2011 Quadrimestrale Anno XVI Numero 54



PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

CALCESTRUZZO "DEPOTENZIATO"?

No, migliore!



Se non lo sai lo trovi sul DEC

Cosa significa "calcestruzzo per ostriche"?

Cosa significa "GBC Italia"?

Cosa è il "carbon negative cement"?

Come si utilizzano i neutroni per studiare il cemento?

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

Cosa significa FPC?

Quali fibre sono impiegate per produrre l'FRP?

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

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

Come si produce il calcestruzzo senza ritiro?

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

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

DEC Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo

di Mario Collepardi

Oltre 2.500 voci in ordine alfabetico





IN SINTONIA CON L'AMBIENTE



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

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

Contattaci per conoscere Fonisocal® e Fonisocal Plus®.

www.calcestruzzi.it





Società di Ricerca **Software House**

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Quadrimestrale - Anno XVI - Numero 54

Direttore Mario Collepardi

CALCESTRUZZO "DEPOTENZIATO" E NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI

In molte contestazioni legali sulla qualità di un calcestruzzo fornito appare spesso il termine di "depotenziato" con il quale si vorrebbe indicare un conglomerato intenzionalmente prodotto con una carente quantità di cemento rispetto a quella convenuta per trarre un illecito profitto nella fornitura. Il primo problema che ci si deve porre riguarda la quantità di cemento convenuto rispetto alla quale si realizza l'illecito guadagno. Il valore di cemento convenuto è ricavato dal dosaggio minimo di cemento che viene erroneamente riportato nelle tabelle che indicano i requisiti dei calcestruzzi in funzione delle classi di esposizione presenti nelle Tabelle della norma europea EN 206-1 e di quella nazionale UNI 11104. Per esempio, per i calcestruzzi esposti alla classe di esposizione XC4 il dosaggio minimo di cemento dovrebbe essere 300 kg/m3 secondo la UNI EN 206-1 e addirittura dovrebbe essere aumentata a 340 kg/m³ secondo la norma UNI 11104 emanata dall'UNICEMENTO per l'applicazione nazionale della norma europea. Questi dosaggi di cemento rischierebbero di essere invece pericolosi in quanto eccessivi rispetto a quelli che si dovrebbero correttamente adottare per non danneggiare le

Infatti, è ben noto, a tutti quelli che si occupano di tecnologia del calcestruzzo, che i valori del dosaggio di cemento sono funzione del diametro massimo dell'inerte e della lavorabilità del calcestruzzo fresco: conglomerati più fluidi e con inerti più piccoli richiedono più cemento, mentre calcestruzzi meno fluidi e con inerti più grossi -quali quelli impiegati nelle costruzioni massive come per esempio le dighe- debbono essere confezionati con un dosaggio di cemento contenuto per evitare che le sollecitazioni indotte dai gradienti termici delle strutture massive provochino fessure con grave pregiudizio per l'impermeabilità e la durabilità dell'opera. Pertanto è assolutamente fuorviante porre un limite nel dosaggio minimo di cemento. D'altra parte, il limite nel rapporto acqua/cemento massimo e nella resistenza caratteristica minima delle strutture in C.A. presenti nella UNI EN 206-1 e nella UNI 11104 è più che sufficiente nello stabilire le caratteristiche che debbono possedere le strutture in C.A. durabili in funzione degli agenti aggressivi ai quali sono esposti. Pertanto, poiché le norme UNI EN 206-1 ed UNI 11104 non hanno di per sé una cogenza legale, si potrebbero facilmente controbattere le argomentazioni di chi sostiene che un calcestruzzo con un contenuto di cemento inferiore a quello minimo indicato in queste norme è un calcestruzzo non conforme alle prescrizioni in quanto "depotenziato"

Purtroppo, però, esistono norme con valenza legale come le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) che finiscono con avvalorare l'erronea interpretazione circa la necessità di un dosaggio minimo di cemento per le opere in C.A. durabili. Infatti, secondo le NTC (paragrafo 11.2.11) "al fine di ottenere le prestazioni in funzione delle caratteristiche ambientali, si potrà fare utile riferimento alla UNI EN 206-1:2006 ed UNI 11104: 2004". Pertanto le norme EN 206-1 ed UNI 11104 acquisiscono una valenza legale per definire le caratteristiche delle strutture in C.A. durabili. Nello stesso paragrafo 11.2.11 NTC stabiliscono che "in fase di progetto la prescrizione, valutate opportunamente le condizioni ambientali del sito ove sorgerà l'opera deve fissare le caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (composizione e resistenza meccanica), i valori del copriferro e le regole di maturazione". A seguito di questa indicazione nelle NTC, il dosaggio minimo di cemento (che fa parte integrante della composizione del calcestruzzo) deve essere conforme a quello indicato nella UNI EN 206-1:2006 e nella UNI 11104:2004, avvalorando così le contestazioni di chi sostiene che il calcestruzzo è "depotenziato" quando il dosaggio di cemento (calcolato per esempio dalla Guardia di Finanza con le indagini sulle bolle per gli acquisti di cemento e le sue utilizzazioni) è inferiore a quello minimo indicato nelle classi di esposizioni, ancorché la resistenza caratteristica sia ben superiore a quella minima indicate dalla UNI EN

A conclusione di queste considerazioni che sono più approfondite nell'articolo "Osservazioni critiche alle specifiche delle classi di esposizione secondo la EN 206 e la UNI 11104" si richiama l'attenzione del Ministero delle Infrastrutture sulla opportunità di modificare nelle NTC al paragrafo 11.2.11 la frase sopra riportata circa la composizione del calcestruzzo.



ARRIVA IL FREDDO: ADDITIVI PER CONTRASTARNE L'EFFETTO

di A. Borsoi e G. Fazio

(pag. 6)

SOSTENIBILITÀ ED INNOVAZIONE NELL'INDUSTRIA DEL **CALCESTRUZZO**

di G. Moriconi (pag. 10)

OSSERVAZIONI CRITICHE ALLE NTC SULLA DURABILITÀ DELLE OPERE IN C.A. SECONDO LA EN 206 E LA UNI 11104

di M. Collepardi e S. Collepardi

(pag. 16)

ENCO - CALENDARIO

Corsi di formazione

(pag. 20)

CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

di F. Simonelli e R. Troli (pag. 23

IL MICROCEMENTO PER CON-SOLIDARE ROCCE E TERRENI di E.N. Croce e J.J.Ogoumah Olagot

Mario Collepardi

ENCO Journal

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

Direttore Responsabile

MARIO COLLEPARDI

Redazione

ROBERTO TROLI SILVIA COLLEPARDI ANTONIO BORSOL FRANCESCA SIMONELLI

EDITORE

ENCO SRL

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

COMPOSIZIONE

ISABELLA CAPOGNA ALESSANDRA GALLETTI MARA MENEGHEL

Grafica e Stampa

GRAFICHE TINTORETTO di Rino Lucatello & C. S.R.L.

31050 Castrette di Vi∎orba (TV) Via Verdi 45/46

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



ARRIVA IL FREDDO: ADDITIVI PER CONTRASTARNE L'EFFETTO



Antonio Borsoi - Glenda Fazio Enco Srl, Engineering Concrete - Ponzano Veneto (TV) info@encosrl.it



1. INTRODUZIONE

Nei periodi invernali l'idratazione del cemento alle brevi stagionature subisce un rallentamento che è tanto più forte quanto più bassa è la temperatura ambientale. Dalla diminuzione del grado di idratazione del cemento derivano un potenziale danno del materiale e un inconveniente nel processo produttivo.

Il danno si verifica se la temperatura scende sotto 0°C, cosicché l'acqua di impasto ancora liquida si trasforma in ghiaccio nel calcestruzzo ancora poco resistente meccanicamente e quindi si verifica una disgregazione irreversibile dovuta all'aumento di volume (circa 9%) dell'acqua.

L'inconveniente è dovuto al rallentamento del processo di idratazione, anche se la temperatura bassa si mantiene al di sopra di 0°C, con un ritardo nella rimozione delle casseforme che non può essere eseguita finché la resistenza meccanica del calcestruzzo non ha raggiunto almeno 5 MPa. Se la bassa temperatura si protrae per diversi giorni o settimane, come si verifica per esempio nei paesi nordici, il processo produttivo subisce un grave ritardo.

Per ovviare a queste problematiche, si ricorre all'impiego di additivi acceleranti, talvolta denominati additivi "antigelo" per sottolineare il contrasto alla formazione del ghiaccio per l'abbassamento crioscopico determinato dalla presenza di sali solubili in acqua. In realtà gli additivi acceleranti agiscono in modo trascurabile sull'effetto "anti-gelo", ma rendono più veloce l'idratazione del cemento e compensano il ritardo provocato dalle basse temperature. Occorre tuttavia precisare due aspetti:

- più recentemente un additivo accelerante non è impiegato da solo, ma è combinato con un altro tipo di additivo capace di ridurre l'acqua di impasto con un beneficio nel processo produttivo per l'abbassamento del rapporto acqua/cemento che notoriamente fa aumentare la resistenza meccanica del calcestruzzo alle lunghe ma anche alle brevi stagionature;
- per contrastare l'influenza negativa del clima freddo non è sufficiente far ricorso agli additivi acceleranti e riduttori d'acqua di impasto, ma è necessario adottare un "pacchetto" di misure tutte dirette a favorire un maggior grado di idratazione del cemento. Queste misure includono:
- l'impiego di un cemento Portland con classe almeno CEM

I 42.5 R;

- l'eventuale rimozione del ghiaccio negli inerti con acqua calda:
- l'impiego di acqua di impasto calda prima di introdurre il cemento:
- evitare di iniziare l'impasto nelle ore tarde del pomeriggio per non andare incontro alle ore più fredde della notte proprio nel periodo iniziale dell'idratazione del cemento.

Gli acceleranti di indurimento sono stati, forse, i primi additivi ad essere impiegati nel modificare il comportamento del calcestruzzo, fin da quando si è scoperto e brevettato (1) nel 1855 che il cloruro di calcio (*CaCl*₂) era in grado di migliorare le resistenze meccaniche del calcestruzzo soprattutto alle brevi stagionature.

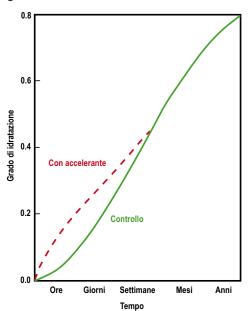


Fig. 1 - Schematizzazione dell'effetto degli additivi acceleranti sul grado di idratazione del cemento.

Poiché la positiva azione accelerante sull'idratazione del cemento, esercitata dai sali a base di cloruro, può essere accompagnata, se il cloruro supera certi limiti, da un effetto negativo sulla corrosione dei ferri di armatura (3), è conveniente distinguere gli acceleranti di indurimento in:



- additivi a base di cloruro;
- additivi privi di cloruro.

2. ACCELERANTI DI INDURIMENTO A BASE DI CLORURO

L'effetto accelerante del cloruro di calcio, che è particolarmente richiesto nella stagione invernale quando per le stesse temperature l'idratazione del cemento subisce un rallentamento iniziale, è stato per molto tempo sfruttato ricorrendo anche a dosaggi relativamente elevati (2) del sale in forma di polvere (Fig. 2).

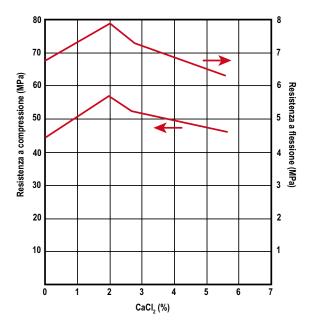


Fig. 2 - Influenza del dosaggio di CaCl₂ sulla resistenza meccanica a compressione ed a flessione di paste cementizie (5)

L'impiego del $CaCl_2$ al suo dosaggio ottimale (2%) provoca degli incrementi delle resistenze meccaniche sostanziali soprattutto a 1 e 3 giorni, trascurabili a 7 giorni e praticamente assenti a 28 giorni, a meno che il calcestruzzo non debba essere stagionato a temperature molto basse prossime a 0°C (Fig. 3): in queste particolari condizioni, a causa del basso grado di idratazione anche a lunghe stagionature, l'effetto del cloruro di calcio si fa sentire positivamente anche a 28 giorni.

Utilizzando l'additivo in forma di polvere, soprattutto in coincidenza di mescolamenti non accurati in betoniera, si è talvolta determinato casualmente un'elevata concentrazione del sale in prossimità delle armature, con conseguente pericolo di corrosione dei ferri, promossa dalla presenza del cloruro, che in talune circostanze ha provocato anche improvvisi collassi delle strutture.

Tutto ciò ha portato gradualmente ad adottare i seguenti provvedimenti:

- impiegare additivi acceleranti in forma di sali pre-disciolti in acqua per favorire una più omogenea distribuzione dell'additivo nel calcestruzzo;
- porre dei limiti nel contenuto dei cloruri negli additivi ac-

celeranti;

- sviluppare nuovi additivi acceleranti esenti da cloruri.

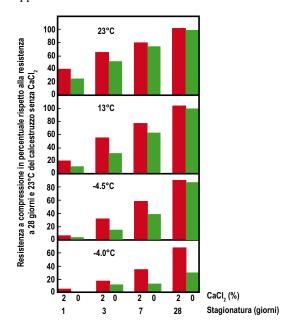


Fig. 3 - Influenza del CaCl₂ (2%) sulla resistenza meccanica di calcestruzzi stagionati a diverse temperature (1)

Per quanto concerne il tenore di cloruro che al massimo può essere introdotto nel calcestruzzo (incluso quello proveniente dagli additivi o dagli altri ingredienti), la Tabella 1 riporta i limiti tollerati dalle norme americane (ACI) e da quelle europee (ENV206) o italiane (UNI 9858).

Tabella 1 - Massimi valori di cloruro espresso come percento di Cl⁻ rispetto al peso del cemento

Tino di	% di cloruro (Cl ⁻)			
Tipo di struttura	Norma ACI	Norma ENV 206 e UNI 9858		
NON ARMATA	NESSUN LIMITE	1.00%		
ARMATA	0.15%	0.40%		
PRECOMPRESSA	0.06%	0.20%		

Come si può vedere, mentre nelle norme americane non esiste alcun limite nel tenore di cloruro per le strutture in calcestruzzo non armate (poiché si è recepito il principio che esso possa essere pericoloro solo nei confronti dei ferri d'armatura), nelle norme europee e nazionali, invece, si è assunto una linea di maggior prudenza ponendo un limite al contenuto di cloruro anche in assenza dei ferri di armatura. Nel caso delle strutture armate e precompresse, invece, il tenore massimo di cloruro è più limitato nelle norme americane che in quelle europee.

