

2013

Quadrimestrale
Anno XVIII
Numero 60

ENCO
JOURNAL

PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

**SPECIALE: CALCESTRUZZI
FIBRORINFORZATI**

CHI SIAMO

La ENCO opera da oltre un ventennio nell'ambito della ricerca e della sperimentazione sui materiali da costruzione. La pluriennale esperienza in questo campo ha visto, come naturale evoluzione, lo sviluppo di un settore completamente dedicato alla diagnostica per i beni culturali particolarmente attivo nell'ambito dei beni architettonici del '900. La diversa provenienza culturale dei professionisti che operano all'interno della ENCO mette in campo una vasta gamma di competenze che sviluppano sinergicamente le risposte alle più svariate domande relative al settore dei beni culturali.

A CHI CI RIVOLGIAMO

La Enco srl mette a disposizione i suoi servizi a varie tipologie di utenti quali progettisti, imprese, restauratori, pubbliche amministrazioni locali, nazionali ed europee proponendo una vasta gamma di indagini diagnostiche *in situ* e in laboratorio. Ma i nostri professionisti sono attivi soprattutto attraverso un costante supporto durante tutte le operazioni finalizzate al restauro conservativo quali la progettazione, la valutazione di metodologie e di prodotti, lo sviluppo di metodologie alternative ed innovative.

I NOSTRI SERVIZI

IN SITU

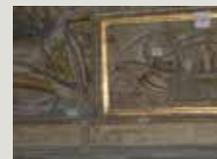
- Indagini strutturali su edifici in muratura, in calcestruzzo e in calcestruzzo armato
- Indagini su solai ed elementi lignei
- Valutazione del livello di carbonatazione del calcestruzzo
- Misure di adesione degli intonaci
- Osservazioni endoscopiche
- Osservazioni in videomicroscopia a fibre ottiche
- Valutazione dell'assorbimento d'acqua
- Sondaggi stratigrafici
- Valutazione dell'efficacia dei trattamenti consolidanti e protettivi

IN LABORATORIO

- Analisi diffrattometriche (XRD)
- Analisi termogravimetriche (TG-DTA)
- Analisi spettrofotometriche infrarosse (FT-IR)
- Osservazioni in microscopia ottica stereoscopica di materiali tal quali e sezioni lucide stratigrafiche
- Osservazioni mineralogico-petrografiche in microscopia ottica a luce trasmessa e polarizzata
- Osservazioni in microscopia elettronica a scansione (SEM) con associata microanalisi spettroscopica EDX
- Osservazioni in videomicroscopia a fibre ottiche
- Dosaggio dei sali idrosolubili
- Misura della permeabilità al vapore d'acqua, dell'assorbimento d'acqua per capillarità e per immersione totale
- Misure ultrasoniche e sclerometriche
- Misure di abrasione
- Analisi granulometriche e distribuzione granulometrica

INOLTRE:

- Assistenza in cantiere per campagne diagnostiche e redazione di progetti di diagnostica e restauro
- Partnership nell'ambito di progetti di ricerca finanziati e cofinanziati
- Elaborazione di ricette per malte, intonaci ad hoc per il restauro conservativo e relativa valutazione prestazionale degli stessi
- Assistenza in progetti di restauro strutturale
- Assistenza negli adeguamenti sismici



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



PERIODICO SULLA TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

Quadrimestrale - Anno XVIII - Numero 60

Direttore Mario Collepari

CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Questo numero di Enco Journal è completamente dedicato ai calcestruzzi fibrorinforzati. Sono disponibili 6 articoli per un totale di 54 pagine.

*Dopo un articolo di carattere generale di **Silvia Collepari** e **Roberto Troli** per l'introduzione ai calcestruzzi fibrorinforzati, sono presentati 5 articoli di carattere sperimentale a cominciare da quello sul calcestruzzo spruzzato e rinforzato con fibre in acciaio, in vetro e in polipropilene di **Luigi Coppola** e **Alessandra Buoso**.*

*Viene poi esaminato il comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato in un articolo di **Valeria Corinaldesi** e **Giacomo Moriconi**.*

***Vito Alunno Rossetti** e **Antonella Ferraro** illustrano come minimizzare l'insorgere di fessure indotte da gradienti termici mediante l'impiego di fibre in acciaio.*

***Marco Arduini** e **Andrea Nicoletti** presentano un articolo sull'impiego di fibre polimeriche per la riparazione di elementi in calcestruzzo.*

***Giovanni Mantegazza** e **Alessandra Gatti**, infine, presentano i risultati sul comportamento di un calcestruzzo autocompattante rinforzato con fibre polimeriche ibride.*

*Mario Collepari
ACI Honorary Member*

In copertina: fibre polimeriche

SOMMARIO

PRINCIPI GENERALI SUI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI
di S. Collepari e R. Troli

(pag. 5)

IL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO: RISULTATI DI UNA CAMPAGNA SPERIMENTALE SU SPRITZ-BETON RINFORZATI CON FIBRE IN ACCIAIO, VETRO E POLIPROPILENE SPERIMENTALE
di L. Coppola e A. Buoso

(pag. 19)

INFLUENZA DEL VOLUME DI FIBRE SUL COMPORTAMENTO POST-FESSURATIVO DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO
di V. Corinaldesi e G. Moriconi

(pag. 27)

L'USO DI FIBRE PER MINIMIZZARE L'INSORGERE DI FESSURE DA FENOMENI TERMICI
di V. A. Rossetti e A. Ferraro

(pag. 32)

I SISTEMI BASF HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE PER LA RIPARAZIONE ED IL RINFORZO DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO
di M. Arduini e A. Nicoletti

(pag. 39)

CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE RINFORZATO CON FIBRE POLIMERICHE IBRIDE
di G. Mantegazza e A. Gatti

(pag. 44)

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

Direttore Responsabile
MARIO COLLEPARDI

Redazione
ROBERTO TROLI
SILVIA COLLEPARDI
ANTONIO BORSOI
J. JACOB OGOUMAH OLAGOT

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

COMPOSIZIONE
ISABELLA CAPOGNA
ALESSANDRA GALLETTI
MARA MENEGHEL

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

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

INDAGINI IN SITO PER LA DEFINIZIONE DEL DISSESTO STRUTTURALE E DEL DEGRADO DEI MATERIALI:

- Prove di carico sugli impalcati per stimare la portanza degli orizzontamenti
- Prove di carico su travi di calcestruzzo, acciaio e legno
- Monitoraggio di spostamenti ed ampiezza delle fessure
- Monitoraggio del comportamento dinamico delle strutture
- Analisi termografiche finalizzate alla definizione dello schema strutturale senza l'asportazione di intonaco
- Definizione delle reti di sottoservizi mediante indagini georadar
- Indagini endoscopiche
- Prove penetrometriche ed estrazione di carote profonde
- Prove "a strappo" su pavimentazione ed intonaci



INDAGINI SULLE STRUTTURE IN C.A.

- Analisi sclerometriche ed ultrasoniche per la stima della qualità del calcestruzzo *in situ*
- Analisi pacometriche per la definizione di diametro, posizione e numero delle barre di armatura
- Prove di estrazione di tasselli post-inseriti per la determinazione della resistenza media del calcestruzzo.
- Carotaggi



INDAGINI SULLE STRUTTURE IN MURATURA

- Prove per la definizione della tensione di esercizio e di quella massima a rottura con i martinetti piatti
- Misura della propagazione delle onde soniche per il controllo dell'omogeneità del paramento murario



SOLAI ED ELEMENTI IN LEGNO

- Misura dell'umidità relativa degli elementi mediante igrometro elettrico
- Analisi resistografiche per la definizione locale della consistenza del materiale
- Asportazione di microcampioni per il riconoscimento della specie legnosa
- Ascultazione degli elementi



DEFINIZIONE IN LABORATORIO DEL DEGRADO DEI MATERIALI

- Determinazione della massa volumica e dell'assorbimento d'acqua su carote di calcestruzzo
- Prove meccaniche sui campioni estratti
- Analisi diffrattometriche e termogravimetriche per l'accertamento della presenza di eventuali componenti inquinanti (cloruri, solfati..)
- Definizione della profondità di carbonatazione
- Analisi microscopiche per la soluzione di problemi di incompatibilità fra i materiali (es.: intonaco-muratura) e alcali-reattività
- Misura della permeabilità e porosità di malte e calcestruzzi
- Prove di trazione sulle barre di armatura con la determinazione della resistenza a snervamento e resistenza a deformazione ultima
- Prove di compressione perpendicolare o diagonale sulle murature



IN PIÙ ENCO OFFRE:

- Redazione di rapporti geologico-tecnici
- Elaborazioni numeriche, verifiche statiche e dinamiche
- Progetti di restauro strutturale
- Adeguamenti sismici
- Progetti di restauro conservativo
- Consulenza per l'uso di materiali nelle nuove realizzazioni



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



PRINCIPI GENERALI SUI CALCESTRUZZI FIBRORINFORZATI

Silvia Collepari e Roberto Troli

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

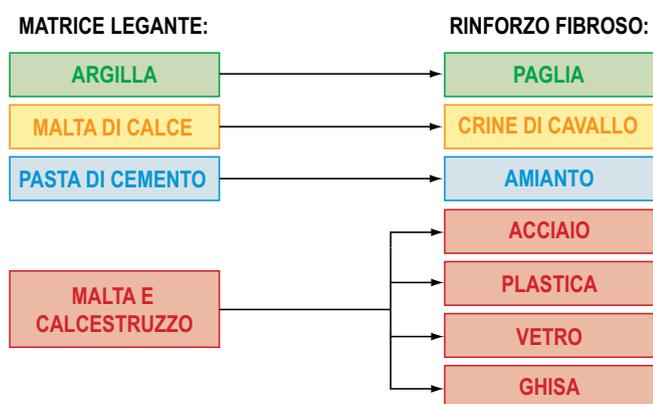


1. INTRODUZIONE

L'idea di disperdere delle fibre in una matrice legante allo stato plastico per migliorarne le proprietà meccaniche, non può certamente considerarsi nuova. Infatti, già ai primordi della civiltà, si realizzavano mattoni impastando paglia e argilla e si impiegavano i crini di cavallo per rendere più resistenti le malte a base di calce.

Più recentemente, all'inizio del XX secolo sono state impiegate le fibre di amianto per migliorare le proprietà meccaniche delle paste di cemento.

In questi ultimi anni un notevole interesse è stato suscitato da fibre di diversa natura (acciaio, plastica, vetro, ghisa, ecc.) per rinforzare i materiali cementizi, soprattutto in quelle situazioni in cui si richiede un comportamento duttile del materiale.

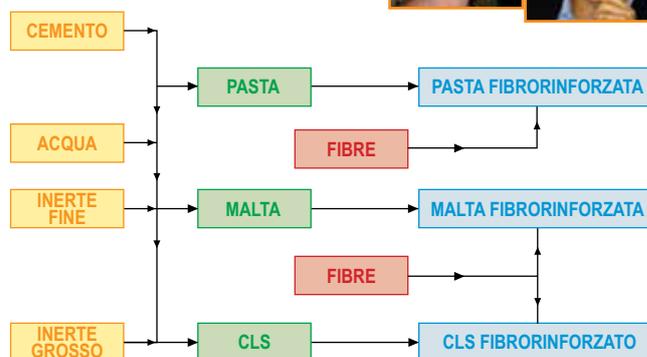


2 I MATERIALI CEMENTIZI FIBRORINFORZATI

Per materiale cementizio fibro-rinforzato si intende un materiale che oltre agli ingredienti normalmente impiegati (cemento, acqua, inerti ed additivi), contiene anche delle fibre (1-4).

Le prestazioni dei materiali cementizi fibrorinforzati, rispetto a quelli ordinari, possono essere riassunte in un incremento di:

1) duttilità;



2) resistenza a trazione pura e per flessione;

3) resistenza all'urto.

3 IL RAPPORTO D'ASPETTO

Le fibre attualmente impiegate per il rinforzo dei materiali cementizi, sono di diversa natura e vengono prodotte in varie forme e dimensioni.

Il parametro numerico correntemente impiegato per contraddistinguere una fibra è il "rapporto di aspetto", definito come il rapporto tra la lunghezza ed il "diametro equivalente*" della fibra stessa. Fibre comunemente impiegate nei materiali cementizi, con una lunghezza variabile tra 1 e 80 mm, hanno un rapporto d'aspetto compreso tra 50 e 400.



*Il diametro equivalente di una fibra è il diametro del cerchio che ha una superficie uguale a quella della sezione trasversale della fibra stessa.

4 LE PROPRIETA' DEI MATERIALI CEMENTIZI FIBRORINFORZATI

I fattori che influenzano le proprietà dei materiali compositi, quali i materiali cementizi fibrorinforzati, sono le proprietà chimico-fisiche delle fibre e della matrice, e l'aderenza che si stabilisce tra i due materiali. Nelle Tabelle 1 e 2 vengono riportate, rispettivamente, alcune proprietà tipiche delle fibre e di alcune matrici cementizie.

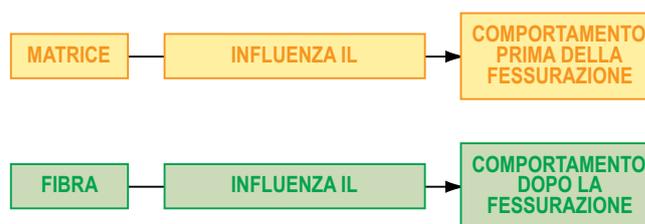
Tabella 1 - Proprietà fisiche di alcuni tipi di fibre.

FIBRE	DIAMETRO (µm)	LUNGHEZZA (µm)	MASSA VOLUMICA (kg/m³)	MODULO ELASTICO (MPa)	MODULO DI POISSON	RES. A TRAZIONE (MPa)	ALLUNG. A ROTTURA (%)	VOL. DI FIBRE USUALMENTE IMPIEGATO NEL COMPOSITO (%)
Carbonio	8	10	1900	380000	0.35	1800	0.5	2-12
Polivinilalcol	10	6-12	1300	20000	—	1500	8	10
Cellulosa	—	—	1200	1000	—	300-500	—	10-20
Vetro	8-10	10-50	2540	72000	0.25	3500	4.8	2-8
Vetro a treccia	110X650	10-50	2700	70000	—	1250	—	2-8
Kevlar PRD 49	10	6-65	1450	133000	0.32	2900	2.1	<2
Poliacrilonitrile	10-20	8-40	1180	13500	—	600	13	0.5-1.5
Nylon	>4	5-50	1140	<4000	0.40	750-900	13.5	0.1-6
Polipropilene	500-4000	20-75	900	<8000	0.46	400	8	0.2-1.2
Acciaio Inox	10-330	10-60	7860	160000	0.28	2100	3	0.5-2

Tabella 2 - Proprietà fisiche di alcune matrici.

MATRICE	MASSA VOLUMICA (kg/m³)	MODULO ELASTICO (MPa)	RESISTENZA TRAZIONE (MPa)	DEF. A ROTTURA (MPa)
Pasta di cemento Portland ordinario	2000-2200	10000-20000	3-12	100-500 · 10 ⁻⁶
Pasta di cemento alluminoso	2100-2300	15000-25000	3-13	100-500 · 10 ⁻⁶
Malta di cemento Portland ordinario	2200-2300	20000-30000	2-10	50-150 · 10 ⁻⁶
Calc. di cemento Portland ordinario	2300-2450	30000-40000	1-8	50-150 · 10 ⁻⁶

Si può notare come l'allungamento a rottura di tutte le fibre (Tabella 1) è di due o tre ordini di grandezza superiore alla deformazione a rottura della matrice cementizia (Tabella 2): pertanto, la matrice subirà la rottura molto prima che si possa verificare quella delle fibre; quindi, assumeranno, come vedremo in seguito, un'importanza predominante le prestazioni del composito dopo la fessurazione.



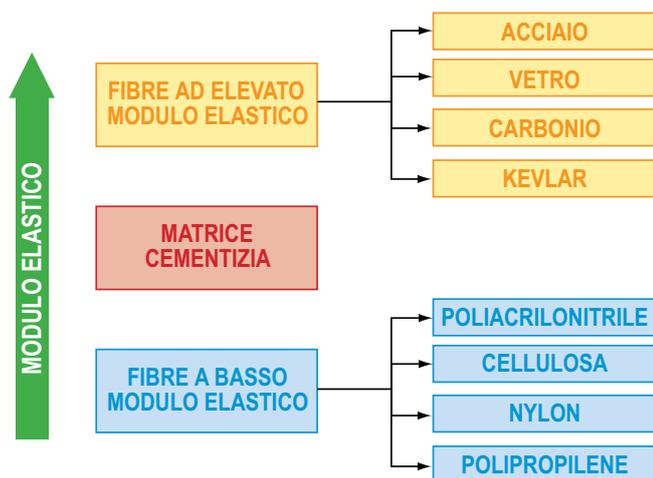
5 CLASSIFICAZIONE DELLE FIBRE E LORO DISTRIBUZIONE NELLA MATRICE

Le fibre possono essere classificate in due categorie:

- 1) fibre con modulo di elasticità più basso della matrice di cemento (cellulosa, nylon, polipropilene, ecc.);
- 2) fibre con modulo di elasticità maggiore della matrice di cemento (vetro, acciaio, carbonio, kevlar, ecc.).

Generalmente, le fibre organiche a basso modulo di elasticità subiscono deformazioni viscoso e quindi, possono provocare, in un composito fessurato, allungamenti considerevoli. Inoltre, queste fibre posseggono valori elevati del modulo di Poisson che, unitamente al basso modulo elastico, possono provocare elevate sollecitazioni di

trazione all'interfaccia fibra-matrice provocando una fuoriuscita delle fibre della matrice stessa. Tuttavia, a questo inconveniente, che può manifestarsi in minor misura anche per le fibre ad alto modulo elastico, si può ovviare utilizzando fibre in forma di maglie intrecciate o di rete, oppure fibre con sezioni trasversali variabili e con piegature terminali che garantiscono un miglior ancoraggio alla matrice cementizia.



L'efficacia delle fibre nel rinforzo della matrice cementizia dipende, inoltre, dal volume di fibre introdotte e dalla distribuzione che si realizza; i due parametri menzionati dipendono dalle dimensioni massime delle particelle che compongono la matrice. Pertanto, diverse saranno le quantità di fibre introdotte e il loro orientamento a seconda che la matrice sia una pasta di cemento, una malta oppure un calcestruzzo.



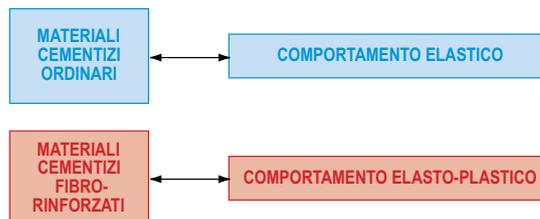
6 METODOLOGIE DI PROVA PER I MATERIALI CEMENTIZI FIBRORINFORZATI

E' da sottolineare che le metodologie di prova impiegate per i materiali cementizi ordinari non sempre sono estendibili ai materiali fibrorinforzati.

Ad esempio, se vengono impiegate le tecniche lente o statiche messe a punto per i materiali cementizi ordinari per ottenere informazioni sulle proprietà dei calcestruzzi fibrosi, queste possono fornire dei risultati ingannevoli poiché, mentre per i calcestruzzi ordinari può ritenersi valida l'ipotesi di comportamento elastico fino a rottura, per i secondi questa teoria non è più valida, in quanto i materiali fibrosi hanno un comportamento di tipo elasto-plastico e quindi grazie alla loro duttilità di post-fessurazione, sopportano la maggior parte del carico dopo che il materiale si è fessurato.

Allo stesso modo, metodi di prova indiretti per il calcolo della resistenza a trazione (prova alla

brasiliiana, rottura a flessione) possono dar luogo a sovrastime della resistenza a trazione superiori al 100% rispetto ai valori ottenuti mediante prove dirette.



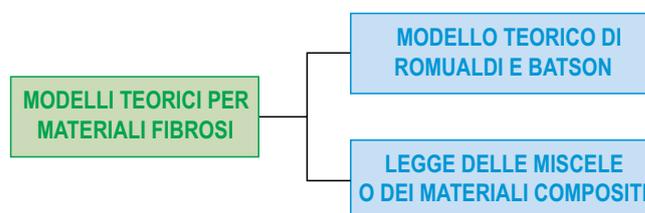
7 PRINCIPI TECNICI DEL RINFORZO MEDIANTE FIBRE IN STATO DI TENSIONE UNIASSIALE

I principi scientifici che permettono di capire come l'introduzione di fibre in una matrice fragile ne determini l'incremento di duttilità, sono stati studiati solo recentemente.

