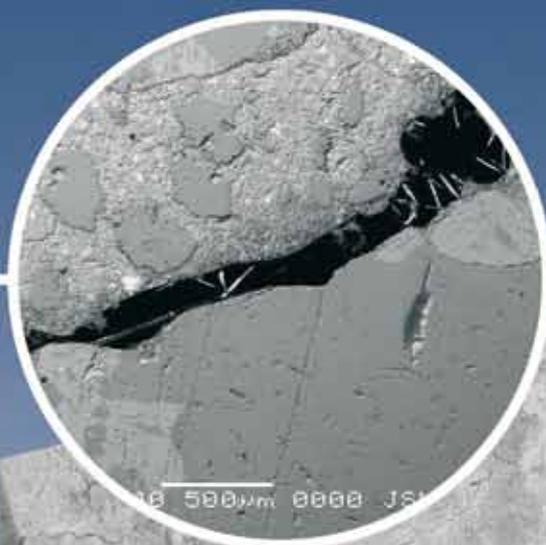
PENETRON®

INTEGRAL CAPILLARY CONCRETE WATERPROOFING SYSTEMS

Sistema Integrale di Protezione del Calcestruzzo per Cristallizzazione

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

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



 **Penetron® Italia**

Distributore esclusivo del sistema Penetron®

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



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



Aggiungi **qualità**
al tuo lavoro

Paviment[®]

SUPERFLUIDIFICANTI
PER PAVIMENTAZIONI IN CALCESTRUZZO

Un mondo di soluzioni.

ADDIMENT ITALIA S.r.l.

Additivi per calcestruzzo
Prodotti chimici per l'edilizia

Direzione e Stabilimento:
Via Roma, 65
24030 Medolago - Bg
Tel. 035 4948558 r.a.
Fax 035 4948149
www.addimentitalia.it
info-vendite@addimentitalia.it



Calcestruzzi
Italcementi Group

*f*onisocal® *e* fonisocal® **PLUS**®

IN SINTONIA CON L'AMBIENTE



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

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

Contattaci per conoscere Fonisocal® e Fonisocal Plus®.

www.calcestruzzi.it

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Quadrimestrale - Anno XVI - Numero 52

Direttore Mario Collepari

SALVIAMO IL COLOSSEO

Come è noto dalle notizie di stampa, Diego Della Valle e la Tod's si sono impegnati a finanziare un piano di interventi per il restauro del Colosseo mettendo a disposizione 25 milioni di euro. Il pagamento sarà erogato alle imprese appaltatrici sulla base dello stato di avanzamento dei lavori approvati dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici. I lavori partiranno alla fine del presente anno e dureranno tra i 24 e i 36 mesi. Sarà ora necessario pubblicare i bandi per la scelta delle imprese e poi potrà partire il restauro sulla base dei progetti esecutivi predisposti dalla Soprintendenza. Della Valle si è impegnato a finanziare la realizzazione del piano degli interventi, la cui liquidità sarà assicurata attraverso una o più fidejussioni. Il contributo verrà versato a rate direttamente alle imprese appaltatrici con il procedere dei lavori.

Si tratta di una iniziativa storica che potrà essere ripetuta per la salvaguardia di altre opere o complessi, per esempio Pompei come lo stesso Della Valle ha menzionato. In cambio, Della Valle chiede di impiegare in esclusiva l'immagine del Colosseo come *logo* della sua azienda. Non condivido le critiche dell'opposizione parlamentare su questa iniziativa e su questa richiesta perché, a mio avviso, si tratta di una proposta non "invasiva" che è accettabile se si vuole salvare, prima che sia troppo tardi, l'eredità culturale del Paese più bello del mondo di cui dovremmo essere orgogliosi.

A questo numero di *Enco Journal* abbiamo dedicato un articolo sulla storia e sui precedenti restauri del Colosseo dovuti a riparazione di danni causati da eventi straordinari come incendi e terremoti che si sono verificati nella bi-millennaria storia del monumento più celebre al mondo. Occorre, però, tener conto che nell'era moderna, con l'avvento dei combustibili per auto-trazione e condizionamento domestico, tutta l'area che circonda il Colosseo è esposta ad un grave inquinamento ambientale, legato soprattutto alle piogge acide, che lentamente e progressivamente stanno corrodendo i preziosi materiali impiegati in questo celebre monumento.

Su un altro argomento, anch'esso incentrato sulla salvaguardia dei beni culturali, in questo numero di *Enco Journal* è presente un articolo di Luca Bertolini, Maddalena Carsana ed Eleonora Marra sui materiali metallici impiegati nelle antiche murature.

Sul fronte del progresso dei moderni materiali da costruzione, Cataldo Matteo Corcella ed altri presentano un articolo sulle prestazioni e sui limiti del calcestruzzo a ritiro compensato.

Chiude, infine, questo numero di *Enco Journal* un articolo di Alessandro Quadrio Curzio ed altri su una straordinaria novità circa il trattamento e l'impiego della cenere pesante, prodotta nei termovalorizzatori per il trattamento dei rifiuti solidi urbani, come materiale cementizio con caratteristiche prestazionali che possono arrivare fino a quelle del più famoso e costoso fumo di silice.

Mario Collepari

In copertina: Foto di Paola Ricca Mariani

SOMMARIO

CONSEGUENZE DELLA
CORROSIONE DEGLI INSERTI
METALLICI NEGLI ELEMENTI IN
MURATURA DEI BENI CULTURALI
*di L. Bertolini, M. Carsana
e E. Marra*

(pag. 6)

IL COLOSSEO
*di Emanuela N. Croce e
Mario Collepari*

(pag. 10)

L'INFLUENZA DEGLI ADDITIVI
E DELLA TEMPERATURA SULLE
PRESTAZIONI DEI CALCESTRUZZI
A RITIRO COMPENSATO
*di C.M. Corcella, C. Cereda,
F. Canonico e D. Gastaldi*

(pag. 18)

LA CENERE PESANTE DA
TERMOVALORIZZATORI PER IL
TRATTAMENTO DEGLI RSU
*di A. Quadrio Curzio, S. Collepari,
D. Ongaro e M. Sammartino*

(pag. 26)

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

**Direttore
Responsabile**

MARIO COLLEPARDI

Redazione

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

EDITORE

ENCO SRL

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

COMPOSIZIONE

ISABELLA CAPOGNA
ALESSANDRA GALLETTI
MARA MENEGHEL

Grafica e Stampa

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

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

CONSEGUENZE DELLA CORROSIONE DEGLI INSERTI METALLICI NEGLI ELEMENTI IN MURATURA DEI BENI CULTURALI



Luca Bertolini¹, Maddalena Carsana¹, Eleonora Marra^{1,2}

¹Politecnico di Milano, Dip. di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica

²Politecnico di Milano, Dip. di Scienza e Tecnologia di Edilizia e Ambiente

luca.bertolini@polimi.it - maddalena.carsana@polimi.it - emarra@chem.polimi.it



1. INSERTI DI ACCIAIO ED EFFETTI DELLA CORROSIONE

Nell'ambito delle murature antiche non è rara la presenza di inserti di acciaio (quali tiranti, catene, cerchiature, ecc.) usati, ad esempio, con lo scopo di migliorare il comportamento strutturale degli edifici o di prevenire la propagazione di fessure. La presenza di tali inserti può essere frutto di scelte progettuali originarie oppure di interventi di restauro successivi alla data di costruzione dell'edificio. Talvolta gli elementi metallici sono applicati esternamente alla struttura, giustapposti alla superficie muraria (è il caso di cerchiature esterne e capo chiavi); più frequentemente essi sono parte integrante della muratura (si pensi, ad esempio, a cerchiature interne e perni), inglobati in materiali quali malta, laterizio o pietra, variabili a seconda delle caratteristiche della compagine muraria. In quest'ultimo caso, tuttavia, la presenza degli inserti d'acciaio, inglobati nella muratura, potrebbe costituire una minaccia per l'intera struttura. La corrosione di tali elementi, infatti, può avere due deleterie conseguenze: la prima riguarda la propagazione di fessure e il distacco dei materiali di ricoprimento degli inserti, fenomeni indotti dagli effetti espansivi conseguenti all'insorgenza dei prodotti di corrosione; la seconda concerne la riduzione della sezione

resistente dell'inserto metallico, e dunque la diminuzione della sua capacità portante [1-4].

È dunque importante distinguere tra inserti d'acciaio databili all'epoca della costruzione dell'edificio, solitamente inglobati nei materiali della muratura, e quelli aggiunti in fasi successive, per lo più applicati superficialmente. Infatti, mentre questi ultimi sono direttamente esposti all'azione dell'atmosfera (siano essi posizionati all'interno o all'esterno dell'edificio), gli inserti inglobati nella muratura possono avere un comportamen-

to a corrosione complesso, che dipende dal materiale con cui sono a contatto (laterizi, malte aeree, malte idrauliche, ecc.) e dal contenuto di umidità di questo ultimo; in particolare, la microstruttura di questi materiali e la composizione chimica della soluzione contenuta nei loro pori giocano un ruolo rilevante. Ad esempio, il pH vicino alla neutralità di alcune tipologie di malta può portare all'innescio del processo corrosivo sulla superficie del metallo non appena queste si bagnano. Al contrario, nel caso di malte alcaline (che promuovono la passività dell'acciaio) la corrosione può avere luogo solo una volta che sia avvenuta la carbonatazione dello strato di malta di ricoprimento (copriferro). Una volta innescata, la velocità di corrosione dell'inserto dipende dalla disponibilità di acqua e ossigeno alla superficie del metallo (segnatamente all'interno dei pori del materiale che lo circonda) e dunque dalle condizioni dell'ambiente a cui la muratura è esposta (vale a dire temperatura e umidità relativa). Le condizioni termo-igrometriche dell'ambiente, inoltre, influenzano fortemente la resistività elettrica dei materiali con cui è a contatto l'elemento metallico. Ad esempio, una malta con un contenuto di umidità molto elevato (cioè prossimo al punto di saturazione, situazione questa che si verifica nel caso di bagnamento o condensazione d'acqua) è caratterizzata da una bassa resistività elettrica; tuttavia, se le condizioni di saturazione si protraggono per lungo tempo, diminuisce la disponibilità di ossigeno alla superficie del metallo (a causa della scarsa diffusività dell'ossigeno attraverso i pori pieni d'acqua nella malta). Al contrario, nel caso di una muratura caratterizzata da un basso contenuto d'acqua, nonostante la disponibilità di ossigeno alla superficie dell'inserto, la resistività è alta e cresce in ragione inversa al contenuto di umidità.

Per quanto concerne le strutture in muratura, va osservato che raramente si raggiungono condizioni di saturazione permanente e che dunque l'ossigeno è in grado di diffondere fino alla superficie dell'inserto; in queste circostanze, la velocità di corrosione dipende principalmente dalla resistività dei materiali a contatto con l'acciaio. In linea di principio si può affermare che maggiore è la resistività elettrica dei materiali a contatto con l'inserto, minore è la velocità di corrosione dello stesso. Tuttavia, accanto alla resistività elettrica, vi sono diversi parametri (connessi sia alle caratteristiche del materiale di ricoprimento dell'inserto, sia all'ambiente circostante) che possono influenzare, in varia misura, il meccanismo elettrochimico. Ciò rende ardua ogni previsione dell'effettivo comportamento a corrosione degli inserti d'acciaio inglobati nei materiali delle murature antiche. In effetti, lo studio della dipendenza della resistività della muratura e della velocità di corrosione degli inserti in essa inglobati dalle condizioni ambientali rappresenta un aspetto di grande rilevanza al fine di ottimizzare i metodi di restauro e promuovere l'approccio durabilistico anche nel-



Fig. 1 - Ciborio dell'Abbazia di San Pietro al Monte Sopra Civate (X-XI sec. d.C.).

l'ambito degli edifici storici. Migliorare la comprensione del processo di corrosione di inserti di acciaio nelle murature antiche può portare alla definizione di un valido strumento per il progetto degli interventi di restauro; questi, d'altro canto, devono avere lo scopo non soltanto di rimediare ai danni provocati dalla corrosione, ma anche di controllarne la velocità, in modo da garantire il più possibile la conservazione dei materiali originari.

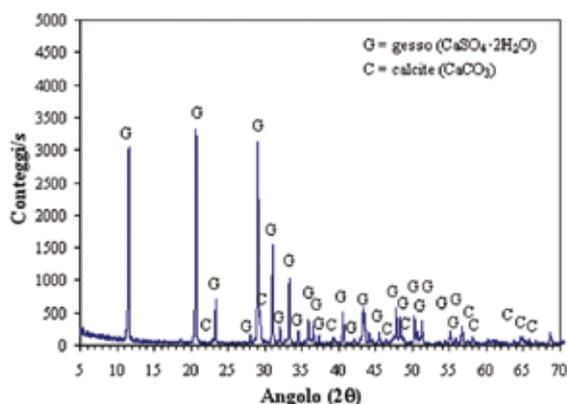
2. CASO DI STUDIO

La problematica appena delineata coinvolge anche il progetto di restauro dell'Abbazia di San Pietro al Monte, capolavoro dell'architettura romanica lombarda (X sec. d.C.) sito in prossimità della cittadina di Civate (LC). Uno degli elementi artistici più rilevanti della basilica è rappresentato dall'antico ciborio: si tratta di un'edicola sovrastante l'altare maggiore, costituita da quattro colonne di granito che sorreggono altrettanti archi su cui si innesta una copertura a cupola (Figura 1). Il ciborio, costruito durante il X-XI sec. d.C. e successivamente rimaneggiato e consolidato fino al termine del XV sec. d.C., mostra gravi segni di degrado indotto dalla corrosione degli inserti d'acciaio in esso inglobati [5]. Infatti, l'azione espansiva dei prodotti di corrosione ha dato luogo ad ampie fessure, soprattutto in corrispondenza dei capitelli, comportando il danneggiamento e il conseguente distacco di frammenti di malta, ed esponendo all'atmosfera parte degli inserti ossidati (Figura 2).

Durante la fase di ispezione una spaccatura prodotta dalla corrosione in uno dei capitelli ha permesso di rilevare l'esistenza di vari elementi metallici: un perno centrale, che collega la base della colonna alla muratura sovrastante, cerchiature di contenimento, piatti verticali



Fig. 2 - Fessure e distacchi di malta indotti dalla corrosione degli inserti in uno dei capitelli del ciborio.



e fili di rinforzo. Inoltre, si è riscontrata la presenza di differenti intonaci, che compongono l'apparato decorativo del capitello, oltre ad una malta all'interno della quale è stato annegato il perno centrale (forse unico elemento metallico originario, mentre cerchiature e piatti verticali sono frutto probabilmente di interventi successivi).

Nell'ambito del progetto di restauro sono stati effettuati il prelievo di alcuni campioni (sia metallici, sia di malta e intonaco) e la loro caratterizzazione.

I campioni sono stati osservati al visore stereoscopico, al microscopio ottico (OM) e al microscopio elettronico a scansione ambientale (SEM), dotato di spettrometro a dispersione di energia (EDS). Su alcuni campioni di malta, intonaco e ossidi superficiali sono state effettuate analisi di diffrazione di raggi X (XRD). Sui soli prelievi di malta e intonaco si sono eseguite analisi termiche (TGA-DTA) e analisi per la determinazione del contenuto di residuo insolubile all'attacco acido (RI). Infine, su una porzione di piatto metallico, si è eseguita un'analisi spettroscopica ad emissione ottica (OES).

I risultati ottenuti hanno mostrato la stratificazione di malte aeree di calce e gesso (con 6-60% di CaCO_3 e 32-90% di CaSO_4); dall'analisi XRD si deduce, infatti, che la matrice legante è costituita da gesso e calcite (Figura 3a), mentre l'osservazione SEM (Figura 3b) evidenzia la morfologia delle particelle di gesso (EDS1) e calcite (EDS2). Gli inserti, invece, sono costituiti da acciai basso legati (0,01-0,05% di C) con microstruttura non uniforme, ferritica con zone perlitiche (Figura 4a), forse battuti a caldo; si è rilevata la presenza di prodotti di corrosione quali goethite, akaganeite, lepidocrocite e magnetite (Figura 4b). Per una descrizione di dettaglio dei risultati delle analisi condotte sui materiali del ciborio si rimanda al riferimento [1].

3. STUDIO SPERIMENTALE

L'esempio dell'abbazia di San Pietro al Monte mostra l'importanza di definire le condizioni di corrosione degli inserti di acciaio all'interno degli elementi costruttivi in muratura, in funzione delle condizioni ambientali e della loro variazione nel tempo. Per valutare il comportamento alla corrosione degli acciai presenti nei capitelli del ciborio è attualmente in corso uno studio sperimentale che ha previsto la realizzazione di diverse tipologie di provini: provini di malta aerea (a base di gesso e di calce e gesso), di malta idraulica (a base di calce e pozzolana e di calce e cocchiopesto), provini di laterizio e, infine, provini compositi di laterizio e malta. Nel seguito si descrive brevemente la metodologia sperimentale, limitando la discussione ai risultati ottenuti dai soli provini armati inglobati in malta di calce e gesso.

Per simulare i materiali rilevati nei capitelli del ciborio di Civate, sono stati realizzati provini armati confezionati con malta di calce e gesso. All'interno dei provini (di dimensioni $80 \times 90 \times 30 \text{ mm}^3$) sono state inserite due barre di acciaio al carbonio (aventi diametro 6 mm) e

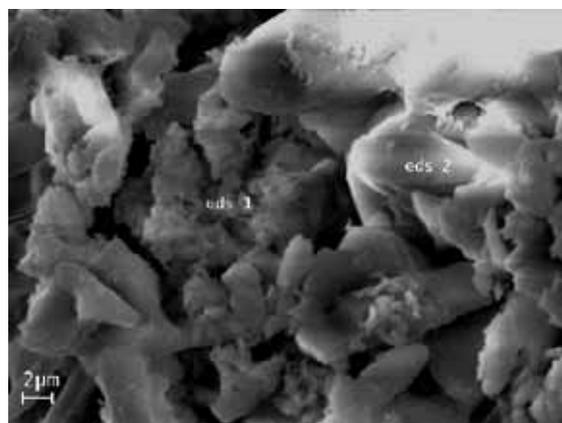


Fig. 3 - Risultati delle prove effettuate sullo strato di malta più interno: (sinistra) analisi XRD e (destra) micrografia SEM (l'EDS1 mostra la morfologia della calcite, l'EDS2 quella del gesso).