Va segnalato, infine, che, in presenza di armature tese delle strutture precomprese, il limite nel tenore di cloruro deve essere più severo per tener conto del fatto che l'eventuale azione corrosiva indotta dai cloruri, diventa più pericolosa se i ferri sono sottoposti ad una permanente ed elevata sollecitazione di trazione (*stress corrosion*).



Tabella 2 - Influenza del CaCl₂ e del ligninsolfonato sul ritiro del calcestruzzo. I numeri tra parentesi rappresentano il ritiro avendo poso eguale a 100 quello del calcestruzzo non additivato.

Tipo di additivo	Ritiro /%) dopo vari periodi di essiccamento					
Tipo di additivo	7 gg	14 gg	28 gg	56 gg	84 gg	168 gg
NESSUNO	0.010	0.018	0.027	0.039	0.045	0.052
	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)	(100)
CaCl ₂ (2%)	0.018	0.028	0.037	0.048	0.054	0.062
	(180)	(155)	(137)	(123)	(120)	(120)
LIGNINSOLFONATO	0.015	0.023	0.032	0.044	0.048	0.049
DI CALCIO (0.2%)	(150)	(127)	(119)	(113)	(107)	(94)
LIGNINSOLFONATO DI CALCIO (0.25%) + CaCl ₂ (0.1%)	0.018 (180)	0.024 (133)	0.034 (126)	0.044 (113)	0.048 (107)	0.053 (100)

Tabella 3 - Influenza del CaCl₂ sullo scorrimento viscoso del calcestruzzo

Additivo	Stagionatura del carico (gg)	Umidità relativa (%)	Aumento del creep rispetto al cls non additivato (%)
Nessuno	7	95	
CaCl ₂	7	95	36
Nessuno	7	35	
CaCl ₂	7	35	103
Nessuno	28	95	
CaCl ₂	28	95	22
Nessuno	28	35	
CaCl ₂	28	35	36

In vista di queste limitazioni, il cloruro è stato fortemente ridotto o addirittura eliminato nelle formulazioni di acceleranti per calcestruzzo, ed i produttori che ne fanno uso dovrebbero comunque dichiararne la percentuale presente nell'additivo per evitare che nel confezionamento del calcestruzzo vengano superati i limiti massimi riportati nella Tabella 1.

In realtà, oltre ai potenziali effetti negativi del cloruro sulla corrosione dei ferri, occorre tener conto anche che il cloruro, da solo o in combinazione con altri ingredienti come per esempio il ligninsolfonato per produrre riduttori d'acqua di tipo accelerante, può far aumentare tanto il ritiro (soprattutto alle brevi stagionature), quanto lo scorrimento viscoso com'è mostrato dai dati riportati rispettivamente nelle Tabelle 2 e 3.

3. ACCELERANTI DI INDURIMENTO PRIVI DI CLORURO

Molti prodotti sono stati provati al fine di trovare un accelerante che non presentasse i rischi di corrosione del cloruro di calcio nei confronti dei ferri delle strutture armate. Alcuni di essi sono in effetti impiegati per formulare additivi acceleranti, ma nessuno presenta le caratteristiche del cloruro di calcio e soprattutto il suo basso costo. Tra i prodotti normalmente impiegati i più diffusi sono la trietanolammina, $N(CH_2-CH_2-OH)_3$, ed il formiato di calcio, $Ca(HCOO)_2$, ma molti altri sali, quali per esempio il nitrato di calcio (4), il fluoruro di

sodio (5), il tiosolfato di potassio (6), ecc., possono essere impiegati. L'azione accelerante della maggior parte degli elettroliti si esplica sull'idratazione dei silicati e del *C*₃*S* in particolare (7-10).

La trietanolammina è particolarmente usata come coadiuvante di macinazione ed essa è quindi molto spesso presente come additivo per cementi. Essa entra, inoltre, in molte formulazioni di fluidificanti per calcestruzzi al fine di controbilanciare l'azione ritardante di qualche altro prodotto. Il dosaggio della trietanolammina difficilmente supera il valore di 0.1% rispetto alla massa di cemento. La trietanolammina agisce da accelerante sull'idratazione

del C_3A sia favorendo la formazione di alluminati idrati esagonali, sia promuovendone la conversione nell'idrato cubico; in presenza di gesso la trietanolammina accelera la produzione di ettringite come anche la trasformazione di questa in monosolfoalluminato. La trietanolammina ritarda l'idratazione del C_3S allungando il periodo di induzione, fa aumentare il rapporto molecolare CaO/SiO_2 del C-S-H prodotto e favorisce la produzione di idrossido di calcio amorfo. L'azione della trietanolammina, quindi, risulta, complessivamente accelerante dell'indurimento se il suo dosaggio è di circa 0.025%, mentre è di tipo ritardante con un dosaggio superiore a 0.06% (6). E' probabile che i dosaggi più elevati ritardino eccessivamente l'idratazione del C_3S .

Il formiato di calcio agisce da accelerante di indurimento oltre che di presa quando viene aggiutno in misura di qualche percento rispetto alla massa di cemento. L'azione accelerante del formiato di calcio è simile a quella di molti altri elettroliti: esso, infatti, agisce sostanzialmente da accelerante nei confronti del C_3S (7,9,11, sebbene formi un sale complesso con il C_3A , C_3A • $Ca(HOCOO)_2$ • xH_2O , simile al monosolfoalluminato idrato. Il maggior limite all'impiego del formiato di calcio consiste nel costo relativamente elevato per il suo dosaggio (1-3%), oltre che nella sua limitata solubilità in acqua che ne impedisce un impiego come additivo sotto forma di soluzione acquosa: esso, pertanto, deve essere impiegato sotto forma di polvere da sciogliere preliminarmente nell'acqua d'impasto per il calcestruzzo.

4. LE NORMATIVE SUGLI ACCELERANTI DI INDURIMENTO

Per quanto attiene alle normative sugli additivi acceleranti (Tabella 4) si può notare innansitutto come la norma ASTM richieda una riduzione dei tempi di presa ed un più rapido indurimento valutato attraverso l'incremento (25%) sulla resistenza meccanica a 3 giorni. La norma UNI, invece, non esclude una riduzione dei tempi di presa purché contenuta entro 30 minuti, ma richiede un incremento (15%) della resistenza meccanica a 1 giorno oltre che a 3 giorni. Entrambe le normative, inoltre, pongono dei limiti al ritiro che per la ASTM non deve superare del 35% il ritiro del calcestruzzo di riferimento, e per la UNI non deve superare di 300 µm/m il



Tabella 4 - Principali variazioni previste rispetto al calcestruzzo non additivato, secondo le norme ASTM ed UNI

Dransiatà	Tempi d	R	Resistenza meccanica			Ditiro		
Proprietà	inizio	fine	1 g	3 gg	7 gg	28 gg	Ritiro	
UNI	Possono essere rid	otti fino a 30 min	> di almeno il 15%	> di almeno il 15%	non <	non <	Non più di 300 µm/m (su malta)	
ASTM	Almeno 1 h prima ma non più di 3 h e 1/2 prima	Almeno 1 h prima		> di almeno il 25%	non <	non <	Non più del 35%	

ritiro della malta non additivata.

BIBLIOGRAFIA

- (1) W. Miller, C.F. Nichols, "Improvement in Means of Accelerating the Setting and Hardening of Cements", Brevetto Britannico N. 2886, del 4 Marzo 1855, Londra.
- (2) M. Collepardi, A. Marcialis, V. Solinas, "L'effetto del cloruro di calcio sulle proprietà delle paste di cemento", Il Cemento, 70, 83-92, (1973).
- (3) M. Collepardi, L. Coppola, "Durabilità e restauro delle opere in calcestruzzo", Ed. Enco, Spresiano, (1992).
- (4) I. Teoreanu, M. Muntean, "Silicates Industriels", 39, 49, (1974).
- (5) F. Vavrin, "Effect of Chemical Addition on Hydrating Processes

- and Hardening of Cement", V Congresso sulla Chimica del Cemento, Principal Paper, Mosca, (1974).
- (6) P.A. Posskopf, F.J. Linton, R.B. Peppler, "J. Testing and Evaluation", 3, 303, (1975).
- (7) M. Collepardi, L. Massidda, "Journal of American Ceramic Society", 54, 419, (1971).
- (8) J.F. Young, R.L. Berger, F.V. Lawrence, "Cement and Concrete Research", 3, 869, (1973).
- (9) M. Collepardi, G. Rossi, M.C. Spiga, "Annuali di Chimica", 61, 137, (1971).
- (10) M. Collepardi, G. Rossi, M.C. Spiga, "Accad. Naz. dei XL", Serv. IV, 18, 3, (1968).
- (11) D.L. Kantro, "J. Testing and Evaluation", 3, 312, (1975).

Hanno conseguito il Diploma di **Tecnico del Calcestruzzo**

dei corsi on-line organizzati da Enco:

Ing. Cinzia Di Altobrando





Ing. Veronica Romeo







SOSTENIBILITA' ED INNOVAZIONE NELL'INDUSTRIA DEL CALCESTRUZZO



Giacomo Moriconi

Dip. Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica, Univ. Politecnica delle Marche q.moriconi@univpm.it

L'industria del calcestruzzo, nell'intraprendere inevitabili azioni tese a ridurre il proprio impatto ambientale, non dovrebbe considerare negativamente questa prospettiva, poiché, se affrontata responsabilmente, può rivelarsi come una grande opportunità di sviluppo di tecnologie innovative. In effetti, un indubbio miglioramento della sostenibilità dell'industria del calcestruzzo richiede prima di tutto di prendere coscienza di alcuni aspetti fondamentali, come l'esigenza di ridurre l'attuale spreco di materie prime attraverso un significativo incremento di durabilità dei materiali da costruzione e la constatazione che le risorse naturali non rinnovabili non sono inesauribili ed è necessario individuare fonti alternative prima che la scarsità di approvvigionamento di tali risorse possa generare situazioni di crisi.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni del XX secolo una rapida industrializzazione ed un enorme aumento della popolazione hanno richiesto un abnorme consumo di materie prime ed energia, provocando mutamenti dell'ambiente terrestre senza precedenti. Fortunatamente, la società civile ha riconosciuto la natura del problema sviluppando il concetto di "sviluppo sostenibile".

La produzione di calcestruzzo su scala mondiale richiede quantitativi incredibilmente enormi di cemento, acqua ed aggregati, peraltro tendenzialmente in aumento, che impongono all'industria del calcestruzzo una rapida assunzione di responsabilità in relazione alla necessaria riduzione dell'impatto ambientale prodotto, anche in termini di gas serra emessi in atmosfera. L'industria del calcestruzzo non dovrebbe considerare questo obbligo come prospettiva negativa, in quanto potenzialmente capace di generare l'opportunità di sviluppare tecnologie innovative. L'innovazione non consiste in nuovi calcestruzzi, confezionati con materiali e tecniche speciali, ma in un calcestruzzo economico ed altamente durevole contenente la maggior quantità possibile di sottoprodotti industriali e rifiuti solidi idonei a sostituire parzialmente il cemento e gli aggregati naturali [1, 2].

In questa ottica, nonostante il consumo energetico e le emissioni di gas serra indotti dalla produzione del cemento necessario a confezionare il calcestruzzo, quest'ultimo può compensare tali effetti negativi e proporsi come un materiale più sostenibile. Questo sorprendente risultato è principalmente attribuibile alla facilità con cui è possibile inglobare vantaggiosamente aggiunte minerali nella miscela del calcestruzzo. Un ulteriore effetto positivo è la capacità del calcestruzzo di assorbire anidride carbonica: sebbene la quantità assorbita durante la vita in servizio sia relativamente bassa e decisamente inferiore a quella emessa per la produzione del calcestruzzo stesso, l'assorbimento aumenta sensibilmente quando il calcestruzzo demolito al termine della sua vita in servizio viene frantumato e riutilizzato per produrre nuovo calcestruzzo.

Tuttavia, un indubbio miglioramento della sostenibilità ambientale del calcestruzzo richiede inevitabilmente una drastica riduzione dello spreco di materiali impiegati per il suo confezionamento e per il mantenimento delle sue prestazioni durante la vita in servizio. Ciò significa che un aspetto essenziale del problema della sostenibilità del calcestruzzo come materiale da costruzione è costituito dall'esigenza di aumentare significativamente la sua durabilità. Questo obiettivo può avere implicazioni che trascendono il senso stretto della sostenibilità di una determinata tecnologia. Infatti, se l'opinione pubblica, od anche gli stessi progettisti, percepissero il calcestruzzo come materiale non più durevole o con il quale fosse più difficile raggiungere la prestazione minima richiesta dalla vita utile di una struttura, questo si ripercuoterebbe negativamente sulla stessa industria del calcestruzzo e sulla sua sostenibilità. Questo aspetto comporta, ad esempio, che le strutture in calcestruzzo, ed in particolare quelle realizzate con finanziamento pubblico, devono semplicemente durare più a lungo, perché la loro sostituzione non è più sostenibile prima di una ragionevole vita utile a causa della sempre crescente difficoltà di ottenere un nuovo finanziamento pubblico [3].

Infine, è opportuno e necessario ricordare e sottolineare che le risorse naturali non sono inesauribili e divengono sempre più limitate, non solo per disponibilità ma anche per il costo energetico ed ambientale del loro approvvigionamento. A fronte di questa crescente consapevolezza, si registra una ingiustificata resistenza nei confronti di nuove fonti di approvvigionamento, che può essere superata più facilmente attraverso una adeguata innovazione tecnologica.



2. SOSTENIBILITA' E SVILUPPO

Fra tutte le sfide che attendono la società attuale e futura, a partire dalla crisi economica mondiale, fino agli incerti scenari socio-politici di un mondo sempre più globalizzato ed alla necessità di una crescita culturale essenziale per l'umanità, una sfida può essere considerata fondamentale per lo sviluppo futuro: la sostenibilità di questo sviluppo.

Il termine sostenibilità è divenuto di pubblico dominio con la pubblicazione nel 1987 da parte della World Commission on Environment and Development del rapporto intitolato Our Common Future (conosciuto anche come rapporto della Commissione Brundtland). La Commissione definì sviluppo sostenibile la capacità di soddisfare le proprie esigenze senza compromettere la possibilità delle future generazioni di soddisfare le loro. Tuttavia, una straordinaria crescita della popolazione umana, quadruplicata nel volgere di un secolo, ha comportato un brusco sviluppo dei settori agricoli ed industriali, e, con la rapida urbanizzazione avvenuta verso la fine del XX secolo, è apparso chiaro che il mondo avrebbe potuto incontrare difficoltà nell'approvvigionamento economico di energia, acqua e risorse naturali. Allo stesso tempo, i modelli di sviluppo economico e le scelte tecnologiche perseguite dai paesi industrializzati si sono dimostrati altamente dispendiosi in termini di energia e risorse [2].