In quest'ottica sono stati messi a punto numerosi modelli teorici che purtroppo non sempre sono risultati adeguati a rappresentare le proprietà dei materiali cementizi fibrosi. La ragione di ciò sta nelle notevoli differenze nell'allungamento a rottura delle fibre e della matrice, e nelle variazioni dell'aderenza nel tempo con il procedere della idratazione del legante.

Il primo modello teorico per i materiali fibrosi fu sviluppato da Romualdi e Batson (1) sulla base della teoria di concentrazione degli sforzi proposta da Griffith. Tuttavia, questo modello teorico è stato successivamente abbandonato in quanto non suffragato dai risultati sperimentali.

I migliori riscontri con la pratica sono stati ottenuti, invece, con la "legge delle miscele o dei materiali compositi".



7.1 LA TEORIA DI ROMUALDI E BATSON

Partendo dalla constatazione che il calcestruzzo è un materiale le cui proprietà meccaniche sono sensibilmente influenzate dalla presenza di microfessure, Romualdi e Batson hanno sviluppato un

modello teorico per prevedere la sollecitazione che provoca la fessurazione di un materiale cementizio fibroso sottoposto ad uno stato di tensione di trazione uniassiale.

La teoria proposta da Romualdi e Batson si basa sulla capacità delle fibre, grazie all'aderenza alla pasta cementizia, di cucire le discontinuità della matrice, impedendone così la propagazione delle microfessure, allorquando il composito viene sollecitato meccanicamente (Fig. 1). Si intuisce quindi che, secondo questa teoria, a parità di volume di fibre, le proprietà meccaniche del composito, e la resistenza a trazione in particolare, dovrebbero migliorare al decrescere del diametro delle fibre, e quindi della distanza media (spaziatura) tra queste.

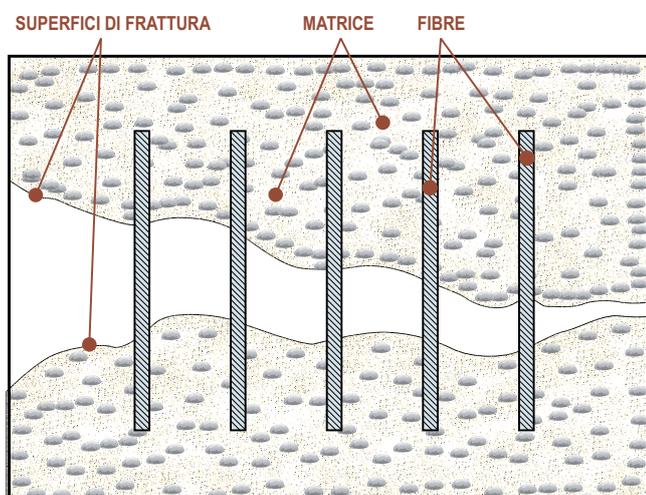


Fig. 1 – Cucitura mediante fibre delle discontinuità presenti nella matrice cementizia

Infatti, a parità di volume e di lunghezza delle fibre, una diminuzione del loro diametro comporta la presenza di un numero maggiore di fibre e quindi di fatto la possibilità di cucire un maggior numero di difetti.

7.2 LA LEGGE DELLE MISCELE E DEI MATERIALI COMPOSITI

Una teoria alternativa a quella di Romualdi e Batson, è nota come “legge delle miscele e dei materiali compositi”; essa descrive lo stato tensionale di un calcestruzzo fibrorinforzato prima della fessurazione.

La legge dei compositi si basa sulle seguenti ipotesi:

1) le fibre sono tutte allineate nella direzione della sollecitazione;

- 2) tra le fibre e la matrice vi è una perfetta aderenza;
3) il modulo di Poisson è nullo sia per le fibre che per la matrice.

Se si esprimono i volumi della matrice e delle fibre come frazioni del volume del materiale composito posto uguale a uno, si ottiene dopo semplici passaggi matematici:

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad [1]$$

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) \quad [2]$$

dove σ , E e V indicano rispettivamente la tensione di fessurazione, il modulo elastico ed il volume, mentre i pedici c , f ed m stanno ad indicare rispettivamente il composito, le fibre e la matrice.

In assenza di fessure, la deformazione della matrice ε_m è uguale a quella del composito:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_c$$

ossia:

$$\frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_c}{E_c}$$

da cui:

$$\sigma_m = \sigma_c \frac{E_m}{E_c}$$

Dividendo la [2] per E_c si ottiene:

$$\frac{E_m}{E_c} = \frac{1}{1 + (n-1) \cdot V_f}$$

per cui la tensione nella matrice vale:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_c}{1 + (n-1) \cdot V_f} \quad [3]$$

dove n è il coefficiente di omogeneizzazione e vale:

$$n = E_f / E_m$$

D'altra parte la [3] può anche essere scritta in forma della [4]:

$$\sigma_c = \sigma_m \left[1 + V_f \left(\frac{E_f}{E_m} - 1 \right) \right] \quad [4]$$

Dall'equazione [4] si deduce che l'effetto dell'aggiunta delle fibre sulla tensione di fessurazione del composito è limitato. Infatti, ad esempio, se un calcestruzzo con un modulo elastico di 30000 MPa, viene rinforzato con un 2% in volume di fibre d'acciaio di modulo elastico pari a 200000 MPa, la tensione di fessurazione (σ_c) del composito risulta:

$$\sigma_c = \sigma_m \left[1 + 0.02 \left(\frac{200000}{30000} - 1 \right) \right]$$

e cioè:

$$\sigma_c = 1.11 \cdot \sigma_m$$

e quindi superiore di solo il 10% alla tensione di fessurazione della sola matrice.

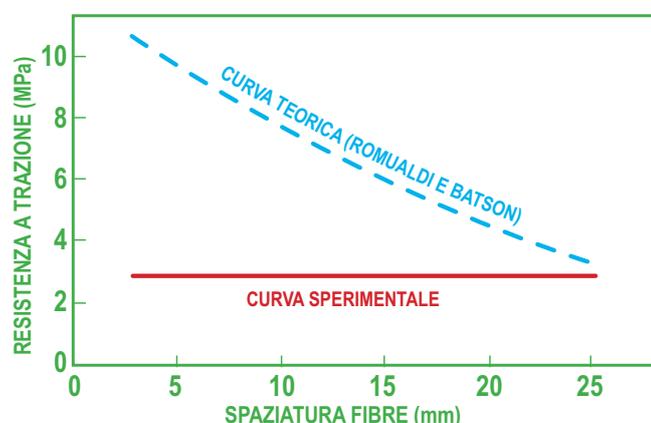


Fig. 2 – Effetto della spaziatura delle fibre sulla resistenza a trazione della matrice

La Fig. 2 mostra la differenza della resistenza a trazione in funzione della distanza tra le fibre attesa secondo la teoria di Bomualdi e Batson e quella ottenuta sperimentalmente.

Analogamente, introducendo il 2% in volume di fibre di vetro con modulo elastico di 70000 MPa in una matrice cementizia con modulo elastico di 17000 MPa si ottiene una tensione di fessurazione del composito che è circa il 6% maggiore di quella della sola matrice.

Essendo la tensione di fessurazione della matrice non alterata dalla presenza delle fibre, si deve quindi dedurre che anche un volume elevato di fibre (2% in volume che per l'acciaio corrisponde a circa 150 kg di fibre per m³) ad alto modulo elastico, incrementa la tensione di fessurazione del composito, rispetto alla tensione di fessurazione del calcestruzzo, solo dell'11 e del 6%, rispettivamente per fibre di acciaio e vetro.

TENSIONE DI FESSURAZIONE DEL CALCESTRUZZO

≈

TENSIONE DI FESSURAZIONE DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

E' superfluo sottolineare che un tale incremento potrebbe essere ottenuto con una semplice riduzione del rapporto acqua/cemento del calcestruzzo.

Per quanto riguarda invece le fibre con un modulo di elasticità più basso di quello della matrice (es. polipropilene), essendo il coefficiente n minore di 1, dall'equazione [4] si deduce che il composito si fessurerà in corrispondenza di una sollecitazione inferiore a quella che provoca la fessurazione della matrice*. Impiegando ad esempio 1 kg di fibre di polipropilene ($E_f = 8000$ MPa) per m³ di calcestruzzo (0.1% in volume), la tensione di fessurazione del composito vale:

$$\sigma_c = 0.99 \cdot \sigma_m$$

Inoltre, l'aggiunta di fibre non influenza sostanzialmente neppure il modulo di elasticità del composito.

In conclusione, si può affermare che, secondo la teoria dei materiali compositi, l'aggiunta di fibre non migliora le proprietà di pre-fessurazione della matrice.

E' da notare inoltre che nella trattazione svolta si è supposto che le fibre fossero orientate nella direzione favorevole, e cioè quella della sollecitazione: è intuibile che questo non avviene mai in realtà; pertanto, le fibre risulteranno meno efficienti nel collaborare con la matrice. Di questo si può tener conto attraverso un coefficiente di efficienza (η_f), riportato in Tabella 3, il quale va moltiplicato per V_f .

Tabella 3 - Coefficiente di efficienza in funzione dell'orientamento delle fibre

ORIENTAMENTO DELLE FIBRE	η_f
tutte allineate	1
disposte casualmente su più rami	0.35
disposte casualmente nello spazio	0.18

*Nel caso del calcestruzzo fresco microrinforzato con fibre polimeriche, il modulo elastico della matrice è sensibilmente minore di quello, pur basso, delle fibre polimeriche: pertanto le tensioni che insorgono nel calcestruzzo fresco esposto al ritiro plastico possono essere efficacemente contrastate dalla presenza delle fibre polimeriche che provocano un aumento della resistenza a trazione del composito.

Nella trattazione svolta si è ammesso che l'aderenza delle fibre alla matrice fosse perfetta. In realtà, l'aderenza che si stabilisce tra i due materiali, per una determinata natura del materiale fibroso, dipenderà molto dalla lunghezza delle fibre. Infatti, più la fibra sarà corta, più facilmente essa si sfilerà dalla matrice nel momento in cui questa si fessurerà. Pertanto, solo se le fibre sono relativamente lunghe, saranno capaci di trasmettere gli sforzi anche dopo che è avvenuta la fessurazione della matrice.

Stabilito quindi che è assolutamente non conveniente il rinforzo di una matrice cementizia con fibre di qualsiasi natura, in quanto ciò non comporta alcun pratico miglioramento nella tensione di fessurazione, analizziamo il comportamento del composito nella fase successiva alla fessurazione della matrice.

Per un materiale composito, dopo la fessurazione, si possono avere sostanzialmente due comportamenti:

- 1) il composito è in grado di sopportare solo un carico minore di quello che ha provocato la fessurazione del materiale (Fig. 3-A) questo comportamento è indicato con il termine *softening*;
- 2) il composito è in grado di sopportare un carico maggiore di quello che ha provocato la fessurazione del materiale (Fig. 3-B) questo comportamento è indicato con il termine *hardening*.

Un materiale che ha un comportamento simile a quello della Fig. 3-B è caratterizzato da una duttilità elevata; esso sarà quindi, interessato da una fessurazione diffusa a differenza del materiale rappresentato nella Fig. 3-A per il quale, invece, la fessurazione consisterà in un'unica fessura che assumerà via via dimensioni sempre più consistenti fino a portare il materiale alla completa rottura.

Se si vuole che un materiale cementizio fibroso abbia un comportamento *hardening*, come quello della Fig. 3-B, è necessario che il volume di fibre disperso nella matrice superi un "volume critico" (V_{fcrit}): questo rappresenta quindi quel volume di fibre che, dopo la fessurazione della matrice, può sopportare tutto il carico che precedentemente gravava sul composito.

Nel momento in cui si verifica la fessurazione

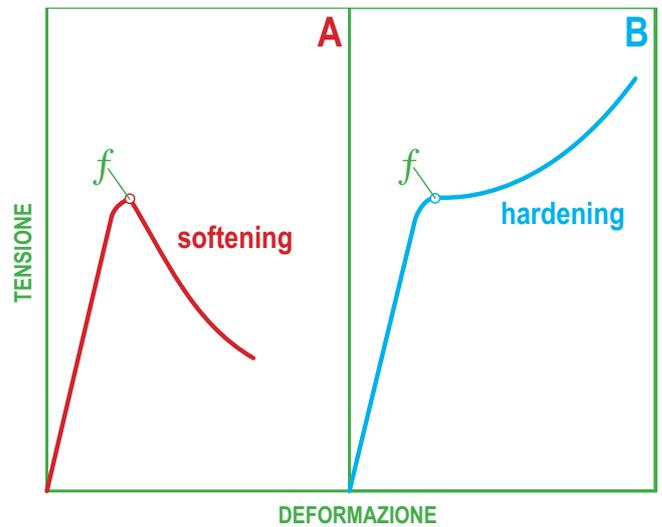


Fig. 3 – Curve tipiche di tensione-deformazione per sollecitazione di trazione uniaassiale: f indica la fessurazione

(f), la deformazione della matrice (ϵ_{mf}) sarà eguale a quella della fibra (ϵ_{ff}). Pertanto:

$$\epsilon_{ff} = \epsilon_{mf} \quad [5]$$

$$\sigma_{ff} = \epsilon_{ff} \cdot E_f = \epsilon_{mf} \cdot E_f \quad [6]$$

$$\sigma_{mf} = \epsilon_{mf} \cdot E_{mf} \quad [7]$$

Sostituendo le espressioni precedenti nell'equazione [1] si determina la tensione del composito σ_c al momento della fessurazione:

$$\sigma_c = \epsilon_{mf} \cdot E_f \cdot V_{fcrit} + \sigma_{mf} (1 - V_{fcrit}) \quad [8]$$

Dopo la fessurazione della matrice la sollecitazione grava interamente sulle fibre, quindi:

$$\sigma_{mf} = 0 \quad [9]$$

Pertanto, tenendo conto della [6] la [8], con $\sigma_{mf} = 0$, diventa:

$$\sigma_c = \epsilon_{mf} \cdot E_f \cdot V_{fcrit} = \sigma_{ff} \cdot V_{fcrit} = \sigma_{fu} \cdot V_{fcrit} \quad [10]$$

dove:

σ_{ff} è la tensione di trazione nelle fibre in corrispondenza della fessurazione, e σ_{fu} è la tensione di rottura delle fibre: proprio perchè si vuole determinare il minimo volume di fibre in grado di sopportare l'intero carico che prima della fessurazione gravava sul composito, ci si riferisce alla massima tensione sopportabile dalle fibre (σ_{fu}).

Dalle equazioni [8] e [10] si ottiene:

$$V_{fcrit} \cdot \sigma_{fu} = \epsilon_{mf} \cdot E_f \cdot V_{fcrit} + \sigma_{mf} \cdot (1 - V_{fcrit}) \quad [11]$$

da cui:

$$V_{fCRIT} = \sigma_{mf} / (\sigma_{fu} - \epsilon_{mf} \cdot E_f + \sigma_{mf}) \quad [12]$$

E' evidente che per ragioni economiche il V_{fCRIT} dovrebbe essere il più piccolo possibile.

Dalla [12] si deduce che una riduzione di V_{fCRIT} si può ottenere tramite:

- a) una riduzione di σ_{mf} : questo significa che se per il composito si vuole ottenere un comportamento duttile, e quindi una fessurazione diffusa, è opportuno utilizzare una matrice cementizia a bassa resistenza meccanica;
- b) un incremento di σ_{fu} , attraverso l'impiego di fibre con un'elevata tensione di rottura;
- c) diminuzione del modulo elastico (E_f) cioè della rigidità delle fibre.

Inoltre, una distribuzione casuale delle fibre, così come un debole legame tra fibre e matrice, fa aumentare il V_{fCRIT} .



In Fig. 4 è rappresentato il V_{fCRIT} ottenuto sfruttando l'equazione [1].

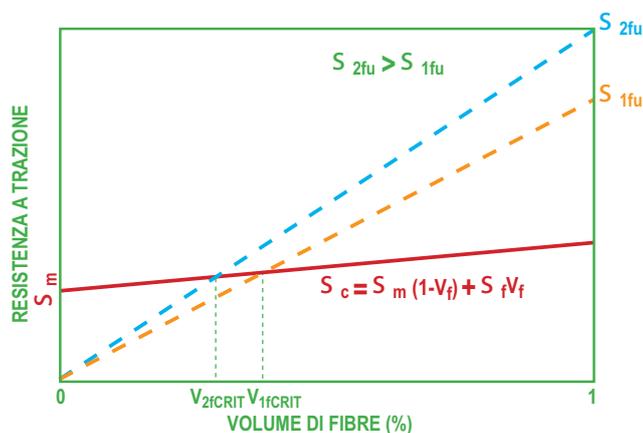


Fig. 4 – Rappresentazione grafica dell'equazione [1] e individuazione del V_{fCRIT}

E' interessante notare come il valore della tensione di rottura della fibra influenzi direttamente il V_{fCRIT} ; esso è rappresentato dall'ascissa del punto d'intersezione della retta che descrive il comportamento del composito prima della fessurazione con la retta che esprime il valore della tensione che grava interamente sulle fibre dopo la fessurazione della matrice. A seconda che la matrice si fessuri

prima o dopo che venga raggiunto il V_{fCRIT} , il carico che le fibre possono sopportare sarà, rispettivamente, minore o maggiore di quello sopportato dal composito al momento della fessurazione. Ancora, l'introduzione nella matrice di fibre con una tensione di rottura elevata ($\sigma_{2fu} > \sigma_{1fu}$), a parità di modulo elastico delle fibre (es. $E_{acciaio} - E_{amianto}$ e $\sigma_{fuacciaio} - \sigma_{fiamianto}$) provoca una diminuzione del V_{fCRIT} ($V_{2fCRIT} < V_{1fCRIT}$).

Tabella 4 - Volume di fibre critico per il rinforzo di una matrice fragile in calcestruzzo

MATRICE CEMENTIZIA		FIBRE					
ϵ_{mf} (%)	σ_{mf} (MPa)	TIPO	E_f (MPa)	σ_{fu} (MPa)	V_{fCRIT} (%)	MASSA VOLUMICA (kg/m ³)	kg/m ³ DI CLS
$100 \cdot 10^{-6}$	3	acciaio	160000	2100	0.14	7860	11.1
$100 \cdot 10^{-6}$	3	vetro	72000	3500	0.025	2540	2.2
$100 \cdot 10^{-6}$	3	polipropilene	7000	400	0.75	900	2.2
$100 \cdot 10^{-6}$	3	carbonio	380000	1800	0.170	1900	3.2
$100 \cdot 10^{-6}$	3	amianto	164000	1000	0.30	2550	7.8

In Tabella 4 vengono riportati i valori di V_{fCRIT} per alcune fibre usualmente impiegate nel rinforzo delle matrici cementizie.

Dalla Tabella 4 si evince quindi, che rendere duttile un materiale fragile quale il calcestruzzo, mediante l'introduzione di fibre, è un'operazione abbastanza economica in quanto i volumi critici calcolati per le diverse fibre non sono elevati. Tuttavia, poiché nella realtà non si verificano quelle condizioni ideali su cui sono basati i calcoli dei V_{fCRIT} della Tabella 4, in pratica il V_{fCRIT} reale da introdurre nel calcestruzzo sarà molto più elevato; ciò, oltre a comportare un costo per le fibre eccessivo, può determinare anche delle difficoltà nel mescolamento, nel trasporto e nella messa in opera del composito.

7.2.1 CURVA $\sigma - \epsilon$ E FESSURAZIONE MULTIPLA DEI MATERIALI COMPOSITI

L'introduzione in una matrice fragile, quale un calcestruzzo ordinario, di un volume di fibre superiore a quello critico conferisce al materiale una elevata capacità di dissipare energia: il materiale, cioè, se sollecitato a trazione, sarà interessato da un elevato numero di fessure, distribuite il più possibile vicine tra loro e caratterizzate da un'ampiezza ridotta.

La curva ideale sforzo-deformazione per una matrice fragile fibrorinforzata sottoposta a trazione è mostrata in Fig. 5.