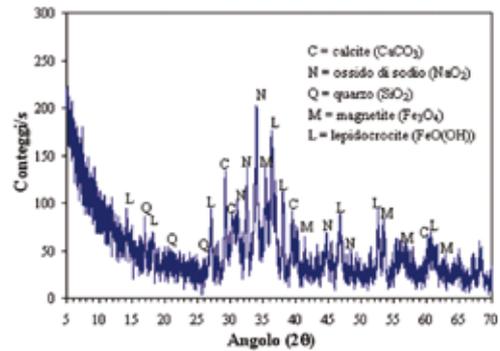
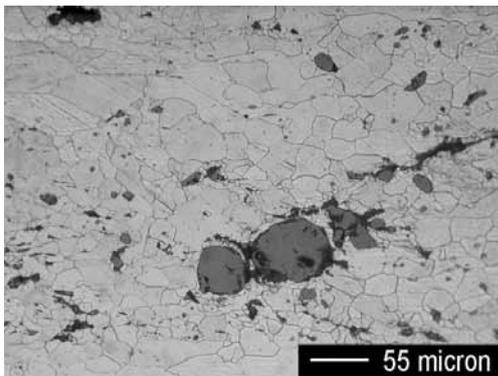


Fig. 4 - Risultati delle prove effettuate sul piatto metallico e relativi ossidi superficiali: (sinistra) micrografia ottica e (destra) analisi XRD.

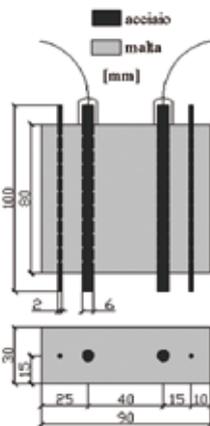


Fig. 5 - Sezione longitudinale (in alto) e sezione trasversale (in basso) dei provini di malta di calce e gesso (LG) armati con 2 barre di acciaio al carbonio e 2 fili di acciaio inossidabile. Dimensioni in mm.

due fili di acciaio inossidabile (AISI 304, diametro 2 mm). Lo schema della geometria dei provini è visibile in Figura 5. La malta è stata preparata miscelando: calce (211 kg/m³), gesso (430 kg/m³), sabbia (769 kg/m³) e acqua (404 kg/m³); ne consegue una miscela con rapporto acqua/legante pari a 0.63, avente uno spandimento, misurato mediante tavola a scosse ($D_m = 130$ mm), pari a 30%. Infine, riguardo alle armature, si è fatto uso di un acciaio al carbonio basso legato (C 0.04%, Si 0.041%, Mn 0.285%, S 0.012% e P 0.012%) avente microstruttura ferritica (con dimensione dei grani pari a 20 μ m circa) e piccole inclusioni perlitiche.

Dopo il getto della miscela e la scasseratura dei provini, questi sono stati stagionati per 28 giorni in camera climatica (7 giorni a 95% UR e 21 giorni a 65% UR, 20°C) e successivamente posti in camera di carbonatazione (0.2% CO₂, a 65% UR e 20°C), dove sono stati mantenuti per 28 giorni, ovvero fino alla completa carbonatazione della malta. Una volta carbonatati, i provini sono stati esposti a sei diversi ambienti, variando l'umidità relativa (65-80-95%) e la temperatura (5-20-40°C). Inoltre, per valutare il comportamento della malta LG in fase di bagnamento e asciugamento, uno dei provini è stato ulteriormente esposto a tre diverse condizioni di umidità: 95% UR (C1), saturazione (C2), e di nuovo 95% UR (C3), mantenendo costante la temperatura a 20°C. Nella condizione C2, la saturazione è stata ottenuta immergendo i primi 10 mm dei provini in acqua, in modo tale da garantire l'assorbimento d'acqua per capillarità verso le armature. Ogni condizione è stata mantenuta per almeno 28 giorni, eccezion fatta per l'esposizione in acqua (1 giorno).

Il comportamento a corrosione dei provini è stato valutato monitorando tre diverse grandezze: la resistività elettrica della malta (ρ , Ω m),

che può fornire informazioni circa il contenuto d'acqua dei provini e la loro porosità; il potenziale di corrosione (E_{corr} , mV vs Ag/AgCl) delle armature, misurato rispetto a un elettrodo di riferimento esterno (Ag/AgCl) per mezzo di un voltmetro ad alta impedenza; infine, la velocità di corrosione (i_{corr} , mA/m²) delle armature, misurata col metodo della resistenza alla polarizzazione lineare (R_p).

La Figura 6 mostra l'andamento nel tempo del potenziale di corrosione (simboli vuoti), della velocità di corrosione (simboli in grassetto) e della resistività elettrica (simboli pieni) di un provino, in diversi ambienti di prova: a 95% UR (C1) e in condizioni di bagnato (C2 e C3), mantenendo la temperatura a 20°C. Valori di potenziale pari a circa -400÷-600 mV vs Ag/AgCl, a indicare cioè uno stato di corrosione in atto, si hanno in tutti gli ambienti di esposizione considerati; in particolare, i valori minori si sono misurati nella condizione di umidità maggiore (C2). Tali considerazioni sono confermate dalle misure di velocità di corrosione: infatti, in tutte le condizioni di esposizione si hanno velocità di corrosione non trascurabili (la soglia di trascurabilità è fissata convenzionalmente a 1 mA/m², pari a 1.17 μ m/anno, se si assume che la corrosione sia uniforme); in particolare, si registrano velocità di corrosione moderate nella condizione C1 (pari a circa 2 mA/m²), più elevate nell'ambiente C2 (intorno a 100 mA/m²). La velocità di corrosione dell'acciaio, inoltre, può essere correlata ai risultati delle misure di resistività elettrica. Elevati valori di resistività elettrica sono stati misurati nella condizione C1 (pari a circa 1100 Ω m), mentre in acqua (condizione C2) tali valori diminuiscono di due ordini di grandezza (circa 10 Ω m); infine, nella condizione C3 si ha un progressivo recupero dei valori iniziali. Dal confronto tra la condizione di bagnamento e quella di asciugamento, è possibile fare anche

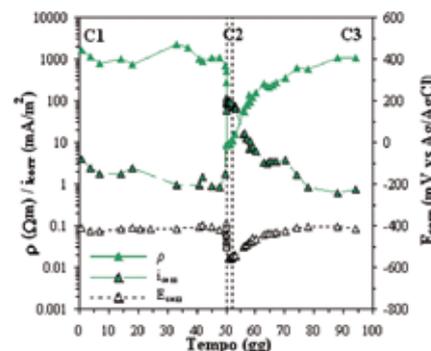


Fig. 6 - Andamento nel tempo di resistività elettrica ρ , velocità di corrosione i_{corr} e potenziale di corrosione E_{corr} di barre di acciaio inglobate nella malta di calce e gesso (LG), per diverse condizioni di umidità: C1/C3 = 95% UR; C2 = 100% UR / immerso (a 20°C).

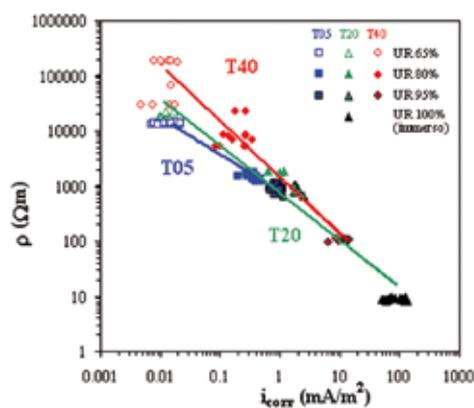


Fig. 7 - Legame tra resistività elettrica ρ e velocità di corrosione i_{corr} in provini di malta di calce e gesso (LG) durante l'esposizione a varie condizioni igrotermiche.

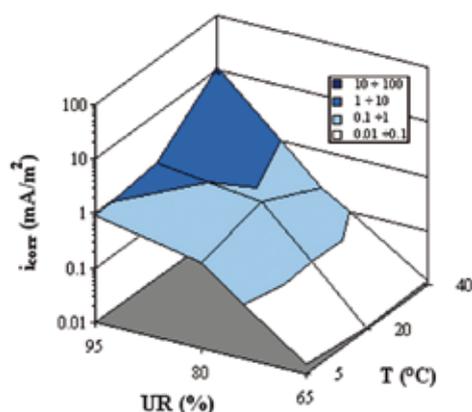


Fig. 8 - Mappa tridimensionale della velocità di corrosione in funzione delle condizioni di temperatura e umidità relativa nella malta di calce e gesso (LG). Valori medi di provini replicati.

delle considerazioni sulla cinetica di questi meccanismi: nel primo caso (limite C1-C2) si ha un transitorio molto rapido (la condizione stazionaria viene raggiunta in poche ore); al contrario, l'asciugamento (limite C2-C3) è molto più lento (la resistività torna ai valori iniziali dopo oltre 10 giorni).

È utile notare come la resistività elettrica, fornendo un'indicazione circa la porosità e il contenuto d'acqua dei provini, possa essere usata anche come indice dell'aggressività della malta. In linea di principio si può assumere che minore è la resistività elettrica del materiale con cui è a contatto l'acciaio, maggiore è la velocità di corrosione dell'inserito stesso [6-7]. Ciò può essere chiaramente osservato in Figura 7, che mostra la correlazione tra resistività elettrica e velocità di corrosione nei provini, permettendo al contempo di valutare l'influenza di differenti condizioni igrotermiche su tali parametri. In questo caso, ognuno dei tre provini è stato esposto ad un'umidità relativa costante (65-80-95% UR), variando solo la temperatura (5°C curva blu, 20°C curva verde, 40°C curva rossa). Per quanto concerne la velocità di corrosione, essa è inferiore a 1 mA/m² nei provini esposti sia a 65% UR (simboli vuoti), sia a 80% UR (simboli pieni), a prescindere dalla temperatura. Al contrario, a 95% UR (simboli in grassetto) la velocità di corrosione aumenta fino a 10 mA/m². La resistività elettrica, invece, diminuisce al crescere del livello di umidità ambientale; ciò si verifica ad ogni temperatura, per quanto tale effetto sia maggiormente marcato a 40°C. A proposito del ruolo della temperatura, va osservato che in ambienti secchi (65% UR) un aumento di temperatura accelera il processo di asciugamento riducendo quindi la velocità di corrosione

degli inserti (meno di 0.01 mA/m²); al crescere dell'umidità relativa (80% UR), tuttavia, questo effetto si riduce fino a scomparire del tutto. Infatti, a 95% UR un aumento di temperatura comporta un aumento della cinetica del processo di corrosione, cosicché la velocità di corrosione è maggiore a 40°C (10 mA/m²) rispetto a 5°C o a 20°C (1÷2 mA/m²).

In linea di principio si può comunque affermare che, nelle malte di calce e gesso considerate in questa nota, gli effetti dell'umidità relativa sulla velocità di corrosione sono preponderanti rispetto a quelli legati alle variazioni di temperatura. A questo proposito, in Figura 8 si propone una mappa tridimensionale che rapporta la velocità di corrosione delle barre di acciaio all'interno della malta LG sia alla temperatura, sia all'umidità relativa.

4. CONCLUSIONI

Lo studio del comportamento alla corrosione degli inserti metallici, in funzione delle condizioni ambientali e dei materiali nelle murature, è necessario per la valutazione dello stato di conservazione di molti edifici di rilevanza per il patrimonio culturale e per la definizione degli interventi di restauro. Un esempio di tale necessità è emerso nell'ambito del progetto di restauro del ciborio romanico dell'Abbazia di San Pietro al Monte sopra Civate (LC), che mostra gravi segni di degrado causato dalla corrosione degli inserti d'acciaio inglobati al suo interno. Le analisi degli intonaci e degli inserti metallici prelevati da un capitello durante l'ispezione del ciborio hanno evidenziato in primo luogo la presenza di malte aeree, prevalentemente a base di calce e gesso; inoltre, gli inserti metallici si sono rilevati essere di acciaio al carbonio basso legato, probabilmente battuto a caldo, con una spessa stratificazione di ossidi.

Per valutare il comportamento alla corrosione degli acciai presenti nei capitelli del ciborio è attualmente in corso uno studio sperimentale. Esso ha mostrato il ruolo chiave della temperatura, dell'umidità relativa e dell'acqua sul comportamento a corrosione di armature di acciaio al carbonio inglobate in malta di calce e gesso (LG). Le prove effettuate hanno mostrato che la velocità di corrosione degli inserti metallici è strettamente connessa al contenuto d'acqua dei materiali ricoprimento con cui sono a contatto. In particolare, la velocità di corrosione si mantiene trascurabile nei provini esposti in ambienti con 65% e 80% UR, anche a temperatura elevata (40°C); al contrario, in ambienti umidi o in presenza di suzione d'acqua, la velocità di corrosione mostra valori elevati (sino a 100 mA/m²). Inoltre, si è osservata una chiara correlazione tra resistività elettrica dei materiali di ricoprimento degli inserti e velocità di corrosione degli stessi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Bertolini, M. Carsana, E. Marra, 2009, *Degradation of mortars and steel inserts from the ciborium of the medieval abbey of San Pietro al Monte*, in Special Topics on Materials Science and Technology – An Italian Panorama, Brill Publisher, 2009.
- [2] P.B. Lourenco, *Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney*, Construction & Building Materials, 20 (2006) 239-251.
- [3] J. Straube, C. Schumacher, *Assessing the durability impacts of energy efficient enclosure upgrades using hygrothermal modeling*, WTA-Journal, 2 (2006) 197-222.
- [4] L. Bertolini, M. Carsana, M. Gastaldi, F. Lollini and E. Redaelli, "Corrosion assessment and restoration strategies of reinforced concrete buildings of the cultural heritage", Materials and corrosion, Vol. 62, N. 2 (2011) 146-154.
- [5] V. Gatti, *Il Ciborio di San Pietro al Monte*, Bergamo, 1977.
- [6] P. Pedferri, *Corrosione e protezione dei materiali metallici*, Polipress, Milano, 2007.
- [7] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, R. Polder, *Corrosion of steel in concrete*, Wiley-VCH, 2004.

IL COLOSSEO



Emanuela N. Croce, Mario Collepari
Enco Srl, Engineering Concrete - Ponzano Veneto (TV)
info@encosrl.it



LA STORIA DEL COLOSSEO

Il Colosseo, inserito nel 2007 fra le “*Sette meraviglie del mondo moderno*” fu voluto dall’imperatore Tito Flavio Vespasiano ed i lavori per la sua costruzione cominciarono nel 72 d.C. , nell’ambito delle operazioni urbane che miravano a restituire al pubblico le zone del centro città di cui Nerone aveva costruito la sua Domus Aurea. L’*Anphytheatrum Flavianum*, questo il suo nome originale, infatti, fu edificato in una valle posta tra il Celio, il Palatino e l’Esquilino, dopo aver prosciugato il piccolo laghetto che era parte integrante della reggia neroniana. Anche il “soprannome” di “Colosseo” affibbiatogli nell’XI secolo, deriva dal fatto che nelle vicinanze sorgeva una “colossale” statua di Nerone.

La costruzione iniziata da Vespasiano venne però completata dal Figlio Tito nell’80 d. C. ed inaugurata con grandiose cerimonie, spettacoli e giochi che durarono 100 giorni, durante i quali vennero sacrificati ben 5.000 animali.

Ulteriori lavori furono operati sotto l’Imperatore Domiziano, altro figlio di Vespasiano, che fece realizzare le strutture sotterranee del Colosseo: sotto il tavolato, ed anche sotto

gli spalti dell’anfiteatro trovavano spazio dei vastissimi ambienti di servizio sotterranei, strumentali agli spettacoli con gladiatori e belve che li si tenevano. Si trattò di modifiche importanti che comportarono la rinuncia agli spettacoli di battaglie navali (*naumachiae*) per preferire gli spettacoli di caccia (*venationes*) e i combattimenti dei gladiatori (*munera*).

Furono costruiti altri edifici di servizio al Colosseo, depositi di armi e attrezzature (il *Summum Choragium* e gli *Armentaria*), lo spogliatoio (lo *Spoliarum*), un luogo dove si curavano le ferite dei combattimenti (il *Sanatorium*), i luoghi di allenamento per i gladiatori, una sorta di caserme di cui

conosciamo il *Magnus*, il *Gallicus*, il *Matutinus* e il *Dacicus*. Venne costruita anche una caserma per il distacco delle flotte militari di Miseno (*Castra Misenatium*) che provvedevano a manovrare il “*velarium*”, una sorta di tela gigantesca che veniva installata per proteggere gli spettatori dal sole e dalla pioggia durante gli spettacoli che si protraevano per tutto il giorno.

Come è noto, al Colosseo si svolgevano i giochi organizzati per volere dell’Imperatore, la maggior parte delle volte utili per accattivarsi l’approvazione del popolo e distoglierlo dalle continue guerre: *panem et circenses*, secondo Giovenale, distoglievano il popolo dalle continue guerre.



Nell’anfiteatro oltre ai combattimenti tra gladiatori si poteva assistere anche ad altri tipi di intrattenimenti, altrettanto sanguinosi e violenti. Vi si eseguivano, infatti, le condanne a morte, allorchando i condannati venivano fatti sbranare da belve feroci (non si disdegnavano, però, altre modalità di uccisione) e le cosiddette *venationes*, ossia delle cacce a varie specie di animali, che potevano andare dalle tigri, ai tori, agli orsi, provenienti da ogni parte dell’impero. Il Colosseo, continuerà ad ospitare questo genere di spettacoli fino quasi alla caduta dell’Impero Romano d’Occidente. Solo nel 438, infatti, l’imperatore Valentiniano III proibirà gli scontri fra gladiatori (*munera*) e l’ultimo spettacolo fra uomini e belve si tenne nel 523 sotto Teodorico.

Il Colosseo fu consacrato alla memoria dei martiri cristiani con un editto di papa Benedetto XIV e nel 1808 fu restaurato per volere di Papa Pio VIII con l'aiuto dell'architetto Valadier.

TECNICA COSTRUTTIVA

Il Colosseo è il simbolo della potenza e della capacità ingegneristica dei Romani e certamente il più imponente monumento dell'antichità giunto fino a noi.