La sostenibilità è divenuta pertanto un fattore importante su scala mondiale ed il riscaldamento globale viene considerato uno dei più seri problemi ambientali, come dimostrato dai dati disponibili sull'andamento della concentrazione in atmosfera dell'anidride carbonica [4], che viene principalmente emessa dalla combustione dei combustibili fossili per soddisfare le esigenze di riscaldamento, trasporto e produzione industriale. Così, l'esperienza sta insegnando quello che il buon senso avrebbe dovuto far intuire, cioè che "in un pianeta limitato, il modello della crescita illimitata, dell'uso indiscriminato delle risorse naturali, e dell'inquinamento ambientale incontrollato è una ricetta per l'autodistruzione" [2].

L'industria delle costruzioni consuma una enorme quantità di energia e risorse naturali a livello mondiale, con quasi il 40% di aggregati naturali, il 25% di legno vergine, il 16% d'acqua ed il 40% dell'energia totale. Il calcestruzzo è il materiale da costruzione più usato nel mondo. Per avere un'idea del livello di consumi, si pensi ad un ponte, che può peraltro essere considerato una delle opere più sostenibili, dal momento che, superando gli ostacoli territoriali, mette in contatto comunità, favorendo scambi culturali che portano ad un allargamento della conoscenza ed allo sviluppo sociale. Tuttavia, il calcestruzzo necessario per la costruzione di un chilometro di ponte (pile, solette) richiede 30 milioni di chili di aggregato calcareo, per un peso equivalente alla demolizione di un grattacielo di 50 piani, 2,5 milioni di litri di acqua, pari alla dotazione idrica di una persona per 50 anni, e l'emissione in atmosfera di 5 milioni di chilogrammi di anidride carbonica, con il conseguente contributo all'aumento di riscaldamento globale e riduzione di qualità dell'aria [5]. Può, sulla base di questi consumi, essere ancora considerata sostenibile la costruzione di un ponte?

Secondo alcune pubblicazioni [2, 6] uno sviluppo sostenibile dell'industria del calcestruzzo deve essere supportato da un uso responsabile dei materiali necessari per la produzione del calcestruzzo, da un sensibile miglioramento della durabilità delle strutture in calcestruzzo, ed in particolare da un approccio olistico alla tecnologia del calcestruzzo sia nella ricerca sia nelle applicazioni pratiche. Tutti questi aspetti implicano innovazione. Per conseguire uno sviluppo sostenibile si possono individuare strategie a breve termine, come:

- utilizzare per quanto possibile cementi di miscela, ottenuti dalla parziale sostituzione del cemento portland con sottoprodotti industriali ad attività pozzolanica o cementante;
- riutilizzare materiali solidi di scarto in sostituzione degli aggregati naturali o come filler in funzione della loro granulometria;
- riciclare il massimo volume possibile di macerie dalla demolizione delle costruzioni in parziale sostituzione degli aggregati naturali nel calcestruzzo e nelle malte.

Si possono anche delineare strategie a lungo termine, basate su uno sviluppo industriale eco-sostenibile che preveda una drastica riduzione degli sprechi nel consumo delle risorse naturali. Questo richiede azioni immediate per un drastico miglioramento della durabilità del calcestruzzo, se si considera che circa un terzo della produzione totale di calcestruzzo viene attualmente impiegata per riparazioni e sostituzione di vecchie strutture.

3. SOSTENIBILITA' ED INNOVAZIONE

3.1 Innovazione attraverso cementi di miscela

L'impiego di cementi di miscela comporta:

- una riduzione della produzione di cemento portland, che a sua volta significa ridurre una produzione industriale ad elevato consumo di energia e ridurre le emissioni di anidride carbonica;
- ridurre il volume di materiale di scarto da conferire in discarica;
- migliorare la microstruttura del calcestruzzo, cioè migliorare le prestazioni meccaniche e la durabilità del calcestruzzo riducendo la sua tendenza alla fessurazione;
- migliorare alcune proprietà tecnologiche dei prodotti cementizi, come la capacità di isolamento termico o la loro impermeabilità.

Cementi di miscela si possono ottenere con una grande varietà di sottoprodotti industriali e materiali di scarto, come cenere volante prodotta dalle centrali termoelettriche a carbone, fumo di silice sottoprodotto della produzione di acciai al silicio, polvere calcarea prodotta dalla lavorazione dei marmi, polvere di riciclo prodotta negli impianti di riciclaggio delle macerie di demolizione, ceneri di cartiera prodotte dalla combustione dei fanghi nel recupero di energia termica, ceneri da biomassa, e così via.

Ad esempio, in Europa la lavorazione della vetroresina produce 40000 t/anno di scarti industriali, parte dei quali sotto forma di polvere delle dimensioni massime di 0,1 mm prodotta dalle operazioni di segatura e levigatura nella can-



tieristica navale. Una ricerca preliminare condotta nell'ottica di riutilizzare questa polvere in un cemento di miscela ne ha dimostrato la compatibilità per questo impiego, mettendo in evidenza, a fronte di una minor resistenza meccanica, anche un minore assorbimento capillare d'acqua ed un minor ritiro igrometrico dei prodotti cementizi confezionati con tale cemento di miscela.

3.2 Riciclo delle macerie da costruzione e demolizione

Si consideri il riciclaggio delle macerie da costruzione e demolizione, che è un modo per chiudere il ciclo di vita del calcestruzzo [7]. Queste macerie possono essere trattate in maniera idonea in impianti di riciclaggio per produrre aggregati riciclati per calcestruzzo previsti dalla norma UNI EN 12620. L'impiego di questi aggregati riciclati in parziale sostituzione dell'aggregato naturale limita sia il consumo di risorse naturali non rinnovabili sia il volume di rifiuti conferiti in discarica, con duplice vantaggio ambientale.

Grazie alla possibilità di impiego di additivi fluidificanti, utilizzati come riduttori dell'acqua di impasto a pari lavorabilità, è possibile compensare facilmente gli effetti negativi introdotti dall'aggregato riciclato, principalmente riconducibili al loro maggior assorbimento d'acqua, alla loro minor massa volumica ed alla loro minor resistenza rispetto all'aggregato naturale. Sulla base dei risultati ottenuti in tal senso da molti ricercatori ed ampiamente confermati nella letteratura tecnica, le Norme Tecniche per le Costruzioni, emanate con D.M. 14.01.2008, al punto 11.2.9.2 autorizzano l'impiego di aggregati riciclati nella produzione di calcestruzzo per uso strutturale entro i limiti della seguente tabella:

Tabella 11.2.III

Origine del materiale da riciclo	Classe del calcestruzzo	Percentuale di impiego
demolizioni di edifici (macerie)	= C 8/10	fino al 100%
demolizioni di solo calcestruzzo e c.a.	≤ C 30/37 ≤ C 20/25	≤ 30% fino al 60%
riutilizzo di calcestruzzo interno negli stabilimenti di prefabbricazione qualificati	≤ C 45/55	fino al 15%
- da qualsiasi classe - da calcestruzzi > C 45/55	stessa classe del calcestruzzo di origine	fino al 5%

Dal punto di vista economico, oltre ai costi tradizionali si dovrebbero prendere in esame anche i costi ambientali, ed il confronto dovrebbe essere effettuato sulla base di costi eco-bilanciati. In questo caso entrano in gioco gli eco-costi, cioè le spese necessarie ad eliminare l'impatto ambientale provocato dall'estrazione degli aggregati naturali (non facilmente valutabili) e le spese di smaltimento in discarica qualora le macerie da demolizione non vengano utilizzate come aggregati per calcestruzzo. La tabella che segue mostra un costo eco-bilanciato più alto in uno scenario convenzionale come conseguenza dei costi di risanamento ambientale della cava di aggregati naturali, mentre il costo eco-bilanciato ri-

sulta molto inferiore in uno scenario che preveda l'impiego di aggregati riciclati come conseguenza del risparmio dei costi di smaltimento in discarica.

Costi (euro) tradizionali ed eco-bilanciati per metro cubo di calcestruzzo

Scenario	Costo tradizionale	Costo eco-bilanciato
Convenzionale	64	> 89
Impiego aggregati riciclati	63	38

Viene anche riportato in letteratura [8] che, con una percentuale di sostituzione del 30-50% degli aggregati naturali con aggregato grosso in calcestruzzo riciclato, i costi delle nuove costruzioni in calcestruzzo possono essere ridotti di circa il 40% e le emissioni di anidride carbonica di circa il 25% pur mantenendo gli stessi livelli di qualità e sicurezza del calcestruzzo tradizionale.

A conferma di quest'ultima affermazione sono state condotte prove di simulazione del comportamento sismico, sottoponendo a carico ciclico nodi trave-pilastro in scala reale (Figura 1) confezionati con calcestruzzo con aggregati riciclati [9].



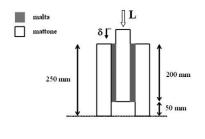
Fig. 1 - Schema della prova per la simulazione del comportamento sismico di nodi trave-pilastro in calcestruzzo con aggregati riciclati.

Il calcestruzzo con aggregati riciclati mostra sotto sollecitazione ciclica un comportamento simile al calcestruzzo tradizionale, ma è in grado di accentuare la dissipazione di energia grazie al suo minor modulo elastico e quindi alla sua maggior duttilità. Questa osservazione suggerisce nuovi criteri di progettazione per questo calcestruzzo basati sulla resistenza a taglio piuttosto che a trazione e sulla rigidezza, che lo rendono idoneo e perfettamente funzionale per impieghi strutturali in area sismica, anche quando confezionato solo con 30% di aggregati riciclati in sostituzione di quelli naturali.

3.3 Malte eco-sostenibili

In una prospettiva di riciclaggio totale delle macerie da demolizione e costruzione, la frazione fine prodotta dall'impianto di riciclaggio, che penalizza la resistenza del calcestruzzo con aggregati riciclati, potrebbe essere impiegata





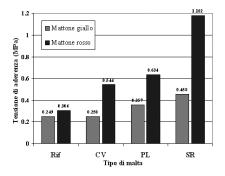


Fig. 2 - Tensione di aderenza fra malte e mattoni diversi.

come aggregato per malte. Nella stessa ottica, la frazione di laterizio contenuta nelle macerie potrebbe essere separata e macinata per ottenere una polvere utilizzabile come legante nelle malte, alla stessa stregua dell'antico cocciopesto. Questa operazione, oltretutto, migliorerebbe la qualità dell'aggregato grosso di riciclo, rendendolo di solo calcestruzzo come previsto dalle norme tecniche per le costruzioni per il calcestruzzo strutturale.

Confrontando la prestazione di malte confezionate con sabbia riciclata (SR) o con parziale sostituzione del cemento con polvere di laterizio (PL) rispetto ad una malta cementizia di riferimento (Rif) od anche contenente cenere volante (CV), è facile constatare la minore resistenza a compressione delle malte eco-sostenibili. Tuttavia, quando viene presa in esame la tensione di aderenza tra queste malte e diversi tipi di mattone (Figura 2), si osserva un tensione di aderenza decisamente superiore per le malte eco-sostenibili, con un significativo miglioramento dell'interfaccia malta-mattone, generalmente riconosciuta come l'anello debole del pannello murario [10-12]. Questo risultato appare abbastanza innovativo, dal momento che la resistenza ultima per taglio risulta spesso più determinante della resistenza ultima per compressione nel meccanismo di collasso dei pannelli murari delle costruzioni in muratura di mattoni sottoposte ad azioni orizzontali, come in aree sismiche.

3.4 Polvere di riciclo come aggiunta minerale per calcestruzzi autocompattanti

Per un riciclo del 100% delle macerie da demolizione e costruzione, la rimanente frazione finissima (0-90 $\mu m)$ potrebbe essere utilizzata come aggiunta minerale per ridurre bleeding e segregazione del calcestruzzo. In effetti, risultati sperimentali preliminari [13] indicano che questa polvere risulta un eccellente filler per calcestruzzi autocompattanti, non modificandone il comportamento meccanico ed essendo in grado di conferire lo stesso effetto di un agente modificatore di viscosità.

4. CONCLUSIONI

È possibile affermare che, a fronte di un uso indiscriminato di risorse naturali non rinnovabili, sono disponibili tecnologie appropriate per un impiego corretto di sottoprodotti e materie prime seconde allo scopo di migliorare la sostenibilità del calcestruzzo come materiale da costruzione. Come esempio, il calcestruzzo confezionato utilizzando aggregati riciclati e cenere volante non mostra alcun effetto deleterio sulla durabilità del calcestruzzo armato, se non talora qualche miglioramento.

Questo non significa che sia necessario rinunciare a strutture impegnative in nome dello sviluppo sostenibile, ma che è necessario gestire correttamente le risorse disponibili per un ambiente migliore, ricorrendo per quanto possibile ad un approccio progettuale realistico

BIBLIOGRAFIA

- Naik, T. R. (2002). "Greener Concrete Using Recycled Materials" ACI Concrete International, 24(7), 45-49.
- Mehta, P. K. (2004). "The Next Revolution in Materials of Construction." VII AIMAT, Ancona, Italy, June 29 - July 2, Key-Note Lecture, 19 pages.
- Holland, T. C. (2002). "Sustainability of the Concrete Industry
 – What Should be ACI's Role?" Concrete International, 24(7), 35-40.
- Naik, T. R. (2007). "Sustainability of the Cement and Concrete Industries" Published at the International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Coventry, UK, June 2007.
- Moriconi, G. (2007). "Recyclable Materials in Concrete Technology: Sustainability and Durability" Proceedings of the First International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, R.N. Kraus, T.R. Naik, P. Claisse and H. Sadeghi-Pouya, ed.; Coventry, U.K., June 11-13, 2007, 1-12.
- Mehta, P. K. (2009). "Global Concrete Industry Sustainability" ACI Concrete International, 31(2), 45-48.
- Corinaldesi, V., Dezi, L., and Moriconi, G. (2008). "Recycling C&DW: A Way for Closing The Concrete Loop." Proceedings of the First International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Taylor & Francis Group, London, U.K., 799-804.
- 8. Dosho, Y. (2007). "Development of a sustainable concrete waste recycling system" Journal of Advanced Concrete Technology, 5(1), 27-42.
- Corinaldesi, V., and Moriconi, G. (2006). "Behavior of Beam-Column Joints Made of Sustainable Concrete under Cyclic Loading" Journal of Materials in Civil Engineering, 18(5), 650-658
- Corinaldesi, V., Giuggiolini, M., and Moriconi, G. (2002). "Use of Rubble from Building Demolition in Mortars" Waste Management, 22(8), 893-899.
- 11. Moriconi, G., Corinaldesi, V., and Antonucci, R. (2003). "Environmentally-friendly mortars: a way to improve bond between mortar and brick" Materials & Structures, 36(264), 702-708.
- 12. Corinaldesi, V., and Moriconi, G. (2009). "Behaviour of cementitious mortars containing different kinds of recycled aggregate" Construction and Building Materials, 23(1), 289–294.
- 13. Corinaldesi, V., and Moriconi, G. (2003). "The Use of Recycled Aggregates from Building Demolition in Self-Compacting Concrete" Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM Publication s.a.r.l., Bagneux, France, 251-260.