Il comportamento del composito prima della fessurazione, rappresentato dal segmento OC, è regolato dal suo modulo elastico E_c . Nel punto C si verifica la fessurazione della matrice ($\varepsilon_c = \varepsilon_{mf}$) e la tensione in tale punto vale:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_{mf} \quad [13]$$

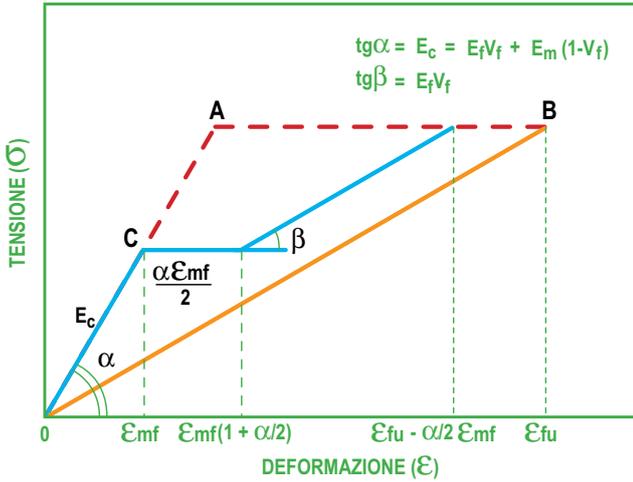


Fig. 5 – Diagramma ideale sforzo-deformazione per un composito a matrice fragile

Essendo il volume di fibre superiore a quello critico ($V_f > V_{fCRIT}$) le fibre supporteranno, senza rompersi, un carico addizionale pari a:

$$\Delta\sigma = E_c \cdot \varepsilon_{mf} \cdot V_m / V_f = \sigma_{mf} \cdot V_m / V_f \quad [14]$$

Successivamente, per effetto dell'aderenza tra fibra e matrice, parte del carico verrà ritrasferito dalla fibra alla matrice mediante una lunghezza di trasferimento S_{rm} . Imponendo una semplice condizione di equilibrio tra il carico necessario a fratturare la matrice e il carico sopportato da N fibre di raggio r , e ipotizzando una distribuzione della tensione di aderenza lungo le fibre di tipo $\tau = \tau_{max} = \text{costante}$, si può calcolare S_{rm} :

$$S_{rm} = V_m \cdot \sigma_{mf} \cdot r / V_{f2}\tau \quad [15]$$

Allora, la tensione aggiuntiva $\Delta\sigma$ varierà tra $E_c \cdot \varepsilon_{mf} \cdot V_m / V_f$ in corrispondenza della fessura, e zero alla distanza S_{rm} dalla fessura stessa.

Pertanto, la deformazione media nelle fibre per una tensione costante pari a $E_c \cdot \varepsilon_{mf}$ è data da:

$$\Delta\varepsilon_c = \sigma_{mf} \cdot V_m / 2V_f \cdot E_f \quad [16]$$

Considerando che la deformazione media della matrice è $\varepsilon_{mf}/2$, l'ampiezza media delle fessure (w_m) risulta:

$$w_m = 2S_{rm} (\varepsilon_{mf}/2 + \alpha \cdot \varepsilon_{mf}/2) = \varepsilon_{mf} \cdot (1 + \alpha) \cdot S_{rm} \quad [17]$$

con:

$$\alpha = E_m \cdot V_m / E_f \cdot V_f \quad [18]$$

Quando, la fessurazione sarà completata (stato di fessurazione stabilizzata), la distanza tra due fessure contigue sarà inferiore a $2 S_{rm}$, distanza necessaria affinché il trasferimento del carico alla matrice provochi la fessurazione di quest'ultima. Pertanto, ulteriori incrementi di carico sul composito determineranno lo scorrimento delle fibre rispetto alla matrice. In queste condizioni il carico viene sopportato interamente dalle fibre e la sollecitazione di rottura (σ_{cu}) risulta:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} \cdot V_f \quad [19]$$

La curva σ - ε della Fig. 5 rappresenta il comportamento ideale di una matrice fragile, cioè di una matrice caratterizzata da un unico valore, ben definito, della tensione di fessurazione. Le matrici fragili reali, invece, hanno una tensione di fessurazione variabile da punto a punto. Inoltre, il comportamento di questi materiali sarà fortemente influenzato dall'aderenza che si stabilisce tra matrice e fibre e dall'orientamento di queste ultime nella matrice. Questa serie di fattori fanno sì che le curve σ - ε per i materiali fibrosi reali, siano tutte contenute nel triangolo OAB della Fig. 5.

Nelle Figure 6, 7 e 8, sono riportate le curve σ - ε calcolate per tre materiali compositi reali; in queste curve V_f rappresenta l'effettivo volume di fibre disposte parallelamente alla direzione della sollecitazione, mentre i valori di α , con l'equazione [18], rappresentano, come si evince dalla equazione [16], la deformazione del composito relativa alla sola fessurazione multipla.

Una caratteristica comune alle tre fibre, è che il tratto relativo alla fessurazione multipla, che nel caso ideale di Fig. 5 è orizzontale, risulta essere più o meno inclinato, in conseguenza del fatto che la tensione di rottura della matrice, come si è detto, varia da punto a punto; pertanto, la fessurazione si verifica per sollecitazioni crescenti, che corrispondono alle diverse tensioni di fessurazione della matrice.

E' poi interessante osservare che l'area sottesa alla curva sforzo-deformazione, rappresenta il lavoro, per unità di volume, necessario a scollegare le fibre. E' evidente allora che un'elevata deformazione di fessurazione multipla è indice di una spiccata attitudine del materiale a dissipare energia. Quindi è chiaro, dal confronto delle curve delle Figure 6, 7 e 9.8, che il composito realizzato con fibre di polipropilene è il più adatto a dissipare energia.

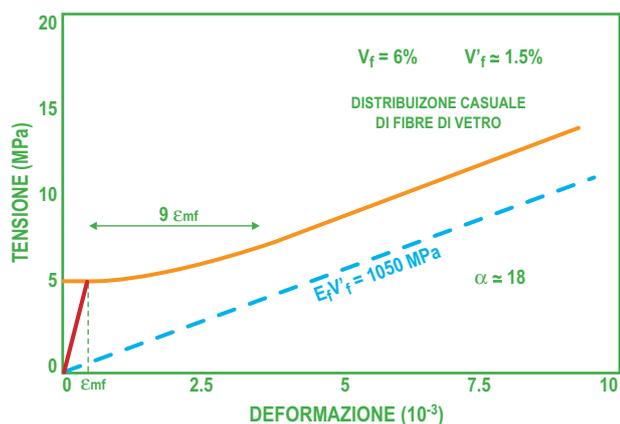


Fig. 6 – Curva σ - ϵ per una pasta di cemento rinforzata con fibre di vetro

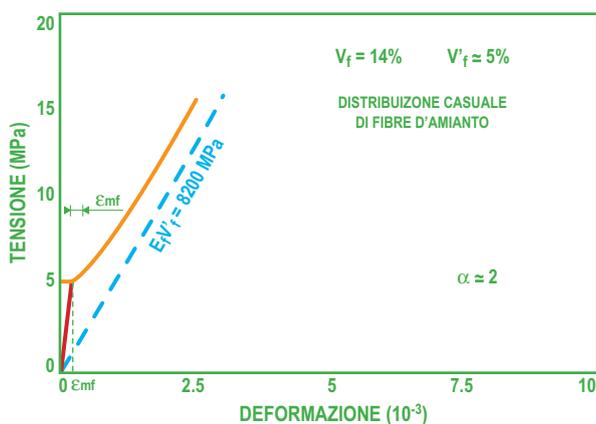


Fig. 7 – Curva σ - ϵ per una pasta di cemento rinforzata con fibre d'amianto

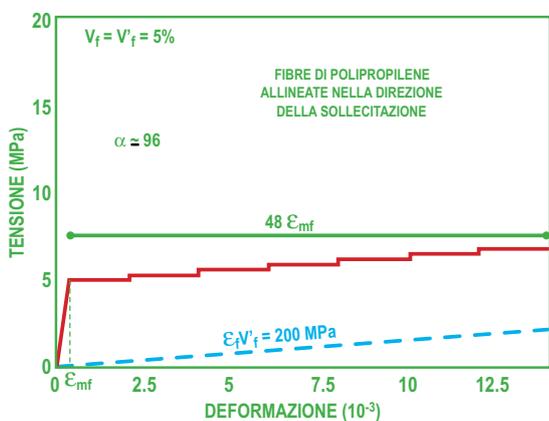


Fig. 8 – Curva σ - ϵ per una pasta di cemento rinforzata con fibre di polipropilene

7.2.2 TENSIONE DI ROTTURA NEL COMPOSITO NEL CASO DI FIBRE SOGGETTE A PULL-OUT

Allorquando in un materiale fibroso si forma una fessura, le fibre che l'attraversano tendono ad allinearsi lungo la direzione della sollecitazione, incrementando la loro efficienza (Fig. 9).

Nonostante il verificarsi di questa condizione favorevole, se le fibre non sono sufficientemente ancorate tenderanno a sfilarsi dalla matrice, dando luogo al fenomeno del *pull-out*.

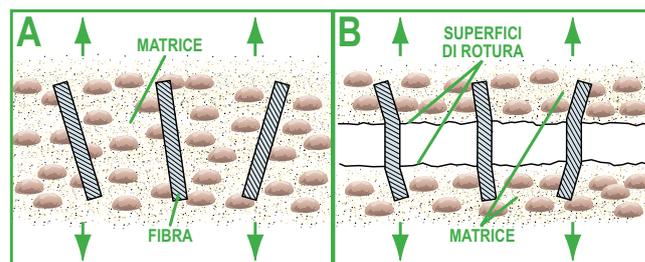


Fig. 9 – Tendenza delle fibre all'allineamento lungo la direzione del carico. A: matrice integra; B: matrice fessurata

In queste condizioni la tensione ultima che può sopportare il composito (σ_{po}) si ottiene moltiplicando il numero delle fibre (N) che attraversano l'unità di superficie del composito per la tensione media di *pull-out* (σ_{fpo}) relativa ad una singola fibra:

$$\sigma_{po} = \sigma_{fpo} \cdot N \quad [20]$$

I valori di N sono forniti dalle seguenti espressioni:

$$N = V_f / \pi r^2 \quad [21]$$

FIBRE ALLINEATE IN UNA DIREZIONE

$$N = 2V_f / \pi^2 r^2 \quad [22]$$

FIBRE DISPOSTE A CASO IN DUE DIREZIONI

$$N = V_f / 2\pi r^2 \quad [23]$$

FIBRE DISPOSTE A CASO IN TRE DIREZIONI

Se la rottura del composito avviene per *pull-out* delle fibre, la lunghezza media di *pull-out* può considerarsi pari a 1/4 (Fig. 10).

Allora, supposto costante il valore dell'aderenza (τ), per ogni singola fibra la forza di *pull-out* (F) vale:

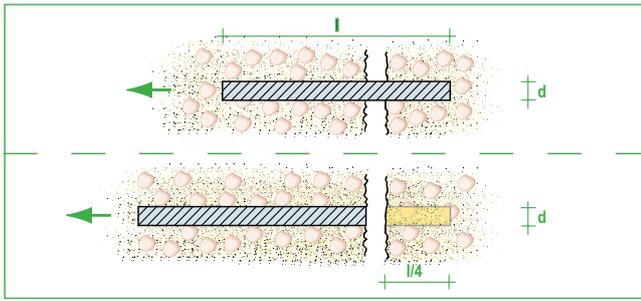


Fig. 10 – Pull-out di una fibra

$$F = \tau \pi r l/2 \quad [24]$$

Quindi la tensione ultima che il composito è in grado di sopportare nel caso che la rottura avvenga per sfilamento delle fibre sarà:

$$\sigma_{cu} = V_f \tau l/2r \quad [25]$$

FIBRE ALLINEATE IN UNA DIREZIONE

$$\sigma_{cu} = V_f \tau l/2r \pi \quad [26]$$

FIBRE DISPOSTE A CASO IN DUE DIREZIONI

$$\sigma_{cu} = V_f \tau l/4r \quad [27]$$

FIBRE DISPOSTE A CASO IN TRE DIREZIONI

Uguagliando le espressioni [25], [26] e [27] al membro di destra dell'equazione [11] è possibile calcolare V_{fCRIT} per materiali fibrosi la cui rottura è regolata dal *pull-out* delle fibre.

8 I MATERIALI CEMENTIZI FIBRORINFORZATI SOGGETTI A SOLLECITAZIONE DI FLESSIONE

L'esigenza di uno studio sull'azione esercitata dalle fibre sul comportamento dei calcestruzzi quando sono soggetti a sollecitazioni di flessione, scaturisce dalla notevole differenza registrata sperimentalmente tra il valore della resistenza a trazione pura e quello della resistenza a trazione per flessione: secondo la teoria dell'elasticità queste due grandezze dovrebbero coincidere.

La principale ragione di questa discrepanza è costituita dal comportamento duttile che caratterizza i compositi fibrosi sottoposti a trazione ed in conseguenza del quale, la forma del diagramma delle tensioni di trazione della sezione trasversale di una trave inflessa in fase di fessurazione non è più quella classica triangolare.

Risulta pertanto evidente che i diversi valori per la resistenza a trazione pura e per quella a trazione per flessione, che si ottengono per i materiali fibrosi, dipendono dal fatto che quest'ultima determinata in base alla teoria dell'elasticità, la quale non può tener conto della duttilità del materiale e quindi fornisce valori che non corrispondono alla situazione reale.

E' opportuno osservare (Fig. 11) che in una trave soggetta a flessione, man mano che la parte di sezione soggetta a trazione si plasticizza, l'asse neutro si sposta verso il lembo compresso rendendo possibili incrementi di carico anche nel caso in cui il volume di fibre risulta minore del volume critico ($V_f < V_{fCRIT}$).

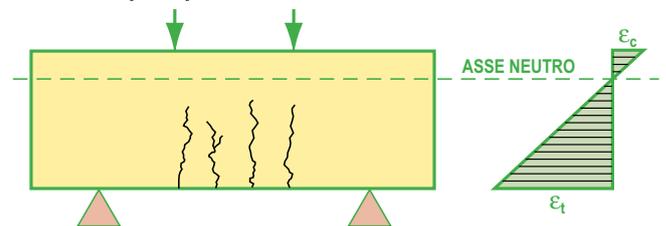


Fig. 11 – Schema di carico per una trave in calcestruzzo fibrorinforzato soggetta a flessione e relativo diagramma delle deformazioni

Il diagramma delle tensioni relativo ad una sezione trasversale per una trave in calcestruzzo ordinario, risulta sensibilmente diverso da quello di un calcestruzzo fibrorinforzato (Fig. 12).

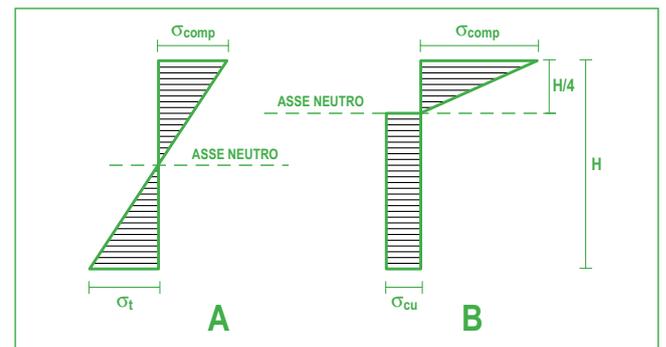


Fig. 12 – Diagrammi di tensione relativi a sezioni inflesse. A) materiale elastico (calcestruzzo ordinario); B) materiale elastico in compressione e plastico in trazione (calcestruzzi fibrorinforzati)

Pertanto la σ_t di Fig. 12 A è la resistenza di fessurazione della sola matrice ed è uguale alla sua resistenza a trazione per flessione, mentre la σ_{cu} di Fig. 12 B rappresenta la resistenza ultima di post-fessurazione a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato.

Siccome l'asse neutro può traslare al massimo fino a $H/4$, con H altezza della trave, imponendo l'equivalenza dei momenti resistenti si ottiene:

$$\sigma_t H^2 b/6 = 13 \sigma_{cu} H^2 b/32 \quad [28]$$

dove b è la base della sezione trasversale della trave.

Dall'equazione [28] risulta:

$$\sigma_{cu} = 0.41 \sigma_t \quad [29]$$

Questa espressione ha un'importanza enorme e un preciso significato fisico: affinché il calcestruzzo fibrorinforzato soggetto a flessione possa garantire, dopo la fessurazione della matrice, un momento resistente non inferiore a quello che la sola matrice è in grado di esibire, non è necessario che $V_f > V_{fCRIT}$, ma, grazie allo spostamento che l'asse neutro subisce verso il lembo compresso, è sufficiente che risulti $\sigma_{cu} \geq 0.41 \sigma_t$.

Cioè, affinché non si verifichino diminuzioni del momento resistente, è sufficiente che il calcestruzzo fibrorinforzato abbia una curva carico-deflessione del tipo di quella riportata in Fig. 13.

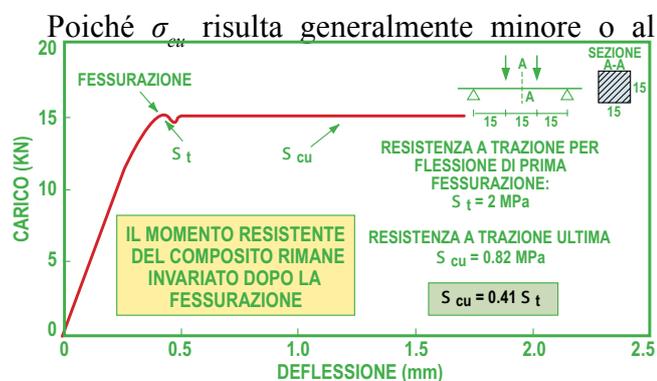


Fig. 13 – Curva carico-deflessione per sollecitazione di flessione; il materiale ha un momento resistente di post-fessurazione pari a quello che immediatamente precede la fessurazione della matrice

più uguale a σ_t , il volume di fibre critico per la flessione sarà sempre minore di quello relativo alla trazione pura.

Se, invece, il composito contiene un volume di fibre pari a quello critico relativo alla trazione pura, la curva carico-deflessione sarà del tipo di quella riportata in Fig. 14, dove in particolare

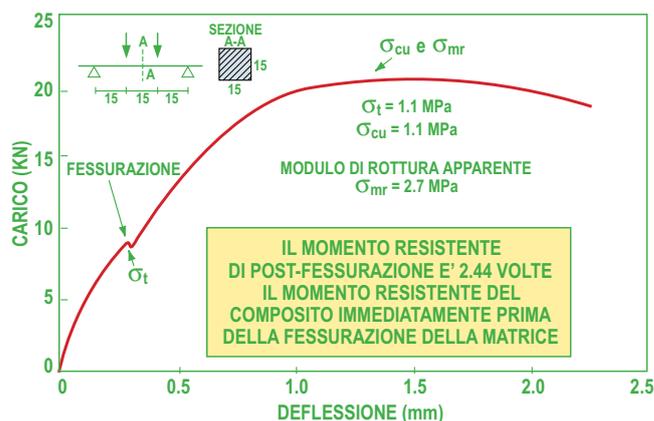


Fig. 14 – Curva carico-deflessione per sollecitazione di flessione; il momento resistente di post-fessurazione è pari a 2.44 volte il momento resistente del composito immediatamente prima della fessurazione della matrice

si verifica che la resistenza a trazione ultima del composito (σ_{cu}) è uguale alla resistenza a trazione per flessione di prima fessurazione della matrice (σ_t).

Il valore effettivo del momento resistente di post-fessurazione risulta:

$$M_r = 13 \sigma_{cu} bH^2/32 \quad [30]$$

Ignorando la duttilità del materiale, e ipotizzando una distribuzione delle tensioni di tipo elastico si ottiene:

$$M_r = \sigma_{mr} bH^2/6 \quad [31]$$

dove σ_{mr} è definito “modulo di rottura apparente”.

Uguagliando le ultime due espressioni si ottiene:

$$\sigma_{mr} = 2.44 \sigma_{cu} \quad [32]$$

Ne consegue che il materiale “sembra” in grado di possedere una resistenza a flessione di post-fessurazione (σ_{mr}) pari a 2.4 volte la resistenza a trazione ultima (σ_{cu}), mentre, in realtà, questo risultato è solo frutto dell'adozione di un criterio di calcolo inesatto. Cioè, la resistenza a trazione ultima effettiva del composito è σ_{cu} , mentre σ_{mr} confrontata con la resistenza a trazione per flessione di prima fessurazione fornisce un'indicazione sull'aumento della capacità di carico flessionale del composito nella fase plastica.