Il nome di anfiteatro (da *amphitheatron*, cioè "doppio teatro") deriva dal fatto che in esso vengono sostanzialmente unite due strutture dei classici teatri a semicerchio. La realizzazione di una tale opera fu possibile grazie alla straordinaria evoluzione dell'architettura romana, sia in fatto di materiali che nell'uso dei vari elementi architettonici. Per limitare il peso, e facilitare quindi il sostegno della struttura, si pensò ad un progetto in cui i vuoti prevalessero sui pieni da cui il larghissimo uso degli archi.

L'anfiteatro Flavio si sviluppa con una pianta ellittica che misura 188 x 156 m, è alto circa 50 m ed era in grado di ospitare da 45.000 a 70.000 spettatori, a seconda delle fonti storiche. Ha tre piani costituiti da 80 arcate separate da colonne rispettivamente in stile dorico, ionico e corinzio; il quarto piano, più alto degli altri tre, era costituito da una massa muraria continua aperta da 40 finestre con lesene di ordine corinzio. Tutto attorno, inoltre, si estendeva un'area lastricata in travertino di 17,60 metri, delimitata da dei cippi. Ma la complessità dell'opera oltre a dover a risultare maestosa e magnificente doveva essere necessariamente molto funzionale.

I sotterranei, che servivano in pratica da "dietro le quinte" erano strutturati secondo complesse e quasi labirintiche gallerie. Oggi una buona parte dei sotterranei è visibile dall'alto ed è chiaramente leggibile il largo corridoio lungo l'asse maggiore che divide l'area in due semicerchi laterali percorsi da dodici corridoi curvilinei. Lungo il muro perimetrale vi sono una serie di ambienti di servizio voltati che probabilmente ospitavano gli animali utilizzati durante i giochi. Inoltre qui dovevano trovare posto le scenografie e vi erano degli ambienti in cui i gladiatori attendevano prima di fare il loro ingresso nell'arena.

Il corridoio lungo l'asse principale dell'ellisse termina con due gallerie che si aprono, con forma trapezoidale, all'interno dello zoccolo di calcestruzzo che forma le fondamenta dell'anfiteatro: quella verso est metteva in collegamento l'anfiteatro con il vicino *Ludus Magnus*, la più grande tra le palestre/caserme dei gladiatori, mentre quella opposta, in direzione del tempio di Venere e Roma, veniva probabilmente utilizzata per l'allestimento delle scenografie degli spettacoli. Ci sono inoltre altre due gallerie lungo l'asse minore dell'ellisse, quella a nord in direzione Colle Oppio e quella a sud in direzione Celio che non sono state scavate. Una quinta galleria è posizionata sotto il palco imperiale: realizzata in epoca domiziana, era rifinita con tessere bianche e nere, marmi, intonaco dipinto e stucchi, ed è stata identificata come un percorso di accesso riservato esclusivamente all'Imperatore e probabilmente metteva direttamente in comunicazione con qualche edificio imperiale nella zona del Tempio di Claudio

sul Celio. Questa galleria veniva chiamata il "passaggio di Commodo": le fonti lo ricordano, infatti, come il luogo in cui si attentò alla vita dell'omonimo Imperatore.

Al di sotto delle 4 gallerie lungo i due assi si trovano altrettanti condotti idraulici, indispensabili per lo smaltimento sia delle acque piovane sia degli scarichi delle latrine che erano raccolti tramite un canale perimetrale anulare.

Altra necessità da affrontare, era quella di gestire il grandissimo afflusso di pubblico: un efficace sistema di entrate (*vomitoria*) conduceva ai vari settori dell'anfiteatro e al termine degli spettacoli, veicolava il "traffico" verso le varie uscite, proprio in maniera simile ad uno stadio moderno. Gli spettatori non potevano accedere liberamente a tutte le zone della platea, ma ogni settore del Colosseo era destinato ad ospitare una classe sociale. Così le postazioni più in basso e più vicine all'arena erano riservate ai senatori ed ai nobili. Salendo, prendevano posto i cittadini di fascia più bassa, fino ad arrivare all'ultimo settore in alto, in cui sedevano schiavi e liberti e, in un settore separato, le donne.

Ancora oggi è difficile immaginare un cantiere come quello del Colosseo, così come ci sono ancora difficoltà nella comprensione di diverse tecniche costruttive dell'anfiteatro Flavio.

Chi sia stato l'architetto del Colosseo, come molti altri dell'antichità, è sconosciuto, così come si possono fare solo delle ipotesi sulla forza lavoro; non si può escludere che si sia fatto ricorso a schiavi, tuttavia la qualità della costruzione testimonia l'impiego di manodopera esperta.

Molti sono gli indizi che fanno ritenere il lavoro di costruzione dell'intero anfiteatro un'operazione complessa ideata, progettata e realizzata con un costante e attento controllo esercitato al fine di mantenere un alto grado di produttività durante l'intera fase di edificazione, tenendo cioè sempre in considerazione gli aspetti legati all'efficienza, intesa non solo come rapidità di esecuzione, ma anche come rendimento qualitativo, nonché come solidità strutturale e lunga durata dell'opera realizzata, col minor costo possibile.

In quest'ottica sono da valutare tutte quelle scelte fatte in fase di costruzione del Colosseo tali da permettere il lavoro contemporaneo su più fronti ed in luoghi diversi. Il problema principale era, infatti, costituito dalla questione logistica ed organizzativa di far lavorare molte centinaia di persone nello stesso luogo. Il basso indice di meccanizzazione comportava, infatti, a quei tempi, lavorazioni ad altissimo 'contenuto' di manodopera di tipo schiavistico. Essendo questa un bene pressoché illimitato, a basso costo e non essendoci problemi di approvvigionamento del materiale, facilmente reperibile nelle zone intorno a Roma, la questione della moltiplicazione dello spazio lavorativo di cantiere era di primaria importanza. Di qui la necessità di dislocare lavorazioni simultanee in luoghi diversi.

Innanzitutto i blocchi di travertino, ma anche quelli di tufo, arrivavano in cantiere già squadrate, percorrendo le ampie strade appositamente realizzate in modo da permettere il transito contemporaneo di un gran numero di carri. I conci, così regolarizzati, una volta in cantiere venivano raggruppati a seconda delle proprie altezze in modo da poter essere messi in opera nello stesso filare orizzontale. Una grande mole di

lavoro era dunque gestita fuori sede, probabilmente presso le cave dove il materiale veniva estratto, tagliato e regolarizzato. Nello stesso tempo altri grossi blocchi di marmo erano in lavorazione presso gli scultori per l'esecuzione di quel grandissimo numero di statue che, a struttura ultimata, sarebbero state collocate in ogni fornice esterno. Allo stesso modo venivano "semilavorati" i fusti delle colonne e i capitelli: tale operazione di prima sbazzatura dei conci lapidei, finalizzata alla semplificazione della finitura ultima in base alla messa in opera, era comunque di prassi per tutti i cantieri dell'impero romano e non solo per il Colosseo.

Altri elementi di razionalizzazione del cantiere e dunque di celerità esecutiva consistono nel massiccio utilizzo di elementi modulari in un edificio che, compatibilmente con la forma ovale, risulta comunque geometricamente regolare, ripetitivo e con poche eccezioni. Tutti i gradini delle scale, per esempio, erano delle stesse misure così come i sedili di marmo destinati agli spettatori avevano tutti la stessa dimensione di 57 cm ciascuno.

L'intero anfiteatro Flavio era poi diviso in settori ognuno dei quali affidato ad appaltatori differenti. Ogni impresa, responsabile di un settore, lavorava con proprie maestranze e poteva giovarsi di una certa libertà di scelta nelle soluzioni tecniche esecutive. A prova di ciò esistono in vari luoghi della costruzione soluzioni tecniche costruttive che differiscono tra loro anche sensibilmente relative a parti architettonicamente uguali le quali appaiono chiaramente dettate da impostazioni esecutive diverse e concorrenziali.

Sono tuttora ben visibili nel Colosseo le congiunzioni in cui le parti realizzate dai cantieri dei diversi settori adiacenti vanno ad unirsi; è proprio qui che le incongruenze costruttive, come errori di scansione del partito architettonico o di definizione della quota d'imposta degli archi, determinano difetti di corrispondenza che non sfuggono anche ad un'osservazione superficiale.

L'osservazione della conformazione attuale rivela irregolarità anche notevoli ma che, nell'imponenza dell'insieme, evidentemente, non disturbavano l'effetto architettonico generale originario.

D'altronde la correzione in corso d'opera di incongruenze costruttive di questo tipo avrebbe comportato il rifacimento di parti consistenti con alti costi in termini di economia e di tempi d'esecuzione. Anche la mancanza di un perfetto allineamento verticale in prospetto tra i pilastri degli ordini sovrapposti, verificata con i rilievi, dimostra la determinazione a sacrificare il rigore esecutivo all'efficacia produttiva connessa all'autonomia dei singoli cantieri di costruzione. Dall'analisi dei particolari costruttivi dell'intero edificio sembra emergere una regola generale alla quale le maestranze dovevano attenersi: avere cura del dettaglio solo nel caso in cui ciò risultasse indispensabile. L'attenzione dei particolari è infatti un costo, economico e di tempo, che aumenta enormemente con l'affinarsi dell'esecuzione, con la riduzione cioè delle approssimazioni e delle tolleranze. Impiegare risorse per affinamenti non necessari implicava una perdita di efficienza, rigorosamente da evitare.

Gli esempi di applicazione di questa regola sono molti nelle finiture, ma anche in elementi strutturali. Per altri det-

tagli, ritenuti invece importanti, non vi erano eccezioni all'attenta cura prestata. Analizzando, ad esempio, la giacitura degli strati geologici del travertino, nei conci delle arcate, questi sono sempre paralleli a una delle due facce laterali dei cunei. Questa modalità di posa veniva quindi considerata irrinunciabile, ciò a causa, evidentemente, della consapevolezza dei costruttori romani che il travertino fosse un materiale tutt'altro che isotropo.

Quanto alle volte a botte e a crociera del monumento esse sono realizzate, come di consueto per i Romani, con l'uso dell'*opus caementicium*, allettato a strati orizzontali su centina lignea.

Una tecnica esecutiva che compare per la prima volta nel Colosseo, ancora non sufficientemente studiata, ma certo da valutare anch'essa nell'ottica di una maggior rapidità esecutiva ed efficacia statica, è l'inserimento di archi in laterizio, collegati tra loro, all'interno dell'*opus caementicium* costituente le volte a botte.

Ci sono varie ipotesi riguardo alla funzione di queste 'nervature': secondo alcuni servirebbero ad irrigidire la struttura, secondo altri a ripartire la massa di calcestruzzo fresco; altra ipotesi potrebbe essere quella di frazionare il ritiro della malta costituente la concrezione, in fase di presa e di indurimento, rendendolo in questo modo trascurabile; su grandi dimensioni, infatti, il ritiro avrebbe potuto causare pericolose fessurazioni. Attualmente la teoria più accreditata sembra essere quella secondo cui esse avevano la funzione di sgravare le centine lignee ed i puntelli sottostanti che, pertanto, potevano avere dimensionamenti molto più contenuti, dovendo sostenere solo poco più del peso delle costolature e non tutto il peso della massa di concrezione ancora fresca, oltre a consentire un disarmo in tempi più celeri. Ciò costituiva un risparmio di materiale, oltre che per il ridimensionamento dei puntelli, anche perché permetteva un celere disarmo consentendo, oltretutto, di riutilizzare la stessa centina più volte. Inoltre puntelli più semplici e snelli erano più facilmente e rapidamente gestibili. Infine, e questa sembra essere stato il fattore più importante, si otteneva un risparmio di tempo per la più veloce praticabilità di una volta appena gettata. Tuttavia ciò non toglie che certamente le nervature potevano assolvere a tutte le funzioni suddette.

Lo stesso spirito di celerità ed efficienza si può riscontrare nella costruzione delle fondazioni, costituite da una imponente platea ovale (diametro maggiore 188 m, diametro minore 156 m), con foro ovale centrale, profonda in media 13 metri. La platea infatti, non fu ottenuta mediante uno scavo, per la realizzazione del quale sarebbe stato necessario un grosso impegno lavorativo, ma in elevato, colmando poi le zone adiacenti con terreno e macerie di riporto, provenienti dalle zone circostanti.

Questa struttura in concrezione romana (*opus concretum*) con frammenti di pietra vulcanica dura (leucite), particolarmente solida, compatta e impermeabile, prende il posto di un avvallamento naturale che, come è noto, era occupato da un piccolo bacino di raccolta delle acque provenienti dai colli, il così detto 'Stagno di Nerone'. Le strutture neroniane, portici e costruzioni, che vi sorgevano intorno, furono seppellite nel terreno di riporto perimetrale.

La piattaforma di fondazione confinata ai suoi contorni da un poderoso muro in *opus caementicium* e cortina laterizia dello spessore di 3 metri, costituiva un appoggio particolarmente solido ed imponente in relazione al terreno acquitrinoso particolarmente cedevole che peraltro, con i secoli, ha determinato cedimenti differenziali nella parte verso il Celio.

Una volta terminato il basamento, esso venne coperto con un pavimento in travertino, spesso in media 90 cm. Su questo pavimento di pietra si marcarono i riferimenti per i pilastri principali dei muri radiali, ed i blocchi di base dei pilastri vennero letteralmente ancorati al pavimento, con un perno in ferro bloccato con piombo fuso. Questo scheletro di pilastri venne alzato sino al secondo ordine di piani e i pilastri furono collegati, alla sommità, da grossi archi in mattoni *bipedali*, cioè alti circa 60 centimetri, situati in modo da rendere possibile la costruzione di numerose volte rampanti, che nel loro complesso costituiscono il grande imbuto o cavea destinata a sostenere le gradinate per gli spettatori. In questo modo i lavori di costruzione potevano continuare contemporaneamente sopra e sotto la cavea, coprendo quasi tutte le volte tra gli archi ma lasciandone alcune aperte per poter sollevare i carichi. Il riempimento tra i pilastri è stato ottenuto, per il piano terreno, con *opus quadratum* di tufo, e per il secondo ordine con conglomerato cementizio a paramento di mattoni semilateres. La combinazione di materiali diversi ha inoltre permesso di aumentare la resistenza e l'elasticità della struttura complessiva.

Altro fattore favorente la celerità dei lavori fu la meccanizzazione del cantiere. I Romani erano in grado di costruire complesse macchine per il sollevamento dei blocchi le quali, pur essendo di legno consentivano, mediante sistemi di leve, verricelli e argani, di elevare notevoli carichi.

Molto probabilmente anche i piani inclinati costituiti dalla sommità dei muri radiali che sostengono la cavea nonché altre superfici inclinate eseguite con terreno di riporto e detriti, furono usate come piani di adduzione per il trasporto e sollevamento dei blocchi.

Quanto agli enormi blocchi in travertino, essi venivano montati mediante macchinari: infatti, in quasi tutti i blocchi sono presenti numerosi fori a coda di rondine praticati al fine di consentirne l'aggancio. Prima di procedere all'appoggio di ogni singolo pezzo, veniva spalmato sulla superficie del blocco inferiore uno strato sottile di boiaccia di calce; questo strato fluido favoriva lo slittamento dei massi uno sull'altro e, nello stesso tempo, rendeva le parti a contatto più "coesive". Aveva inoltre, evidentemente, l'importante funzione di distribuire i carichi sull'intera sezione orizzontale, evitando pericolose concentrazioni su aree limitate per la non perfetta complanarità delle facce combacianti. Inoltre venivano disposti perni metallici in appositi alloggiamenti, scalpellati nelle facce dei conci. A collocazione ultimata, infine, si colava piombo fuso in apposite canalette scalpellate nel blocco inferiore, che convogliavano quest'ultimo fino ai perni predisposti all'interno dei blocchi stessi che venivano così efficacemente fissati.

Quella miriade di fori, che attualmente sono visibili su buona parte della struttura in travertino del monumento,

sono le tracce del laborioso recupero, attuato nel Medioevo, di materiali metallici divenuti all'epoca particolarmente appetibili.

Le grappe nel Colosseo evitavano spostamenti relativi tra i blocchi sia in fase di costruzione quando, in assenza di carichi sovrastanti e nel montaggio ed allineamento dei blocchi superiori, erano ancora possibili spostamenti indesiderati, ma avevano anche la funzione di ottenere un rinforzo statico della struttura una volta terminata, ritenendo insufficiente l'effetto dell'attrito tra gli enormi massi alla durabilità statica dell'edificio nell'ipotesi certamente plausibile di un evento sismico.

Infatti l'unica situazione in cui l'effetto dell'attrito tra i blocchi può diminuire considerevolmente è il caso del sisma. Le oscillazioni sussultorie possono, in determinati istanti, diminuire l'effetto della forza peso e le oscillazioni della struttura possono incidere negativamente sull'aderenza tra le facce dei conci, anche se per brevissimi periodi di tempo. In queste situazioni, gli effetti delle oscillazioni ondulatorie possono determinare dislocazioni dei singoli blocchi rispetto a quelli circostanti. E' evidente che la presenza dei perni poteva avere la funzione proprio di evitare il reciproco slittamento dei blocchi di travertino, in quanto essi esercitavano un efficace vincolo che, resistendo al taglio, si opponeva agli spostamenti orizzontali.

Quindi è ipotizzabile che i Romani abbiano constatato gli effetti dei sismi su murature di monumenti più antichi in *opus quadratum* ed abbiano, di conseguenza, molto opportunamente, trovato, o comunque utilizzato in modo sistematico, il più efficace espediente per prevenire il verificarsi di tale grave danno.

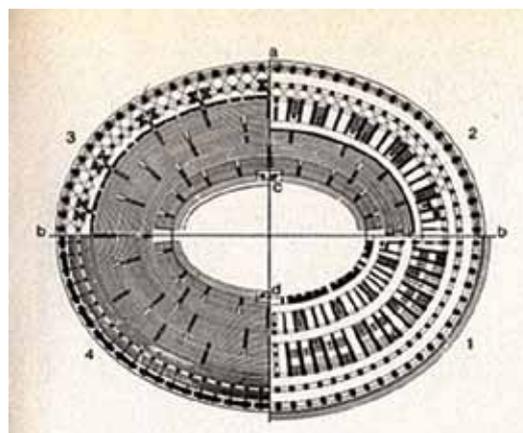


Fig. 1 - Pianta ellittica del Colosseo.