RecensionI sul DEC

Recensione pubblicata su L'Edilizia del "Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo"

Mario Collepardi si dedica da sempre, con le sue grandi capacità didattiche, alla divulgazione della cultura della tecnologia del calcestruzzo nel nostro paese. I suoi numerosi libri sono un riferimento per gli studiosi e i tecnici di questo settore. Il Dizionario Enciclopedico sul Calcestruzzo è la sua recente novità editoriale.

Spesso i tecnici che operano nell'ambito del cantiere si trovano disorientati di fronte ai nuovi termini che sono nati in seguito ai recenti sviluppi della scienza e della tecnologia del calcestruzzo. Analogamente i ricercatori sui materiali e i progettisti delle strutture in calcestruzzo, frequentemente, ignorano i termini che vengono utilizzati nella pratica di cantiere. Il linguaggio è uno dei fattori che ostacola la comprensione e la collaborazione tra le molte figure professionali che contribuiscono alla realizzazione di opere in calcestruzzo.

Il Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo è unico nel suo genere e aiuta a colmare queste lacune. Contiene dai termini scientifici, a quelli tecnologici a quelli gergali. Include le sigle che vengono comunemente impiegate per identificare i materiali e le tecniche utilizzate in cantiere. Non mancano nemmeno le biografie scientifiche dei grandi ricercatori italiani e stranieri che hanno fatto la storia del calcestruzzo.

Di ciascun termine fornisce una spiegazione semplice ma rigorosa. Continui richiami consentono di individuare i termini tra loro collegati e, se necessario, di giungere alle parti nelle quali vengono spiegati in modo più approfondito i principi scientifici (ad esempio i processi di idratazione dei diversi tipi di cemento), le procedure pratiche (ad esempio il mix design), le proprietà dei materiali (ad esempio dei calcestruzzi autocompattanti), ecc.

È, quindi, uno strumento pratico e di facile consultazione, utile sia per risolvere rapidamente un dubbio immediato sia per approfondire le conoscenze su uno specifico argomento. Nel primo caso si può utilizzare per trovare direttamente la spiegazione del termine cercato, nel secondo si possono leggere i diversi richiami nel testo, fino a trovare dei riferimenti bibliografici per ulteriori approfondimenti.

Questo dizionario è quindi un valido strumento che può essere utile avere a disposizione negli studi di progettazione, negli impianti di produzione e nei laboratori.

Prof. Luca Bertolini - Politecnico di Milano

Recensione del volume "Dizionario Enciclopedico del Calcestruzzo" di Mario Collepardi Il Giornale dell'Ingegnere, n. 19 - Ottobre 2011

Quando, circa un anno fa, l'autore mi scrisse per avere il mio parere, accanto a quello di altri colleghi ed amici, sul suo progetto di scrivere un dizionario sul calcestruzzo, approvai entusiasticamente l'iniziativa. Un'opera del genere mancava nel panorama librario italiano, e chi meglio di Mario Collepardi, un insigne studioso di leganti e conglomerati cementizi di rinomanza internazionale, già autore di molti apprezzati testi sul calcestruzzo, avrebbe potuto portare a termine felicemente l'impresa?

Avendo ora il libro tra le mani, posso affermare che l'attesa, nemmeno tanto lunga, non è andata delusa. L'agile volume, in formato A4, di poco meno di 300 pagine, è una summa delle più aggiornate conoscenze sul calcestruzzo, sulla tecnologia di fabbricazione delle materie prime, sul confezionamento del conglomerato, sulla sua corretta messa in opera, sulle prove tecniche e sui controlli, sulle proprietà e sui criteri di scelta nelle varie applicazioni, sulla degradazione delle opere e sul modo di contrastarla. Non mancano informazioni di carattere storico su scienziati del settore del passato e del presente, su opere esemplari di interesse archeologico o architettonico, sulla norme e sulla legislazione.

Naturalmente l'insieme delle conoscenze di cui si tratta è reperibile in manuali, trattati e, in genere, nella letteratura scientifica internazionale, ma il modo in cui la materia è presentata in questo volume è del tutto originale e, aggiungo, efficace. Voglio dire che non si tratta di un banale dizionario che riporta in ordine alfabetico una serie di lemmi, cui corrispondono stringate definizioni: siamo, al contrario, in presenza di un autentico trattato, che ha però il vantaggio di consentire, pur nella completezza dell'informazione, un'agevole consultazione e l'acquisizione di rapide risposte a quesiti, dubbi o esigenze di approfondimento.

Come è bene e opportunamente spiegato dall'autore nella prefazione, il dizionario è organizzato in maniera che ad ogni lemma o argomento corrisponda una serie di richiami o collegamenti (indicati da una freccia), che consentono, ove se ne ravveda la necessità, di acquisire ulteriore conoscenza o di completare l'informazione. Si veda, ad esempio, a solo titolo esemplificativo, fra gli innumerevoli percorsi, la sequenza: $malta \Rightarrow legante \Rightarrow pasta cementizia \Rightarrow pori capillari \Rightarrow rapporto acqua-cemento \Rightarrow permeabilità all'acqua, etc. Evidente anche il vantaggio di "scoprire" attraverso questi percorsi informazioni di cui non si aveva alcuna nozione.$

Il volume è corredato di innumerevoli grafici, tabelle e figure, completato da un'essenziale bibliografia (inserita opportunamente nel testo), e da un utile indice degli autori menzionati.

Per concludere, l'opera di Collepardi non dovrebbe mancare nella biblioteca del professionista tecnologo dei materiali, ma è di indubbia utilità, per l'agilità e la rapidità con la quale fornisce informazioni, al tecnico operatore e al produttore, oltre che al ricercatore, ad ogni livello, nel campo della scienza e tecnologia del calcestruzzo.

Prof. Carmine Colella - Univ. Federico II - Napoli

A proposito di prestazione termica



L'evoluzione della normativa sul contenimento dei consumi energetici degli edifici impone importanti adequamenti 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



www.chryso.com



OSSERVAZIONI CRITICHE ALLE NTC SULLA DURABILITA' DELLE OPERE IN C.A. SECONDO LA EN 206 E LA UNI 11104



Mario Collepardi, Silvia Collepardi Enco Srl - Ponzano Veneto (TV) - info@encosrl.it



1. INTRODUZIONE

Le norme EN 206 e le UNI 11104 fissano alcuni parametri per specificare il comportamento durabile per almeno 50 anni del calcestruzzo in funzione delle classi di esposizione. Questi parametri sono:

- il rapporto acqua cemento (a/c) massimo al di sotto del quale deve essere adottato quello specificato per un calcestruzzo durabile;
- il valore di resistenza caratteristica (R_{ck}) minimo al di sopra del quale è assicurata la durabilità del calcestruzzo;
- il dosaggio di cemento minimo richiesto per un calcestruzzo durabile.

Inoltre, l'Eurocodice 2, in aggiunta alle specifiche sopra riportate, stabilisce i valori di copriferro minimo per assicurare la durabilità assumendo un valore maggiore di 10 mm per le strutture in C.A.P. più vulnerabili dalla corrosione rispetto alle strutture in C.A. Infine questi valori del copriferro, che si riferiscono a una vita di servizio di 50 anni, vanno aumentati di altri 10 mm per strutture con una durabilità di 100 anni.

La Tabella 1 mostra a titolo di esempio quanto sopra esposto per la classe di esposizione XC cui si deve la corrosione dei ferri di armatura per esposizione all'anidride carbonica presente nell'aria. In particolare, quando le strutture in calcestruzzo armato sono esposte all'aria umida, dove nell'ambiente si alternano cicli di asciutto e bagnato, possiamo esaminare la classe di esposizione XC4 che verrà analizzata in dettaglio in questo articolo per evidenziare due tipi di critiche:il cemento da una parte ed i valori di a/c e di R_{ck} dall'altra.

Tabella 1 - Classe di esposizione XC secondo UNI 11104

Classe di	Ambiente	a/c	R _{ck}	Dosaggio di cemento	Coprifer	ro (mm)*
esposizione	Ambiente	a/C	R _{ck} (MPa)	(kg/m³)	c.a.	c.a.p.
XC1	asciutto	≤ 0.60	≥ 30	≥ 300	≥ 15	≥ 25
XC2	bagnato	≤ 0.60	≥ 30	≥ 300	≥ 25	≥ 35
XC3	umido	≤ 0.55	≥ 35	≥ 320	≥ 25	≥ 35
XC4	asciutto- bagnato	≤ 0.50	≥ 40	≥ 340	≥ 30	≥ 40

^{*} Valori stabiliti dall'Eurocodice 2: per durabilità > 100 anni aumentare il copriferro di 10 mm

2. IL DOSAGGIO MINIMO DI CEMENTO

L'indicazione del dosaggio minimo di cemento e la mancanza della precisazione sul suo tipo nella norma EN 206 come anche nella norma UNI 11104 rappresentano due aspetti negativi per l'adozione di queste norme per prescrivere calcestruzzi durabili in funzione della classe di esposizione.

Il dosaggio minimo di cemento dipende, in accordo alla regola di Lyse (1), dal diametro massimo e dal tipo (alluvionale o frantumato) dell'inerte, dalla classe di consistenza del calcestruzzo fresco, dall'eventuale presenza di additivi riduttori di acqua che –a parità del rapporto acqua/cemento- comportano anche una riduzione del dosaggio di cemento; pertanto indicare un dosaggio di cemento minimo senza specificare questi parametri che influenzano la reologia del calcestruzzo fresco è praticamente in disaccordo con i principi generali della tecnologia del calcestruzzo: per fare un esempio estremo come si potrebbero impiegare 340 kg/m³ di cemento previsto in XC4 (Tabella 1) se il calcestruzzo è destinato ad una diga con diametro massimo di 60 mm e una classe di consistenza asciutta proprio per ridurre il dosaggio di cemento a livelli di 150-200 kg/m³ al fine di non aggravare i gradienti termici e le conseguenti fessurazioni di origine termica?

Questo aspetto del problema è aggravato dalle indicazioni delle *Norme Tecniche per le Costruzioni* (NTC). A differenza delle norme tecniche EN 206 ed UNI 11104, le NTC sono norme legali che rendono cogenti anche le norme tecniche EN ed UNI se queste vengono richiamate nelle NTC.

A proposito della composizione di un calcestruzzo durabile, (che include il dosaggio minimo di cemento ed il rapporto a/c), nel paragrafo 11.2.1 le NTC stabiliscono che occorre "dare in-

dicazioni in merito alla composizione della miscela" e scegliere la classe di esposizione secondo la norma EN 206-1 oppure la UNI 11104-1. A seguito di questi richiami nelle NTC sulla composizione del calcestruzzo, il dosaggio minimo di cemento, che appare nella EN 206-1 e nella UNI 11104-1 deve essere obbligatoriamente rispettato. Ed ancora nel paragrafo 11.2.11 le NTC ribadiscono che in fase di progetto, la prescrizione, valutate opportunamente le condizioni ambientali, del sito ove sorgerà la costruzione, deve fissare le



caratteristiche del calcestruzzo da impiegare (*composizione* e resistenza meccanica), i valori dei copriferri e le regole di maturazione. Tutto ciò crea confusione nelle contestazioni sulla qualità del calcestruzzo durabile: spesso, in queste occasioni, consulenti tecnici del PM impreparati su questo argomento attribuiscono all'impiego di un calcestruzzo "*depotenziato*" le eventuali *defaillance* perchè il dosaggio minimo di cemento non è rispettato, ancorchè la resistenza meccanica misurata su provini cubici del calcestruzzo (R_{cm28}) fornito e di quello determinato sulle carote estratte dalla struttura in opera risultino molto più alto di quelle richieste per assicurare la compattezza e la durabilità del materiale.

Per quanto attiene il tipo di cemento, esso diventa importante nel caso specifico della XC4 per ridurre il calore di idratazione; ma né la norma europea EN 206 né quella nazionale UNI 11104 indicano quale è il particolare tipo di cemento da impiegare in funzione della classe di esposizione. Esistono, poi, classi di esposizione, quali XS, XD ed XF -dove il cloruro di origine marina, industriale o proveniente dai sali disgelanti- provoca gravi corrosioni dei ferri di armatura che a parità di tutte le altre condizioni (in particolare a parità di a/c) possono essere fortemente mitigate dall'impiego del cemento d'altoforno (CEM III), pozzolanico (CEM IV) e composito (CEM V) capaci tutti di adsorbire il cloruro (2) frenandone l'avanzamento verso i ferri di armatura. Anche in questi casi particolari le norme EN 206 e UNI 11104 non raccomandano l'impiego di questi cementi.

3. IL RAPPORTO ACQUA/CEMENTO E LA R_{ck}

I rapporti acqua/cemento che sono coinvolti nelle specifiche di un calcestruzzo possono essere così individuati (Tabella 2):

- (a/c)₁ indica il rapporto acqua/cemento che dipende dalla R_{ck} funzione delle caratteristiche strutturali e che nell'esempio specifico sarà assunta 30 MPa;
- (a/c)₂ indica il rapporto acqua/cemento che corrisponde al valore massimo (≤ 0.50) mostrato in Tabella 1;
- $(a/c)_{2R}$ indica il rapporto acqua/cemento che occorre adottare per garantire il valore minimo di R_{ck} (\geq 40 MPa) mostrato in Tabella 1

Tabella 2 - Rapporti a/c per la classe di esposizione XC4

PROPRIETA' STRUTTURALI	 R_{ck} individuato dal calcolo progettuale cui corrisponde un valore di rapporto acqua/cemento (a/c)₁ che è funzione della classe di consistenza del cemento impiegato.
DURABILITA'	 (a/c)₂ → rapporto acqua/cemento per garantire il valore massimo a/c (≤ 0.50) presente nella Tabella 1; (a/c)_{2R} → rapporto acqua/cemento per garantire il valore di R_{ck} (≥ 40 MPa) presente nella Tabella 1.