Introducendo nell'espressione [32] il valore di σ_{cu} in funzione della distribuzione delle fibre è possibile calcolare il modulo di rottura apparente

(σ_{mr}) nei vari casi:

$$\sigma_{mr} = 2.44 \sigma_{fu} V_f \quad [33]$$

fibre allineate in una direzione

$$\sigma_{mr} = 2.44 V_f \tau l / 2r \quad [34]$$

fibre allineate soggette a pull-out

$$\sigma_{mr} = 1.55 V_f \tau l / 2r \quad [35]$$

fibre distribuite su piani soggette a pull-out

$$\sigma_{mr} = 1.22 V_f \tau l / 2r \quad [36]$$

fibre distribuite casualmente soggette a pull-out

In particolare, per le fibre soggette a *pull-out*, si può osservare che:

- a) il modulo di rottura apparente dipende dal volume, dalla forma e dall'orientamento delle fibre, nonché dall'aderenza tra fibra e matrice;
- b) il modulo di rottura apparente aumenta proporzionalmente al volume e al rapporto di aspetto delle fibre.

Come già si è detto nel paragrafo 7.2, una volta noto il valore di σ_{cu} , è possibile ricavare il V_{fCRIT} a flessione in funzione della resistenza di fessurazione per trazione della matrice.

Sostituendo il valore di σ_{cu} nell'equazione [9.29] con quello di σ_{mr} si ottiene:

$$V_{fCRIT} = 0.41 \sigma_t / \sigma_{fu} \quad [37]$$

fibre allineate

$$V_{fCRIT} = 0.82 \sigma_t r / \tau l \quad [38]$$

fibre allineate soggette a pull-out

$$V_{fCRIT} = 1.28 \sigma_t r / \tau l \quad [39]$$

fibre distribuite su piani soggette a pull-out

$$V_{fCRIT} = 1.64 \sigma_t r / \tau l \quad [40]$$

fibre distribuite casualmente soggette a pull-out

Si può osservare che per fibre soggette a *pull-out*, il V_{fCRIT} dipende dal rapporto tra la tensione di fessurazione a trazione del composito e l'aderenza oltre che dal rapporto d'aspetto e dall'orientamento delle fibre nella matrice.

Nella Fig. 15 è riportata graficamente la relazione che lega il rapporto di aspetto (l/d) al volume

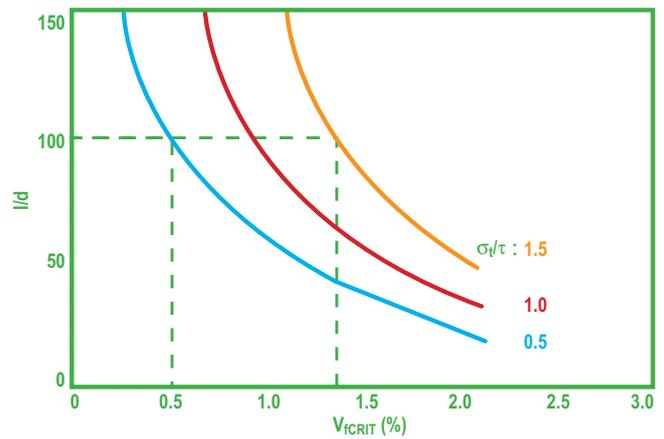


Fig. 15 – Volume critico di fibre per compositi soggetti a flessione

di fibre critico, per diversi valori del rapporto σ_t/τ .

Si può notare come un materiale con una bassa σ_t , quale può essere un calcestruzzo con un elevato rapporto acqua/cemento, può essere rinforzato efficacemente con un volume di fibre ($l/d = 100$) pari allo 0.5%. Qualora, invece, il composito abbia un'elevata σ_t rispetto all'aderenza fibra-matrice, il V_{fCRIT} aumenta notevolmente passando all'1.35% circa.

L'effetto dell'aderenza fibra-matrice sul valore del modulo di rottura apparente è mostrato in Fig. 16 dove sull'ascissa è riportato il prodotto della percentuale di fibre in peso (W) per il rapporto d'aspetto l/d .

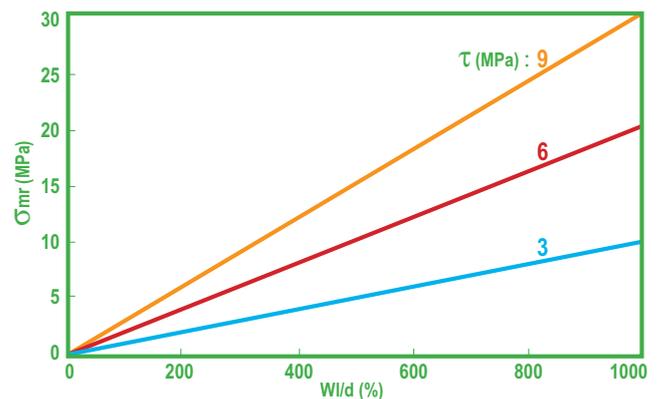


Fig. 16 – Effetto dell'aderenza sul modulo di rottura apparente per fibre disposte casualmente

E' evidente che si possono ottenere sensibili miglioramenti nelle prestazioni del composito sottoposto a flessione, perfezionando la forma delle fibre in modo da incrementare la loro aderenza alla matrice cementizia.

BIBLIOGRAFIA

- (1) J.P. Romualdi e E.B. Batson, *Mechanics of Crack Arrest in Concrete*, ASCE Journal of Engineering Mechanics, pp. 147-168, 1963
- (2) S.P. Shah e A. Skarendahl, *Steel Fiber Concrete*, Elsevier Applied Science, London e New York, 1986
- (3) A. Bentur e S. Mindness, *Fibre reinforced cementitious composites*, Elsevier Applied Science, London e New York, 1990
- (4) ACI Committee 544, *ACI Manual of Concrete Practice, Part 6, "State of the Art Report on Fiber Reinforced Concrete"*, ACI Publication, Detroit, 2005



Laboratorio prove materiali autorizzato dal **Ministero delle Infrastrutture e Trasporti**
 Ente iscritto all'Albo dei Laboratori MURST, **Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica**
 Diretto dal Prof. Mario Collepardi, Honorary Member of the **American Concrete Institute**

Corsi di formazione permanente online

Sono disponibili **CORSI TELEMATICI ENCO** per il conseguimento del diploma di **TECNICO DEL CALCESTRUZZO**.

Senza spese di trasferta e soggiorno: è possibile frequentare i Corsi comodamente da casa

Senza obblighi di orari: il corso può essere frequentato nell'arco di un mese decidendo quali e quante lezioni seguire per giorno
 E' possibile comunicare con i docenti tramite e-mail per avere chiarimenti, e suggerimenti.

Se si desidera conseguire il diploma di **TECNICO DEL CALCESTRUZZO** occorre:

- a) frequentare i corsi: **TECNOLOGIA DEL CALCESTRUZZO** e **CALCESTRUZZI SPECIALI**;
- b) per ciascun corso sostenere un esame on-line preliminare in data da concordare;
- c) per ciascun corso sostenere un esame diretto finale in data e sede da concordare.

Per entrambi gli esami è possibile consultare il materiale didattico e normativo così come avviene nella usuale attività professionale. In caso di insuccesso il test on-line e l'esame finale sono ripetibili.

PROGRAMMI

I Programmi dei Corsi di **Tecnologia del calcestruzzo** e di **Calcestruzzi speciali** sono disponibili sul sito www.encosrl.it cliccando su **CORSI ON LINE**.

MATERIALE DIDATTICO

Materiale didattico: agli iscritti al primo corso verrà recapitato il libro **Il Nuovo Calcestruzzo** (V Edizione di M. Collepardi, S. Collepardi e R. Troli) con gli allegati sulle Norme Tecniche per le Costruzioni, la Circolare Ministeriale Esplicativa delle Norme, il software Easy&Quick per le prescrizioni di capitolato sulle opere in CA e CAP, e il video sul "Degradamento del calcestruzzo".

COSTI

Costo del primo corso: € 350,000 iva esclusa. - Costo del secondo corso: € 200,000 iva esclusa.

ISCRIZIONE AI CORSI

Si può effettuare l'iscrizione e il pagamento via Internet al sito www.encoshop.com sezione **CORSI ON LINE** → nella fase di completamento dell'ordine (precisazione dei dati dell'acquirente: nome e cognome, ragione sociale, carta di credito, ecc.) andare alla voce **TIPOLOGIA** (in rosso) scegliere l'opzione **CORSI ON LINE** per iscriversi al corso e completare il pagamento, oppure mandare una e-mail con tutti i dati all'indirizzo info@encosrl.it.

Per maggiori informazioni: www.encosrl.it oppure Enco Srl – Via delle Industrie 18/20 – 31050 Ponzano Veneto (TV) – Tel. 0422 96 37 71 – Fax 0422 96 32 37 – info@encosrl.it



FORMULAZIONI

- Nuovi additivi o aggiunte minerali per conglomerati cementizi
- Malte per intonaci e murature
- Malte per il ripristino di strutture in calcestruzzo



RICERCHE E SPERIMENTAZIONI

Mirate all'inertizzazione o al riutilizzo di scorie industriali nei conglomerati cementizi:

- materiali da demolizione di costruzioni
- scorie di fonderia
- scorie da RSU
- scorie di lavorazioni di vetro o ceramici
- materiale plastico non riciclabile
- liquidi a bassa radioattività



MIX-DESIGN

Ottimizzazione e prequalifica di conglomerati cementizi speciali quali:

- calcestruzzi con durabilità ≥ 50 anni secondo UNI EN 206/1 (struttura in classe 1 secondo DM 14-9-05)
- calcestruzzi con durabilità ≥ 100 anni (strutture in classe 2 o eccezionali)
- calcestruzzi leggeri ad uso strutturale
- conglomerati a ritiro ridotto o compensato nelle condizioni termo igrometriche più severe (es. pavimentazioni)
- calcestruzzi a rapido scassero e rapido sviluppo di resistenza
- calcestruzzi ad alte ed altissime prestazioni, anche fibrorinforzati
- calcestruzzi decorativi o per strutture con pregiato facciavista
- calcestruzzi a basso calore d'idratazione
- calcestruzzi autocompattanti (SCC) di tutti i tipi sopraelencati



IL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO: RISULTATI DI UNA CAMPAGNA SPERIMENTALE SU SPRITZ-BETON RINFORZATI CON FIBRE IN ACCIAIO, VETRO E POLIPROPILENE SPERIMENTALE



Luigi Coppola, Alessandra Buoso

Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria

luigi.coppola@unibg.it – alessandra.buoso@unibg.it



Il calcestruzzo è notoriamente un materiale a comportamento fragile (Fig. 1) che unitamente alla modesta resistenza a trazione e all'innata tendenza a contrarsi per effetto del ritiro idraulico tende a fessurarsi in maniera più o meno evidente. La comparsa di quadri fessurativi generalmente rappresenta sia un problema estetico che di funzionalità, come avviene nelle pavimentazioni industriali, ove la presenza di soluzioni di continuità in servizio, per l'azione dei carichi di tipo mobile (su ruota), determinerebbe un rapido sbriciamento dei cigli fessurativi con conseguente compromissione della funzionalità del pavimento. In molte situazioni, inoltre, le fessure possono avere ricadute negative sia per la statica che per la durabilità delle strutture, per la facilità con cui le sostanze aggressive attraverso le soluzioni di continuità, raggiungono le armature corrodendole. Inoltre, la fragilità del calcestruzzo è responsabile anche della ridotta resistenza che il materiale offre nei confronti dei carichi impulsivi (urti, carichi ripetuti, etc.) come

avviene, ad esempio, per i giunti strutturali negli impalcati da ponte che richiedono una costante e onerosa manutenzione straordinaria. Purtroppo, la fessurazione non riguarda solo i calcestruzzi ordinari, ma coinvolge anche i conglomerati cementizi ad alta resistenza.

Al fine di sopperire a queste carenze prestazionali intrinseche del conglomerato cementizio, nelle strutture in c.a. si fa abitualmente ricorso all'utilizzo di armature di ripartizione – generalmente in forma di reti elettrosaldate o di barre di piccolo diametro e con passo molto ravvicinato – che permettono di contenere l'ampiezza del quadro fessurativo connesso con i carichi impulsivi e con le distorsioni prodotte dai fenomeni di natura termo-igrometrica (Fig. 1). Occorre sottolineare, tuttavia, come questa pratica non risolve esaustivamente la problematica connessa con la comparsa e l'attenuazione dell'ampiezza dei quadri fessurativi. Gli stati tensionali indotti da questi fenomeni, infatti, non sempre agiscono in una sola e ben definita direzione e, pertanto, la disposizione delle tradizionali barre di acciaio lungo direttrici obbligate non sempre riesce a prevenire e, soprattutto, a contenere l'ampiezza delle soluzioni di continuità. In particolari situazioni, inoltre, la presenza di ferri anche se di piccolo diametro non sortisce alcun effetto benefico nei confronti della fessurazione: è il caso, ad esempio, delle soluzioni di continuità che si manifestano nel conglomerato nella fase immediatamente successiva alla posa in opera quando un'eccessiva evaporazione dell'acqua dall'impasto ancora fresco determina la nascita di stati tensionali superiori alla modesta resistenza a trazione del calcestruzzo a causa della sua giovane età.



Fig. 1 – Le intrinseche debolezze del calcestruzzo

Per le motivazioni sopraesposte, si è pensato di introdurre nel calcestruzzo di un rinforzo discreto costituito da fibre di diversa natura. Rispetto alle tradizionali armature in forma di barre le fibre, disponendosi nella matrice cementizia a guisa di un rinforzo tridimensionale, sono capaci di assorbire gli sforzi di trazione agenti in qualsiasi direzione garantendo nei confronti delle lesioni un'azione di cucitura puntuale che impedisce alle soluzioni di continuità di propagarsi rapidamente e, conseguentemente, di attingere ampiezze elevate. Quest'azione di cucitura consente, quindi, di evitare che il materiale collassi fragilmente e, pertanto, un calcestruzzo fibrorinforzato possiede anche un'elevata capacità, rispetto a un conglomerato tradizionale, di dissipare energia resistendo ai carichi di tipo impulsivo (urti, scoppi, azioni cicliche, etc.) (1).

Dall'inizio del secolo scorso, l'impiego delle fibre, come sistema di rinforzo nel calcestruzzo è notevolmente aumentato. Le prime a essere impiegate furono le fibre d'amianto nella produzione di lastre di copertura prefabbricate. Solo più tardi, verso la fine degli anni '40, fecero la loro comparsa, negli Stati Uniti, le fibre di acciaio e via via si svilupparono fibre di vetro, quelle organiche (polipropilene, poliacrilonitrile, poliolefiniche) provenienti da trattamenti di sintesi e recentemente anche fibre di ghisa, di ottone, ecc. (2). Attualmente, per il confezionamento dei calcestruzzi fibrorinforzati si fa ricorso principalmente alle fibre acciaio, a quelle di vetro, in polipropilene e in poliacrilonitrile (3).

I fattori che influenzano le proprietà dei materiali cementizi fibrorinforzati sono:

1. Le proprietà chimico-fisiche delle fibre.
2. Le proprietà chimico-fisiche della matrice cementizia.
3. L'aderenza fibra-matrice.

Tra quelle menzionate, in particolare, l'aderenza fibra-matrice riveste un ruolo di primaria importanza in quanto, essendo l'allungamento a rottura di tutte le fibre circa 2-3 ordini di grandezza superiori alla deformazione a rottura della matrice cementizia, la crisi del conglomerato avviene molto prima che si possa verificare la rottura delle fibre. Queste ultime, quindi, contribuiranno alla portanza di un elemento in calcestruzzo soltanto dopo la fessurazione della matrice, allorquando le

fibre disponendosi a cavallo della lesione consentiranno la trasmissione degli sforzi attraverso i cigli fessurativi, esercitando un "effetto cucitura" (Fig. 2) che impedisce all'elemento in calcestruzzo fibrorinforzato di collassare fragilmente (come avverrebbe, invece, in assenza del rinforzo fibroso).



**EFFETTO DI CUCITURA DELLE FESSURE
ESERCITATO DAL RINFORZO FIBROSO**

Fig. 2 – Effetto cucitura delle fibre nel calcestruzzo

Le prestazioni di un calcestruzzo fibrorinforzato, sebbene in parte legate alle proprietà elastiche delle fibre e, quindi, alla loro natura, dipendono strettamente dall'aderenza fibra-matrice. Da questo punto di vista, acquista importanza la resistenza a compressione del calcestruzzo (in quanto l'aderenza fibra-matrice aumenta con questa proprietà), oltre ad alcuni parametri geometrici del rinforzo fibroso (Fig. 3) quali:

- la lunghezza della fibra (l_f), cioè la distanza tra le estremità della fibra;
- la lunghezza in sviluppo della fibra (l_d), cioè la lunghezza della linea d'asse della fibra;
- il diametro equivalente (d_f), ossia il diametro di un cerchio con area uguale all'area media della sezione trasversale della fibra;
- il rapporto d'aspetto (o di forma) definito come rapporto tra lunghezza e diametro equivalente (l_f/d_f).

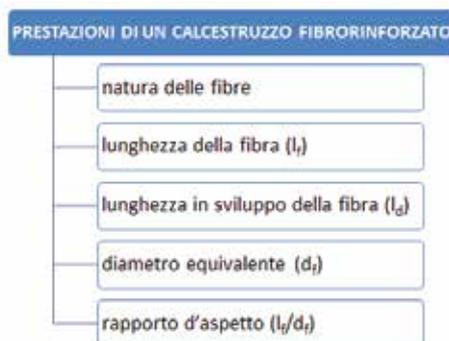


Fig. 3 – Parametri del rinforzo fibroso che influenzano le prestazioni del calcestruzzo fibrorinforzato

Il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato dipende strettamente dall'aderenza fibra-matrice. Da questo punto di vista, quindi, tra i parametri sopramenzionati il rapporto di forma acquista un'importanza rilevante nel definire la resistenza residua di un elemento in conglomerato fibrorinforzato dopo la fessurazione della matrice. Ovviamente, l'azione di cucitura delle fibre sarà strettamente influenzata anche dalla geometria della fibra. In particolare, quelle forme (ad esempio, con estremità piegate o uncinata, ondulate, etc.) che consentono di massimizzare l'ancoraggio della fibra dalla matrice saranno quelle che renderanno più efficiente il comportamento del materiale fibrorinforzato. L'azione di cucitura, ovviamente, dipenderà anche dal numero di fibre che si disporranno a cavallo dei cigli fessurativi. Pertanto, riveste un ruolo importante nel comportamento del composito sia il dosaggio che la dispersione delle fibre nella matrice. Ovviamente, maggiore il dosaggio, e più uniforme la dispersione, e più efficiente risulterà il rinforzo fibroso. Tuttavia, occorre tener presente che quantitativi elevati di fibre producono una riduzione della fluidità dell'impasto, tanto maggiore quanto più alto è il rapporto di forma, di cui si dovrà tener conto nella progettazione della miscela.

In Fig. 4, vengono riassunte le principali caratteristiche e i dosaggi tipici delle fibre sia metalliche che non (es. vetro, polipropilene, etc.). Le fibre non metalliche possono essere strutturali, per la produzione di conglomerati destinati alle stesse applicazioni di quelli prodotti con le fibre di acciaio, o non strutturali generalmente utilizzate per la realizzazione di calcestruzzi destinati prevalentemente a solette e pavimenti di piccolo spessore per attenuare il rischio fessurativo derivante dal ritiro plastico del conglomerato.

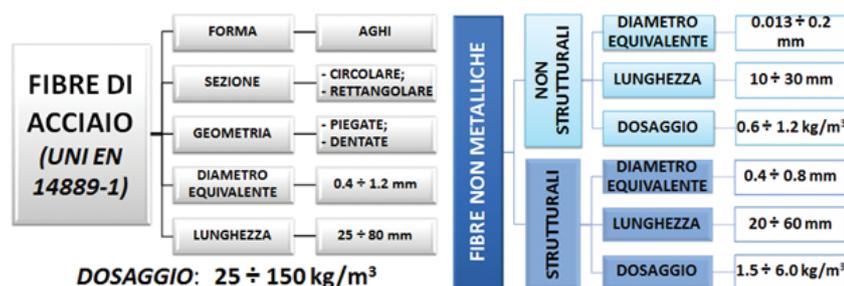


Fig. 4 – Caratteristiche e dosaggio delle fibre da utilizzare come rinforzo discreto nei calcestruzzi

Attualmente i calcestruzzi rinforzati con fibre sia in parziale che totale sostituzione dell'armatura tradizionale sono utilizzati per la realizzazione di pavimentazioni industriali in calcestruzzo, parcheggi, elementi prefabbricati (strutturali e non) e rivestimenti di gallerie.