MATERIALI IMPIEGATI

I prodotti impiegati nella realizzazione del Colosseo a Roma includono tutti i tipi di materiali disponibili all'epoca della sua costruzione e dei numerosi restauri che si sono succeduti nel corso dei venti secoli di vita della struttura: pietre, metalli, laterizi, calcestruzzo, legno e tessuti.

I tipi di pietra più diffusamente impiegate nella costruzione del colosseo sono il tufo e, naturalmente, il travertino;

tuttavia un varietà incredibile di *marmora* sono stati impiegati nell'Anfiteatro Flavio durante tutte le fasi costruttive della sua storia. Il monumento più famoso di Roma veniva abbellito attraverso l'utilizzo delle tipologie di pietre ornamentali più "in voga" al momento dei restauri e i rifacimenti necessari dopo i vari eventi distruttivi (prevalentemente incendi e terremoti).

I litotipi più usati con funzione estetica sono certamente il marmo proconnesio, in misura minore il marmo lunense (Carrara), il marmo cipollino, la sienite o granito rosso (di Assuan) ma anche il pavonazzetto (*marmor phrygium*), il porfido rosso (*lapis porphirites*) e verde, il serpentino (*marmor lacedaemonium*), il verde antico (*marmor Thessalicum*), il rosso antico (*marmor taenarium*), il costosissimo giallo antico (*marmor numidicum*) e molti altri.

Questi marmi prevalentemente sono stati usati per i fusti delle colonne e i capitelli che abbellivano la *summa cavea*, ma anche per rivestire l'*opus latericium* e l'*opus caementicium* con lastre parietali e pavimentali, per la realizzazione di fontane, statue, balaustre, sedili degli spalti pavimenti in *opus sectile* e in mosaico (dall'*opus signinum*, al mosaico a tessere bianche e nere, all'alessandrino), ecc.

Ma è il travertino il materiale lapideo che caratterizza maggiormente il Colosseo. Oltre 100.000 metri cubi di questo materiale furono usati, tra la facciata e l'interno. Il materiale fu scelto perché le cave erano vicine, a Tivoli da cui il nome *lapis Tiburtinus*, e anche perché questa pietra possiede eccellenti proprietà meccaniche: è facile da lavorare e ha un'ottima resistenza allo schiacciamento e all'usura: sopporta quasi 330 kg per centimetro quadrato. Esso non si presta ad essere scolpito con dettagli minuti data la sua particolare struttura sedimentaria estremamente disomogenea e porosa; nonostante ciò esso grazie al sapientissimo impiego in una struttura tanto straordinaria quale è il Colosseo non può che apparire maestoso ed elegante.

Al momento della sua costruzione tutte le strutture esterne del Colosseo erano completamente realizzate in travertino e quindi la struttura appariva bianchissima con le arcate del secondo e terzo ordine esterno decorate da statue in marmi colorati che rappresentavano eroi, divinità e personalità dell'antica Roma. Anche l'attico era riccamente decorato: tra finestra e finestra erano affissi grandi *clipea* di bronzo, cioè



Fig. 2 - Ricostruzione virtuale del Colosseo tratta dalle fonti storiche.

scudi rotondi (Fig. 2).

Il travertino è un materiale lapideo calcareo bianco con venature color miele talvolta con striature più scure originatosi dalla precipitazione del carbonato di calcio più o meno puro da acque termali calde. Nonostante la sua porosità questo materiale è molto resistente a compressione, duro, fragile e pochissimo gelivo. Il travertino utilizzato nella costruzione del Colosseo proveniva dalla cava del Barco situata sulla strada per Tivoli. Ci sono testimonianze dell'utilizzo di questa pietra da parte dei Romani già a partire dal III sec. a.C. per esempio nei *Templi dell'Acropoli Tiburtina* nei pressi di Tivoli. Con Augusto e la dinastia *Giulio-Claudia*, a partire dalla metà del I secolo a.C., il travertino divenne il materiale caratteristico dell'architettura di Roma e, insieme all'impiego degli archi a tutto sesto, il simbolo della città eterna. Con la costruzione del *Colosseo in epoca Flavia*, realizzata tutta in opera quadrata di travertino, si arriva alla massima diffusione a Roma di questa pietra che ne diverrà inevitabilmente il simbolo.



Fig. 3 - Pilastrini in mattoni.



Fig. 4 - Calcestruzzo antico gettato tra paramenti in mattoni a perdere.

Oltre ai materiali lapidei il Colosseo si distingue anche per il massiccio impiego di mattoni utilizzati per gli archi, le colonne (Fig. 3), il rinforzo delle volte, i pavimenti (*opus spicatum*) e di calcestruzzo antico (*opus caementicium*) utilizzato sia per parte delle fondamenta, che come nucleo delle murature che erano formate da un getto di malta (*materia*) tra due paramenti in mattoni che fungono da cassi a perdere ed il successivo conficcamento a mano di rottami di pietra e mattoni (*caementa*) (Fig. 4).

FENOMENI DI DEGRADO PIU' DIFFUSI

Il Colosseo è una struttura complessa, polimerica, il cui aspetto attuale è il risultato di una miriade di modificazioni che si sono succedute sulla struttura e sui materiali a partire dal periodo immediatamente successivo alla sua inaugurazione. In questa ottica è facilmente immaginabile che le forme di degrado siano le più svariate. Ma chiunque si sia trovato, specialmente negli ultimi trent'anni, di fronte al Colosseo, insieme allo stupore e alla meraviglia che riempie gli occhi e il cuore alla vista di tale magnificenza, non ha potuto fare a meno di constatare quanto il Colosseo sia "sporco"; alla originaria intenzione dei suoi costruttori di creare una struttura dal bianco abbacinate, si contrappone oggi un edificio magnifico ma...quasi completamente nero.

Lo smog, la polvere, il guano dei piccioni, per i "non addetti ai lavori" sono fattori che limitano il completo godimento delle magnificenza della struttura, ma sono facilmente ovviabili con una pulitura delle superfici. Purtroppo però quello che comunemente è considerato lo "sporco" del Colosseo non è una patina superficiale più o meno tenace, ma è la *crosta nera* cioè una vera e propria modificazione dei primi millimetri, in alcuni casi anche centimetri della superficie lapidea per la quale non è sufficiente una "semplice" operazione di pulitura.

I materiali lapidei di natura calcarea, come il travertino, sono soggetti ad un tipo di degrado che si esplica in atmosfere inquinate quali quelle delle grandi metropoli attraverso un complesso processo chimico-fisico cui partecipano l'emissione di SO₂ da combustibili da riscaldamento e scarichi automobilistici ricchi in zolfo insieme a polveri sottili nere e idrocarburi incombusti, che va sotto il nome di solfatazione del carbonato di calcio. In pratica il carbonato di calcio (calcite) compatto e poco solubile, si trasforma, a causa dell'anidride solforica, in solfato di calcio idrato (gesso) poroso e solubile. Questa trasformazione del materiale originario si accompagna a due tipologie di degrado:

- 1) la formazione di croste nere localizzate in zone poco dilavate dall'acqua piovana (sotto i cornicioni, tra le pieghe delle lavorazioni) che sono il risultato dell'inglobamento da parte della porosità del gesso delle particelle di smog che entrano a far parte del primo strato di materiale, rendendolo crostoso e nero (Fig. 5);
- 2) la perdita dello strato superficiale del materiale lapideo quando la superficie è sottoposta al dilavamento; lo strato di gesso che si forma non viene impregnato di polvere, ma viene asportato dalla pioggia e/o dal vento in quanto molto solubile, poroso e sovente polverulento. Questo secondo aspetto della solfatazione viene considerato un danno infe-



Fig. 5 - Zona del Colosseo più esposto al traffico automobilistico con emissioni di anidride solforosa e polveri sottili che provocano la formazione di croste nere.

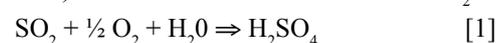


Fig. 6 - Blocchi di Travertino bianco dilavato in seguito alla solfatazione delle superfici.

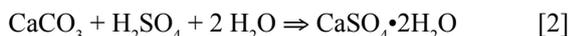
riore in quanto la superficie non appare nera e crostosa, ma bianchissima e apparentemente integra (Fig. 6), tuttavia è altrettanto grave perché di fatto si perde parte dello spessore superficiale che, specialmente nei casi di bassorilievi e altorilievi, annienta la leggibilità attraverso l'eliminazione della tridimensionalità.

Il fenomeno chimico può essere così riassunto:

- ossidazione all'aria umida della SO₂ atmosferica (derivata dai combustibili) con formazione di acido solforico H₂SO₄:



- neutralizzazione della pietra calcarea e formazione di gesso poroso (CaSO₄•2H₂O):



- deposito del pulviscolo atmosferico nero nel gesso poroso e formazione di crosta nera;
- rimozione del gesso di neoformazione ad opera dell'acqua nelle zone aperte esposte all'azione della pioggia.

Nella Fig. 5 è mostrato un classico esempio di formazione di croste nere sotto gli archi non dilavate dall'acqua piovana. Si può notare anche una significativa differenza cromatica tra la parte bassa delle colonne più chiare esposte alla pioggia e la parte più alta delle colonne protette dalla pioggia dai prosperanti cornicioni superiori.

RESTAURI DEL COLOSSEO

Nel 217 d.C., a causa di un incendio provocato da un fulmine, crollarono le strutture superiori del Colosseo e i lavori di restauro, eseguiti a cura di Alessandro Severo, durarono cinque anni durante i quali i giochi furono trasferiti al Circo Massimo. Altri lavori di restauro furono eseguiti per riparare i danni di un altro incendio causato da un fulmine nel 250. A seguito di terremoti nel 470 e nel 484 furono realizzati altri restauri. Dopo un altro terremoto dell'847 il Colosseo fu per lungo tempo utilizzato come fonte di materiale edilizio per palazzo Barberini ed il porto di Ripetta. Purtroppo quasi tutti i marmi pregiati che ornavano il Colosseo sia nei rivestimenti pavimentali e parietali che negli ornamenti (colonne, capitelli fontane, balaustre, ecc) del Colosseo fu dilapidato per essere impiegato nel rivestimento di chiese o di altri edifici pubblici o addirittura per ricavarne calce: è celebre la frase: "*Quod non fecerunt barbari, fecerunt Barberini*" che tradotta significa "*quello che non hanno fatto i barbari, lo hanno fatto i Barberini!*". Questa frase satirica è indirizzata a papa Urbano VIII e ai membri della sua famiglia Barberini per gli scempi edilizi di cui si resero responsabili non solo per i danni al Colosseo ma anche ad altri edifici storici di rilevante importanza come il Pantheon. Papa Urbano VIII nel 1625 fece asportare e fondere gli antichi bronzi romani del Pantheon, per costruire il baldacchino di San Pietro e i cannoni per Castel Sant'Angelo.

Il periodo neoclassico vide rifiorire l'interesse per il Colosseo quindi ebbe inizio una nuova fase di restauri che seguirono per tutto il secolo diciannovesimo. A seguito di un altro terremoto nel 1806 furono iniziati altri restauri guidati da Raffaele Stern per puntellare vari concii pericolanti con l'aggiunta di uno sperone in mattoni. Dal 1815 e nel 1823 il restauro fu seguito da Giuseppe Valadier e durante le operazioni tra le altre cose venne chiuso l'anfiteatro mediante cancellate e rinforzato l'anello perimetrale che si trova sul lato dei fori. Altri restauri per consolidare il Colosseo furono portati avanti dal 1830 al 1850 sotto la guida di Gaspare Salvi, sotto la cui direzione venne rinforzato il terzo anello sul lato di via san Gregorio, e di Luigi Canina, cui si deve la risoluzione di un problema di strapiombo verso l'interno della struttura.

Altri lavori sono stati eseguiti nel secolo scorso dal 1938 al 1939 per ristabilire le strutture sotterranee modificate da precedenti lavori di restauro.

CONCLUSIONI

Simbolo dei fasti dell'impero, l'Anfiteatro ha cambiato nei secoli il proprio volto e la propria funzione. Oggi il Colosseo è un monumento a se stesso e alle opere dell'ingegno umano che sopravvivono al tempo; esso si presenta ancora come una struttura funzionale e dinamica, visitabile su due livelli, che offre un'ampia panoramica sugli spazi interni, ma anche brevi e suggestivi scorci della città; al suo interno, inoltre, sono spesso organizzate esposizioni temporanee legate ai temi sempre attuali dell'antico e del suo rapporto con la contemporaneità, nonché spettacoli moderni.

Il Colosseo è giunto a noi come testimonianza del passato e a noi spetta consegnarlo alle generazioni future conservandone per quanto più possibile la materia che lo costituisce e la documentazione delle sue vicissitudini e delle sue alterne fortune nel corso della storia. In questa ottica si inserisce il tanto atteso intervento di restauro da anni invocato e atteso e finalmente giunto alla sua fase preliminare; come annunciato dal Sottosegretario di Stato ai Beni e alle Attività Culturali Francesco Giro «*i lavori partiranno alla fine dell'anno e dureranno tra i 24 e i 36 mesi*». Adesso bisognerà pubblicare i bandi per la scelta delle imprese e poi partirà il restauro sulla base dei progetti esecutivi predisposti dalla Sovrintendenza per i Beni Archeologici.

Dobbiamo ora essere grati all'Imprenditore Della Valle che intende investire 25 milioni di euro per il restauro di questa imponente opera architettonica dopo un accurato esame diagnostico dal punto di vista strutturale e dei materiali. In particolare è auspicabile un'ampia ed articolata fase diagnostica in quanto l'opera d'arte, in questo caso tra i maggiori capolavori dell'ingegno umano, non si pone solo come oggetto della fruizione, bensì essa è documento storico a tutti gli effetti. In questa ottica l'intervento di restauro rappresenta un momento fondamentale per la conoscenza delle tecniche dei materiali e delle tecnologie impiegate nei venti secoli di vita del Colosseo.

BIBLIOGRAFIA

Federica Guidi, *Morte nell'arena. Storia e leggenda dei gladiatori*, Mondadori 2006.

Giovanni Manieri Elia, *Costruzioni monumentali nell'Antica Roma. Efficienza produttiva e qualità costruttiva. Problematiche tecnologiche, strutturali e di cantiere: l'esempio del Colosseo sito web metodi e tecniche del restauro architettonico*, Articolo presente al seguente link: <http://metodoetecniche.blogspot.com/p/articoli-dellautore.html>

Bianca Misitano, *L'anfiteatro Flavio*, www.signaiferre.it

Rota Colisei, *La valle del Colosseo attraverso i secoli*, Mondadori Electa, 2002

Adriano Morabito, www.romasotterranea.it

Marco Bianchini, *Le tecniche edilizie nel mondo antico*, Editrice Dedalo, Roma 2010

A proposito di prestazione termica



CHRYSO® Flexò Flexò



L'evoluzione della normativa sul contenimento dei consumi energetici degli edifici impone importanti adeguamenti alle tecnologie produttive.

Con 65 anni di esperienza maturata nell'ambito dei materiali da costruzione, **CHRYSO** propone oggi **CHRYSO® Flexò**, una innovativa tecnologia per il mercato della prefabbricazione, che permette di realizzare pannelli a taglio termico integrale con la migliore prestazione termica.

La soluzione **CHRYSO** comprende:

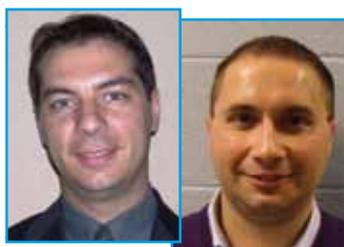
- semplici connettori, facili da installare, che assicurano una corretta ripartizione dei carichi. Grazie alla loro matrice sintetica, non inducono ponti termici consentendo la libera dilatazione degli strati del pannello dovuta alle variazioni di temperatura
- un programma di calcolo dedicato che realizza: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

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

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

CHRYSO
LA CHIMICA AL SERVIZIO DEI
MATERIALI DA COSTRUZIONE
www.chryso.com

L'INFLUENZA DEGLI ADDITIVI E DELLA TEMPERATURA SULLE PRESTAZIONI DEI CALCESTRUZZI A RITIRO COMPENSATO



Cataldo Matteo Corcella¹ - Cristiano Cereda¹
Fulvio Canonico² - Daniela Gastaldi²

¹Addiment Italia srl - ²Buzzi Unicem S.p.a.

MCorcella@addimentitalia.it - ccereda@addimentitalia.it

fcanonico@buzziunicem.it - dgastaldi@buzziunicem.it



1. INTRODUZIONE

Il calcestruzzo a ritiro compensato nasce dall'esigenza primaria di contrastare/eliminare, l'insorgere dei fenomeni fessurativi a medio-lungo termine indotti dal ritiro igrometrico impedito. Tali fessure infatti rappresentano uno dei principali problemi che interessano le strutture in cemento armato in quanto, oltre a pregiudicare l'estetica, sono frequentemente causa di degrado precoce (contatto diretto con agenti aggressivi: es. CO₂, Cl⁻) e perdita di funzionalità (es. perdita del requisito di impermeabilità).

L'idea alla base della progettazione del calcestruzzo a ritiro compensato [1], è quella di bilanciare le sollecitazioni di trazione differite prodotte dal ritiro igrometrico impedito, attraverso una pre-compressione chimica del calcestruzzo ottenuta mediante l'introduzione di un agente espansivo in polvere. Tale componente infatti, se opportunamente dosato, è in grado di produrre un'espansione iniziale del calcestruzzo che, se adeguatamente contrastata dalla presenza di vincoli di varia natura, viene trasformata in una sollecitazione di segno opposto a quella indotta dal ritiro igrometrico. Solitamente tale vincolo è dato dalla comune armatura metallica.