Non necessariamente i tre valori di rapporto acqua/cemento coincidono e quindi occorre adottare il più basso valore $(a/c)^*$ per soddisfare tutti e tre i requisiti ed in particolare la $(R_{ck})^*$, che corrisponde alla resistenza caratteristica da adottare.

4. INFLUENZA DELLA CLASSE DI RESISTENZA DEL CEMENTO

Nell'esempio che segue saranno calcolati i valori di (a/c)* e di (R_{ck}) * da adottare in funzione dei seguenti cementi - CEM 32.5 R;

- CEM 42.5 R;
- CEM 52.5 R.

Nei paragrafi che seguono sarà assunto un controllo statistico di tipo B con uno scarto quadratico medio (s) di 5 MPa. Nella Fig. 1 è mostrata la resistenza a compressione media a 28 giorni (R_{cm28}) in funzione del rapporto a/c per calcestruzzi confezionati con i summenzionati tre cementi. Ovviamente, a parità di rapporto a/c la R_{cm28} aumenta all'aumentare della classe di resistenza del cemento impiegato.

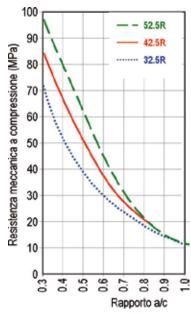


Fig. 1 - R_{cm28} in funzione di a/c per calcestruzzi con cemento 52.5 R oppure 42.5 R oppure 32.5R

4.1 Cemento 32.5 R

Nella Tabella 3 sono mostrati i risultati ottenuti nel calcestruz-zo confezionato con CEM 32.5R attraverso quattro stadi da A a D per calcolare:

- il rapporto $(a/c)_i$;
- la R_{cm28} ;
- il rapporto $(a/c)_{2R}$;
- il rapporto $(a/c)^*$ e la $(R_{ck})^*$ da adottare per la durabilità della struttura.

Tabella 3 - Calcolo di (a/c),, (a/c) $_{2R}$, (a/c) $_{2R}$, (a/c)* ed (R $_{ck}$)* per calcestruzzo con CEM 32.5 R

A)	CEM 32.5 R: R_{ck} = 30 MPa con s = 5 MPa $\downarrow R_{cm28} = 30 + 1.4 \cdot 5 = 37 \text{ MPa}$ $\downarrow (a/c)_{1} = 0.52$
B)	$(a/c)_2 \le 0.50 \rightarrow R_{cm28} = 38 \text{ MPa}$
C)	$(a/c)_{2R} \rightarrow (R_{ck})^* \ge 40 \text{ MPa}$ $\downarrow \qquad \qquad \downarrow$ $R_{cm28} = 47 \text{ MPa}$ $\downarrow \qquad \qquad \downarrow$ $(a/c)_{2R} = 0.42$
D)	(a/c)* ≤ 0.42

Nella Fig. 2 sono mostrati i calcoli della R_{cm28} e del rapporto a/c quando si impiega il CEM 32.5R:

- stadio A della Tabella $3 \rightarrow la R_{cm28}$, derivante da considerazioni



strutturali con $R_{ck} = 30$ MPa, è pari a $30 + 1.4 \cdot 5 = 37$ MPa e corrisponde (seguendo il tracciato della freccia da 37 MPa in Fig.2) ad un rapporto $(a/c)_1 = 0.52$.

- stadio B della Tabella $3 \rightarrow (a/c)$, = 0.50 corrisponde (seguendo il tracciato della freccia da 0.50 in Fig.2) a una R_{cm28} di 38 MPa;
- stadio C della Tabella $3 \rightarrow (a/c)_{2R}$ corrisponde alla $(R_{ck})^*$ di 40MPa per ragioni di durabilità che comporta una R_{cm28} di 47 MPa da cui (seguendo la freccia in Fig.1) si arriva a 0.42;
- stadio D della Tabella $3 \rightarrow$ scelta del rapporto (a/c)* più basso da adottare per confezionare il calcestruzzo.

In conclusione, i valori di $(R_{cb})^*$ così calcolati corrispondono esattamente al valore di R_{ck} mostrato in Tabella 1 per garantire la durabilità della struttura in C.A. esposta nella classe di esposizione XC4. Al contrario, il rapporto (a/c)* calcolato per garantire la durabilità è 0.42 e quindi discretamente inferiore a quello prescritto di 0.45 mostrato in Tabella 1.

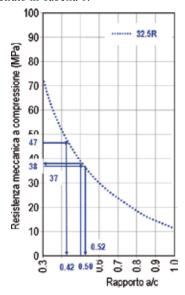


Fig. 2 - R_{cm28} in funzione di a/c con cemento 32.5R

4.2 Cemento 42.5 R

Nella Tabella 4 sono riportati i risultati ottenuti nel calcestruzzo confezionato con CEM 42.5R attraverso i quattro stadi sopra menzionati:

- il rapporto $(a/c)_i$;
- la R_{cm28} ;
- il rapporto $(a/c)_{2R}$; il rapporto $(a/c)^*$ e la $(R_{ck})^*$.

Tabella 4 - Calcolo di $(a/c)_1$, $(a/c)_2$, $(a/c)_{2R}$, $(a/c)^*$ ed $(R_{ck})^*$ per calcestruzzo con CEM 42.5 R

	CEM 42.5 R: R _{ck} = 30 MPa con s = 5 MPa
A)	$R_{cm28} = 30 + 7 = 37 \text{ MPa}$
	(a/c) ₁ = 0.60
	$(a/c)_2 \le 0.50 \to R_{cm28} = 51 \text{ MPa}$
B)	51-7 = 44 MPa → (R _{ck})* ≈ 45 MPa
	$R_{cm28} = 45-7 = 52 \text{ MPa} \rightarrow a/c = 0.49$
	$(a/c)_{2R} \rightarrow R_{ck} \ge 40 \text{ MPa}$
C)	$R_{cm28} = 47 \text{ MPa} \rightarrow (a/c)_{2R} = 0.52$
D)	(a/c)* ≤ 0.49

Nella Fig. 3 sono mostrati i calcoli della R_{cm28} e del rapporto a/c quando si impiega il CEM 42.5R:

- stadio A della Tabella $4 \rightarrow la R_{cm28}$, derivante da considerazioni strutturali con $R_{ck} = 30$ MPa, è pari a $30 + 1.4 \cdot 5 = 37$ MPa e corrisponde (seguendo il tracciato della freccia da 37 MPa in Fig. 3) ad un rapporto $(a/c)_1 = 0.60$.
- stadio B della Tabella $4 \rightarrow (a/c)_2 \le 0.50$ corrisponde (seguendo il tracciato della freccia da 0.50 in Fig.3) a una R_{cm28} di 51 MPa che a sua volta corrisponde ad una R_{ck} di 51-1.4•5 = 44 MPa difficilmente disponibile nei listini del calcestruzzo preconfezionato. E' conveniente pertanto arrotondare 44 MPa in \approx 45 MPa. A questo valore di R_{ck} arrotondato corrisponde una $R_{cm28} = 45$ $+1.4 \cdot 5 = 52$ MPa. Seguendo il percorso della freccia da 52 MPa in Fig.3 si arriva al valore di a/c = 0.49. In altre parole il valore di a/c si adegua cambiando da 0.50 a 0.49 per arrivare ad un valore arrotondato della R_{ck} disponibile sul mercato.
- stadio C della Tabella $3 \rightarrow (a/c)_{2R}$ corrisponde alla R_{ck} di 40 MPa per ragioni di durabilità che comporta una $R_{cm/28}$ di 47 MPa da cui (seguendo la freccia in Fig. 3) si arriva a 0.52.

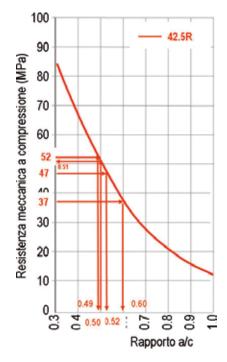


Fig. 3 - R_{cm28} in funzione di a/c con cemento 42.5R

Pertanto, i valori di (R_{ck}) * così calcolato (45 MPa) è superiore al valore di R_{ck} (40 MPa) mostrato in Tabella 1 per garantire la durabilità della struttura in C.A. esposta nella classe di esposizione XC4. Al contrario, il rapporto (a/c)* calcolato per garantire la durabilità è 0.49 e quindi leggermente inferiore a quello prescritto di 0.50 mostrato in Tabella 1.

4.2 Cemento 52.5 R

Nella Tabella 5 sono indicati i risultati ottenuti nel calcestruzzo confezionato con CEM 52.5R attraverso i quattro stadi sopra menzionati:

- il rapporto (a/c);
- la R_{cm28} ;
- il rapporto $(a/c)_{2R}$; il rapporto $(a/c)^*$ e la $(R_{ck})^*$.

Nella Fig. 4 sono mostrati i calcoli della R_{cm28} e del rapporto a/c quando si impiega il CEM 52.5R:



- stadio A della Tabella $4 \rightarrow la R_{cm28}$, derivante da considerazioni strutturali con $R_{ck} = 30$ MPa, è pari a $30 + 1.4 \cdot 5 = 37$ MPa e corrisponde (seguendo il tracciato della freccia da 37 MPa in Fig. 4) ad un rapporto $(a/c)_1 = 0.65$, sensibilmente maggiore di quelli registrati con gli altri cementi per le maggiori prestazioni meccaniche del CEM 52.5R.
- <u>stadio B</u> della Tabella $5 \rightarrow (a/c)_2 \le 0.50$ corrisponde (seguendo il tracciato della freccia da 0.50 in Fig. 4) a una R_{cm28} di 61 MPa che a sua volta corrisponde ad una R_{ck} di 61- $1.4 \cdot 5 = 54$ MPa difficilmente disponibile nei listini del calcestruzzo preconfezionato e pertanto arrotondabile a ≈ 55 MPa. A questo valore di R_{ck} corrisponde una $R_{cm28} = 55 + 1.4 \cdot 5 = 62$ MPa. Seguendo il percorso della freccia da 62 MPa in Fig.4 si arriva al valore di a/c = 0.49. In altre parole, anche in questo caso il valore di a/c si adatta per arrivare ad un valore arrotondato della R_{ck} disponibile sul mercato.
- stadio C della Tabella $5 \rightarrow (a/c)_{2R}$ corrisponde alla R_{ck} di 40 MPa sensibilmente inferiore al valore di 55 MPA sopra calcolato in base al rapporto (a/c), per il cemento di classe 52.5R.

Tabella 5 - Calcolo di $(a/c)_1$, $(a/c)_2$, $(a/c)_{2R}$, $(a/c)^*$ ed $(R_{ck})^*$ per calcestruzzo con CEM 52.5 R

A)	CEM 52.5 R: R_{ck} = 30 MPa con s = 5 MPa \downarrow R_{cm28} =30 + 7 = 37 MPa
A)	$(a/c)_1 = 0.65$
	$(a/c)_2 \le 0.50 \rightarrow R_{cm28} = 61 \text{ MPa}$
D)	$R_{ck} = 61-7 = 54 \text{ MPa} \rightarrow (R_{ck})^* \approx 55 \text{ MPa}$
B)	$R_{cm28} = 55+7 = 62 \text{ MPa}$
	a/c = 0.49
6)	$(a/c)_{2R} \rightarrow R_{ck} \ge 40 \text{ MPa}$
C)	(a/c) ₂₈ = 0.59
D)	(a/c)* ≤ 0.49

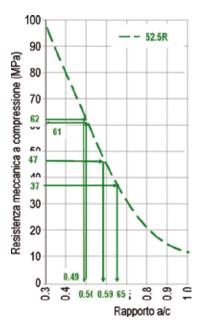


Fig. 4 - R_{cm28} in funzione di a/c con cemento 52.5R

Pertanto, il valori di $(R_{ck})^*$ così calcolato (55 MPA) è superiore al valore di R_{ck} (40 MPa) mostrato in Tabella 1 per garantire la durabilità della struttura in C.A. esposta nella classe di esposizione XC4. Al contrario, il rapporto $(a/c)^*$ calcolato per garantire la durabilità è 0.49 e quindi quasi coincidente con quello prescritto di 0.50 mostrato in Tabella 1.

5 CONCLUSIONI

Nella Tabella 6 sono riassunti i valori di a/c e di R_{ck} che debbono essere rispettati per garantire la durabilità di una struttura in C.A. nella classe di esposizione XC4 in funzione della classe di cemento adottato. Il calcolo è stato limitato a tre cementi (32.5R, 42.5R, 52.5R) ma potrebbe ovviamente essere esteso anche ai cementi della corrispondente classe N.

I valori mostrati in Tabella 6 indicano che il valore di 40 MPa come R_{ck} minima per garantire la durabilità della struttura non è più sufficiente quando si adottano cementi 42.5R e 52.5R per i quali il valore richiesto per il rapporto a/c (circa 0.50) comporta valori di R_{ck} rispettivamente di 45 e 55 MPa e quindi superiori a quello previsto di 40 MPa .

Tabella 6 - Prescrizioni nella UNI 11104 in funzione del cemento impiegato

Prescrizioni	a/c	R _{ck} (MPa)
Secondo UNI 11104 attuale	≤ 0.50	≥ 40
UNI 11104 + CEM 32.5 R	≤ 0.42	≥ 40
UNI 11104 + CEM 42.5 R	≤ 0.49	≥ 45
UNI 11104 + CEM 52.5 R	≤ 0.49	≥ 55

Nella Tabella 6 si vede anche che, se si impiega un cemento 32.5R, per garantire una R_{ck} di almeno 40 MPa, come richiesto nella Tabella 1, occorre abbassare a 0.42 il rapporto a/c al di sotto del valore massimo (0.50) previsto dall'attuale UNI 11104.

Infine il dosaggio minimo di cemento richiesto nella Tabella 1 deve essere considerato fuorviante e comunque da escludere in strutture massive dove i dosaggi indicati in Tabella 1 possono risultare eccessivi ai fini dello sviluppo termico dovuto al calore di idratazione del cemento.

Sarebbe invece molto utile che venissero almeno consigliati i tipi di cemento capaci di contribuire a mitigare le aggressioni come per esempio il cemento d'altoforno, pozzolanico e composito nei confronti dei cloruri delle opere marittime e di quelle di alta montagna esposte al trattamento disgelante con sali a base di cloruro. Da questo punto di vista solo nel caso delle strutture esposte ai sali solfatici (classe di esposizione A) si raccomanda l'impiego di cementi resistenti ai solfati.

BIBLIOGRAFIA

- (1) I. Lyse, "Tests on consistency and strength of concrete having constant water content", Proceedings ASTM, 32, Part II, pp. 629-636, (1932).
- (2) M. Collepardi, A. Marcialis, R. Turriziani, "Penetration of chloride ions in cement pastes and concretes", Journal of American Society, 55, pp. 534-535, (1972).