Negli ultimi anni, in Italia vi è stata una rapida diffusione nell'utilizzo dei calcestruzzi fibrorinforzati soprattutto nel settore delle pavimentazioni e dei rivestimenti per galleria (sia realizzati con calcestruzzo proiettato che gettato entro cassero). Stime cautelative (in difetto) indicano per questo tipo di rinforzi un volume complessivo di fatturato che supera i 10 milioni di euro. La diffusione del calcestruzzo fibrorinforzato è da attribuire, non solo ai vantaggi in termini strutturali, alla riduzione di ampiezza delle fessure e di conseguenza all'aumento della durabilità, alla maggiore resistenza a fatica e ai carichi impulsivi, ma anche alla maggiore facilità di esecuzione dei manufatti e degli elementi costruttivi rispetto alla tradizionale tecnologia di realizzazione basata sull'impiego di barre di armatura e/o di reti elettrosaldate. Basti pensare, ad esempio, alle fasi di realizzazione di una pavimentazione industriale in cui le maestranze, dopo aver pulito il piano di posa, devono disporre i distanziatori, la rete elettrosaldata e gettare il calcestruzzo in condizioni di precario equilibrio dovendo camminare sulla rete d'armatura (Fig. 5). Per contro, ricorrendo all'impiego del calcestruzzo fibrorinforzato, la realizzazione del pavimento risulta molto più agevole in quanto, dopo aver preparato i piani di posa e aver steso la barriera vapore si può procedere al getto senza alcuna ulteriore lavorazione aggiuntiva. Allo stesso modo, la realizzazione di un rivestimento in galleria con calcestruzzo fibrorinforzato consente di eliminare le operazioni lunghe e complicate di fissaggio della rete elettrosaldata alla parete di scavo.

La progettazione strutturale di elementi in calcestruzzo rinforzato con fibre può essere effettuata ricorrendo alle raccomandazioni emanate dalla fib (*Fédération Internationale du Béton*) che ha recentemente emanato la versione finale del Model Code 2010 in cui sono state inserite due nuove sezioni sui calcestruzzi rinforzati con le fibre (materiali e compor-

tamento strutturale). Inoltre, per quanto concerne l'Italia, è disponibile anche un documento CNR-DT 204 in cui si riportano le istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato.

Il comportamento di un calcestruzzo fibrorinforzato è individuato attraverso le resistenze residue a trazione per flessione che il composito è in grado di assicurare dopo la comparsa della prima



Fig. 5 – Principali vantaggi derivanti dall'impiego di calcestruzzo fibrorinforzato

fessurazione (quest'ultima proprietà esclusivamente dipendente dalla resistenza a trazione del solo calcestruzzo). Le resistenze residue a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato vengono valutate attraverso la prova di flessione secondo la norma EN 14651. I provini prismatici, confezionati in accordo alla UNI EN 12390-1, vengono intagliati in mezzeria e sottoposti a una prova di flessione su tre punti di carico in controllo di CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*), che rappresenta lo spostamento rilevato fra due punti alla base dell'intaglio (Fig. 6).

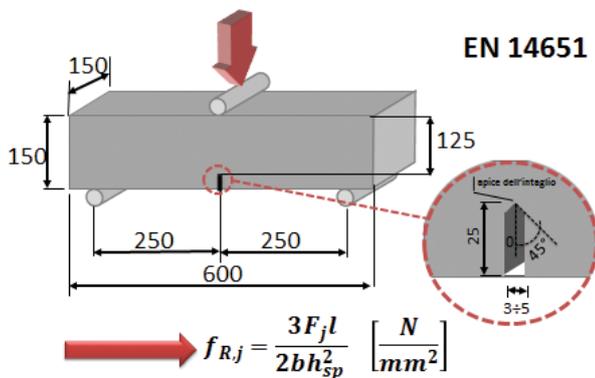


Fig. 6 – Schema della prova di flessione su tre punti su travetto con intaglio per forzare la fessura nella mezzeria della trave in controllo di CMOD (norma EN 14651)

Il calcestruzzo fibrorinforzato (Fig. 7) è classificato sulla base di valori puntuali delle tensioni residue nominali $f_{R,j}$, corrispondenti a prefissati valori di CMOD e derivati dal carico F_j . In particolare, i calcestruzzi fibrorinforzati, in accordo alla *fib MC 2010*, possono essere denominati mediante la resistenza a flessione ($f_{R,1k}$) corrispondente a un'apertura di fessura di 0.5 mm (Tabella 1) seguita da una lettera che quantifica il rapporto tra $f_{R,3k}/f_{R,1k}$ (Tabella 2), in cui $f_{R,3k}$ è la tensione residua in corrispondenza dell'apertura della fessura di 2.5 mm.

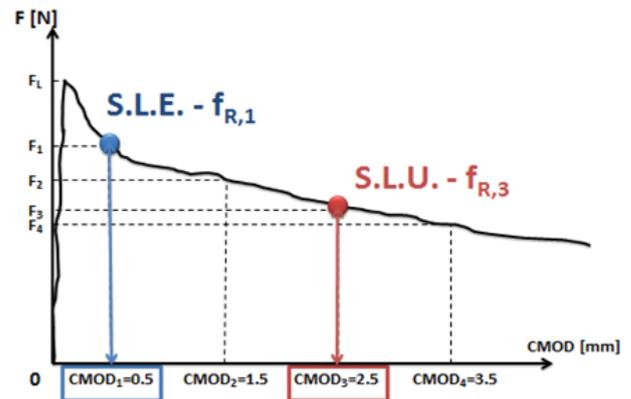


Fig. 7 – Diagramma carico-apertura della fessura alla bocca dell'intaglio (CMOD) a seguito della prova di flessione su tre punti con intaglio in accordo alla norma EN 14651

Se ad esempio un calcestruzzo fibrorinforzato, che, a seguito delle prove sperimentali fornisce dei valori di resistenza $f_{R,1k} = 3.1 \text{ N/mm}^2$ e $f_{R,3k} = 2.5 \text{ N/mm}^2$, sarà classificato 3b, in quanto:

- $f_{R,1k} = 3.1 \text{ N/mm}^2 \rightarrow$ classe 3 (Tabella 1);
- $f_{R,3k} / f_{R,1k} = 2.5 / 3.1 = 0.81 \rightarrow$ b (Tabella 2).

Tabella 1 – Classi di resistenza in funzione del valore di

CLASSE	$f_{R,1k}$ (N/mm ²)
	1.0
	1.5
	2.0
	2.5
	3.0
	4.0
	5.0
	6.0
	7.0
	8.0

Tabella 2 – Lettera per la denominazione del calcestruzzo fibrorinforzato in funzione del rapporto

$f_{R,3k}/f_{R,1k}$	CLASSE
0.5 ÷ 0.7	a
0.7 ÷ 0.9	b
0.9 ÷ 1.1	c
1.1 ÷ 1.3	d
≥ 1.3	e

Sulla base dei valori di tensioni residue ottenuti dalla prova di flessione (EN 14651) si possono definire due legami semplificati tensione-apertura della fessura, con comportamento post-fessurativo rigido-plastico o lineare (incrudente o degradante) (Fig. 8).

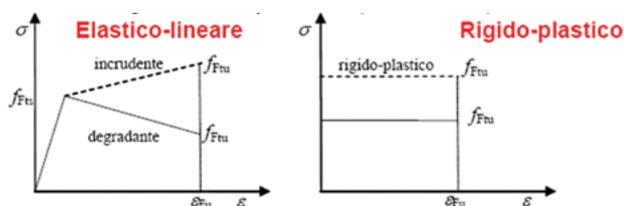


Fig. 8 – Legami costitutivi semplificati tensione-apertura della fessura

I parametri fondamentali per procedere al calcolo strutturale di elementi realizzati in calcestruzzo fibrorinforzato, sono f_{Fts} che rappresenta la resistenza residua di esercizio, definita come resistenza post-fessurazione valutata in corrispondenza di aperture di fessure compatibili con l'esercizio ed f_{Ftu} che rappresenta la resistenza ultima residua. In

accordo al *fib MC 2012*, i valori tensionali, f_{Fts} e f_{Ftu} , che caratterizzano i due modelli, sono pari a:

$$\bullet f_{Fts} = 0.45 \cdot f_{R,1}$$

$$\bullet f_{Ftu} = 1667 \left[f_{Fts} - \frac{W_u}{W_{i2}} (f_{Fts} - 0.5 f_{R,3} + 0.2 f_{R,1}) \right] \geq 0$$

che nel modello rigido plastico può essere semplificata con la formula

$$f_{Ftu} = \frac{f_{R,3}}{3}$$

In particolare, considerando il legame costitutivo semplificato del calcestruzzo teso (e quindi trascurando la resistenza a trazione del calcestruzzo), sotto l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, si possono, ad esempio, tracciare i domini Momento flettente/Sforzo normale delle sezioni di calcestruzzo fibrorinforzato (Fig. 9). Come si può notare in Fig. 9, utilizzando un calcestruzzo fibrorinforzato non varia il comportamento a compressione, ma solo la capacità resistente a trazione. Infine, è possibile altresì fare una verifica agli stati limite di esercizio per il controllo della fessurazione.

Da alcuni anni, il calcestruzzo fibrorinforzato, anche grazie al diffondersi e consolidarsi di una procedura per il calcolo strutturale, è molto utilizzato per i rivestimenti in galleria, soprattutto perché consente la completa eliminazione della rete elettrosaldata riducendo così i rischi per gli operai

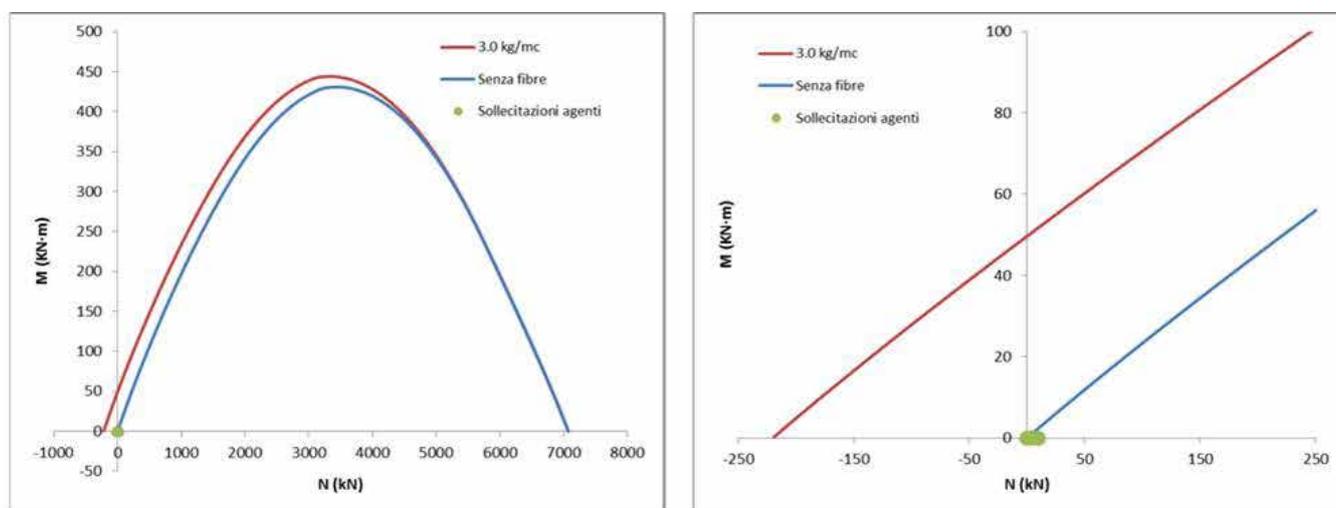


Fig. 9 – Dominio di resistenza per un calcestruzzo rinforzato con 3.0 kg/m³ di fibre in polipropilene

durante le fasi di messa in opera e aumentando di conseguenza la sicurezza (4). Da un punto di vista prettamente strutturale, il calcestruzzo fibrorinforzato consente di aumentare la tenacità e la resistenza ai carichi impulsivi, permettendo di controllare gli eventuali distacchi puntuali del rivestimento (5) (6). Nel seguito vengono presentati alcuni risultati di una campagna sperimentale condotta su betoncini fibro-rinforzati - con fibre strutturali metalliche e non - applicati a spruzzo per la realizzazione di rivestimenti per gallerie. Le prove sperimentali sono state condotte con l'obiettivo di confrontare le prestazioni reologiche ed elasto-meccaniche dei betoncini rinforzati con fibre di diversa natura oltre all'influenza derivante dall'aggiunta dell'accelerante di presa (a base di silicato di sodio) (7).

CAMPAGNA SPERIMENTALE

Ad un betoncino ordinario con rapporto $a/c = 0.44$, lavorabilità S5 (in accordo alla UNI EN 12350-2), sono stati aggiunti tre tipi di fibre: acciaio, vetro e polipropilene le cui proprietà principali sono riportate in Tabella 3.

Tabella 3 – Caratteristiche principali delle fibre utilizzate

Sigla	Materiale	Lunghezza (mm)	Diametro (mm)	l/d
SF	Acciaio	33	0.55	60
GF	Vetro	40	1.6	25
PF	Poli-propilene	40	0.9	44

I dosaggi delle fibre sono riportati in Tabella 4. È importante sottolineare come il dosaggio in volume delle fibre in acciaio ed in vetro sia sostanzialmente coincidente e, conseguentemente, le prestazioni dei calcestruzzi realizzati con queste fibre saranno direttamente confrontabili. Per quanto concerne le fibre in polipropilene, il dosaggio risulta essere di gran lunga inferiore, circa del 34% circa rispetto alle fibre in acciaio e del 39% circa delle fibre in vetro. Ovviamente, questo aspetto sarà di fondamentale importanza nell'analisi dei risultati ottenuti.

Tabella 4 – Dosaggio (sia in volume che in massa) delle fibre e massa volumica degli impasti

Miscela	Natura delle fibre	Massa volumica	Dosaggio delle fibre	
			kg/m ³	l/m ³
PL	—	2341	—	—
SF	Acciaio	2394	39.2	4.4
GF	Vetro	2342	11.2	4.7
PF	Poli-propilene	2324	3.5	2.9

Durante le fasi di getto (dopo 1/5 e 4/5 dello scarico della betoniera), ma comunque prima dell'aggiunta dell'additivo accelerante di presa, sono state misurate sugli impasti allo stato fresco la lavorabilità e la massa volumica. Relativamente alla massa volumica del calcestruzzo fresco non esistono differenze sostanziali tra gli impasti realizzati con le diverse fibre (Tabella 4). Pertanto, l'aggiunta delle fibre non determina anomali intrappolamenti di aria. Analogo comportamento si registra in termini di lavorabilità. Infatti, nessuna delle fibre utilizzate ha richiesto un incremento della richiesta d'acqua, a pari consistenza iniziale, rispetto all'impasto di riferimento. Inoltre, dopo 45 minuti dal confezionamento la lavorabilità è aumentata o rimasta sostanzialmente invariata rispetto a quella registrata al termine della miscelazione.

Successivamente è stato aggiunto il silicato di sodio ed il calcestruzzo è stato spruzzato sulle pareti della galleria, misurando lo sfrido (UNI EN 14488-7). Il dosaggio di additivo accelerante

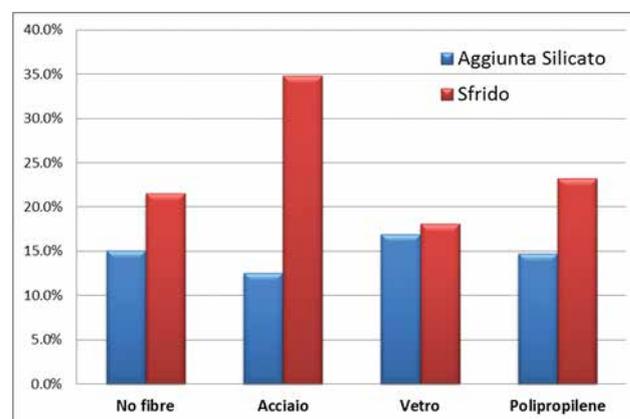


Fig. 10 – Dosaggio di additivo accelerante di presa e sfrido

di presa (silicato di sodio) si è attestato nell'intervallo 13-17% circa e lo sfrido si è attestato tra il 18 e il 35% circa (Fig. 10). Dai risultati ottenuti sembra emergere chiaramente come la percentuale di materiale rimbalzato durante la prova di proiezione dei betoncini sia esclusivamente influenzata dal dosaggio di additivo accelerante e non dal tipo né dal dosaggio di fibre aggiunte. Sembra, infatti, esistere una proporzionalità indiretta tra dosaggio di accelerante e sfrido: maggiore è il dosaggio di accelerante e minore risulta lo sfrido.

Per valutare le prestazioni meccaniche dei calcestruzzi fibrorinforzati, sono stati confezionati dei pannelli (UNI EN 14488-1), sia prima che dopo l'aggiunta del silicato di sodio, maturati in condizioni di cantiere, da cui sono state estratte 3 carote ($d=100\text{ mm}$, $h=100\text{ mm}$, $h/d=1$) per la misura della massa volumica e della resistenza a compressione dopo 1, 7 e 28 giorni.

La massa volumica del calcestruzzo indurito risulta sostanzialmente uguale o tendenzialmente maggiore di quella dell'impasto di riferimento senza fibre indipendentemente dalla stagionatura e dalla presenza o meno dell'accelerante. Mentre, con l'aggiunta dell'accelerante di presa e la proiezione del calcestruzzo, c'è una riduzione della massa volumica pari all'incirca al 2-6% rispetto a quella dell'impasto compattato a rifiuto, indipendentemente dal tempo di stagionatura e dal tipo di fibra.

Per quanto concerne lo sviluppo della resistenza a compressione del tempo (Fig. 11), si nota che dopo 1 giorno di maturazione, lo shotcrete (cal-

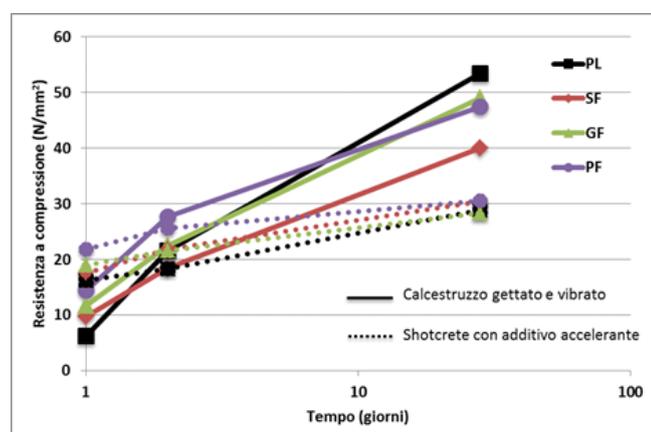


Fig. 11 – Sviluppo della resistenza a compressione nel tempo in funzione del tipo di fibra sia di calcestruzzi gettati che spruzzati con aggiunta di additivo accelerante di presa

cestruzzo spruzzato con aggiunta di additivo accelerante di presa) ha una resistenza maggiore di quella dell'analogo impasto confezionato senza silicato di sodio. Quindi, alle brevissime stagionature, l'accelerante di presa è in grado di compensare ampiamente l'incremento di porosità (diminuzione di massa volumica) derivante dalla proiezione del conglomerato, tanto che la resistenza meccanica a compressione dell'impasto con silicato di sodio risulta a 1g dal 50 all'85% circa maggiore di quella del betoncino senza l'accelerante. Al contrario, dopo 28 giorni, tutti gli impasti – indipendentemente dall'aggiunta delle fibre – additivati con l'accelerante di presa presentano una resistenza meccanica a compressione decisamente più bassa di quella dell'analogo impasto non additivato. In particolare, si nota come la diminuzione della resistenza a compressione sia strettamente legata alla percentuale di aggiunta dell'additivo accelerante (Fig. 10): maggiore il dosaggio di silicato di sodio, minore la resistenza a compressione. In sostanza, i dati di resistenza meccanica a compressione a 28 giorni indicano come i valori di questa caratteristica siano fortemente dipendenti non dal tipo di fibra, ma dal dosaggio dell'additivo accelerante di presa. In linea di massima, si può anche stimare la penalizzazione della resistenza direttamente attribuibile all'accelerante e quella, invece, associabile con la diminuzione di massa volumica conseguente all'operazione di proiezione del betoncino.