Gli agenti espansivi più comunemente utilizzati per questa tipologia di calcestruzzi sono l'ossido di calcio CaO o alternativamente un ossido misto di calcio e magnesio (Ca,Mg)O. Le ragioni sono molteplici sia di carattere economico che tecnico. Relativamente a quest'ultimo punto, recentemente è stato dimostrato che l'impiego di additivi riduttori di ritiro (SRA) in combinazione ad agenti espansivi a base di CaO o MgO, migliora notevolmente le prestazioni in termini di ritiro igrometrico di questo tipo di calcestruzzi sia a lungo che a breve termine anche in assenza di prolungata stagionatura umida [2,3]. Aspetto quest'ultimo non trascurabile dal momento che proprio la necessità di una prolungata maturazione umida (es. continua bagnatura, impiego di teli di iuta bagnati, ecc.) è stata tra le ragioni che hanno limitato l'impiego di questa tipologia di calcestruzzo.

In particolare è stato messo in evidenza che l'aggiunta dell'additivo SRA ai suddetti sistemi oltre a ridurre l'entità del ritiro igrometrico a lungo termine, ha come effetto quello di massimizzare l'efficacia dell'agente espansivo in termini di espansione iniziale (effetto sinergico). Relativamente alle ragioni di tale sinergia positiva nell'utilizzo congiunto di SRA e CaO, questa sarebbe, secondo alcuni autori [2], ascrivibile ad una sorta di ritardo nell'idratazione dell'agente espansivo che avverrebbe, in tal modo, in un sistema che ha sviluppato una maggiore aderenza calcestruzzo-armatura.

Accade infatti che, anche in assenza di additivo SRA, l'entità dell'espansione iniziale e quindi l'efficacia della compensazione del ritiro, a parità di dosaggio di espansivo, dipende strettamente dalla corretta sincronia di due diversi processi che avvengono all'interno del calcestruzzo [4]: l'evoluzione delle resistenze iniziali, controllate dall'iniziale idratazione del cemento, e il tasso di espansione, controllato dal grado di idratazione dell'agente espansivo.

In pratica nel caso in cui l'idratazione dell'agente espansivo fosse troppo rapida, rispetto a quella del cemento, la coazione indotta nel calcestruzzo sarebbe assai ridotta in quanto gran parte dell'aumento di volume avverrebbe in un momento in cui il calcestruzzo si trova ancora allo stato plastico. Al contrario, se la cinetica di idratazione dell'agente espansivo fosse molto lenta, come avviene ad esempio per un'altra tipologia di espansivi a base di solfo alluminati di calcio, l'efficacia del processo espansivo sarebbe vincolata all'applicazione di una prolungata stagionatura umida del calcestruzzo. Infatti per quest'ultima tipologia di espansivi, studi preliminari sembrerebbero non rilevare alcuna interazione positiva con gli additivi SRA.

Scopo della presente pubblicazione è di verificare l'ipotesi proposta dagli autori [2] relativamente all'effetto sinergico e chiarire il ruolo di altri parametri, come la temperatura e la tipologia di additivo superfluidificante, che tipicamente influenzano le cinetiche di idratazione di questi sistemi.

2. PARTE SPERIMENTALE

2.1 Materiali

È stato impiegato un cemento Portland tipo I classe 42.5 R la cui composizione mineralogica è riportata in Tabella 1.

L'aggregato di tipo naturale è costituito da una sabbia fine e da due pezzature grosse, composti secondo la proporzione riportata in Figura 1.

L'agente espansivo (Espanso C22) utilizzato è un ossido di calcio sinterizzato la cui distribuzione granulometrica è riportata in Figura 2.

Per supplire alla carenza di finissimi nella sabbia e per compensare la presenza del finissimo introdotto sotto forma di agente espansivo, è stato impiegato un filler calcareo di granulometria a questi paragonabile, Figura 3.

L'additivo riduttore di ritiro SRA, è un additivo liquido costituito da glicoli sintetici che agisce riducendo la tensione superficiale dell'acqua presente nei pori capillari dei sistemi cementizi, incrementandone la coesione e la resistenza al collasso.

Tabella 1 - Composizione mineralogica determinata mediante analisi XRD (metodo Rietveld).

FASI MINERALOGICHE	Wt. %	FASI MINERALOGICHE	Wt. %
C ₃ S	64.8	Portlandite	1.7
C ₂ S	8.9	Quarzo	0.2
C ₄ AF	10.8	Gesso	0.4
C ₃ A cubico	0.9	Dolomite	0.9
C ₃ A Na ortorombico	5.2	Bassanite	2.9
Calcite	3.1		

Gli additivi superfluidificanti impiegati sono due, entrambi di natura policarbossilica, ma caratterizzati da un diverso comportamento in termini di mantenimento della lavorabilità del calcestruzzo:

- **Ctc 39/T75R:** additivo superfluidificante iper-prestazionale a lunghissimo mantenimento della lavorabilità.
- **Ctc 39/T100i:** additivo superfluidificante a lungo mantenimento della lavorabilità.

2.2 Composizione dei calcestruzzi

Nelle Tabelle 2 e 3 sono riportate le ricette dei calcestruzzi impiegati. Il dosaggio di espansivo è stato fissato 30 kg/m³ (9.7%

s.p.c.) il dosaggio di SRA a 5.5 kg/m³ (1.8% s.p.c.).

Il rapporto a/c è stato fissato a 0,51 mentre il dosaggio di additivo superfluidificante è stato di 2 kg/m³ per i calcestruzzi confezionati con il Ctc 39/T100i e 3 kg/m³ per i calcestruzzi confezionati con il Ctc 39/T75R, tale da avere grossomodo la medesima consistenza iniziale.

Tabella 2 - Ricette dei calcestruzzi confezionati con l'additivo superfluidificante Ctc 39/T75R.

COMPONENTI (kg/m ³)	A.1	A.2	A.3
CEM I 42.5 R	310	310	310
Filler CaCO ₃	155	125	125
Acqua	158	158	158
Espanse C22	----	30	30
SRA	----	----	5.5
Ctc 39/T75R	3.0	3.0	3.0
a/c	0.51	0.51	0.51
Sabbia	745	745	745
Ghiaino	400	400	400
Ghiaia	670	670	670

Tabella 3 - Ricette dei calcestruzzi confezionati con l'additivo superfluidificante Ctc 39/T75R.

COMPONENTI (kg/m ³)	B.1	B.2	B.3
CEM I 42.5 R	310	310	310
Filler CaCO ₃	155	125	125
Acqua	158	158	158
Espanse C22	----	30	30
SRA	----	----	5.5
Ctc 39/T100i	2.0	2.0	2.0
a/c	0.51	0.51	0.51
Sabbia	745	745	745
Ghiaino	400	400	400
Ghiaia	670	670	670

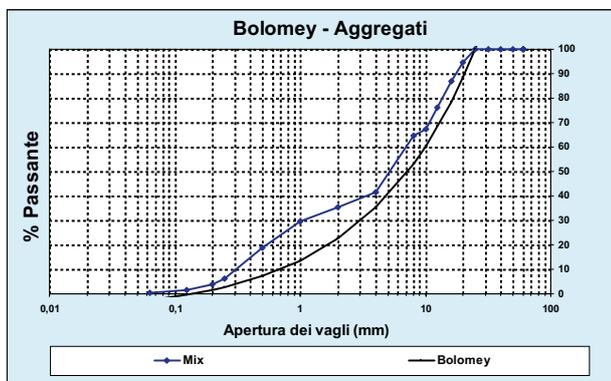


Fig. 1 - Curva granulometrica risultante.

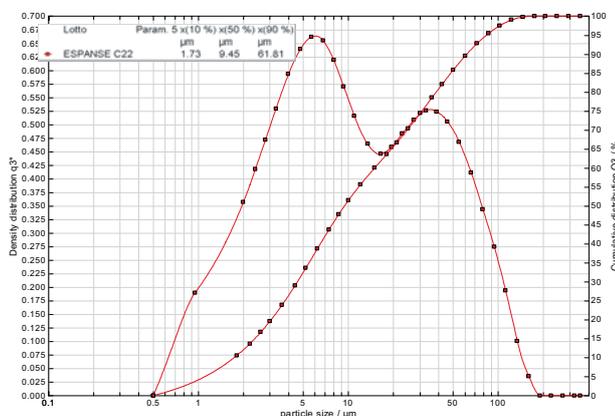


Fig. 2 - Granulometria laser dell'agente espansivo Espanse C22.

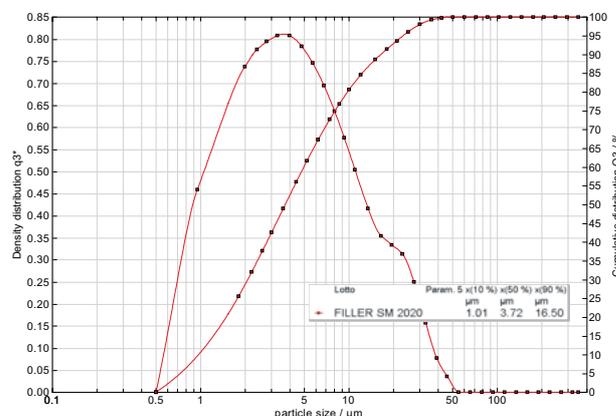


Fig. 3 - Granulometria laser del carbonato di calcio usato come filler.

2.3 Metodi e procedure

Al fine di valutare l'influenza della temperatura sulle caratteristiche di questi calcestruzzi, tutte le miscele riportate nelle tabelle precedenti, sono state confezionate all'interno di un locale climatizzato, alle temperature di 20°C e di 30°C.

Per la miscelazione dei calcestruzzi si è fatto ricorso ad una comune mescolatrice a caduta del volume utile di 30 litri. La procedura standard di carico ha seguito il seguente ordine: aggiunta degli aggregati asciutti insieme a 2/3 dell'acqua di impasto, riposo per 2 minuti, aggiunta di cemento, filler ed espansivo; un minuto di miscelazione, aggiunta della restante acqua d'impasto insieme agli altri additivi in forma liquida. Miscelazione finale per ulteriori 9 minuti. Per i soli sistemi A.3 e B.3 sono state eseguite prove supplementari in cui l'agente espansivo è stato aggiunto al termine della prova di mantenimento della lavorabilità e cioè dopo 60'.

La consistenza valutata mediante tavola a scosse (UNI EN 12350-5) è stata misurata a 0', 30', 45' e 60', per la determinazione del mantenimento della lavorabilità. Al termine di questa fase si è proceduto alla:

- esecuzione della misura della massa volumica e del contenuto d'aria in accordo alle normative UNI EN 12350-6 e UNI EN 12350-7;
- preparazione dei provini 80x80x240 mm, per la misura dell'espansione contrastata fino a 60 gg, in accordo alla normativa UNI 8148 metodo B. I provini dei calcestruzzi confezionati a 30°C sono stati maturati in un armadio climatizzato alle condizioni di T=30°C U.R.= 65%.
- determinazione dei tempi di fine presa in accordo alla normativa UNI 7123.
- rilevazione dell'andamento della temperatura del calcestruzzo contenuto in uno stampo 15x15x15 cm in PVC, mediante una termocoppia PT 100 munita di datalogger;
- preparazione, utilizzando stampi metallici 10x10x10 cm, dei provini per la determinazione dei valori di resistenza meccanica alle stagionature di 1, 2, 7 e 28 giorni. I provini dei calcestruzzi confezionati a 30°C dopo la sformatura sono stati avvolti in due strati di pellicola trasparente e maturati alla temperatura di 30°C.

La cinetica di idratazione dell'agente espansivo (ossido di cal-

Tabella 4 - Composizione delle miscele cemento + EC22 analizzate tramite TG.

BASE	ADDITIVO	Temp. (°C)	SRA (%)
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T100I	20	0
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T100I	30	0
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T75R	20	0
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T75R	30	0
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T100I	20	2
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T100I	30	2
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T75R	20	2
CEM 90% + EC22 10%	Ctc 39/T75R	30	2

Tabella 5 - Composizione delle miscele filler calcareo + EC22 analizzate tramite TG.

BASE	ADDITIVO	Temp. (°C)	SRA (%)
Filler 90% + EC22 10%	Ctc 39/T100I	20	0
Filler 90% + EC22 10%	Ctc 39/T100I	20	2

cio) è stata determinata mediante analisi termo-gravimetrica (TG). Il contenuto percentuale di idrossido di calcio Ca(OH)₂ è stato determinato a 6 ad a 24 ore utilizzando crogioli di allumina aperti in flusso di aria (80 ml/min) con il seguente programma:

- isoterma a 35°C per 10 minuti;
- rampa da 35°C a 1000°C a 5°C/min;
- isoterma a 1000°C per 10 minuti.

La stima del contenuto di Ca(OH)₂ nel campione è stata eseguita valutando la perdita percentuale di peso conseguente alla completa disidratazione dell'idrossido di calcio che avviene tra 400°C e 450°C

Le analisi sono state compiute, a T= 20°C e 30°C, su sistemi semplificati composti da paste di cemento+ossido di calcio+additivi secondo lo schema di seguito riportato. Sono state infine eseguite, limitatamente ad alcuni sistemi, misure su paste composte da filler calcareo+ossido di calcio+additivi, a pari rapporto acqua/polveri, al fine di discriminare tra il contributo offerto dal cemento e quello offerto dal CaO (Tabella 5).

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 Lavorabilità

Nei grafici di seguito (Figure 4 e 5) sono riportati gli andamenti dei mantenimenti della lavorabilità di tutte le miscele sia a 20° C che a 30°C. Tutte le miscele hanno consistenza superfluida in modo da minimizzare l'effetto della diversa consistenza iniziale sull'andamento nel tempo della lavorabilità.

Dai grafici delle Figg. 4 e 5, si può notare che a 20°C entrambi

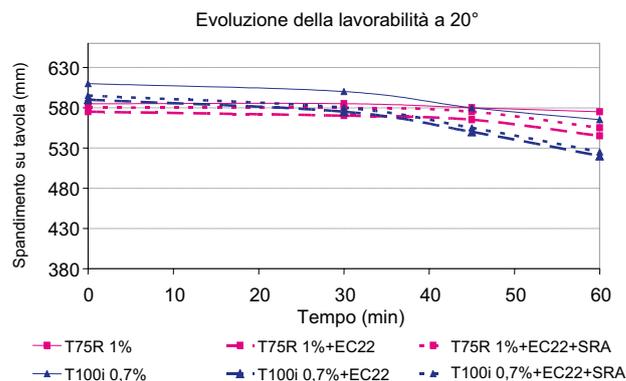


Fig. 4 - Evoluzione del consistenza dei calcestruzzi alla temperatura di 20°C valutata mediante spandimento su tavola.

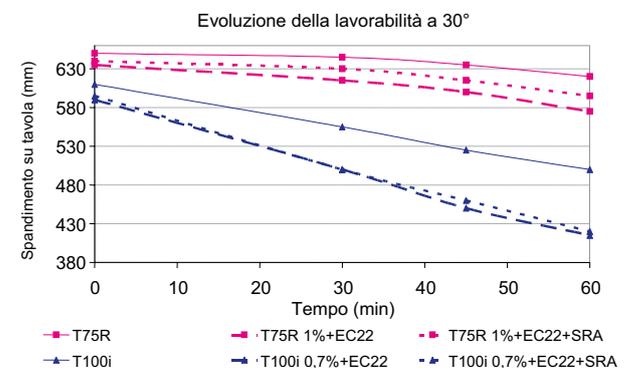


Fig. 5 - Evoluzione del consistenza dei calcestruzzi alla temperatura di 30°C valutata mediante spandimento su tavola.

gli additivi superfluidificanti conferiscono un ottimo mantenimento della lavorabilità.

L'aumento della temperatura da 20°C a 30°C favorisce la fluidificazione iniziale dei sistemi additivati con l'additivo Ctc 39/T75R.

L'aggiunta dell'agente espansivo influenza negativamente il mantenimento della lavorabilità in misura tanto maggiore quanto più è alta la temperatura di prova, e in misura maggiore quando è impiegato l'additivo superfluidificante Ctc 39/T100i.

Osservando i grafici si nota inoltre che l'aggiunta dell'agente espansivo produce un leggero calo di fluidificazione iniziale soprattutto a 30°C. L'agente antiritiro ha una influenza minore sugli impasti di calcestruzzo; solo in alcuni casi porta ad un leggero miglioramento nell'evoluzione della lavorabilità.

3.2 Tempi di presa

I tempi di presa rappresentati nel grafico in Figura 6 evidenziano come l'impiego di un additivo progettato per dare al calcestruzzo un più lungo mantenimento della lavorabilità (Ctc 39/T75R), influenzi anche i tempi di presa allungandoli a tutte le temperature. L'aggiunta dell'agente espansivo ha come effetto quello di accelerare notevolmente i tempi di presa del calcestruzzo sia a 20°C che, e in misura maggiore, a 30°C. L'introduzione, nei sistemi con espansivo, dell'additivo riduttore di ritiro SRA, induce un generale rallentamento delle cinetiche di idratazione che si esplica in un allungamento dei tempi di fine presa, in particolar modo in presenza dell'additivo Ctc 39/T75R.

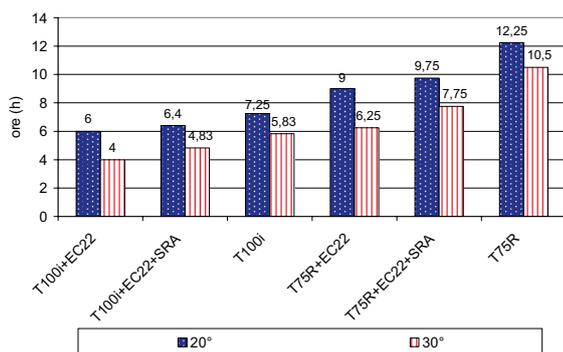


Fig. 6 - Tempi di presa dei calcestruzzi additivati con il superfluidificante Ctc 39/T75R e Ctc 39/T100i alle temperature di 20°C e 30°C.

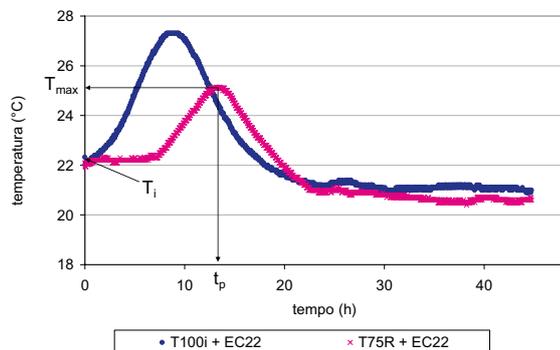


Fig. 7 - Esempio di termometria: sistema additivo superfluidificante + espansivo, temperatura ambientale = 20°C.