CORSI DI FORMAZIONE 2012

Mercure Bologna Centro Viale Pietramellara 59 – 40121 Bologna (BO) Dal 30 Gennaio al 3 Febbraio 2012

TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO Bologna, 30-31 Gennaio 2012

- Cementi. Inerti. Additivi chimici ed aggiunte minerali.
- Calcestruzzo fresco: lavorabilità, perdita di lavorabilità, bleeding e segregazione.
- Calcestruzzo indurito: resistenza caratteristica, durabilità, ritiro, deformazione viscosa.
- Messa in opera e stagionatura del calcestruzzo.
- Dinfluenza della temperatura sulle proprietà del calcestruzzo: getti in climi freddi e caldi.
- Maturazione a vapore.
- Prescrizioni di capitolato in accordo alle norme Tecniche per le Costruzioni.

Docenti: Prof. M. Collepardi

Materiale Didattico: Libro "IL NUOVO CALCESTRUZZO", Software Easy & Quick 2012 Orario: Primo Giorno 10.30-12.30 e 14.00- 18.00; Secondo Giorno: 8.30-12.30 e 14.00-16.30

Costo: € 700,00 + IVA

Sconti cumulabili: sconto del 10% se l'iscrizione avviene entro il 31/12/2011 - sconto 5% se l'iscrizione è estesa a 2 corsi - sconto del 10% se l'iscrizione è estesa a 3 corsi.

> STRUTTURE IN CALCESTRUZZI SPECIALI Bologna, 1 Febbraio 2012

- Calcestruzzi al alta resistenza meccanica
- Calcestruzzi autocompattanti
- Calcetruzzi leggeri strutturali
- Calcestruzzi fibrorinforzati
- Calcestruzzi a ritiro compensato
- Calcestruzzi proiettati (Spritz Beton Shotcrete)
- Calcestruzzi polimero-impregnati (PIC)
- Calcestruzzi resistenti al fuoco
- Calcestruzzi riciclati
- Calcestruzzi leggeri

Docenti: Prof. M. Collepardi, Ing. R. Troli, Ing. S. Collepardi,

Materiale Didattico: Libro "IL NUOVO CALCESTRUZZO", Software Easy & Quick 2012

Orario: 10.30-12.30 e 14.00- 18.00

Costo: € 400,00 + IVA

Sconti cumulabili: sconto del 10% se l'iscrizione avviene entro il 31/12/2011 - sconto 5% se l'iscrizione è estesa a 2 corsi - sconto del 10% se l'iscrizione è estesa a 3 corsi.

➤ DIAGNOSI DEL DEGRADO E RESTAURO DELLE STRUTTURE IN C.A. Bologna, 2-3 Febbraio 2012

ROGRAMMA DEL CORSO

- Prove in sito ed in laboratorio
- Il degrado del calcestruzzo armato
- Calcestruzzi speciali per il restauro
- Diagnosi del degrado nelle strutture in calcestruzzo
- Il restauro delle opere in calcestruzzo
- Introduzione ai materiali FRP. Le fibre in carbonio, in aramide ed in vetro. Le resine epossidiche
- I materiali compositi e determinazioni delle caratteristiche meccaniche
- L'impiego dell'FRP nel restauro delle opere in c.a.
- Calcolo del rinforzo degli elementi inflessi con il metodo agli stati limite
- Esempi di applicazione degli FRP nel rinforzo strutturale
- Applicazione dei rinforzi in FRP nel restauro degli edifici danneggiati dal sisma

Docenti: Prof. M. Collepardi, Ing. R. Troli, Ing. S. Collepardi, Ing. F. Simonelli

Materiale Didattico: Libro "DIAGNOSI DEL DEGRADO E RESTAURO DELLE STRUTTURE IN C.A. - Sec. Edizione"

Orario: Primo Giorno 10.30-12.30 e 14.00- 18.00 ; Secondo Giorno: 8.30-12.30 e 14.00-16.30

Costo: € 700,00 + IVA

Sconti cumulabili: sconto del 10% se l'iscrizione avviene entro il 31/12/2011 - sconto 5% se l'iscrizione è estesa a 2 corsi - sconto del 10% se l'iscrizione è estesa a 3 corsi.

MODULO D'ISCRIZIONE - da inviare via fax o mail a Enco

Titolo O	ognome		Nome	
Societa' / Ente	P.IVA		> CF	
V ia	n°	CAP		(
T el	> Fax			
Ruolo all'interno dell'azie	nda			
STRUTTURE IN CALCES 1 Febbraio 2012	TRUZZI SPECIALI - Costo Euro	400,00+IVA		
DIAGNOSI DEL DEGRAI 02-03 Febbraio 2012	DO E RESTAURO DELLE STRUT	ΓURE IN C.A Cos	to Euro 700,00+IVA	
Sconto 10% per l'iscrizio	one entro il 31 Dicembre 2011			
Sconto 5% per l'iscrizion	ne a 2 corsi			
Sconto 10% per l'iscrizio	one a 3 corsi			
Autorizzo la Enco Srl a utilizzare (Dichiarazione ai sensi della Lego	questi dati per l'invio di aggiornament ne 196/2003)	i periodici	Firma	

Il pagamento della quota di iscrizione deve avvenire almeno 15 giorni prima della data di inizio corso mediante bonifico bancario intestato a Enco Srl presso Banca Popolare di Verona (IBAN: IT 67 M 05188 62180 00000001059).

Si avvisa che il mancato ricevimento della quota di iscrizione entro tale termine causerà la cancellazione dell'iscrizione stessa.



POLITECNICO DI TORINO: LAUREA MAGISTRALE AD HONOREM A THADDEUS MASSALSKI e ADAM NEVILLE

Mercoledì 9 Novembre 2001 presso l'Aula Magna "G. Agnelli" del Politecnico di Torino si è tenuta la cerimonia di conferimento delle Lauree Magistrali ad Honorem a:



ADAM M. NEVILLE Laurea Magistrale ad honorem in Ingegneria Civile

conferita per la riconosciuta competenza nel settore della tecnologia del calcestruzzo e del suo comportamento meccanico e reologico, nonchè per l'impegno profuso nella divulgazione della sua conoscenza.

THADDEUS B. MASSALSKI Laurea Magistrale ad honorem in Ingegneria dei Materiali

conferita per gli alti meriti scientifici e in particolare per l'eccellenza conseguita nello studio dei diagrammi di stato, trasformazioni di fase, struttura di fasi metastabili e amorfe concernenti leghe metalliche non ferrose.





Inizia la cerimonia per la consegna delle Lauree ad Honorem, sulla estrema sinistra il Prof. Neville e all'estrema destra il Prof. Massalski



Il Prof. Massalski mostra la tesi di Laurea rilasciata dal Politecnico di Torino



Il Prof. Neville riceve l'attestato della tesi di Laurea ah Honorem



Standing Ovation dopo la lettura della tesi di Adam Neville: la seconda da destra è la Signora Neville



CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO



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



Il calcestruzzo fibro-rinforzato appartiene alla famiglia dei calcestruzzi speciali. Esso, indicato anche come FRC (Fiber Reinforced Concrete) è una miscela che, oltre ai normali ingredienti per produrre il calcestruzzo, contiene anche delle fibre per rinforzare la matrice cementizia. Le proprietà finali di un FRC possono essere adeguatamente "progettate" mediante la scelta del tipo e del dosaggio di fibre da impiegare nonché delle caratteristiche del sistema cementizio nelle quali esse vengono introdotte (S.P. Shah and A. Skarendal, "Steel Fiber Concrete", Elsevier Applied Science, London & New York, 1986; A. Bentur and S. Mindness, "Fibre-Reinforced Cementitious Composites", Elsevier Applied Science, London & New York, 1990).

La progettazione, l'esecuzione e la caratterizzazione di elementi strutturali in *FRC* richiedono regole e modelli di calcolo diversi da quelli normalmente impiegati per le opere in conglomerato cementizio ordinario e non trattati nelle norme tecniche sulle costruzioni sia nazionali che europee.

Per ovviare a questo limite, un'apposita commissione di esperti, predisposta dal *CNR* nel 2006, ha emesso un documento tecnico (*CNR DT 204/2006 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato*) dove vengono riassunte le principali proprietà dei calcestruzzi fibrorinforzati e fornite le indicazioni sufficienti a consentire il dimensionamento e la verifica di strutture realizzate mediante l'impiego di calcestruzzi armati con fibre in sostituzione o in aggiunta alle armature ordinarie. In queste Istruzioni vengono fornite anche le indicazioni necessarie per la verifica in laboratorio delle proprietà dei materiali cementizi fibro-rinforzati e per la determinazione delle grandezze significative ai fini del calcolo strutturale.

Le *Norme Tecniche per le Costruzioni* al paragrafo § 8.6 precisano che è consentito l'impiego di *FRC* per attività di rinforzo di edifici esistenti senza il preventivo ricorso ad autorizzazioni da parte del *Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*. Al paragrafo § 4.6 le *NTC* precisano che resta, invece, soggetto a preventiva autorizzazione ministeriale l'impiego di tali materiali nelle nuove costruzioni.

1. LE FIBRE

Esistono diversi tipi di fibre impiegate nel rinforzo dei sistemi cementizi. Quelle maggiormente utilizzate sono di tipo metallico, polimerico, in vetro, in carbonio o in materiale naturale (cellulosa, legno ecc.).

L'influenza delle fibre sulle proprietà meccaniche di un conglomerato cementizio dipende dalle proprietà del materiale di cui sono costituite, in particolare dalla *tenacità* e dal *modulo elastico* a trazione, e da alcuni parametri geometrici quali:

- · la forma;
- · la lunghezza;
- il diametro equivalente;
- il rapporto d'aspetto.

Accanto a fibre semplicemente rettilinee esistono fibre ondulate, uncinate, nervate, ad estremità schiacciate, ecc.. La *forma* indica la geometria della linea d'asse delle fibre e l'eventuale variazione della loro sezione trasversale.

Per *lunghezza* della fibra si intende la distanza tra le due estremità. Essa può differire dalla lunghezza della linea d'asse del filamento nel caso di fibre non rettilinee (ondulate, uncinate, ecc.).

Il *diametro equivalente* è il diametro del cerchio di area equivalente alla sezione media della fibra.

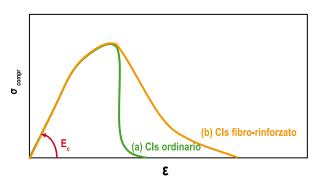
Il *rapporto d'aspetto* è definito come il rapporto tra la lunghezza della fibra e il suo diametro equivalente. A parità di composizione e di dosaggio, l'efficacia delle fibre migliora se aumenta il rapporto d'aspetto e se la forma assume un contorno irregolare che favorisca l'adesione alla matrice cementizia.

A seconda del tipo e del dosaggio di fibre impiegate, il comportamento meccanico del calcestruzzo fibro-rinforzato può differire radicalmente da quello di un calcestruzzo ordinario. Di seguito vengono elencate alcune tra le più significative caratteristiche fisiche e meccaniche del calcestruzzo fibrorinforzato.

2. COMPORTAMENTO A COMPRESSIONE

L'aggiunta di fibre di qualsiasi tipo e forma non è in grado di influenzare apprezzabilmente la *resistenza meccanica a compressione* ed il *modulo elastico* dei materiali cementizi. Tuttavia, un adeguato dosaggio di fibre, soprattutto se di tipo metallico, può influenzare il comportamento sforzo-deformazione (mostrato nella Figura che segue) di un provino in calcestruzzo sottoposto ad una prova di schiacciamento rendendo più lunga e meno ripida la fase discendente (il cosiddetto ramo degradante o di *softening*) della curva σ_{compr} - ε per l'azione di cucitura esercitata dalle fibre nei confronti delle fessure che si producono in direzione ortogonale a quella di massima compressione.



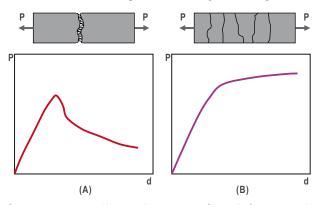


Comportamento sforzo-deformazione a compressione di un calcestruzzo ordinario e di uno rinforzato con fibre metalliche

3. COMPORTAMENTO A TRAZIONE

L'aggiunta di fibre non migliora la resistenza meccanica a trazione del calcestruzzo intesa come la sollecitazione in corrispondenza della quale si verifica l'innesco della prima (o unica) fessura nella matrice di un elemento sollecitato a trazione. Non vengono apprezzabilmente modificate le grandezze che caratterizzano il comportamento del materiale prima della fessurazione, ossia, il modulo elastico a trazione (E_i) e la deformazione in corrispondenza dell'innesco della fessura (ε). L'aggiunta di fibre modifica sensibilmente, invece, il comportamento a trazione della matrice cementizia in fase post-fessurativa (L. Sorelli, A. Meda, G. A. Plizzari, "Bending and uni-axial tensile tests on concrete reinforced with hybrid steel fibers", ASCE Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.17, N.5, pp. 519-527, 2005; E. Cadoni, A. Meda and G.A. Plizzari, "Tensile behaviour of FRC under high strain-rate, Materials and Structures, N. 42, pp.1283-1294, 2009).

A seconda del dosaggio di fibre impiegato, si possono avere due diversi comportamenti post-fessurativi. Per contenuti di fibre non elevati (indicativamente per volumi di fibre inferiori al 2%) il comportamento è di tipo degradante. Questo significa che dopo l'innesco della fessura, il materiale è in grado di sopportare sollecitazioni di trazione a patto che queste siano inferiori a quella che ha provocato la fessurazione della matrice. In questo caso, in provini fibrorinforzati e in assenza di altre armature, si forma un'unica fessura che aumenta di ampiezza fino al collasso come è mostrato nella parte A della Figura che segue.



Comportamenti di un calcestruzzo fibrorinforzato sollecitato a trazione con un carico P: comportamento degradante in A; comportamento incrudente in B

Per dosaggi di fibre elevati (indicativamente per volumi di fibre superiori al 2%), il comportamento post-fessurativo del-l'FRC può risultare di tipo incrudente noto anche come hardening. Ciò significa che, grazie all'efficace azione di cucitura esercitata dalle fibre, nel composito si verifica l'innesco progressivo di una molteplicità di fessure fino al raggiungimento di una tensione di collasso che è maggiore di quella che ha provocato la comparsa della prima lesione come è mostrato nella parte B della Figura precedente.