Si tenga conto che:

1. la penalizzazione della resistenza per effetto della proiezione è del 5% circa per ogni punto percentuale di diminuzione della massa volumica;
2. la diminuzione della massa volumica del calcestruzzo è risultata compresa nell'intervallo 2÷6%.

Conseguentemente, la diminuzione della resistenza per effetto della proiezione dovrebbe essere all'incirca pari al 10÷30%. Pertanto, essendo la diminuzione della resistenza complessivamente compresa tra il 25 e il 45% circa, si deve concludere che l'effetto dell'accelerante di presa sulla diminuzione della resistenza meccanica a compressione è stimabile all'incirca in un 15%. In sostanza, i dati confermano che la penalizzazione delle resistenze meccaniche a compressione sono strettamente correlate sia alle modalità di posa in

opera (proiezione) che al dosaggio di additivo accelerante di presa a base di silicato sodico più che al tipo e al dosaggio di fibre impiegate.

Infine, sono stati confezionati pannelli (600x600mm) di shotcrete fibrorinforzato additivato con il silicato di sodio per valutare l'energia di deformazione), in accordo alla norma UNI EN 14488-5. I risultati (Fig. 12) indicano che tutti gli shotcrete superano il valore di 500 Joule, requisito minimo richiesto da normativa, dopo 28 giorni. In particolare, il valore minimo viene conseguito anche dalle fibre in polipropilene nonostante il dosaggio di queste fibre nella ricerca condotta fosse inferiore a quello del vetro e dell'acciaio.

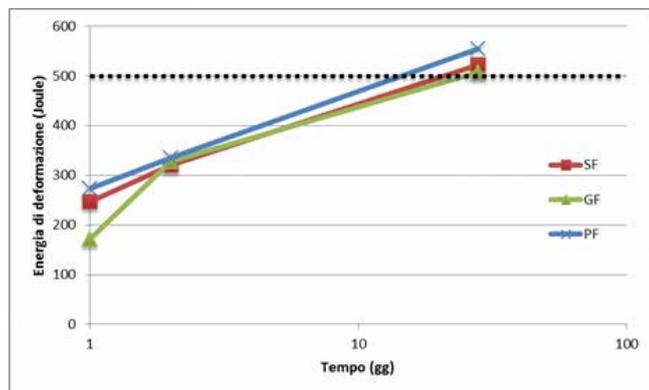


Fig. 12 – Energia di deformazione nel tempo per shotcrete fibrorinforzati con additivo accelerante di presa

Le prove di punzonamento indicano che il valore minimo dell'energia di deformazione viene conseguito soltanto dopo 28 giorni di maturazione. E' probabile che la scadente qualità della matrice conseguente all'utilizzo dell'accelerante di presa abbia ridotto l'aderenza fibra-matrice penalizzando le prestazioni del betoncino spruzzato fibrorinforzato.

Sulla base dei risultati di un'indagine sperimentale condotta tesa a valutare le prestazioni reologiche e meccaniche di calcestruzzi rinforzati e con fibre di diversa natura, è possibile concludere che:

- L'aggiunta delle fibre, indipendentemente dal dosaggio e dalla loro natura, non influenza la massa volumica del fresco, lo slump ed il mantenimento della lavorabilità nel tempo rispetto ad un calcestruzzo non fibrorinforzato.
- Esiste una proporzionalità inversa tra il dosaggio di additivo accelerante di presa e lo sfrido: maggiore la percentuale di silicato di sodio, minore sarà lo sfrido. Inoltre, la percentuale di materiale che rimbalza non è correlata al tipo e dosaggio di fibre utilizzato.

- Lo sviluppo della resistenza compressione è fortemente influenzato dall'aggiunta dell'additivo accelerante di presa. Dopo 1 giorno, la resistenza a compressione è maggiore per gli shotcrete, in quanto l'aggiunta dell'additivo accelerante è in grado di compensare la penalizzazione dovuta alla proiezione a spruzzo. Al contrario, dopo 28 giorni, la resistenza è maggiore per i calcestruzzi gettati senza silicato di sodio di circa un 25÷45%. La minore resistenza dei betoncini proiettati additivati con l'accelerante di presa è attribuibile per un 10÷30% alla modalità di getto (proiezione) e per un 15% circa all'aggiunta dell'additivo dell'accelerante di presa.
- A causa dell'aggiunta dell'additivo accelerante di presa, si ha una riduzione dell'aderenza fibra-matrice, che inevitabilmente riduce la tenacità e l'energia di deformazione del composito, che raggiunge il valore minimo richiesto da normativa (di 500 Joule) soltanto dopo 28 giorni di maturazione.

BIBLIOGRAFIA

- Coppola L., Cadoni E., Forni D., Buoso A. (2011). "Mechanical Characterization of Cement Composites Reinforced with Fiberglass, Carbon Nanotubes or Glass Reinforced Plastic (GRP) at High Strain Rates", *Applied Mechanics and Materials* Vol. 82 190-195.
- Collepari M., Coppola L., Moriconi G. (1991). "Durabilità di Calcestruzzi Rinforzati con Fibre in Poliaccrilonitrile", *L'Industria Italiana del Cemento*, 657, 489-494.
- Coppola L. (2008). "Il manuale del calcestruzzo di qualità", pp. 350, Il Sole 24 Ore, Milano, Italia, ISBN 978-88-324-7027-7.
- Zeidler K., Jäger J. (2007). "Fiber reinforced shotcrete for tunnel linings", *Recent Advances in Concrete Technology*.
- Coppola L. (2001). "Rheology Proportioning and Properties of Self-Compacting Concretes", *Proc. Self Compacting Concrete for Tunnel Linings*, Sargans, Switzerland.
- Zaffaroni P., Pistolesi C., Dal Negro E., Coppola L. and Collepari M. (2000). "High Performance Shotcrete", *Industria Italiana del Cemento*, 756, 598-605.
- L. Coppola, A. Buoso, F. D'Alessandro, (2013). "Comparative Evaluation of Steel, Glass and Polypropilene Fiber Reinforced Shotcretes for Tunnel Lining", *Proceedings of ACI Italy Chapter 3rd Workshop on "The New Boundaries of Structural Concrete"*, 165-174, Editors L. Coppola, R. Realfonzo, P. Riva, Bergamo, October 3-4, 2013, ISBN 978-88-904292-7-9.

INFLUENZA DEL VOLUME DI FIBRE SUL COMPORTAMENTO POST-FESSURATIVO DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO



Valeria Corinaldesi e Giacomo Moriconi

Università Politecnica delle Marche (Ancona)

v.corinaldesi@univpm.it - lg.moriconi@univpm.it



1. INTRODUZIONE

Gli elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) sono sempre più comuni. In effetti, le fibre di acciaio disperse nella matrice cementizia consentono di controllare la fragilità del calcestruzzo inducendo una qualche duttilità, oltre ad incrementarne durabilità e tenacità. L'aggiunta di fibre di acciaio al calcestruzzo non contribuisce significativamente a migliorarne il comportamento meccanico prima della fessurazione né la resistenza a compressione. I vantaggi indotti dall'aggiunta di fibre risultano evidenti solo dopo la fessurazione del calcestruzzo, dal momento che le fibre sono capaci di cucire le fessure, consentendo al calcestruzzo di sviluppare una resistenza residua. Tuttavia, questa resistenza residua dipende dal volume di fibre introdotto nella miscela del calcestruzzo (Velazco et al. 1980, di Prisco et al. 2009), condizionando il comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato, che risulta modificato da degradante ad incrudente quando il volume di fibre supera un valore critico.

In questo lavoro si sono utilizzate fibre di acciaio uncinato con diversi dosaggi per valutare il loro effetto sul comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato con classe di resistenza sia bassa che alta. Per tutte le miscele preparate è stata sempre garantita la stessa lavorabilità allo stato fresco variando il dosaggio di additivo superfluidificante, mentre allo stato indurito le miscele sono state caratterizzate mediante prove di compressione, trazione e flessione.

In ogni caso, a parità di classe di resistenza del calcestruzzo, è stata ottenuta sempre la stessa resistenza di prima fessurazione indipendentemente dal dosaggio di fibre. Peraltro, sono stati osservati comportamenti post-fessurativi sia degradanti sia

incrudenti diversi in funzione del volume di fibre aggiunto. Per definire questo effetto, è stata valutata la tenacità per ogni miscela di calcestruzzo. Sulla base dei risultati ottenuti è stato possibile identificare il volume critico di fibre, finalizzato all'ottimizzazione del progetto degli elementi strutturali.

2. PARTE SPERIMENTALE

Il calcestruzzo è stato confezionato con cemento tipo CEM II-A/L 42.5 R, sabbia naturale (0-6 mm) e pietrischetto (5-15 mm) combinati secondo Bolomey. Inoltre, si sono adottati due diversi rapporti acqua/cemento, pari a 0,55 e 0,35, in modo da ottenere due diverse classi di resistenza, rispettivamente C25/30 e C50/60. Alla miscela del calcestruzzo a più alta resistenza è stato aggiunto un superfluidificante (poliacrilistere carbossilico in soluzione acquosa al 30%) dosato dell'1.2% in peso del cemento, come additivo riduttore d'acqua per limitare la quantità di cemento. Considerando la perdita di lavorabilità dovuta all'aggiunta delle fibre, in questo caso l'additivo superfluidificante ha anche consentito di raggiungere la stessa lavorabilità allo stato fresco di tutte le altre miscele, con slump pari a 160 mm.

Sono state utilizzate fibre di acciaio uncinato conformi alla norma UNI EN 14889-1, le cui caratteristiche tecniche sono riassunte nella Tabella 1.

Tabella 1 – Dati tecnici delle fibre di acciaio

Lunghezza	30 mm
Diametro	0,50 mm
Rapporto d'aspetto	60
Resistenza a trazione	> 2500 MPa
Allungamento	< 1%
Modulo elastico	190 GPa

Inoltre, le fibre erano del tipo ottonato allo scopo di prevenire l'ossidazione dell'acciaio e di migliorare l'aderenza fra fibra e matrice cementizia.

Sono stati esaminati dosaggi di fibre pari a 10, 30, 50, 70 e 90 kg/m³ per il calcestruzzo con classe di resistenza C25/30, e dosaggi pari a 30, 40, 50 e 60 kg/m³ per la classe C50/60.

Per ogni miscela di calcestruzzo si sono confezionati provini prismatici (10×10×50 cm) intagliati al centro (profondità dell'intaglio di 25 mm) per le prove di flessione, e provini cubici (10×10×10 cm) per le prove di compressione e trazione. Tutti i provini di calcestruzzo sono stati stagionati in condizioni umide a 20°C fino al momento della prova. Le prove di compressione sono state effettuate dopo 1, 7 e 28 giorni di stagionatura, mentre le prove di trazione e flessione sono state effettuate solo dopo 28 giorni di stagionatura.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 - Resistenza a compressione

La resistenza a compressione è stata valutata su provini cubici fino a 28 giorni di stagionatura umida in accordo alla norma UNI EN 12390-3. In Tabella 2 sono riportati i valori medi ottenuti a 28 giorni da tre provini per tipo di miscela di calcestruzzo fibrorinforzato, che dimostrano il conseguimento della classe di resistenza progettata indipendentemente dal dosaggio di fibre nella miscela stessa. In Figura 1 viene mostrato lo sviluppo della resistenza nel tempo, dal quale si può osservare, come peraltro atteso, che l'aggiunta di fibre, a qualsiasi livello e per qualsiasi classe di resistenza, non influenza significativamente la resistenza a compressione del calcestruzzo FRC.

Tabella 2 – Resistenza a compressione a 28 giorni dei diversi calcestruzzi FRC

Classe di resistenza (MPa)	C25/30					C50/60				
	Dosaggio di fibre (kg/m ³)	10	30	50	70	90	30	40	50	60
Resistenza a compressione media (MPa)		35.6	36.0	35.6	36.0	37.1	67.4	64.0	72.6	67.9
Resistenza caratteristica cubica (MPa)		30	30	30	30	30	60	60	67	60

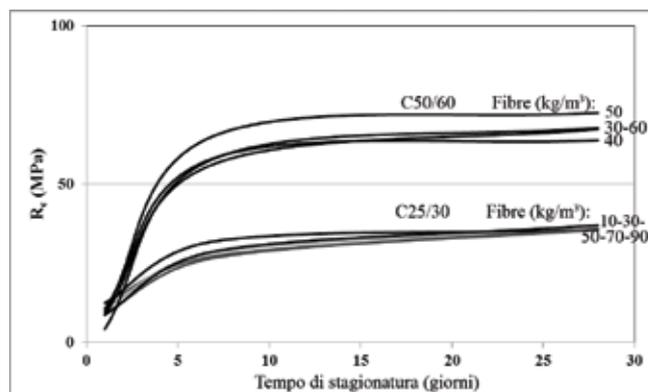


Fig. 1 – Sviluppo della resistenza nel tempo dei diversi calcestruzzi FRC

3.2 - Resistenza a trazione

La resistenza a trazione è stata valutata per via indiretta su provini cubici in accordo alla norma EN 12390-6. In Tabella 3 sono riportati i valori medi della tensione di prima fessurazione dopo 28 giorni di stagionatura umida. Anche in questo caso, come atteso, l'aggiunta di fibre di acciaio non modifica significativamente il massimo valore di resistenza a trazione per i diversi FRC.

Tabella 3 – Resistenza a trazione a 28 giorni per i diversi calcestruzzi FRC

Classe di resistenza (MPa)	C25/30					C50/60				
	Dosaggio di fibre (kg/m ³)	10	30	50	70	90	30	40	50	60
Resistenza a trazione		2.84	2.74	2.79	2.56	2.81	3.87	3.59	2.76	3.07

In Figura 2 sono riportate le curve sollecitazione-deformazione per trazione indiretta dei diversi FRC.

3.3 Prova di flessione su tre punti

La resistenza a flessione è stata valutata secondo RILEM TC 162-TDF (Vandewalle et al. 2003) sui provini prismatici dopo 28 giorni di stagionatura umida, calcolando la sollecitazione di trazione all'apice dell'intaglio. Nelle Figure 3 e 4 sono riportate le curve forza-deflessione per i calcestruzzi delle due diverse classi di resistenza. Queste curve confermano che l'aggiunta di fibre non modifica praticamente la sollecitazione di prima fessurazione, limitata dalle proprietà della matrice cementizia, ma consente comportamenti post-fessurativi

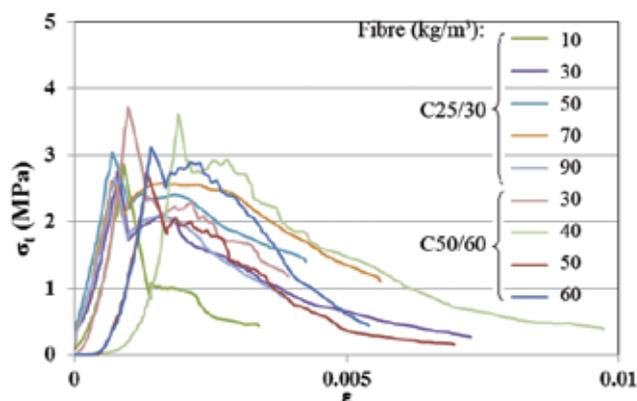


Fig. 2 – Curve σ - ε per trazione indiretta dei diversi FRC

del calcestruzzo fibrorinforzato diversi in funzione della quantità di fibre aggiunte. Questo comportamento è determinato proprio dalla presenza delle fibre, che entrano in funzione solo dopo la prima fessurazione del calcestruzzo svolgendo un'azione di cucitura delle fessure. Il risultato principale è un recupero di resistenza dopo la fessurazione che conferisce al calcestruzzo fibrorinforzato una maggiore duttilità rispetto ad un calcestruzzo ordinario, al contrario fragile, e la capacità di assorbire maggiore energia che si traduce in una maggiore tenacità del calcestruzzo FRC.

Tuttavia, il comportamento post-fessurativo del calcestruzzo FRC dipende dal dosaggio di fibre, rilevando per bassi volumi di fibre un comportamento degradante, che diviene incrudente con alti volumi di fibre aggiunti alla miscela del calcestruzzo, superiori ad un determinato valore critico.

Si può anche determinare la resistenza residua a trazione per flessione corrispondente alla tensione di fessurazione del calcestruzzo, come riportato in Tabella 4.

I numeri sulle curve indicano il dosaggio di fibre (kg/m^3).

Tabella 4 – Resistenza residua a 28 giorni per i diversi FRC

Classe di resistenza (MPa)	C25/30					C50/60				
	Dosaggio di fibre (kg/m^3)	10	30	50	70	90	30	40	50	60
Resistenza residua a trazione per flessione (MPa)		2.57	2.85	4.74	5.92	4.82	3.43	5.15	5.21	6.24
Resistenza a trazione (MPa)		2.84	2.74	2.79	2.56	2.81	3.87	3.59	2.76	3.07

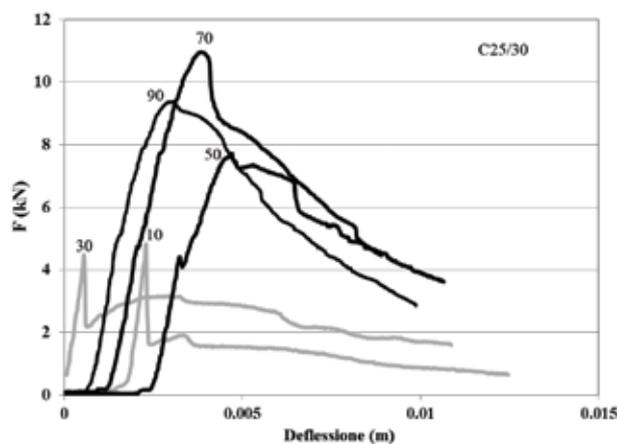


Figura 3 – Curve forza-deflessione per sollecitazione flessionale di FRC C25/30.

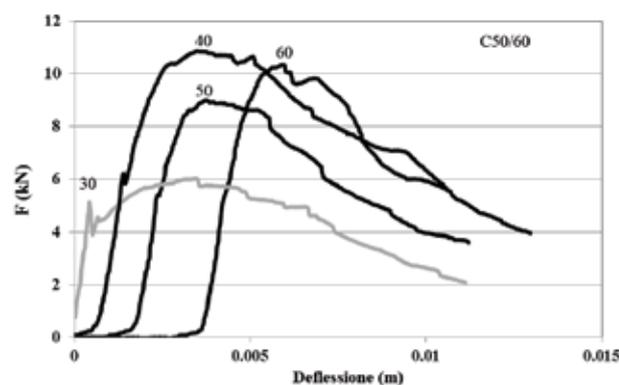


Figura 4 – Curve forza-deflessione per sollecitazione flessionale di FRC C50/60.

I numeri sulle curve indicano il dosaggio di fibre (kg/m^3).

Sia dalle Figure 3 e 4 sia dalla Tabella 4 è individuabile un valore critico del volume di fibre, corrispondente a 40 kg/m^3 indipendentemente dalla classe di resistenza di FRC, che chiaramente discrimina fra comportamento degradante e comportamento incrudente.

3.4 Incremento di tenacità

L'aumento di tenacità attribuibile all'aggiunta di fibre è stato valutato attraverso il rapporto fra le aree sottese dalle curve forza-deflessione nel campo post-fessurativo ed in quello pre-fessurazione. Quest'ultima area non è influenzata dall'aggiunta di fibre, mentre l'altra, limitata alla deflessione di $0,01 \text{ m}$, dipende prevalentemente dalla quantità di fibre disperse nella matrice

cementizia. Nella Tabella 5 sono riportati i fattori di incremento della tenacità dei diversi FRC determinati in questo modo.