3.3 Termometrie

In Figura 7 è riportato un esempio di termometria di uno dei

sistemi analizzati (superfluidificante + espansivo, $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$). Da questo tipo di grafico, per ciascun sistema, è stato possibile estrarre il valore della temperatura iniziale del calcestruzzo T_i , quella massima del picco termico, T_{max} e il momento in cui questo è avvenuto, t_p .

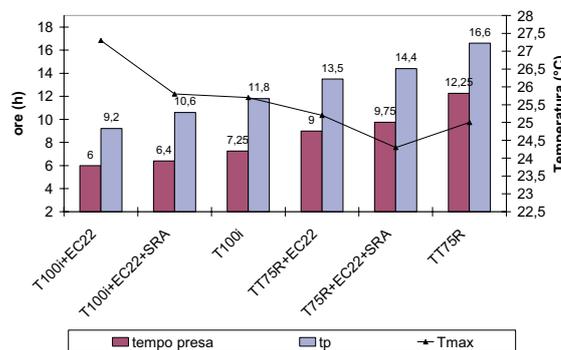


Fig. 8 - Variazione dei valori di T_{max} , t_p , Tempo di presa nei sistemi maturati a 20°C.

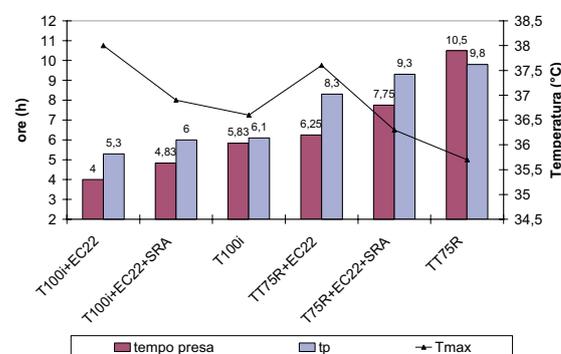


Fig. 9 - Variazione dei valori di T_{max} , t_p , Tempo di presa nei sistemi maturati a 30°C.

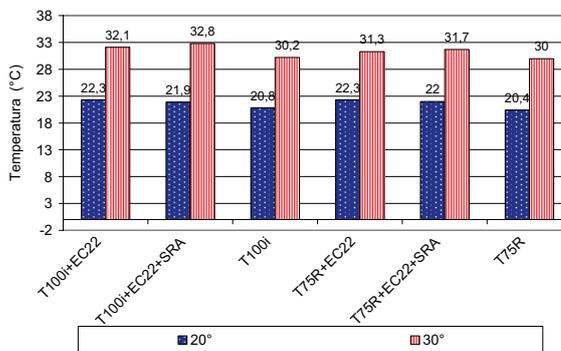


Fig. 10 - Temperature iniziali dei calcestruzzi.

Osservando questi dati, rappresentati nelle Figure 8, 9 e 10, è possibile notare che esiste una buona correlazione tra i valori dei tempi t_p , i tempi di presa e l'inverso delle temperature massime di picco T_{max} . L'aggiunta dell'ossido di calcio, oltre alla diminuzione dei tempi di presa, produce in generale un aumento delle temperature sia iniziali che di picco di circa 2°C. Sia gli andamenti dei valori di T_{max} che quelli di t_p confermano il sostanziale effetto di rallentamento delle cinetiche di idratazione indotto dall'introduzione dell'additivo SRA. Tale effetto è amplificato dalla presenza dell'additivo a lungo mantenimento della lavorabilità Ctc 39/T75R.

È interessante osservare come i valori delle temperature di picco T_{max} sono più basse per i sistemi con SRA (Figure 8 e 9), mentre

Tabella 6 - Evoluzione delle resistenze meccaniche (N/mm²) a compressione dei sistemi a 20°C e 30°C.

	Rc1	Rc2	Rc7	Rc28
	20°C			
T100i+EC22 20°	30	40	49	55
T100i+EC22+SRA 20°	22	35	44	49
ritardo SRA %	-26%	-13%	-11%	-11%
T100i	26	38	50	53
30°C				
T100i+EC22 30°	36	43	52	52
T100i+EC22+SRA 30°	32	38	46	52
ritardo SRA %	-12%	-11%	-12%	0%
T100i	34	41	49	55

	Rc1	Rc2	Rc7	Rc28
	20°C			
T75R+EC22 20°	29	40	53	55
T75R+EC22+SRA 20°	18	33	48	51
ritardo SRA %	-38%	-17%	-9%	-8%
T75R	22	38	51	56
30°C				
T75R+EC22 30°	36	47	57	58
T75R+EC22+SRA 30°	31	42	50	57
ritardo SRA %	-14%	-12%	-12%	-3%
T75R	35	44	55	62

i valori delle temperature iniziali dei calcestruzzi Ti risultano essere pressoché uguali con e senza SRA (Figura 10). Da ciò si può dedurre che il rallentamento delle cinetiche esercitato dall'SRA non avviene al momento dell'idratazione iniziale del sistema, ma in una fase successiva.

3.4 Resistenze meccaniche

In Tabella 6 sono riportate le resistenze meccaniche a compressione alle diverse stagionature per tutti i sistemi analizzati.

Analizzando questi dati è possibile fare le seguenti considerazioni:

- l'aumento della temperatura ambientale da 20°C a 30°C produce un generale incremento delle resistenze meccaniche a tutte le stagionature in tutti i sistemi additivati, ma in modo particolare a 1g e in presenza dell'additivo Ctc 39/T75R;
- a 20°C nei sistemi senza espansivo è massima la differenza indotta dal tipo di additivo superfluidificante impiegato. Con l'additivo a lungo mantenimento della lavorabilità Ctc 39/T75R infatti, le resistenze meccaniche a 1g sono più basse del -15% rispetto al calcestruzzo additivato con l'additivo Ctc 39/T100i. A 30°C tale differenze si annullano;
- l'aggiunta dell'espansivo ai suddetti sistemi a 20°C incrementa sensibilmente le resistenze meccaniche a 1g, annullando le differenze indotte dal tipo di additivo superfluidificante. I valori delle stesse alle stagionature più lunghe rimangono inalterati;
- l'aggiunta dell'espansivo a 30°C produce in tutti i sistemi additivati un leggero aumento delle resistenze fino a 7gg e un calo di circa il 5-6% a 28gg;

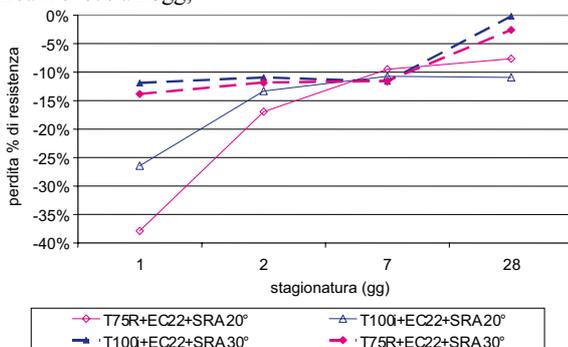


Fig. 11 - Riduzione di resistenze meccaniche a seguito dall'aggiunta del prodotto SRA.

- l'introduzione dell'additivo riduttore di ritiro SRA, così come riportato da altri autori [5] produce un calo delle resistenze meccaniche soprattutto alle brevi stagionature e nei sistemi intrinsecamente più ritardati (T=20°C + additivo 39/T75R). Tale calo diventa trascurabile a 30°C, Figura 11;
- le resistenze meccaniche a 1g dei sistemi contenuti espansivo (con o senza SRA) con diverso additivo superfluidificante sono uguali a T = 30°C e assai prossime a T = 20°C.

3.5 Espansioni contrastate

Nelle Figure 12 e 13 sono riportate le curve di espansione con-

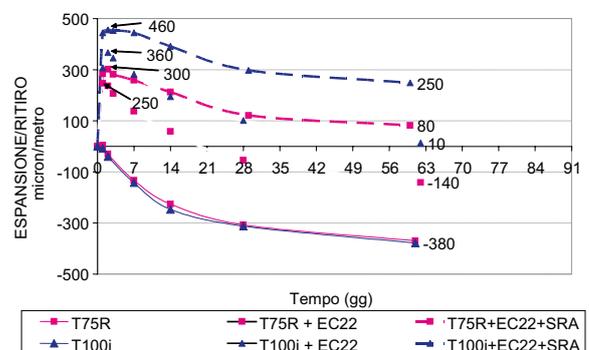


Fig. 12 - Risultati delle misurazioni dei valori di espansione contrastata valutata in accordo alle norma UNI 8148 metodo B, per i sistemi a 20°C.

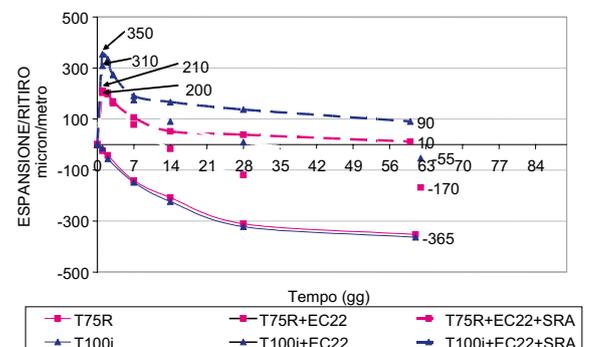


Fig. 13 - Risultati delle misurazioni dei valori di espansione contrastata valutata in accordo alle norma UNI 8148 metodo B, per i sistemi a 30°C.

trastata ottenute in accordo alla metodologia descritta nella norma UNI 8148 metodo B a 20°C e 30°C. In base a questa recente normativa, i provini, una volta sformati, non vengono più maturati in acqua, ma bensì all'interno di un foglio di cellophane per due giorni e poi in aria. Questa procedura, assai più rappresentativa della realtà della precedente, permette anche di quantificare il valore aggiunto offerto dall'additivo riduttore di ritiro SRA.

Dall'analisi dei risultati espressi nelle figure, si possono fare le seguenti importanti osservazioni:

- l'evoluzione del ritiro in assenza di agente espansivo ed SRA è pressoché indipendente dal tipo di additivo superfluidificante utilizzato;
- l'espansione iniziale indotta dall'aggiunta dell'agente espansivo Espanse C22 è maggiore quando si usa l'additivo Ctc 39/T100i;
- l'aggiunta dell'additivo riduttore di ritiro SRA al sistema contenente l'agente espansivo Espanse C22, oltre a ridurre il ritiro igrometrico a medio-lungo termine, ne massimizza l'espansione iniziale (effetto sinergico) a 20°C;
- tale effetto sinergico si riduce all'aumentare della temperatura;
- l'effetto sinergico è comunque maggiore per l'additivo Ctc 39/T100i a tutte le temperature;
- l'espansione contrastata assoluta si riduce a 30°C, e la cosa è solo parzialmente compensabile con aggiunta dell'additivo SRA;
- l'efficacia dell'additivo SRA nella riduzione del ritiro è massima con l'additivo Ctc 39/T75R indipendentemente dalla temperatura mentre è inferiore con il Ctc 39/T100i ad alte temperature.

Questi dati mettono in evidenza una maggiore difficoltà a raggiungere prefissati valori di espansione contrastata iniziale e finale alle più alte temperature ($T_{cls} = 30^\circ\text{C}$). Al fine di chiarire le ragioni di tale comportamento, sono state ripetute alcune delle prove a $T =$

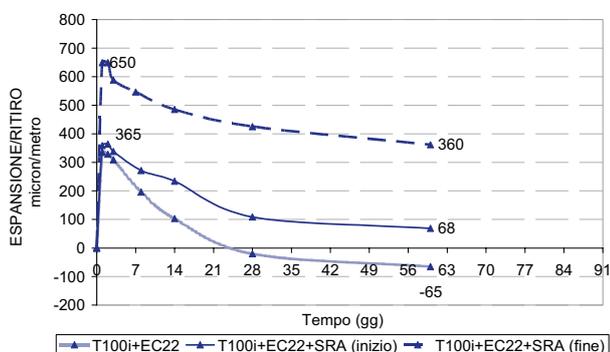


Fig. 14 - Risultati delle misurazioni dei valori di espansione contrastata per i sistemi a 30°C con additivo Ctc 39/T100i, con aggiunta ritardata dell'espansivo.

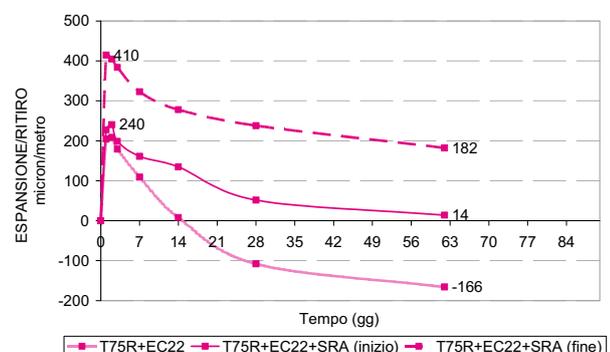


Fig. 15 - Risultati delle misurazioni dei valori di espansione contrastata per i sistemi a 30°C con additivo Ctc 39/T75R, con aggiunta ritardata dell'espansivo.

30°C provando ad aggiungere l'agente espansivo al termine della prova di mantenimento della lavorabilità, e cioè dopo 60'. Nei grafici che seguono, sono riportati i risultati ottenuti:

Da queste prove si evince che l'aggiunta ritardata dell'agente espansivo Espanse C22 aumenta notevolmente l'espansione iniziale indipendentemente dal tipo di additivo superfluidificante utilizzato. E' interessante osservare che, nel caso del sistema additivato con Ctc 39/T75R a 30°C, l'espansione iniziale raggiunta è pressoché uguale a quella che si raggiunge con l'additivo Ctc 39/T100i in cui l'espansivo è aggiunto all'inizio. L'aggiunta ritardata dell'espansivo non altera la successiva evoluzione del ritiro rispetto al caso il cui l'aggiunta è concomitante al cemento.

3.6 Termogravimetrie

In Tabella 7 sono riportati i dati ottenuti dall'analisi quantitativa termo-gravimetrica sui sistemi contenenti cemento+CaO+additivi.

Tabella 7 - Risultati analisi termo gravimetriche.

ADDITIVI	% CA(OH) ₂
T=20°C	
24 h	
T100I	16.76
T100I + SRA	15.02
Variazione %	-10.40
T75R	17.08
T75R + SRA	14.07
Variazione %	-17.60
T=30°C	
24 h	
T100I	18.93
T100I + SRA	16.84
Variazione %	-11.00
T75R	18.14
T75R + SRA	15.84
Variazione %	-12.70

I dati confermano quanto riportato in letteratura [5] riguardo l'effetto di ritardo esercitato dall'SRA nello sviluppo del Ca(OH)₂ conseguente alle reazioni di idratazione del cemento e dell'ossido di calcio. Tali dati a 24 ore sono altresì correlabili con i valori delle T_{max} , l'allungamento dei T_p e la diminuzione delle resistenze meccaniche alle brevi stagionature.

Risolviendo il piano fattoriale si ricava che i fattori determinanti ai fini dello sviluppo di Ca(OH)₂ a 24 ore sono:

- la temperatura (peso positivo)
- la presenza di SRA (peso negativo)

L'apporto degli additivi superfluidificanti impiegati sembra invece non avere effetti significativi.

Il modello lineare che si ricava (valido esclusivamente all'interno del dominio, ma estrapolabile anche al di fuori dello stesso) risponde alla seguente equazione:

$$\%Ca(OH)_2[24h] = 16,58 + 1,71 * T - 2,29 * SRA$$

E' possibile fornire anche una rappresentazione grafica del mo-

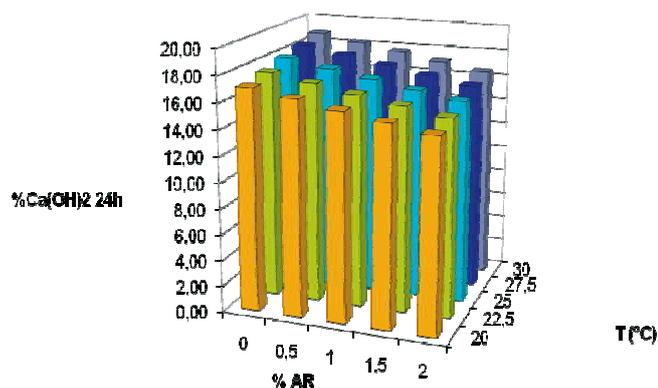


Fig. 16 - Rappresentazione grafica a 3 assi del modello che correla la % di SRA, la temperatura e la % Ca(OH)₂ sviluppata.

dello a 3 assi come mostrato in Figura 16.

E' interessante osservare in Tabella 7 che l'additivo Ctc 39/T75R sembra essere più influenzato dall'aggiunta dell'SRA rispetto al Ctc 39/T100i.

I risultati inoltre confermano che l'effetto dell'SRA sulle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi diminuiscono all'aumentare della temperatura.

In Tabella 8 sono riportati, per i soli sistemi con Ctc 39/T100i e SRA, i contributi nella formazione del Ca(OH)₂.

A 6 ore dalla iniziale miscelazione, il contributo preponderante alla formazione del Ca(OH)₂ è dato dall'idratazione dell'agente espansivo. Mentre dopo 24 ore i due contributi sono quantitativamente simili.

L'aggiunta ai sistemi dell'SRA riduce l'idratazione dell'agente espansivo sia a 6 ore che a 24 ore, mentre l'effetto sullo sviluppo del Ca(OH)₂ proveniente dal cemento è significativamente inferiore.

Tabella 8 - Analisi dei contributi del cemento e dell'agente espansivo al contenuto totale di Ca(OH)₂.

ADDITIVI T=20°C	t 6 h	Ca(OH) ₂	t 24 h	Ca(OH) ₂
T100I	da Cem	2.30	da Cem	9.40
	da CaO	6.50	da CaO	7.40
T100I + SRA	da Cem	1.90	da Cem	9.50
	da CaO	5.20	da CaO	5.60

3.7 Discussione

Alla luce dei dati sperimentali prodotti, viene confermato che l'entità del processo espansivo iniziale è massimizzata allorquando sono presenti condizioni che favoriscono le reazioni di idratazione del cemento rispetto a quella di idratazione dell'agente espansivo. In questa sorta di competizione tra queste diverse reazioni chimiche che avvengono nel calcestruzzo in presenza di espansivo nelle prime ore dal momento della miscelazione, hanno un ruolo determinante la temperatura e la tipologia di additivo impiegato.