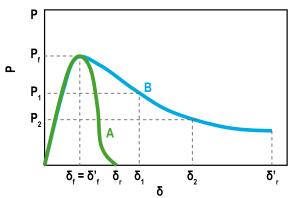
Con i volumi di fibre utilizzati nelle applicazioni più comuni, il comportamento a trazione di un calcestruzzo fibrorinforzato è, in genere, di tipo *softening*.

La caratterizzazione di questo tipo di materiali mediante prove di trazione uni-assiale non è agevole. Si ricorre, pertanto, all'esecuzione di prove di flessione come descritto nel paragrafo che segue.

4. COMPORTAMENTO A FLESSIONE

Le prove di flessione impiegate per la caratterizzazione dei calcestruzzi fibrorinforzati possono essere di due tipi a seconda della norma cui ci si riferisce per la loro esecuzione. Secondo la norma belga NBN B15-239, 239 e secondo la norma giapponese JSCE SF4, ad esempio, deve essere eseguita una prova di flessione "a quattro punti" su provini prismatici aventi dimensioni di $l \times l \times 4l$ (normalmente 150 x 150 x 600 mm), posti su due appoggi aventi distanza pari a 3l l'uno dall'altro. Secondo altre norme, come la norma italiana UNI 11039, invece, la prova deve essere condotta su travi di analoghe dimensioni ma caratterizzate dalla presenza di un intaglio nella mezzeria del lembo inferiore. In entrambi i casi il comportamento flessionale è definito sulla base di una tensione nominale di trazione valutata ipotizzando un comportamento elastico lineare del provino.

La Figura che segue illustra schematicamente il diagramma P- δ (cioè del carico P applicato in funzione della deflessione δ in mezzeria) di una prova di flessione eseguita su travetti non intagliati realizzati con calcestruzzo ordinario (curva A) o fibrorinforzato (curva B).



Comportamento del calcestruzzo ordinario (A) e di quello fibrorinforzato (B) nella prova di flessione per applicazione di un carico P in funzione della deflessione

Nel calcestruzzo ordinario, al raggiungimento del carico che provoca l'innesco di una fessura, a partire dal lembo maggiormente teso (P_f) , si assiste al collasso repentino dovuto alla rapida propagazione della lesione nell'intero spessore del travetto: in altre parole, la deflessione al momento dell'apparizione della



prima fessura (δ_p) è di poco inferiore (e quasi coincidente) a quella che corrisponde alla completa rottura (δ_p) come tipicamente avviene in un materiale *fragile*.

L'introduzione di fibre non cambia significativamente né il carico P_f né la pendenza della curva nell'iniziale tratto lineare. Dal valore del carico P_f nelle ipotesi fatte, si ricava la resistenza a flessione del materiale (R_d) attraverso la formula:

$$R_3 = \frac{6P_f}{l^2}$$

L'aggiunta di fibre, quindi, non modifica significativamente la resistenza a flessione del calcestruzzo. In sostanza, il comportamento del sistema (con e senza fibre) fino alla fessurazione, seguita ad essere governato dal comportamento della matrice cementizia.

Le fibre, invece, modificano sensibilmente il *comportamento post-fessurativo* del sistema come è mostrato nella precedente Figura: la deformazione δ'_f , che corrisponde all'apparizione della prima fessura, è molto inferiore a quella δ'_f , che si registra a completa rottura dell'FRC, come tipicamente avviene in un materiale *duttile*. Un'altra caratteristica connessa alla precedente è la *tenacità*, cioè l'*energia di frattura* che indica il lavoro che è necessario spendere per deformare il materiale fino al collasso. Nel diagramma P- δ di una prova di flessione su provini non intagliati, tale energia è rappresenta dall'area sottesa dalla curva; con un adeguato dosaggio di un determinato tipo di fibre si può aumentare notevolmente l'energia di frattura e, quindi, la tenacità del calcestruzzo come appare nella Figura precedente.

Nelle prove di flessione su provini non intagliati, non essendo possibile stabilire a priori il punto in cui si formerà la fessura, il comportamento post-fessurativo viene caratterizzato sulla base di due valori di deflessione δ_1 e δ_2 mostrati nella Figura precedente. A titolo d'esempio, nella norma JSCE SF4 le deflessioni δ_1 e δ_2 sono poste pari a, rispettivamente, 1.5 e 3.0 mm.

A tali valori di deflessione corrispondono valori del carico applicato P_1 e P_2 dai quali, per mezzo dell'equazione:

$$R_3 = \frac{6P_f}{l^2}$$

è possibile ricavare le cosiddette *resistenze residue* R_1 e R_2 . Tali valori, opportunamente modificati, vengono impiegati nei calcoli per eseguire le verifiche, rispettivamente, allo stato limite di servizio e allo stato limite ultimo.

5. LA TENACITÀ

Alla *tenacità* del calcestruzzo fibro-rinforzato (caratteristica opposta alla fragilità del calcestruzzo ordinario) si deve la capacità di resistere agli urti, qualità particolarmente apprezzata nelle strutture sottoposte a sollecitazioni impulsive e ripetute (giunti autostradali, pavimenti industriali esposti a carichi dinamici, ecc.).

6. LA RESISTENZA ALL'URTO

La *resistenza all'urto* del calcestruzzo fibrorinforzato con una prova basata sull'applicazione ripetuta di colpi è determinata con un maglio fino a rottura del materiale. Con un rinforzo adeguato di fibre in acciaio, il provino di calcestruzzo subisce un affossamento nella zona centrale in corrispondenza dell'area sulla quale agisce il maglio, senza tuttavia subire mai alcuna frattura per l'elevatissima resistenza all'urto del calcestruzzo fibrorinforzato.

7. LA LAVORABILITÀ

L'aggiunta di fibre ad un conglomerato cementizio comporta, in genere, una riduzione della *lavorabilità* dell'impasto rispetto al valore misurato prima dell'aggiunta (*Liberato Ferrara and Alberto Meda, "Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements", Materials and Structures, N.39, pp.411–420, 2006) La riduzione della lavorabilità dipende, principalmente, dal dosaggio e dal rapporto d'aspetto delle fibre impiegate. A parità di rapporto d'aspetto, maggiore è il dosaggio di fibre, maggiore è la riduzione di lavorabilità cui si assiste mentre, a parità di dosaggio, fibre caratterizzate da un più elevato rapporto d'aspetto provocano una maggiore penalizzazione della lavorabilità.*

Ai dosaggi di fibre usualmente impiegati nelle applicazioni correnti, comunque, è in genere possibile ottenere un adeguato livello di lavorabilità aggiungendo e dosando opportunamente *additivi superfluidificanti* e, se necessario, provvedendo ad aumentare la frazione fine dell'impasto e/o a ridurre il diametro massimo dell'aggregato.

8. IL RITIRO IGROMETRICO

Contrariamente a quanto comunemente ritenuto, l'aggiunta di fibre, di qualsiasi tipo e nei dosaggi usualmente impiegati nelle applicazioni pratiche, non è in grado di ridurre apprezzabilmente il *ritiro igrometrico* del calcestruzzo e neppure è in grado di ridurre l'apertura delle fessure indotte dal ritiro contrastato da vincoli. Per contro, con l'aggiunta di fibre al calcestruzzo si può ridurre la propagazione delle fessure dovute al ritiro igrometrico grazie all'azione di cucitura esercitata sui lembi delle lesioni che eventualmente si innescano. Questo effetto è ormai largamente utilizzato aggiungendo fibre in acciaio o di tipo polimerico al calcestruzzo delle pavimentazioni industriali in sostituzione delle reti elettrosaldate con funzione di controllo delle fessurazioni da ritiro igrometrico.

9. IL RITIRO PLASTICO

L'aggiunta di fibre di opportune dimensioni e dosaggio può contribuire a prevenire la formazione di *cavillature* da *ritiro plastico* nei sistemi cementizi prematuramente esposti all'evaporazione d'acqua. Le fibre che maggiormente risultano efficaci a tale scopo sono le micro-fibre polimeriche caratterizzate da lunghezza compresa tra 3 e 20 mm e diametro dell'ordine di $0.05 \div 0.1$ mm.

10. APPLICAZIONI DEI CALCESTRUZZI FIBRORIN-FORZATI

I tipi di fibre più impiegati nei sistemi cementizi sono:

- fibre in acciaio;
- macro-fibre polimeriche;
- micro-fibre polimeriche.
- fibre in vetro

Di seguito si riportano alcuni approfondimenti in merito agli impieghi pratici di tali rinforzi.



10.1 Applicazioni di calcestruzzi rinforzati con fibre in acciaio

L'impiego di fibre in acciaio nei sistemi a base cementizia risale al 1962 con gli studi e il conseguente brevetto depositato negli USA da J. P. Romualdi e G. B. Batson.

Se si eccettuano alcuni materiali speciali come gli *RPC*, dove vengono impiegati volumi considerevoli di speciali fibre metalliche al fine di ottenere comportamenti di tipo incrudente o *hardening*, i dosaggi normalmente impiegati per le fibre in acciaio variano da 20 a 60 kg/m³ cui corrispondono percentuali volumetriche comprese tra 0,25% e 0,75%.

Gli impieghi più ricorrenti delle fibre in acciaio riguardano la realizzazione di pre-rivestimenti nelle opere in sotterraneo mediante *calcestruzzo proiettato* e la realizzazione di pavimentazioni industriali o stradali in calcestruzzo, in parziale o totale sostituzione dell'armatura metallica tradizionale. Nel primo caso si predilige l'impiego di fibre rettilinee (mostrate a sinistra della Figura che segue) caratterizzate da lunghezza non superiore ai 30-40 mm, al fine di non penalizzare eccessivamente la lavorabilità e la *pompabilità* dell'impasto, nel secondo caso risulta particolarmente diffuso l'impiego di fibre ad estremità uncinate, per migliorare l'aderenza alla matrice cementizia (mostrate nella parte destra della Figura) e caratterizzate da rapporti d'aspetto compresi tra 40 e 70.



Fibre rettilinee (a sinistra) e ad estremità uncinate (a destra). Queste ultime sono incollate con colla idrosolubile che serve a mantenere impacchettate le fibre prima del loro uso facilitandone il dosaggio

Le fibre metalliche, impiegate con dosaggi compresi tra 20 e 40 kg/m³ si sono dimostrate efficaci nel sostituire la *rete elettrosaldata* usualmente impiegata nel calcestruzzo per *pavimentazioni industriali* al fine di contrastare la formazione di *fessure* da *ritiro igrometrico* impedito e di contenere l'eccessiva apertura dei *giunti di contrazione*.

Le fibre in acciaio consentono, inoltre, di ridurre il quantitativo di armatura ordinaria eventualmente introdotto nella lastra con funzionalità di carattere statico e, in alcuni casi, di sostituirla completamente. In questi casi, per poter sfruttare il contributo esercitato dalle fibre, occorre utilizzare metodi di calcolo delle pavimentazioni che prendano in considerazione il comportamento post-fessurativo della sezione in calcestruzzo fibro-rinforzato, attingendo alle notevoli riserve di iperstaticità tipiche delle lastre poggianti su sottofondo.

Il vantaggio dell'impiego di fibre in luogo dell'armatura ordinaria consiste nella semplificazione del getto in quanto il calcestruzzo può essere scaricato direttamente dall'autobetoniera con una canaletta in caduta libera come è mostrato nella Figura che segue senza ricorrere all'intervento di *pompe*:



Getto di un calcestruzzo fibrorinforzato per un pavimento industriale senza rete metallica (per gentile concessione di E. Strazzer, General Beton)

Inoltre, con l'impiego di fibre si eliminano le incertezze riguardo il corretto posizionamento delle armature metalliche che, in genere, vengono lasciate sul fondo, dove risultano inefficaci o, anche se correttamente posizionate in partenza, vengono schiacciate al passaggio degli operatori.

Infine, l'impiego di fibre in totale sostituzione delle *armature metalliche* ordinarie in forma di rete elettrosaldata consente l'utilizzo più semplice di una tecnologia meccanizzata per la stesura e finitura automatica del calcestruzzo come, per esempio, la *laser screed*.

10.2 Calcestruzzi rinforzati con macro-fibre polimeriche

Le macro-fibre polimeriche in *PVA* si propongono come alternativa alle fibre di acciaio in quelle applicazioni di carattere prettamente non strutturale come, ad esempio, nel controllo delle fessurazioni da ritiro nel calcestruzzo per *pavimentazioni industriali*. Tuttavia alcune rivendicazioni commerciali definiscono impropriamente queste fibre *macro-fibre strutturali*; esse hanno forma e dimensioni comparabili con quelle delle fibre in acciaio essendo caratterizzate da diametro equivalente dell'ordine del millimetro e lunghezze normalmente comprese tra 30 e 50 mm. Nella Figura che segue sono mostrate macro-fibre lunghe circa 20 mm utilizzate per bloccare la crescita delle fessure provocate dal ritiro igrometrico:



Macro-fibre polimeriche



I materiali polimerici più impiegati in questo settore sono il *polipropilene* e, più recentemente, il *poliestere*, caratterizzato da maggiore rigidezza rispetto al polipropilene e, quindi, da un miglior contributo in termini tensionali a parità di deformazione.

Il dosaggio comunemente usato per queste fibre va da 3 a 7 kg/m³ cui corrispondono, sostanzialmente, le stesse percentuali volumetriche che caratterizzano l'impiego usuale delle fibre in acciaio. Dosaggi inferiori, ancorché consigliati per essere economicamente più attraenti, rischiano di essere inefficaci.

Il vantaggio delle fibre polimeriche, rispetto a quelle in acciaio, è per esempio nel minor effetto negativo esercitato sulla *pompabilità* dell'impasto fortemente influenzata dalle fibre in acciaio a causa della loro maggiore rigidezza.

Ottimi risultati sono stati ottenuti nell'impiego combinato di macro-fibre polimeriche, dosate in quantità di 3 kg/m³ e di un additivo riduttore di ritiro noto come *SRA* nel getto di calcestruzzo per *pavimentazioni industriali* prive di *rete elettro-saldata* ai fini del contenimento delle fessurazioni da ritiro. Nel caso specifico è stato possibile raddoppiare la distanza media tra i *giunti di contrazione* senza riscontrare inconvenienti in forma di fessurazioni o *imbarcamenti* della lastra (*A. Borsoi, P. Birane, W. Parente e M. Collepardi; "Calcestruzzo a ritiro ridotto o nullo"; Enco Journal N. 29, pp. 6-8, 2005*).

Un'altra applicazione interessante delle macro-fibre in un calcestruzzo leggero con additivi super-riduttori di acqua per migliorarne il comportamento post-fessurativo riguarda la produzione di barriere autostradali note come new jersey per aumentarne la resistenza all'urto (G. Mantegazza e A. Gatti "Ruolo dei disaeranti negli additivi a base di policarbossilato applicato al calcestruzzo leggero fibro-rinforzato" Enco Journal, N. 49, 2010).