Tabella 5 – Fattori di incremento della tenacità per i diversi FRC

Classe di resistenza (MPa)	C25/30					C50/60			
	10	30	50	70	90	30	40	50	60
Dosaggio di fibre (kg/m ³)									
Fattore di incremento della tenacità	7.3	33.0	46.2	47.2	29.4	35.7	41.5	37.4	39.0

Anche se i valori dei fattori riportati in Tabella 5 sono affetti dall'incertezza nella determinazione grafica della deformazione corrispondente alla sollecitazione di prima fessurazione, che li rende molto sensibili anche a piccole variazioni dei bassi valori dell'area sottesa nel campo pre-fessurativo, molto vicini fra loro, il benefico effetto sulla tenacità indotto da quantità crescenti di fibre nelle miscele dei calcestruzzi FRC appare facilmente riconoscibile.

4 CONCLUSIONI

Ipotizzando una relazione fra il volume di fibre aggiunto alla miscela del calcestruzzo e la tenacità indotta da questa aggiunta nel calcestruzzo fibrorinforzato, si è tentato di determinare il volume critico di fibre, capace di modificare il compor-

tamento del calcestruzzo FRC da degradante ad incrudente, analizzando il comportamento flessionale di calcestruzzi fibrorinforzati con quantità crescenti di fibre. Questo valore critico del volume di fibre sembrerebbe essere indipendente dalla classe di resistenza del calcestruzzo.

Come atteso, l'aggiunta di fibre non influenza significativamente la resistenza a compressione e trazione del calcestruzzo, ma contribuisce a modificare decisamente il comportamento post-fessurativo del calcestruzzo fibrorinforzato, manifestando un recupero di resistenza ed una certa duttilità indotta da un notevole aumento di tenacità.

BIBLIOGRAFIA

- Di Prisco M., Plizzari G., Vandewalle L. (2009). "Fibre reinforced concrete: new design perspectives", *Materials and Structures*, 42(9), 1261-1281.
- Vandewalle L. et al. (2003). "RILEM TC162-TDF: Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete: sigma-epsilon design method (final recommendation)", *Materials and Structures*, 36(262), 560-567.
- Velazco G., Visalvanich K., Shah S.P. (1980). "Fracture behavior and analysis of fiber reinforced concrete beams", *Cement and Concrete Research*, 10(1), 41-51.

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

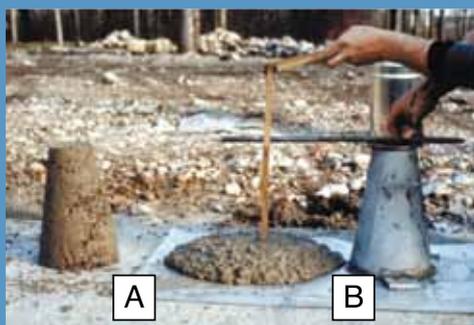
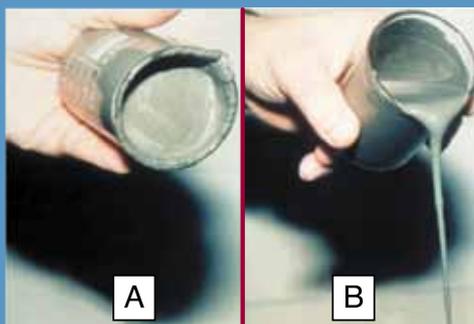
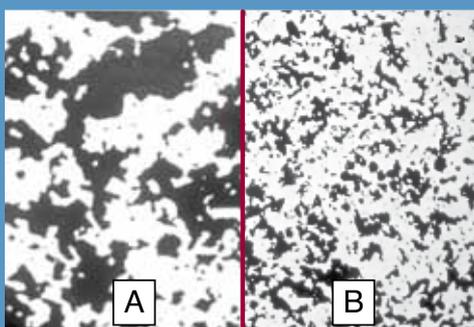
Ing. Alessandro Nardinocchi



SE VUOI CONOSCERE COME SI MIGLIORA IL CALCESTRUZZO

GLI ADDITIVI PER CALCESTRUZZO

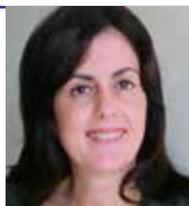
Come funzionano e come si impiegano



MARIO COLLEPARDI
ACI Honorary Member

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

L'USO DI FIBRE PER MINIMIZZARE L'INSORGERE DI FESSURE DA FENOMENI TERMICI



Vito Alunno Rossetti e Antonella Ferraro

www.clinicadelcalcestruzzo.it

1 - INTRODUZIONE

Allo scopo di indagare sulla possibilità di minimizzare o eliminare il ricorrente fenomeno di fessurazione su travi prefabbricate in c.a.p. “a cassoncino” da impalcato ferroviario utilizzate per la costruzione della linea dell’Alta Velocità in Italia è stata eseguita un’ampia sperimentazione [1] su prototipi di travi considerando in primo luogo l’impiego di calcestruzzi speciali e fibrorinforzati.

Il sistema fessurativo delle travi prodotte in stabilimento si è presentato generalmente sulle anime, in corrispondenza delle testate con una lunghezza fino a circa 30-40 cm e con un’apertura di qualche decimo di millimetro. Si ritiene che una causa importante di tale fessurazione sia da attribuire a fenomeni termici.

Il fenomeno si è manifestato sulla maggior parte delle travi indipendentemente dallo stabilimento di produzione, subito dopo il rilascio dei trefoli pretesi (fase in cui la sollecitazione di trazione si instaura al bordo della trave per effetto della precompressione [2], quando il calcestruzzo, dopo la maturazione naturale o a vapore, ha raggiunto la resistenza richiesta di 42 MPa.

Poiché la ricerca è stata svolta su travi già in produzione nello stabilimento della Sigma C di Ausonia (FR), si è esclusa a priori la possibilità di modificare in modo importante le sezioni, traendo il possibile beneficio dall’uso di calcestruzzo ad alta resistenza.

2 - PROGRAMMA DELLA SPERIMENTAZIONE

Sono state realizzate porzioni di travi prefabbricate e precomprese di lunghezza di 5 metri, (prototipi), corrispondenti ad una testata delle travi

della produzione corrente della MI-BO impiegando le seguenti tipologie di calcestruzzo:

- calcestruzzo normale Rck 55 MPa (la stessa miscela utilizzata sui cassoncini prefabbricati della Milano-Bologna che hanno presentato le fessure descritte),
- calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato,
- calcestruzzi con aggiunta di additivo espansivo,
- calcestruzzo ad alta resistenza fibrorinforzato Rck 125 MPa.

Inoltre sono state introdotte alcune modifiche strutturali: modifica della sezione mediante riragrosso della soletta inferiore, precompressione trasversale inferiore e superiore, aggiunta di rete metallica (si veda la seconda colonna della Tabella 2).

Nelle Figure 1 e 2 sono visibili la faccia anteriore e posteriore dei prototipi.



Figura 1 – La faccia anteriore di un prototipo con precompressione, longitudinale e trasversale inferiore



Fig. 2 – La faccia posteriore di un prototipo: le cavillature sono localizzate nella parte verticale nella posizione indicata

3 - STUDIO E MESSA A PUNTO DEI CALCESTRUZZI

La messa a punto dei calcestruzzi (escluso il calcestruzzo Rck 55) si è sviluppata in diverse fasi:

- mix-design delle miscele,
- realizzazione e prova delle miscele presso il Laboratorio del Centro Ricerche Buzzi Unicem (Guidonia, RM),
- messa a punto definitiva nello Stabilimento Sigma C Sud (Ausonia, FR).

3.1 - Calcestruzzo Rck 55

Per il calcestruzzo normale Rck 55 è stata adottata la miscela utilizzata nella realizzazione di travi precomprese di calcestruzzo della stessa classe, presso lo stabilimento della Sigma C che ha progettato e fatto costruire appositamente il cassero dei prototipi ed ha eseguito i getti.

Questa miscela, molto simile a quella impiegata per le travi a cassoncino della Milano Bologna, è stata scelta per utilizzare gli aggregati già presenti nello stabilimento in modo da facilitare le operazioni. La composizione riportata in tabella 1 mostra i materiali e le proporzioni adoperate.

3.2 - Miscela del calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato

La prima fase sperimentale in laboratorio ha interessato miscele con 400-500 kg di cemento per m³, con impiego anche di fibre di acciaio (Fibre Dramix della Bekaert, L = 30 mm, D = 0.62 mm dosate a 75 kg/m³), aggregato di diametro massimo di 12 mm e con maturazione a vapore; in

alcune è stato utilizzato fumo di silice a diverso dosaggio (0, 5, 10% in massa rispetto alla massa di cemento). I risultati delle prove a compressione hanno evidenziato che la maggiore resistenza a compressione a 14 ore si ottiene con miscele senza aggiunte di fumo di silice (la cui presenza migliora solo la resistenza a compressione a lungo termine, come del resto era prevedibile) e con contenuto più elevato di cemento.

A seguito delle indicazioni ottenute da questi risultati, si è proceduto alla messa a punto della miscela con le attrezzature e materiali di cantiere, che ha richiesto un'aggiunta del filler calcareo e una riduzione del contenuto di fibre a 60 kg/m³ per ottenere una lavorabilità soddisfacente (si veda la Tabella 1).

3.3 - Miscela fibrorinforzata ad alta resistenza: Rck 125 MPa

Per la formulazione della miscela per il calcestruzzo fibrorinforzato Rck 125 MPa si è proceduto inizialmente ad un'attività sperimentale di laboratorio, volta a realizzare un calcestruzzo con una resistenza molto elevata a compressione e flessione. A tal fine sono state realizzate tre miscele RPC, Reactive Powder Concrete o calcestruzzo a polvere reattiva [3] (su questo materiale uno degli autori aveva in precedenza svolto la sua Tesi di Laurea [4]).

Gli impasti sono caratterizzati da un alto contenuto di cemento (900 kg/m³), elevati dosaggi di additivo superfluidificante (13 kg/m³ di prodotto secco) e fumo di silice (~ 23% della massa del cemento), da sabbia finissima di quarzo (150 – 600 µm), silice precipitata e da microfibre di acciaio ottonato della Bekaert tipo “Dramix OL 13/16” (D = 0.16 mm, L = 13 mm).

Sono stati utilizzati oltre alla maturazione in condizioni normali (20°C U.R. 95%), anche un ciclo termico a vapore a 90°C di 6 h e una maturazione con trattamento termico a 160°C in autoclave, con ciclo di 6 h.

I valori della resistenza a compressione e flessione (valori medi di quattro provini per ciascuna condizione) sono risultati elevati, in particolare:

- nel caso di maturazione in condizioni normali

sono stati raggiunti, dopo 28 giorni, valori di resistenza a compressione di 150 MPa e di resistenza a flessione di 41 MPa;

- nel caso di maturazione a vapore a 90°C sono stati raggiunti, dopo 28 giorni valori di resistenza a compressione di 160 MPa e di resistenza a flessione di 45 MPa;
- nel caso di maturazione in autoclave sono stati raggiunti, dopo 28 giorni valori di resistenza a compressione di 210 MPa e di resistenza a flessione di 50 MPa.

Questa esperienza è stata il punto di partenza nella formulazione del mix-design del calcestruzzo Rck 125 (Tabella 1), per il quale era prevista, nelle condizioni di cantiere, una maturazione naturale e l'ottenimento di una resistenza a compressione abbastanza elevata al taglio dei trefoli (14 h), cercando inoltre di non accrescere eccessivamente il costo del conglomerato. È stato quindi diminuito il contenuto del fumo di silice che determina un aumento della resistenza a compressione a lungo termine, in parte a scapito di quella iniziale; è stato diminuito anche il contenuto di microfibre di acciaio (da 1,7% in volume a 1% in volume) che influenza in modo particolare la resistenza a flessione nonché la duttilità, ma soprattutto il costo del calcestruzzo. Inoltre, rispetto alla serie di miscele RPC di laboratorio, non si è ritenuto necessario l'impiego di materiali caratterizzati da particolari proprietà volte a contenere la richiesta di acqua: un cemento con contenuto di C3A nullo e bassa superficie specifica, fumo di silice con bassa

superficie specifica e assenza di incombusti.

4 - RISULTATI SPERIMENTALI

Vengono di seguito analizzati i risultati ottenuti in termini di:

- caratteristiche dei calcestruzzi alla produzione, caratteristiche meccaniche e di ritiro
- grado di fessurazione che ha interessato i prototipi.

4.1 - Proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco e indurito

Su tutta la produzione del calcestruzzo sono state eseguite prove, sia nel laboratorio di cantiere che presso laboratori esterni. Oltre alla misura della lavorabilità e ai cubi per la determinazione della resistenza a compressione a 28 giorni Rck e la resistenza a compressione al taglio dei trefoli Rckj (misura effettuata ad Ausonia salvo per i cubi del calcestruzzo Rck 125, che richiedendo una pressa di maggiore portata, sono stati schiacciati presso il Centro Ricerche Buzzi Unicem), nel corso del getto dei prototipi si è provveduto alla confezione di diversi provini, utilizzati successivamente presso il laboratorio GEOLAB di San Vittore del Lazio per la determinazione del modulo elastico, della resistenza a trazione indiretta e del ritiro, secondo la normativa UNI.

Le caratteristiche principali delle tre tipologie di calcestruzzo al momento del getto dei prototipi sono elencate nella Tabella 2.

TABELLA 1 - Composizione dei calcestruzzi utilizzati

Materiali	Rck 55		Rck 55 fibrinformato		Rck 125	
Sabbia di quarzo 0-0.4 mm	—	—	—	—	33.3	424
Sabbia fina 0-2 mm	15	266	22,5	388	33.3	425
Sabbia lavata 0-4 mm	42	751	36,5	631	33.3	418
Pietrischetto 8-12 mm	43	771	41	706	—	—
Filler calcareo	—	—	—	42	—	—
Cemento 52.5R	—	420	—	420	—	800
Fumo di silice	—	—	—	—	—	80
Superfluidificante a base di polycarbossilati eteri	—	5.3	—	9	—	38
Acqua	—	173	—	160	—	154
Fibre Dramix o microfibre OL*	—	—	—	60	—	76*
a/c**		0.42		0.40		0.23
Massa volumica		2386		2416		2415

** E' stato considerato il contenuto totale di acqua, incluso il quantitativo apportato dall'additivo (80% in peso del prodotto)

TABELLA 2 - Caratteristiche dei manufatti. Proprietà dei calcestruzzi allo stato fresco

Tipologia prototipo		Prot.	Tempo misc. min.	Slump	M.V. kg/m ³	Resistenza MPa		Taglio trefoli (h)
						Rckj	Rck	
Rck 55	Sezione normale	A1	4	20	n.d.	41,8	60,8	14
		A2		21	2391	40,7	55,8	16
	Sezione normale con precompressione trasv. inf.	E1	5	21	2372	41,6	63,3	16
		E2		20	2374	57,8	63,5	91
	Sezione normale con rete	P1	4	21	2371	55,6*	62,2	72
		P2		21	2373	23,3*	56,5	72
		P3		22	2350	54,0	62,6	36
	Sezione normale + Rete + precompressione tr. inf.	Q1	4	21	2343	46,4	59,3	38
	Sezione attuale + agente espans.	O1		21	2331	38,7	57,0	14
	Sezione piena	H1		22	2350	43,5	57,1	16
H2			22	2366	42,3	59,7	14	
Sezione piena precompressione trasv. inf. e sup.	K1	5	21	2361	41,6	58,8	14	
	K2	4	23	2352	36,2	53,3	14	
Rck 55 Fibro rinforzato	Sezione normale	B1	8	22	2406	48,1	67,6	14
		B2		23	2403	62,3*	71,8	60*
	Sezione normale + rete	N1		22	2434	62,0	75,5	38
	Sezione normale con precompressione trasv. inf.	F1		22	2450	46,6	78,2	14
		F2		24	2373	n.d.	66,4	14
	Sezione piena	I1		23	2453	49,2	75,1	14
		I2		23	2410	49,2	71,5	14
Sezione piena precompressione trasv. inf. e sup.	L1		22	2416	44,6	70,7	14	
Rck 125	Sezione normale	D1	10	—	2394	85,8	122,0	14

Nella Tabella 2 sono raccolti anche i risultati di resistenza ottenuti ad Ausonia cantiere; i valori di resistenza a compressione caratteristica Rck riportati sono stati ottenuti detraendo 8 MPa dai valori medi delle resistenze determinate sui provini prelevati all'atto del getto. I risultati a 28 giorni ottenuti presso il laboratorio INTEC sono riportati nella Tabella 3. Ciascuno dei valori tabellati è la media dei valori relativi a tre provini (per quanto riguarda la trazione indiretta i valori medi sono relativi a quattro provini per la prova a 14 h e a due provini per la prova a 28 d). Il tempo di scassero di 14 h non è stato sempre rispettato per esigenze di produzione.

4.1.1 - Caratteristiche meccaniche e ritiro

I calcestruzzi realizzati hanno raggiunto resistenze caratteristiche a compressione a 28 giorni

quasi sempre maggiori di quelle programmate.

L'incremento di resistenza a trazione a 28 giorni osservato con i calcestruzzi fibrorinforzati è consistente: si passa da poco più di 5 a 7.8 MPa per il calcestruzzo Rck 55 e a 11.8 MPa per il calcestruzzo Rck 125. Per quanto riguarda il modulo elastico si può notare come i valori misurati sono in accordo con i valori teorici proposti dall'EC 2 (Tabella 3).

Per quanto riguarda il ritiro, per i calcestruzzi normali ci si attende una riduzione del ritiro al ridursi dell'acqua di impasto. Nel nostro caso ciò si verifica con le miscele aventi Rck 55 ma non con il calcestruzzo ad alta resistenza Rck 125. Questo comportamento può essere però spiegato ricordando il fenomeno del ritiro autogeno che diventa via via più significativo al ridursi del rapporto acqua/

TABELLA 3 - Prove di laboratorio sul calcestruzzo

Calcestruzzo	Modulo elastico GPa				Trazione indiretta MPa			Ritiro µm/m			Rck MPa
	18 h	28 gg	EC (28 gg)*	90 gg	14 h	28 gg	180 gg	14 gg	28 gg	90 gg	28 gg
Rck 55 (K2)	34,3	40,1	36,8	40,5	2,5	5,1	3,8	297	299	416	57,8
Rck 55 fibroso (I2)	39,9	41,7	39,6	39,9	4,7	7,8	6,9	218	300	408	76,0
Rck 125 (D1)	43,1	45,1	45,9	44,6	11,4	11,8	13,0	312	384	476	126,5

* $E = 22(f_{cm}/10)^{0,3}$ con $f_{cm} = f_{ck} + 8$; f_{ck} è la resistenza caratteristica a compressione cilindrica; nel caso del calcestruzzo Rck 85 e Rck 125 è stato considerato $f_{ck} = 0,86 * Rck$

cemento al di sotto di 0,40 [6] anche in relazione al maggior contenuto di pasta di cemento presente nel calcestruzzo Rck 125 e di conseguenza al maggiore volume soggetto a ritiro autogeno.

4.2 - Fenomeni fessurativi

Osservando i manufatti in tempi diversi, prima e dopo il rilascio dei trefoli, nei giorni successivi allo scasso e durante la maturazione, si è notato che la maggior parte dei prototipi è stata interessata in testata da fenomeni di fessurazione, che dal punto di vista della loro localizzazione e per le loro caratteristiche morfologiche si presentano molto simili tra loro ed anche simili a quelle rilevate sui manufatti dell'Alta Velocità.

Quattro dei 22 prototipi realizzati non presentavano dopo 180 d nessuna fessura (le lesioni orizzontali sul manufatto realizzato con calcestruzzo Rck 125 sono in effetti riprese di getto e non fessure confrontabili con quelle presenti sugli altri manufatti). Inoltre, è importante segnalare che per alcuni prototipi le fessure sono state osservate già prima del rilascio dei trefoli dopo poche ore di maturazione.

4.2.1 - Rilevamento delle fessure

Nella Tabella 4 viene riportato, per ogni prototipo, il numero totale di fessure rilevate mediante microscopio portatile, le lunghezze e le ampiezze massime raggiunte, con le rispettive lunghezze totali di tutte le fessure presenti.

Viene riportato altresì, nell'ultima colonna, il valore w dell'apertura massima osservata, limitatamente ai casi in cui tale apertura è assente o non ha superato 0,1 mm (valore limite della Normativa).