Tra i sistemi analizzati (Tabelle 2 e 3), quello che ha mostrato il massimo valore di espansione iniziale, è stato quello in cui il calcestruzzo è stato prodotto a T=20°C in presenza dell'additivo superfluidificante meno ritardante (Ctc 39/T100i) insieme all'SRA.

Al contrario il sistema che ha mostrato il più basso valore si espansione contrastata iniziale, è stato quello in cui il calcestruzzo è stato prodotto a T=30°C con l'additivo a più lungo mantenimento della lavorabilità, e quindi intrinsecamente più ritardante (Ctc 39/T75R) in assenza di SRA.

Questi dati suggeriscono inoltre che delle variabili analizzate (temperatura, tipologia di additivo superfluidificante, presenza o meno di SRA), la temperatura e l'additivo SRA influenzano maggiormente la cinetica di idratazione dell'ossido di calcio, mentre la tipologia di additivo superfluidificante influenza in maniera preponderante l'idratazione del cemento. Questo è confermato dai valori dei tempi di presa del calcestruzzo, che possono essere impiegati quali indicatori del processo di indurimento del calcestruzzo conseguente all'idratazione dei componenti del cemento nelle prime ore dalla miscelazione. Osservando tali dati riportati in Figura 6, è possibile notare infatti che i tempi di presa variano in maniera più marcata al variare della tipologia di additivo superfluidificante di quanto non avvenga al variare della temperatura e della presenza o meno dell'additivo SRA.

I dati riassunti nelle Figure 12 e 13 evidenziano che una riduzione dell'espansione iniziale è possibile sia come conseguenza di un aumento della temperatura, sia come conseguenza dell'impiego di un additivo a lunghissimo mantenimento della lavorabilità (ritardante o meno). Sebbene vi sia una certa convergenza nel risultato finale, l'analisi dei dati evidenzia che questo è il risultato di cause diverse. Nel caso della temperatura, ciò è dovuto ad una maggiore accelerazione della reazione di idratazione dell'agente espansivo (già di per se molto rapida) rispetto a quella di idratazione del cemento. Nel secondo caso è dovuta al rallentamento di quest'ultima. Scarso è infatti l'effetto ritardante dell'additivo Ctc 39/T75R nei confronti dell'idratazione del CaO.

Per quanto attiene il contributo dell'additivo riduttore di ritiro SRA sull'espansione iniziale in presenza di agente espansivo (effetto sinergico), i risultati delle prove confermano che per quanto esso influisca anche sull'idratazione del cemento inibendola, il suo effetto principale sia quello di ritardare l'idratazione dell'ossido di calcio, (Tabelle 7 e 8) in accordo a quanto riportato da altri autori [2].

Per quanto riguarda invece la riduzione del ritiro a lungo termine indotta dall'SRA, i dati mettono in evidenza un altro aspetto interessante: e cioè il fatto che essa è influenzata dalla tipologia di additivo superfluidificante in misura tanto maggiore tanto più alta è la temperatura. Osservando le Figure 12 e 13 infatti si può osservare che mentre la riduzione di ritiro nei sistemi con l'additivo Ctc 39/T75R è del 44% e 46% rispettivamente a 20°C e 30°C, nei sistemi additivati con il Ctc 39/T100i, la riduzione di ritiro è del 41% a 20°C e del 27% a 30°C. Alla luce dei risultati ottenuti dalle analisi termo gravimetriche, si ritiene che questo diverso comportamento sia legato a modificazioni di natura chimico-fisica che intervengono in un periodo successivo alle prime 24 ore di stagionatura.

Ad ogni modo, il fatto che la riduzione del ritiro a T = 30°C sia favorita in presenza dell'additivo a lunghissimo mantenimento della lavorabilità (Ctc 39/T75R) riveste una notevole importanza in quanto compensa, almeno in parte, la scarsa espansione iniziale che caratterizza quest'ultimo sistema.

Alla luce dei risultati ottenuti, la minore espansione iniziale alle alte temperature è ascrivibile alla maggiore accelerazione della reazione di idratazione del CaO rispetto a quella del cemento. In queste condizioni, almeno al dosaggio analizzato, l'azione di ritardo selettivo esercitato dall'additivo SRA è insufficiente.

In queste circostanze assai più efficace si è rilevata l'aggiunta ritardata dell'agente espansivo che consente l'ottimizzazione delle performance del calcestruzzo in termini di espansione iniziale, mantenimento di lavorabilità e sviluppo delle resistenze iniziali.

4. CONCLUSIONI

Le prestazioni dei calcestruzzi a ritiro compensato a base di ossido di calcio sono influenzate principalmente dalla temperatura e dal tipo di additivo superfluidificante impiegato.

Sono state investigate le condizioni che ne determinano il valore finale di espansione contrastata al variare dei suddetti parametri.

Nel caso si debba realizzare un calcestruzzo a ritiro compensato in presenza di temperature ambientali dell'ordine dei 20°C l'uso combinato di agente espansivo e antiritiro consente di massimizzare l'espansione iniziale e il conseguente valore di ritiro igrometrico a medio e lungo termine anche in caso di tempi di trasporto prolungati.

In presenza di temperature nell'ordine dei 30°C l'ottenimento di una analoga prestazione è condizionata dal tempo di trasporto richiesto.

L'utilizzo infatti di un additivo a lunghissimo mantenimento della lavorabilità può portare ad una riduzione dell'espansione iniziale del calcestruzzo che viene solo parzialmente compensata dalla riduzione del ritiro igrometrico dovuto all'additivo SRA. In questi casi può essere necessario prevedere una aggiunta differita dell'agente espansivo in modo da diminuire quanto possibile la quota parte di espansivo che si idrata durante il trasporto del calcestruzzo senza dare alcun apporto positivo al processo espansivo iniziale.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] ACI Committee 223-98: "Standard Practice for Use of Shrinkage-Compensating Concrete", ACI Manual of Concrete practice, Detroit, MI.
- [2] C.Maltese, C. Pistolesi, A. Lolli, A.Bravo, T.Cerulli, D. Salvioni, "Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars", Cement and Concrete Research, 35 (2005) 2244-2251.
- [3] M. Collepardi, A. Borsoi, S. Collepardi, J.J. Olagot, R. Troli "Effect of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions", Cement and Concrete Research, 27 (2005) 704-708.
- [4] M.Collepardi, "Il calcestruzzo a ritiro compensato", Atti del 3° Congresso CTE, Novembre (1980).
- [5] F. Rajabipour, G. Sant, J. Weiss, "Interaction between shrinkage reducing admixtures (SRA) and cement paste's pore solution", Cement and Concrete Research, 38 (2008) 606-615.
- [6] D.P. Bentz, M.R. Geiker, K.K. Hansen, "Shrinkage-reducing admixtures and early desiccation in cement pastes and mortars", Cement and Concrete Research, 31 (2001) 1075-1085.

La pubblicazione originale è disponibile sul sito dell'editore: www.cte-it.org.

Ha conseguito il Master in Ingegneria del Calcestruzzo

**Geom. Carlos
Alberto Di Meo**



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



Ing. Denise Po

LA CENERE PESANTE DA TERMOVALORIZZATORI PER IL TRATTAMENTO DEGLI RSU



Alessandro Quadrio Curzio¹, Silvia Collepari²,
Daniele Ongaro³, Mauro Sammartino³

¹Petracem - a.quadriocurzio@petracem.it

²Enco Srl - info@encosrl.it

³Actelios Gruppo Falck, Ongaro.Ecosesto@Falck.it - Sammartino.Actelios@Falck.it

1. INTRODUZIONE

Dai termovalorizzatori per produrre energia termica dalla combustione dei rifiuti solidi urbani (RSU) si ricavano due tipi di ceneri: una trascurabile quantità di cenere leggera molto ricca in cloruri e che pertanto non può essere impiegata nella confezione del calcestruzzo armato per il rischio di corrosione dei ferri di armatura; una discreta percentuale (15-30 % dei rifiuti trattati) di ceneri pesanti (che non contengono cloruri o altre sostanze nocive per il calcestruzzo) che sono portate a discarica. Le ceneri pesanti (o, così come spesso vengono chiamate scorie o "bottom ash"), così come si raccolgono nella griglia del termovalorizzatore, sono grossolane e mescolate ad altri frammenti di natura metallica (Fig. 1).



Fig. 1 - Ceneri pesanti da RSU raccolte nella griglia del termovalorizzatore.

Se si debbono impiegare come aggiunte minerali nel calcestruzzo, le ceneri pesanti da RSU debbono essere private dai metalli pesanti che sempre accompagnano i rifiuti solidi urbani (Fig. 2).



Fig. 2 - Residui metallici ferrosi separati dalla cenere pesante.

Dopo la eliminazione delle parti metalliche la cenere pesante si presenta in forma di granuli da 1-4 mm (Fig. 3).

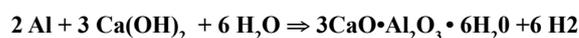


Fig. 3 - Cenere pesante dopo la rimozione delle parti metalliche.

La composizione delle ceneri da RSU non è molto diversa da quella loppa di altoforno e della cenere volante del carbone tradizionalmente utilizzate per ridurre il dosaggio del cemento e migliorare la durabilità dei calcestruzzi. Infatti, le ceneri pesanti da termovalorizzatore contengono principalmente silice, allumina, calce e ossido ferrico (1-4). Questo significa che, se finemente macinate, queste ceneri possono presentare un'attività pozzolanica o un comportamento idraulico con benefici per la microstruttura della matrice cementizia.

L'impiego nel calcestruzzo delle ceneri pesanti da RSU comporta anche la produzione di un materiale eco-sostenibile perché attenua il conferimento a discarica di grosse quantità di un rifiuto convertendolo in una preziosa materia seconda da riciclare. Alcuni ricercatori (5,6) hanno effettivamente trovato che le ceneri pesanti da RSU, purché finemente macinate, reagiscono indurendo in presenza di calce o cemento Portland.

Tuttavia, nessuna applicazione pratica è stata finora segnalata sull'impiego di queste ceneri in combinazione con cemento a causa di un effetto collaterale che ne penalizza l'applicazione. Quest'effetto collaterale negativo consiste nella reazione tra le particelle di alluminio metallico presente nelle ceneri da RSU con l'idrossido di calcio che si forma per idratazione dei silicati (C_3S e C_2S) del cemento Portland (7). A seguito di questa reazione si formano bolle di idrogeno che fanno aumentare in modo erratico la porosità del calcestruzzo indebolendone la resistenza meccanica anche dopo una prolungata compattazione:



A causa di questo inconveniente, la cenere pesante, così come proviene dal processo RSU non è adatta, anche se finemente macinata, come componente in materiali cementizi ed è stata per lo più impiegata solo come aggregato per calcestruzzi bituminosi. Tuttavia, recentemente Quadrio Curzio ha messo a punto un processo brevettato (8) in base al quale l'alluminio ed altri metalli anfoteri presenti della cenere pesante sono in larghissima misura eliminati e, in misura residua, trasformati nei corrispondenti ossidi incapaci di reagire con la calce e quindi non sono più nocivi nei calcestruzzi cementizi perché si rimuove il rischio di sviluppare bolle di idrogeno.

Secondo il processo di produzione messo a punto da Quadrio Curzio, dopo aver rimosso le particelle metalliche, la cenere pesante da RSU può essere macinata in due modi: a secco producendo una polvere fine o a umido sotto acqua producendo un fango molto fluido (*slurry*) con circa 50% di acqua. Il secondo metodo produttivo è molto più efficace sia per maggiore finezza della cenere che può essere conseguita, sia per la più facile ed accurata rimozione delle parti metalliche ferrose ed alluminose.

2. CARATTERISTICHE DELLA CENERE PESANTE DA RSU

Nella Tabella 1 sono mostrate le composizioni degli ingredienti impiegati per produrre calcestruzzi con e senza aggiunte minerali a base di cenere volante da carbone (CV) di tipo F, di fumo di silice (FS), di cemento Portland 52.5 R (CP) e di cenere pesante macinata (CPM) da RSU.

Tabella 1 - Composizione chimica della cenere pesante da RSU macinata (CPM) a confronto con la cenere leggera da carbone (CV), del fumo di silice (FS) e del cemento Portland (CP) 52.5 R.

OSSIDO	CPM	CV	FS	CP
SiO ₂	40.07	55.11	95.12	23.15
CaO	20.43	2.12	0.79	63.12
Al ₂ O ₃	11.08	27.91	0.21	5.20
Fe ₂ O ₃	10.60	3.75	0.70	1.05
MgO	3.37	0.51	0.58	0.15
Na ₂ O	3.52	0.41	0.19	0.35
K ₂ O	0.90	0.71	0.31	0.41
p.a.f.*	5.2	6.8	2.01	2.2

* perdita al fuoco

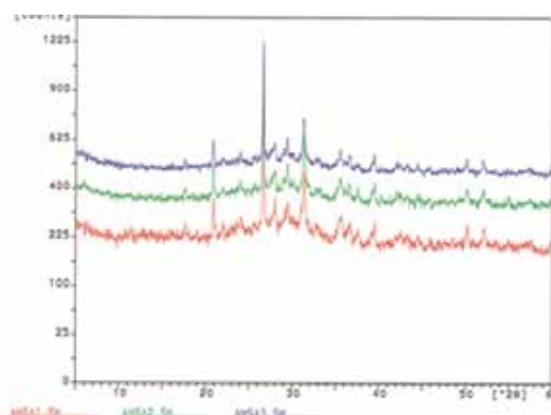


Fig. 4 - Diffattogramma di tre campioni di CPM da diversa provenienza da impianti di RSU.

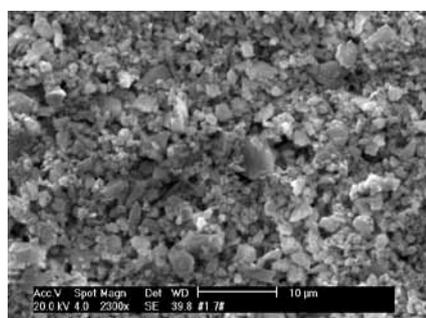
Da un punto di vista chimico la cenere pesante da RSU presenta qualche somiglianza con la cenere da carbone di tipo C, meno ricca in silice è più ricca in calce rispetto alla cenere da carbone di tipo F (Tabella 2). Anche l'analisi per diffrazione dei raggi X (Figura 4) per tre campioni di CPM di diversa provenienza è molto più simile a quella della cenere volante di carbone tipo C (assenza di silice amorfa e presenza di quarzo) che non alla cenere volante di carbone di tipo F.

La Tabella 2 mostra le caratteristiche granulometriche di tre campioni di cenere pesante da RSU macinata a 3 livelli di finezza. Aumentando il tempo di macinazione sotto acqua il diametro medio particellare (D50) è passato da circa 5 µm, a 3 µm e a 1,7 µm. Quest'ultimo, a causa della sua maggior finezza, contiene – a parità di fluidità dello *slurry* – un minor contenuto di CPM secco rispetto agli altri due *slurry* più grossolani.

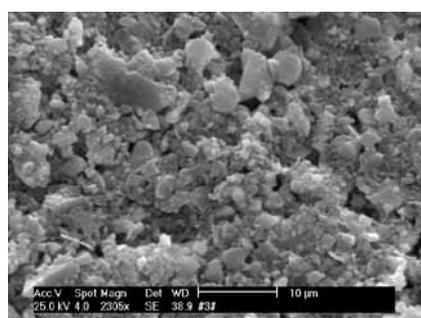
Tabella 2 - Caratteristiche della cenere pesante da RSU (macinata in forma di *slurry* acquoso) determinate mediante laser-granulometria

TIPO DI SLURRY	D ₅₀ * (µm)	AREA SUPERFICIALE SPECIFICA (m ² /kg)	CONTENUTO SECCO (%)
5 CPM	4.88	2440	55.7
3 CPM	2.85	3430	56.7
1.7 CPM	1.67	4724	41.0

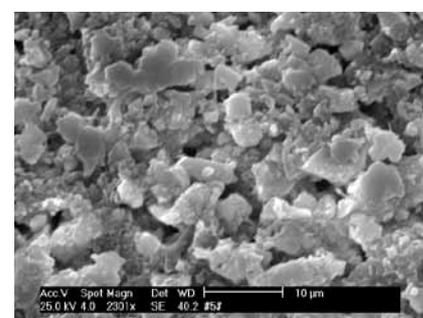
* dimensione che corrisponde al 50% di CPM con particelle più piccolo di questo valore



5 GBA



3 GBA



1.7 GBA

Fig. 5 - Osservazione al microscopio elettronico a scansione dei tre campioni di CMP essiccati dai corrispondenti *slurry*.

Tabella 3 - Composizione delle miscele di calcestruzzo.

MIX	CEMENTO PORTLAND (kg/m ³)	AGGIUNTA MINERALE			SABBIA 0-4 mm (kg/m ³)	GHIAIA 4-2 mm (kg/m ³)	ACQUA * (kg/m ³)	SUPER-FLUIDIFICANTE (% by m.c.)	a/c	a/mc **	SPLUMP (mm)
		TIPO	SECCO	ACQUA							
Control Mix	340	-----	-----	-----	976	970	167	0.90	0.49	0.49	220
FA Mix	272	fa	68	-----	976	970	167	0.90	0.62	0.49	220
SF Mix	304	sf	34	-----	968	962	166	1.10	0.54	0.49	210
5 CPM Mix	273	5 GBA	68	54	980	974	167	0.90	0.60	0.49	220
3 CPM Mix	273	3 GBA	68	54	980	974	168	0.90	0.61	0.49	210
1.7CPM Mix	273	1.7 GBA	68	48	980	974	168	0.90	0.61	0.49	210

* Comprende l'acqua presente negli slurry del CPC - **mc: materiale cementizio → cemento + aggiunta minerale

La Figura 5 mostra la dimensione delle particelle macinate di cenere pesante da RSU con dimensione media di circa 5 µm, circa 3 µm e di 1,7 µm.