10.3 Calcestruzzi rinforzati con micro-fibre polimeriche

L'impiego di micro-fibre polimeriche caratterizzate da lunghezza compresa tra 6 e 20 mm e diametro dell'ordine del decimo di millimetro è particolarmente diffuso al fine di ridurre, o addirittura eliminare, le *cavillature* indotte dal *ritiro plastico*, cioè quello che si manifesta nelle prime 24 ore dal getto nelle pavimentazioni e negli intonaci particolarmente esposti, per la loro estensione superficiale, all'evaporazione dell'acqua di impasto

Le fibre maggiormente impiegate in questo caso sono in *poli-propilene (PP) poli-acrilo-nitrile (PAN)* e *poli-vinil-alcool (PVA)* mostrate nella Figura che segue.

I dosaggi di fibre normalmente impiegati vanno da 0.5 a 2 kg/m³. Dosaggi maggiori sono tecnicamente impossibili a causa della notevole influenza negativa che queste fibre hanno, a causa della loro estrema finezza, nei confronti della lavorabilità dell'impasto.

L'efficacia dimostrata dalle micro-fibre polimeriche nell'impedire la formazione di fessure da ritiro plastico è spiegabile con il fatto che il ritiro plastico provoca sollecitazioni di trazione molto limitate. Tali sollecitazioni, però, sono in genere sufficienti a provocare la fessurazione della matrice cementizia essendo la resistenza a trazione praticamente nulla in un calcestruzzo ancora in fase plastica. In queste condizioni è sufficiente un dosaggio anche limitato di fibre a basso modulo elastico per incrementare notevolmente la resistenza a trazione della matrice cementizia rendendola adeguata a sopportare le sollecitazio-







Micro-fibre polimeriche; dall'alto in basso: in poli-vinil-alcol (PVA), in poli-acrilo-nitrile (PAN), in poli-propilene (PP).

ni in gioco.

Un'ulteriore interessante applicazione delle micro-fibre polimeriche consiste nel migliorare la *resistenza al fuoco* del *calcestruzzo ad alta resistenza meccanica*.

10.4 Calcestruzzo rinforzato con fibre di vetro

Allo scopo di mettere a punto materiali leganti adatti al ripristino di manufatti edilizi di interesse nei beni culturali, si sono studiate le proprietà fisico-meccaniche di malte di calce idraulica rinforzate mediante aggiunta di fibre corte di vetro (F. Iucolano, B. Liguori, C. Colella, "Malte di calce fibrorinforzate nel ripristino edilizio", Enco Journal, N. 50, 2010). Le malte fibrorinforzate, pur denunciando resistenze meccaniche mediamente inferiori al riferimento, hanno di converso mostrato un netto miglioramento nel comportamento post-fessurativo. L'aggiunta di fibre, indipendentemente dalla tipologia e dalla concentrazione, ha comportato il passaggio da un meccanismo di rottura di tipo fragile ad uno di tipo duttile. I migliori risultati sono stati ottenuti con campioni di malta rinforzati col 2% di fibre di vetro, che, oltre ad aver guadagnato in termini di tenacità, hanno evidenziato una resistenza a flessione più elevata della malta convenzionale.



IL MICROCEMENTO PER CONSOLIDARE ROCCE E TERRENI



Emanuela N. Croce, Jean Jacob Ogoumah Olagot

Enco Srl, Engineering Concrete - Ponzano Veneto (TV)

info@encosrl.it



I normali leganti idraulici si presentano con granuli di dimensione variabile compresa tra 1 e 100 μm. Quando si prepara, con questi cementi, una sospensione acquosa molto fluida (rapporto acqua/cemento = 2) da iniettare all'interno di un sistema poroso (roccia, terreno, letto di sabbia, muratura, calcestruzzo fessurato, ecc.) il riempimento dei vuoti è funzione fondamentalmente di due parametri:

- distribuzione dei vuoti del sistema da riempire;
- distribuzione dei granuli del cemento.

Se la dimensione dei granuli di cemento è maggiore di quella dei vuoti, non si realizza ovviamente un soddisfacente riempimento. In queste condizioni si ricorre molto spesso alle iniezioni di sistemi liquidi organici formati da un *monomero* liquido capace di impregnare il sistema poroso e successivamente di indurire formando un *polimero* dopo un certo tempo che è stato iniettato all'interno dei vuoti: si sono impiegate a questo scopo *resine epossidiche*, poliacriliche, ecc.

Tuttavia, in molte delle applicazioni alle quali queste iniezioni sono destinate, si possono verificare gravi problemi di contaminazione del sistema da consolidare (per esempio i terreni e le relative acque di falda) a causa della tossicità dei monomeri organici, o di incompatibilità fisico-meccanica tra il prodotto iniettato ed il sistema da impregnare (per esempio murature) per la impermeabilizzazione delle strutture che impedisce un naturale scambio igrometrico del sistema consolidato con l'ambiente.

Nella Tabella che segue sono riassunti i vari inconvenienti provocati dall'iniezione di monomeri organici:

Problemi connessi con l'impregnazione di liquidi organici che polimerizzano entro un sistema poroso

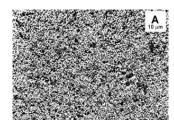
SISTEMA POROSO DA IMPERMEABILIZZARE O CONSOLIDARE	TIPO DI INCONVENIENTE CON IMPREGNANTI ORGANICI	
Terreni	Inquinamento delle zone	
Terrem	circostanti (acque e terreni)	
Rocce	Inquinamento delle zone	
Nocce	circostanti (acque e terreni)	
Murature in pietra o	Impermeabilizzazione assoluta	
mattone	ed impedimento dello scambio	
mattone	igrometrico con l'ambiente	
Strutture in	Nessun problema	
calcestruzzo	Nessun problema	

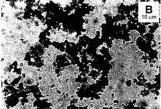
L'inquinamento provocato dai liquidi organici è stato risol-

to, almeno in parte, con l'avvento dei cosiddetti "microcementi", che si differenziano dai tradizionali cementi per una dimensione sensibilmente minore (circa dieci volte) dei loro granuli (M.C. Santagata, G. Bonora and M.Collepardi "Superplasticized Microcement Grouts", Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures, SP173, pp. 909-936,1997; M.C. Santagata and E. Santagata, Proceedings of 3rd International Conference on Grouting and Ground Treatment, pp. 1221-1224, New Orleans, USA, 2003).

I microcementi possono essere definiti leganti idraulici speciali che si distinguono fondamentalmente dai tradizionali cementi per la ridotta dimensione dei granuli che, attualmente, raggiunge al massimo il valore di 10- $15~\mu m$.

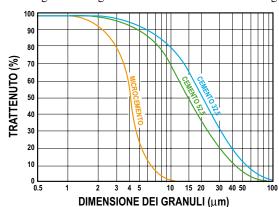
Nella Figura che segue sono mostrate comparativamente due microfotografie di un cemento Portland I 52.5R e di un microcemento, entrambi dispersi in acqua ed osservati al microscopio ottico:





Microfotografie di sospensioni acquose di un microcemento (A) e di un cemento Portland I 52,5 R (B)

Nella Figura che segue sono mostrate le distribuzioni granu-



Distribuzione granulometrica del microcemento e dei cementi ordinari



lometriche di un microcemento, di un cemento ordinario (CEM II A/L 32.5 R), e di un cemento Portland a rapido indurimento (CEM I 52.5 R). Si può osservare che il microcemento è per la maggior parte (98%) compreso tra 1 e 10 μ m, il cemento 32.5 R tra 1 e 100 μ m, il cemento 52.5 R tra 1 e 80 μ m.

Nella Tabella segue sono riassunte le principali caratteristiche granulometriche e superficiali del microcemento e degli altri cementi.

Caratteristiche granulometriche del microcemento e dei cementi ordinari

TIPO DI CEMENTO	SUPERFICIE SPECIFICA BLAINE (cm²/g)	D ₅₀ (μm)	D ₈₅ (μm)	D ₉₈ (μm)
Cemento Portland 32.5	3200	20	45	100
Cemento Portland 52.5	4500	15	35	80
Microcemento	8000	4	6	10

In particolare il valore di D_x rappresenta la dimensione in μ m in corrispondenza della quale il materiale risulta essere passante per x %: così per esempio se D_{50} = 4 μ m significa che il materiale in esame passa al 50% ad un ipotetico vaglio di 4 μ m:

$$D_{50} = 4 \mu m \implies Passante a 4 \mu m = 50\%$$

Al valore di D_{85} per il cemento viene attribuito, nelle applicazioni geotecniche per il consolidamento dei terreni sabbiosi, un

particolare significato. Esso, congiuntamente con il valore di D_{IS} per il letto sabbioso da impregnare, viene assunto come parametro per determinare il cosiddetto rapporto di iniettabilità (I) definito come:

$$\mathbf{I} = \mathbf{D}_{15,s} / \mathbf{D}_{85,c}$$

dove s e c si riferiscono rispettivamente alla sabbia da impregnare, ed al cemento (o microcemento) da iniettare. In prima approssimazione, l'iniezione con una sospensione acquosa di cemento per consolidare un terreno ha successo solo se I è maggiore di 25.

Pertanto assumendo per $D_{85,c}$ i valori riportati nella precedente Tabella si può calcolare, per ogni cemento da iniettare, quale è il valore minimo di $D_{15,s}$ del terreno impregnabile con successo.

Caratteristiche del terreno e del cemento raccomandato per l'impregnazione

TERRENO CON D _{15,s}	CEMENTO DA	
(µm)	INIETTARE	
> 1125	Portland 32.5	
> 875	Portland 52.5 R	
> 150	Microcemento	

100 | NESSUNO |

Distribuzione granulometrica dei terreni da I a V impregnabili con sospensioni acquose di cemento o microcemento indicati su ciascuna curva granulometrica del terreno

Così, per esempio, i terreni indicati da I a V, le cui curve granulometriche sono riportate nella Figura che segue, sono impregnabili o meno con successo a seconda del legante impiegato: i terreni sono tutti iniettabili con microcemento avente $D_{85,c}$ di 6 μ m ad eccezione del terreno contrassegnato con I per il quale si richiederebbe un $D_{85,c}$ non superiore a 3-4 μ m. Il cemento 52.5 R, invece, potrebbe essere impiegato solo per il terreno V costituito da sabbia grossa e ghiaia.

Un altro criterio per valutare preliminarmente la possibilità di successo di impregnazione di un sistema poroso, e di un terreno in particolare, si basa non tanto e non solo sul rapporto di iniettabilità (I), ma piuttosto sul coefficiente di permeabilità (K) all'acqua del sistema da impregnare. La Tabella che segue mostra l'iniettabilità dei terreni in funzione del coefficiente di permeabilità e del sistema iniettante.

Influenza della permeabilità di un terreno sull'iniettabilità del cemento, del microcemento, del cemento 52.5R e di un monomero polimerizzabile

COEFFICIENTE	POSSIBILITA' DI SUCCESSO		
DI	NELL'IMPREGNAZIONE CON INEZIONE DI		
PERMEABILITA'			
DEL	CEMENTO		LIQUIDO
TERRENO DA	PORTLAND	MICROCEMENTO	LIQUIDO
IMPREGNARE	52.5R		MONOMERICO
(m/s)			
10-3	SI	SI	SI
10-3 - 10-4	NO	SI	SI
10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁵	NO	SI	SI
10 ⁻⁵ - 10 ⁻⁶	NO	NO	SI

Per terreni ghiaiosi o murature a sacco molto permeabili ($K = 10^{-3} \text{ m/s}$) è possibile realizzare con successo l'impregnazione anche con sospensioni acquose di cemento Portland 52.5 R. Per sistemi porosi meno permeabili ($K = 10^{-4} - 10^{-5} \text{ m/s}$), costituiti per esempio da terreni di sabbia fine o murature più compatte, è necessario ricorrere all'iniezione di microcementi, mentre per i sistemi porosi ancor meno permeabili ($K = 10^{-5} - 10^{-6} \text{ m/s}$) si deve ricorrere all'iniezione di liquidi monomerici.



MAC: 1981





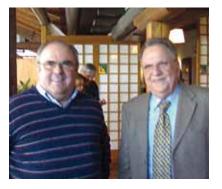


Novembre 2011



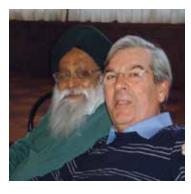
















... saperle costruire è un'arte



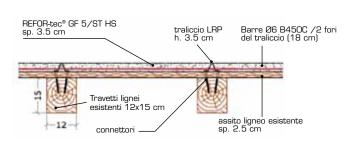
Enco Srl - Via delle Industrie, 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV) Tel. 0422 963 771 - Fax 0422 963237 - www.encosrl.it - info@encosrl.it

REFOR-tec®

UHPFRCC

Ultra High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites

cappe collaboranti e rinforzi strutturali a basso spessore su solai in legno



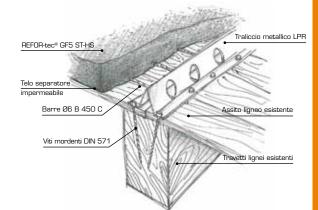
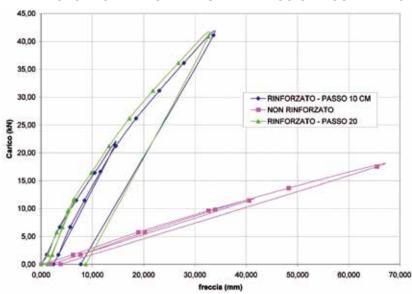


DIAGRAMMA SFORZO - DEFORMAZIONE A FLESSIONE SU CAMPIONE DI SOLAIO



Tempo di lavorabilità





Caratteristiche fisico-meccaniche del microcalcestruzzo fibrorinforzato HPFRCC REFOR-tec®

GF5/ST HS

16111po di lavorabilità	2 1 11
 Pedonabilità 	12 h a 20 °C
Agibilità a traffico leggero	24 h a 20 °C
 Agibilità con massime sollecitazioni 	3 gg. a 20 °C
Densità	2.450 Kg/m3
 Resistenza alla compressione 1 gg 	48 MPa
 Resistenza alla compressione 28 gg 	130 MPa
 Resistenza alla trazione diretta 28 gg 	8,5 MPa
 Resistenza alla flessotrazione 28 gg 	32 MPa
 Resistenza al taglio 	16 MPa
 Modulo Elastico 	38 GPa
Energia di frattura	32.500 N/m
Ritiro endogeno	< 0,05 %
 Profondità di carbonatazione 	0