3. PROVE SPERIMENTALI SU CALCESTRUZZI CON CPM ED ALTRI MATERIALI POZZOLANICI

Nei paragrafi che seguono sono mostrati i materiali e le composizioni adottate per confezionare i calcestruzzi. Successivamente sono illustrate le prestazioni di questi calcestruzzi.

3.1 Proprietà del calcestruzzo con cenere pesante macinata da RSU

Nei paragrafi che sono illustrati i risultati ottenuti (9) con calcestruzzi a base dei tre campioni di slurry di CPM, di cenere leggera da carbone e da fumo di silice in confronto a un calcestruzzo privo di aggiunta minerale. Gli *slurry* sono stati prodotti macinando la cenere pesante dei termovalorizzatori industriali della Falk dopo aver rimosso in un impianto su scala semi-industriale i metalli ferrosi e non ferrosi.

La Tabella 3 mostra la composizione dei seguenti calcestruzzi identificati dai seguenti simboli:

- *Control mix* ⇒ calcestruzzo senza alcuna aggiunta minerale;
- *CV mix* ⇒ con 20% di cenere volante in sostituzione del cemento Portland;
- *SF mix* ⇒ con 10% di fumo di silice in sostituzione del cemento Portland;
- *5CPM* ⇒ con 20% di cenere pesante da 5 µm in sostituzione del cemento Portland;
- *3CPM* ⇒ con 20% di cenere pesante da 3 µm in sostituzione del cemento Portland;
- *1,7CPM* ⇒ con 20% di cenere pesante da 1,7 µm in sostituzione del cemento Portland.

In tutti i calcestruzzi della Tabella 3 il dosaggio di materiale cementizio (*mc*) che include cemento Portland e le aggiunte minerali in sostituzione è circa 340 kg/m³. L'acqua di impasto, inclusiva di quella presente nello *slurry* di CPM, è circa 167 kg/m³, cosicché il rapporto *a/mc* è di 0,49. Un'adeguata quantità di superfluidificante a base policarbossilica (circa 1% sul peso del materiale cementizio) è stato impiegato per produrre calcestruzzi tutti a pari slump di 210 mm.

3.2 Proprietà dei calcestruzzi

Sono esaminate prove di lisciviazione, di resistenza meccanica, di impermeabilità e di durabilità nei confronti della diffusione dei cloruri e della penetrazione della CO₂.

3.2.1 Prove di lisciviazione

Sono state innanzitutto determinate le prove di lisciviazione eseguite secondo le normative sui rifiuti del Ministero dell'Ambiente (DL 03/08/05, DM 5/2/98 con le ultime modifiche del DM 186 del 5/4/2006). Tale caratterizzazione ha compreso la valutazione della composizione e i test di cessione sia sulla cenere pesante da RSU tal quale che sulle frazioni derivanti dal processo di selezione e macinazione. Al fine di comparare le proprietà della CPM sotto il profilo igienico/ambientale con altri leganti comunemente in uso, sono stati altresì previsti test di cessione su provini di calcestruzzo prodotti con cementi comuni, ceneri volanti da carbone ed CPM. Queste prove sono risultate tutte positive, nel senso che il rilascio di elementi pericolosi (come cromo, arsenico, ecc.) è apparso ben al di sotto dei valori tollerati e non sono qui riportate per brevità di esposizione.

3.2.2 Prove meccaniche

La resistenza meccanica a compressione è stata determinata su provini stagionati a umido a 20 °C fino a 90 giorni. La Figura 6 mostra lo sviluppo della resistenza meccanica del calcestruzzo di riferimento (*Control mix*) senza aggiunte minerali a confronto con i calcestruzzi *CV mix* ed *FS mix* dove il cemento Portland 52.5 R è stato sostituito con il 20 % di cenere o 10 % di fumo di silice. In presenza di CV la resistenza meccanica è sempre inferiore a quella del *Control mix* ma la differenza tende a diminuire con il tempo e si annulla a 90 giorni. In presenza di fumo di silice la resistenza meccanica è leggermente inferiore a quella del *Control mix* ma solo alle brevi stagionature (< 7 giorni), mentre tende ad aumentare all'aumentare della stagionatura successiva tra 14 e 90 giorni.

Le Figure 7, 8 e 9 mostrano la resistenza meccanica in funzione del tempo dei calcestruzzi dove il 20 % di cemento Portland 52.5 R è stato rispettivamente sostituito dal 5 CPM, dal 3 CPM e dall'1,7 CPM in confronto con le curve di resistenza meccanica della Figura 6. Maggiore è la finezza della cenere pesante macinata, maggiore è la resistenza meccanica. In particolare, la CPM più fine (D₅₀ = 1,7 µm) si comporta come il fumo di silice e supera le prestazioni del *Control mix* dopo 7 giorni di stagionatura.

La sostituzione del 20 % di cemento Portland con la 3 µm CPM alle brevi stagionature riduce leggermente la resistenza rispetto al *Control mix* ma non modifica la resistenza a 90 giorni. Sostituendo

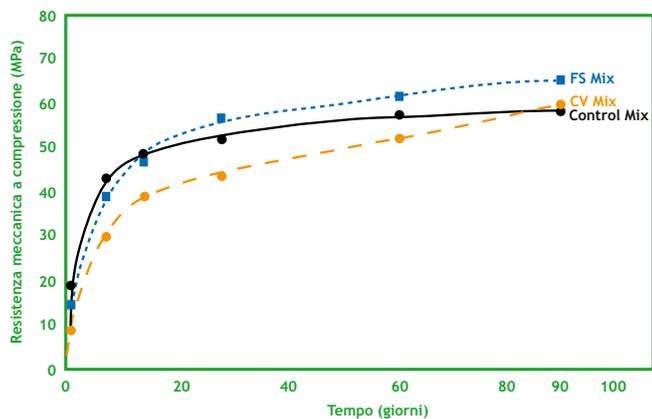


Fig. 6 - Resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo con e senza sostituzione del cemento Portland con cenere volante o fumo di silice.

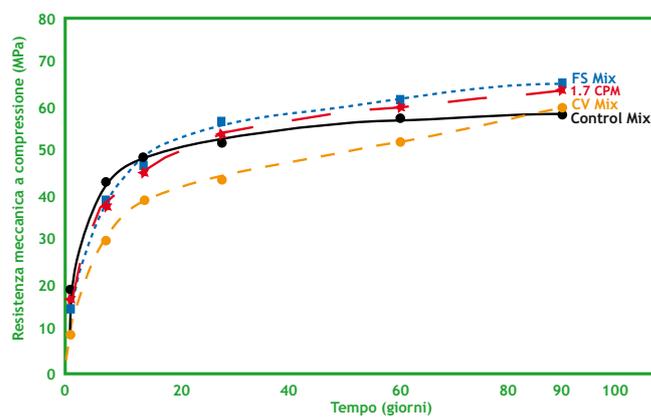


Fig. 7 - Resistenza meccanica del calcestruzzo con e senza sostituzione di Cenere volante, fumo di silice o 1.7 µm CPM.

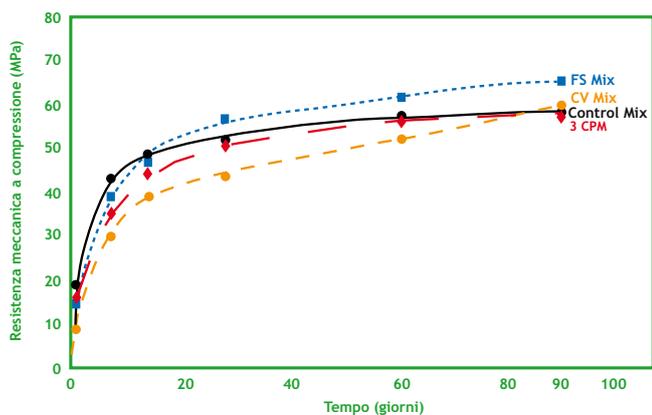


Fig. 8 - Resistenza meccanica del calcestruzzo con e senza sostituzione di Cenere volante, fumo di silice o 3 µm CPM.

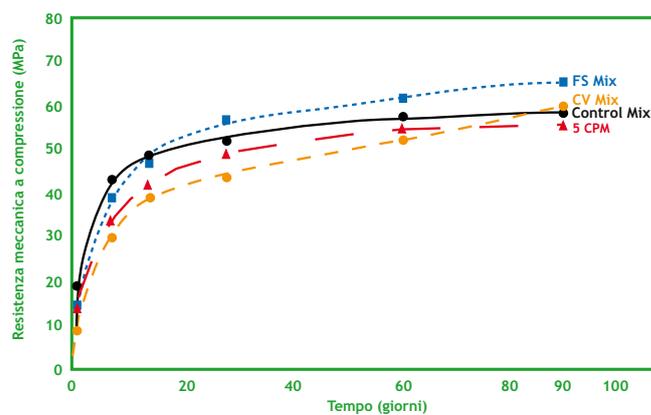


Fig. 9 - Resistenza meccanica del calcestruzzo con e senza sostituzione di Cenere volante, fumo di silice o 5 µm CPM.

il 20 % di cemento Portland con il 5 µm CPM il calcestruzzo si comporta leggermente meglio di quello con la cenere volante da carbone alle brevi stagionature.

Quindi, da un punto di vista meccanico la cenere pesante macinata da RSU si comporta in modo intermedio tra la cenere volante da carbone e il fumo di silice a seconda della finezza di macinazione dello *slurry* di CPM.

3.2.3 Impermeabilità all'acqua

La Tabella 4 mostra la penetrazione di acqua in calcestruzzi esposti ad una pressione d'acqua di 3 bar per un tempo di 5 giorni. Secondo la norma UNI EN 12390-8 il calcestruzzo è considerato impermeabile se il profilo medio della penetrazione dell'acqua non supera 20 mm e se la massima penetrazione rimane al di sotto di 50 mm. Tutti i calcestruzzi risultano essere impermeabili secondo questi criteri e ciò è da mettere in relazione con un relativamente basso rapporto acqua/legante (0,49) come è mostrato nella Tabella 5.3. Tuttavia, la penetrazione dell'acqua sotto pressione del calcestruzzo con la più fine delle CPM ($D_{50} = 1,7 \mu\text{m}$) è molto simile a quella del calcestruzzo con fumo di silice e molto inferiore a quella del calcestruzzo con cenere volante che si comporta come le altre CPM più grossolane.

3.2.4 Diffusione del cloruro

La Tabella 5 mostra lo spessore di cloruro diffuso nei provini di

calcestruzzo stagionati a umido per 28 giorni prima di essere esposti ad una soluzione di NaCl (3,5% in acqua) per 120 giorni dal loro confezionamento. Lo spessore di penetrazione del cloruro è stato determinato con un metodo colorimetrico basato sull'impiego del nitrato di argento e della fluoresceina (10). I risultati indicano che la cenere pesante da RSU si comporta come il fumo di silice quando è finemente macinata ($D_{50} = 1,7 \mu\text{m}$). Le ceneri da RSU macinate più grossolanamente si comportano comunque meglio della cenere volante soprattutto ai tempi di esposizione più brevi.

Tabella 4 - Penetrazione dell'acqua secondo la norma UNI EN 12390-8 su calcestruzzi stagionati sotto acqua per 28 giorni

TIPO DI CALCESTRUZZO	PENETRAZIONE D'ACQUA (mm)	
	MASSIMA	MEDIA
Control Mix	7	3
CV Mix	11	6
FS Mix	5	2
5 CPM Mix	10	5
3 CPM Mix	11	4
1.7 CPM Mix	6	3

Tabella 5 - Diffusione degli ioni cloruro nei calcestruzzi stagionati per 28 giorni prima di essere esposti ad una soluzione di 3,5% di NaCl

TIPO DI CALCESTRUZZO	SPESSORE DI DIFFUSIONE DEL CL AL TEMPO (giorni) DI:		
	28 GG	45 GG	120 GG
Control Mix	5.0 mm	6.0 mm	15.0 mm
CV Mix	8.0 mm	11.5 mm	18.0 mm
FS Mix	5.0 mm	6.0 mm	12.0 mm
5 CPM Mix	7.0 mm	9.0 mm	19.0 mm
3 CPM Mix	6.0 mm	8.0 mm	18.0 mm
1.7 CPM Mix	5.0 mm	6.0 mm	12.0 mm

3.2.5 Penetrazione della CO₂

I risultati della Tabella 6 mostrano lo spessore di calcestruzzo penetrato dall'anidride carbonica (CO₂) determinato con il test alla fenoltaleina che si colora in rosso dove il pH è maggiore di 13 per la presenza di calce di idrolisi formata per idratazione del cemento Portland. Lo spessore di calcestruzzo penetrato dalla CO₂ comporta la neutralizzazione del Ca(OH)₂ e indica la parte penetrata dall'anidride carbonica esposta al rischio di corrosione dei ferri di armatura.

I risultati della Tabella 6 indicano che la cenere pesante da RSU finemente macinata (D₅₀ = 1,7 µm) si comporta bene come il fumo di silice nel rallentare la velocità di carbonatazione sia rispetto al calcestruzzo di riferimento (*Control mix*) sia rispetto al calcestruzzo con cenere volante da carbone, rispetto alla quale anche le CPM più grossolane si comportano meglio.

Tabella 6 - Penetrazione in mm della CO₂ nei provini di calcestruzzi stagionati a umido per 28 giorni

TIPO DI CALCESTRUZZO	PENETRAZIONE (mm) DELLA CO ₂ NEI PROVINI DI CALCESTRUZZI STAGIONATI A UMIDO PER 28 GIORNI AL TEMPO DI:		
	28 GG	45 GG	120 GG
Control Mix	1.0 mm	2.0 mm	3.5 mm
CV Mix	2.0 mm	3.0 mm	5.5 mm
FS Mix	1.0 mm	1.0 mm	2.0 mm
5 CPM Mix	2.0 mm	3.0 mm	4.5 mm
3 CPM Mix	1.0 mm	2.0 mm	2.5 mm
1.7 CPM Mix	1.0 mm	1.0 mm	2.0 mm

4. CONCLUSIONI

La cenere pesante da rifiuti solidi urbani (RSU) macinata sotto acqua in forma di *slurry* fluido con circa 50 % di acqua è stata trattata con un nuovo processo (8) per eliminare e/o ossidare le particelle di alluminio metallico che viene ossidato e quindi reso innocuo per la sua potenziale reazione con la calce di idrolisi prodotta

per idratazione del cemento Portland e la conseguente formazione di idrogeno gassoso che penalizza le prestazioni del calcestruzzo (7).

Grazie a questo innovativo processo, la cenere pesante macinata (CPM) da RSU consente di produrre ottimi calcestruzzi (paragonabili a quelli confezionati con il più caro ed introvabile fumo di silice) in termini di resistenza meccanica, di impermeabilità e di durabilità per la resistenza alla penetrazione dei cloruri e dell'anidride carbonica che potrebbero promuovere la corrosione dei ferri di armatura.

Si possono segnalare due aspetti che evidenziano la sostenibilità di questo processo:

- poiché la CPM sostituisce una parte del cemento Portland (fino al 20 % con miglioramenti prestazionali) si riduce il consumo energetico per la produzione del clinker e si riduce proporzionalmente l'inquinamento per la emissione atmosferica della CO₂;
- poiché la cenere pesante da RSU deve essere allocata a discarica (la quantità è di circa il 15-30 % dell'RSU trattato) si rende più sano l'ambiente e si migliora il rendimento economico dei termovalorizzatori.

BIBLIOGRAFIA

- (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. 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) 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.
- (6) 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*.
- (7) L. Bertolini, M. Carsana, D. Cassago, A. Quadrio Curzio and M. Collepardi, "MSWI ashes as mineral additions in concrete", *Cement and Concrete Research*, 34, 1899-1906, 2004.
- (8) A. Quadrio Curzio, European Patent Application No. 08807669.0.
- (9) M. Collepardi, S. Collepardi, Daniele Ongaro, A. Quadrio Curzio, M. Sammartino, "Concrete with bottom ash from municipal solid wastes incinerators", *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Volume Three, pp.289-298, June 28-30, 2010 Ancona, Italy.
- (10) M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, "Penetration of chloride ions in cement pastes and in concretes", *Journal of Ceramic Society*, 55, pp.534-535, 1972

**... saperle costruire
è un'arte**



Enco Srl - Via delle Industrie, 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)
Tel. 0422 963 771 - Fax 0422 963237 - www.encosrl.it - info@encosrl.it
Acquistabile tramite il sito internet www.encosrl.it oppure telefonando al 0422 963771

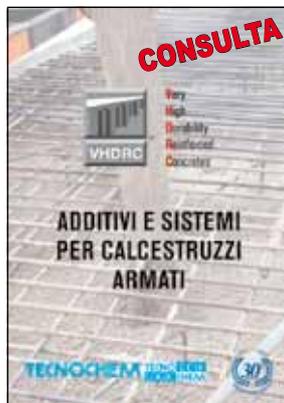


Very
High
Durability
Reinforced
Concretes

Tecnologie, Sistemi ed Innovazioni per la Durabilità e Sostenibilità delle Strutture in Cls Armato e per la rispondenza alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14 Gennaio 2008.

LA GAMMA COMPLETA DEGLI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO

- Cls reoplastici
- Cls reodinamici
- Cls autocompattanti
- Cls impermeabili
- Cls fotocatalitici
- Cls autopulenti
- Cls antiradiazione
- Cls speciali "ad hoc"



TECNOLOGIE E SISTEMI

Rapida agibilità e funzionalità strutturale

Anticorrosione

Antiritiro

Duttilità

Super resistenze
Ingegnerizzazione delle forme

Fibrorinforzati ad alta energia di frattura

Stabilità fisico-chimica
Resilienza

Resistenza al fuoco

Autocompattanti Compounds

Sostenibilità
Durabilità
Ecologia
Economia

MARCHI REGISTRATI

RAPI-tec®

MuCis®

SHRINKO-tec®

HFE-tec®

REFOR-tec®

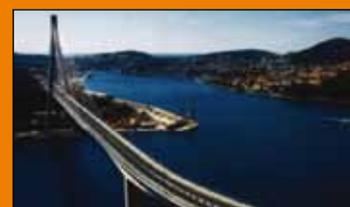
FIB-energy®

STABIL-tec®

**HFE-tec® FIRE
STABIL-tec® FIRE**

SELF-tec®

SISTEMI VHDRC®



technology