5 - INFLUENZA DEI DIVERSI FATTORI SUL FENOMENO FESSURATIVO

Dal confronto tra prototipo di riferimento (sezione attuale, Rck 55) e quelli modificati (precompressione trasversale inferiore e superiore, aggiunta di rete, sezione piena, Rck 55 fibroso, Rck 125) è stato osservato quanto segue:

- la presenza di fibre riduce in misura apprezzabile il fenomeno della fessurazione: se si esclude il prototipo F2 che evidenzia dodici fessure, da considerare un dato anomalo, dei sette prototipi realizzati con il calcestruzzo Rck 55 fibrorinforzato, due non presentano fessure e in quelli che mostrano più di due lesioni queste hanno una lunghezza totale inferiore a quella dei manufatti realizzati con il calcestruzzo Rck 55 "normale" con lo stesso numero di fessure,
- il calcestruzzo Rck 125 di composizione e caratteristiche non paragonabili a tutti gli altri, non è risultato fessurato. Questo calcestruzzo oltre che ad altissima resistenza è fibrorinforzato; la presenza delle microfibre di acciaio lo rende più duttile ed ostacola la propagazione delle microfessure, migliorandone di molto il comportamento,
- a pari classe nominale di resistenza, limitatamente ai calcestruzzi Rck 55 con dosaggio quasi identico di cemento, l'incremento di resistenza a compressione al taglio dei trefoli, Rck_j , cui certamente si accompagna un'accresciuta resistenza a trazione, risulta apprezzabilmente positivo (si veda la Fig. 3),
- in merito alle modifiche strutturali sembrerebbe che solo la precompressione trasversale inferiore e superiore (nel caso di sezione piena) contribuisce positivamente a limitare la formazione di cavillature: due dei tre prototipi esenti da fessure sono stati realizzati con sezione piena con precompressione trasversale inferiore e su-

TABELLA 5 - Caratteristiche delle fessure

Tipologia prototipo		Prot.	Taglio trefoli (h)	Fessure				
				N° fess.rilevte ad ore dal getto	Lungh. max ragg. (mm)	Ampiez. max ragg. (µn)	Lungh. Tot.	W ≤ 0,1 mm*
Rck 55	Sezione normale	A1	14	3 a 3-180 gg	125-380	50-100	1515	
		A2	16	3 a 14h/13-20-60 gg	235-685	80-120	1600	
	Sezione normale con precompressione trasv. inf.	E1	16	3 a 14h/7-14-42 gg	155-665	10-300	1020	
		E2	91	2 a 20-40 gg	40-280	10/60	440	0,06
	Sezione normale con rete	P1	72	1 a 5-20 gg	565	80	565	0,10
		P2	72	1 a 3-20 gg	445	80	445	0,10
		P3	36	1 a 3 gg	455	80	455	0,10
	Sezione normale + Rete + precompressione tr. inf.	Q1	38	4 a 5-20 gg	120-330	120-180	10	
	Sezione attuale + agente espans.	O1	14	2 a 5-20 gg	280-635	100-120	915	
	Sezione piena	H1	16	3 a 24 gg/20 gg	180-885	40-140	1645	
H2		14	1 a 3-20 gg	660	120	660		
Sezione piena precompressione trasv. inf. e sup.	K1	14	nessuna (oss.a 24h/3-5-15 gg)					
	K2	14	1 a 24h<73 gg	375	60	375	0,07	
Rck 55 Fibro rinforzato	Sezione normale	B1	14	3 a 37h/27gg	35-665	80-100	870	0,10
		B2	60*	nessuna (oss.a 24h/4-28-60 gg)				0,08
	Sezione normale + rete	N1	38	2 a 24h/10-20 gg	295-320	80-140	615	
	Sezione normale con precompressione trasv. inf.	F1	14	4 a 7-20-35 gg	25-255	40-180	740	
		F2	14	12 a 3-30 gg	30-400	200-400	2005	
	Sezione piena	I1	14	1 a 24h/75-25-40 gg	530	60	530	0,07
		I2	14	1 a 24h/3 gg	600	60	600	0,08
Sezione piena precompressione trasv. inf. e sup.	L1	14	nessuna (oss.a 24h/3-5-20 gg)					
Rck 125	Sezione normale	D1	14	nessuna				

*Con riferimento alle Norme Tecniche della L. 1086

periore. L'aggiunta di una rete elettrosaldata ha avuto effetti positivi solo nel caso della sezione attuale.

6 - CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati precedentemente esposti e discussi, si ritiene che l'utilizzo dei dati raccolti abbiano fornito indicazioni coerenti ed interpretazioni plausibili in merito ad alcune variabili che influiscono sui fenomeni fessurativi.

Diversi fra gli accorgimenti adottati, in particolare l'impiego delle fibre, l'introduzione della precompressione trasversale inferiore e superiore, l'aggiunta di rete elettrosaldata, hanno evidenziato

miglioramenti nel comportamento a fessurazione. Il calcestruzzo fibrorinforzato ha dato risultati molto buoni, in quanto dei tre prototipi non fessurati due appartengono a questa tipologia.

Il comportamento a fessurazione (per i calcestruzzi di classe Rck 55, fibrorinforzato e normale, con pari contenuto di cemento) migliora invece apprezzabilmente all'aumentare della resistenza a compressione Rckj al momento del taglio dei trefoli, risultata diversa da caso a caso in funzione del diverso tempo di maturazione trascorso. Questo risultato permette di prefigurare un sistema produttivo nel quale il taglio dei trefoli viene ritardato proprio in funzione dei fenomeni fessurativi.

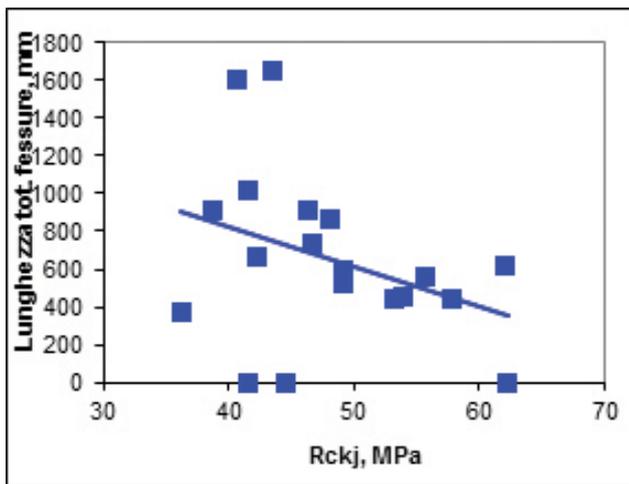


Fig. 3 – Fenomeno fessurativo in funzione di Rckj (per i prototipi con calcestruzzo Rck 55 e Rck 55 fibrorinforzato, valori nella Tabella 2)

7 - RINGRAZIAMENTI

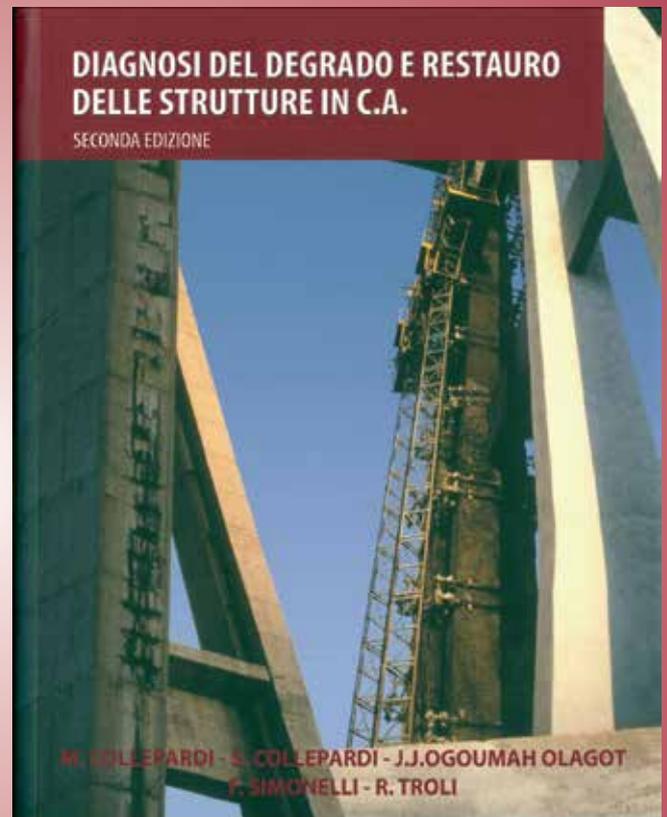
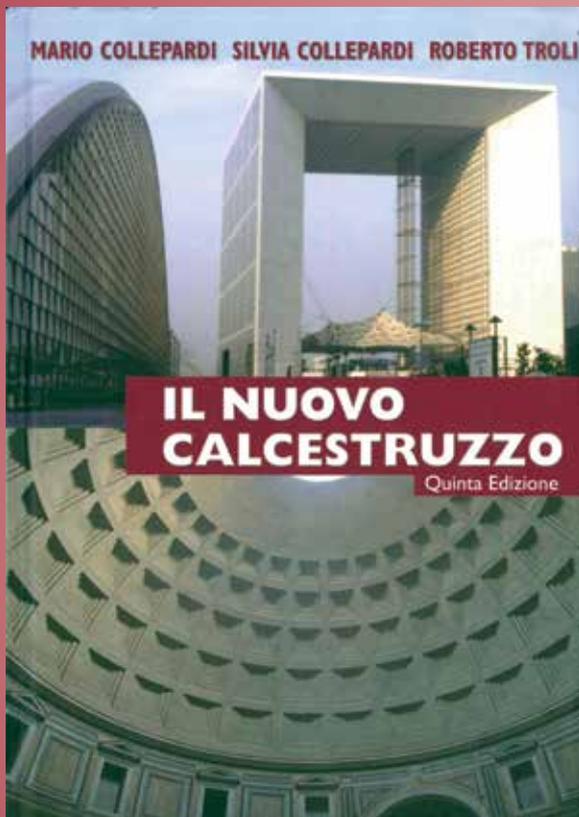
Gli autori desiderano ringraziare per la collaborazione e l'assistenza: la committente RFI e in particolare l'Ing. Mele e l'Ing. Ti Salvi; l'Ing.

Evangelista di Italferr; l'Ing. Pedrocco, l'Ing. Pinato e il Geom. Costanzo della Sigma C; il Geom. Gallo e l'Ing. Paris della Buzzi Unicem; il Geom. Piciacchia della Degussa.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] V. Alunno Rossetti, A. Ferraro, A. Lo Schiavo, Calcestruzzi ad alta resistenza e fibrorinforzati per ridurre la formazione di cavillature su travi in cap - Sperimentazione su prototipi, L'Industria Italiana del cemento, n 812, Sett. 2005, pagg. 630-642.
- [2] F. Leonhardt, C.a. & c.a.p. – Calcolo & tecniche costruttive, Ed. Scienza e Tecnica, 1980, pg. 75.
- [3] G.L. Guerrini, Applications of High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, Applied Composite Materials 7: 195-207, 2000.
- [4] A. Ferraro, Tesi di Laurea - Materiali compositi innovativi a matrice cementizia.
- [5] V. Alunno Rossetti, Il calcestruzzo – materiali e tecnologia, Ed. McGraw-Hill, 2007.

I libri



I SISTEMI BASF HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE PER LA RIPARAZIONE ED IL RINFORZO DI ELEMENTI IN CALCESTRUZZO



Marco Arduini* e Andrea Nicoletti**

*Co-Force srl - coforce@alice.it **BASF CC - andrea.nicoletti@basf.com

1. INTRODUZIONE

Dopo l'introduzione sul mercato di sistemi di rinforzo in materiale composito fibroso FRP alla fine del secolo scorso (linee Mbrace ed Mbar), la nuova sfida di BASF Construction Chemical è l'introduzione sul mercato di malte e betoncini duttili in trazione per la riparazione ed il rinforzo delle strutture in calcestruzzo.

L'idea di fondo è quella di rendere le malte ed i betoncini cementizi premiscelati espansivi all'aria della linea Emaco, già da tempo impiegati nell'edilizia, adatti anche all'assorbimento delle tensioni di trazione senza o con minor apporto di armatura metallica aggiuntiva.

Le ricerche sul conglomerato cementizio fibrorinforzato sono iniziate già negli anni '70 e '80, ma non si è mai giunti ad una definizione commerciale precisa, perché le miscele formulate avevano forti problemi applicativi: poca costanza nelle prestazioni, corrosione superficiale, formazione di bleeding e pesanti limiti normativi.

Con la pubblicazione delle raccomandazioni CNR DT 204 si sono fornite le basi progettuali necessarie per l'uso dei calcestruzzi High Performance Fiber Reinforced Concrete HPFRC e Ultra HPFRC.

BASF CC ha recentemente introdotto sul mercato due linee di prodotti specifici di tipo HPFRC con formulazione ideale per ottenere: costanza delle prestazioni, facilità di miscelazione, facilità di getto, riduzione del ritiro plastico, stabilità volumetrica a tempo infinito ed elevato comportamento a trazione. In questa memoria vengono presentati alcuni dati sperimentali, il metodo per l'identifica-

zione del legame costitutivo di calcolo in trazione ed alcune realizzazioni con queste tipologie particolari di prodotti.

2. DEFINIZIONI

La Fig. 1 illustra chiaramente i vantaggi di inserire fibre corte metalliche e non metalliche all'interno della matrice cementizia:

- A) nelle zone dove si formano le lesioni da trazione le fibre presenti si oppongono alla libera propagazione, il carico esterno deve crescere significativamente prima di ottenere lo sfilamento delle fibre dalla matrice e/o la rottura a trazione delle stesse fibre.
- B) l'aderenza matrice – armatura metallica è migliorata perché le fibre corte attorno alle armature evitano la propagazione di una singola grossa fessura, ma aumentano il numero di lesioni riducendone l'ampiezza, le armature interne, quindi, sfilano dalla matrice a carichi più elevati.
- C) la presenza delle fibre comporta anche una dut-

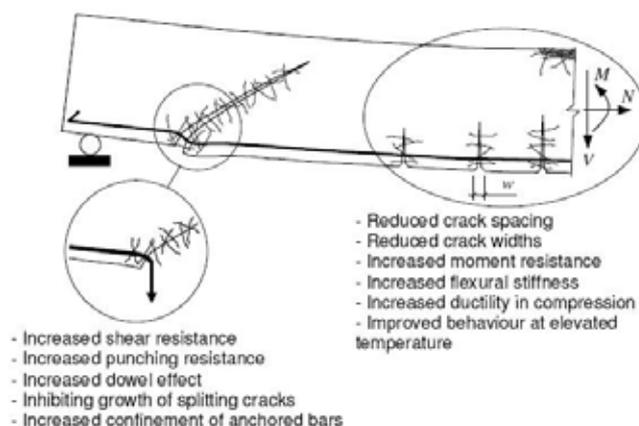


Fig. 1 – Il comportamento in trazione delle miscele cementizie fibrorinforzate e l'effetto di crack-bridging esercitato sulle linee di fessurazione

tilizzazione del calcestruzzo in zona compressa, non si manifestano più comportamenti fragili di spacco.

Nella prova di trazione uniassiale di un provino ad osso di cane, vedi Fig. 2, si ottiene un diagramma tensione – deformazione molto differente da quello delle miscele cementizie pure tradizionali. Raggiunto il valore di f_{ft} , dopo una prima fase di carico lineare, in funzione del quantitativo e del tipo di fibre presenti nella miscela, si può ottenere un comportamento di tipo incrudente (hardening) o discendente (softening). Nel primo caso si parla di malte/betoncini a comportamento duttile, nel secondo caso si parla di malte / betoncini a controllo dello stato fessurativo.

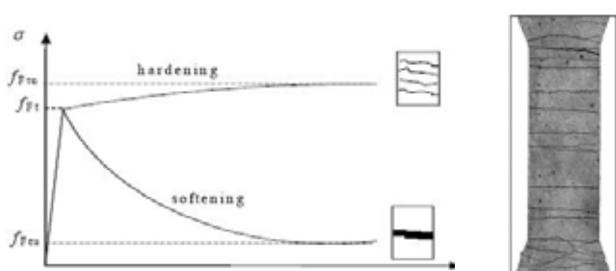


Fig. 2 – Tipici comportamenti post fase elastica

Tantissime sono le tipologie di fibre attualmente impiegate nelle miscele cementizie; la Tabella 1 presenta un elenco parziale, per esaltare la risposta in trazione si possono addirittura creare opportune

Tabella 1 – Le tipologie di fibre più comunemente impiegate nei calcestruzzi fibrorinforzati

Type of Fibre	Diameter [μm]	Specific gravity [g/cm ³]	Tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Ultimate elongation [%]
Metallic					
Steel	5-1 000	7.85	200-2 600	195-210	0.5-5
Glass					
E glass	8-15	2.54	2 000-4 000	72	3.0-4.8
AR glass	8-20	2.70	1 500-3 700	80	2.5-3.6
Synthetic					
Acrylic (PAN)	5-17	1.18	200-1 000	14.6-19.6	7.5-50.0
Aramid (e.g. Kevlar)	10-12	1.4-1.5	2 000-3 500	62-130	2.0-4.6
Carbon (low modulus)	7-18	1.6-1.7	800-1 100	38-43	2.1-2.5
Carbon (high modulus)	7-18	1.7-1.9	1 500-4 000	200-800	1.3-1.8
Nylon (polyamide)	20-25	1.16	965	5.17	20.0
Polyester (e.g. PET)	10-8	1.34-1.39	280-1 200	10-18	10-50
Polyethylene (PE)	25-1 000	0.96	80-600	5.0	12-100
Polyethylene (HPPE)	-	0.97	4 100-3 000	80-150	2.9-4.1
Polypropylene (PP)	10-200	0.90-0.91	310-760	3.5-4.9	6-15.0
Polyvinyl acetate (PVA)	3-8	1.2-2.5	800-3 600	20-80	4-12
Natural - organic					
Cellulose (wood)	15-125	1.50	300-2 000	10-50	20
Coconut	100-400	1.12-1.15	120-200	19-25	10-25
Bamboo	50-400	1.50	350-50	33-40	-
Jute	100-200	1.02-1.04	250-350	25-32	1.5-1.9
Natural - inorganic					
Asbestos	0.02-25	2.55	200-1 800	164	2-3
Wollastonite	25-40	2.87-3.09	2 700-4 100	303-530	-

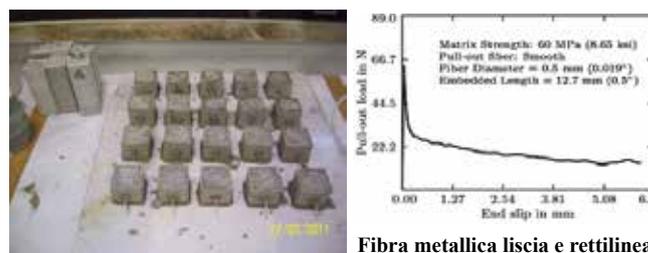


Fig. 3 – Alcuni provini per la prova di aderenza della fibra

miscela di fibre differenti. Le fibre sono classificate in base al rapporto d'aspetto, cioè il rapporto lunghezza / diametro equivalente (l_f/d_f). La prestazione in trazione ottenibile è significativamente influenzata dalla frazione volumetrica di fibre, V_f , dal rapporto d'aspetto, e dall'aderenza tra matrice e fibra; quest'ultima proprietà può essere modificata mediante: sagomatura della fibra (ad esempio ad uncino), presenza di trattamenti superficiali (rivestimenti o zigrinature), apporto di speciali polimeri nella miscela cementizia che favoriscono l'adesione di tipo chimico.

La misura dell'adesione delle fibre alla matrice cementizia si realizza con prove di pull-out di una singola fibra dalla miscela cementizia, vedi Fig. 3. Durante la prova si misura la forza necessaria per sfilare la fibra dalla matrice e lo scorrimento della stessa; i diagrammi carico – scorrimento hanno una forma molto variabile in funzione del tipo di fibra. Nel caso delle fibre metalliche rettilinee, ad esempio, si assiste ad uno sfilamento come indicato in Fig. 3 dx: nella prima parte della prova l'attrito radente non produce alcuno scorrimento, superata la soglia la fibra inizia a scorrere liberamente con una entità di forza che si assesta intorno al valore dell'attrito volvente tra i due materiali.

3. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI HPFRC A COMPORTAMENTO SOFTENING

La caratterizzazione si svolge con prove di flessione su provino prismatico intagliato o non intagliato; la normativa EN 14651 raccomanda la prova di flessione a 3 punti su provino intagliato, vedi Fig. 4. Il vantaggio dell'intaglio risiede nel fatto di

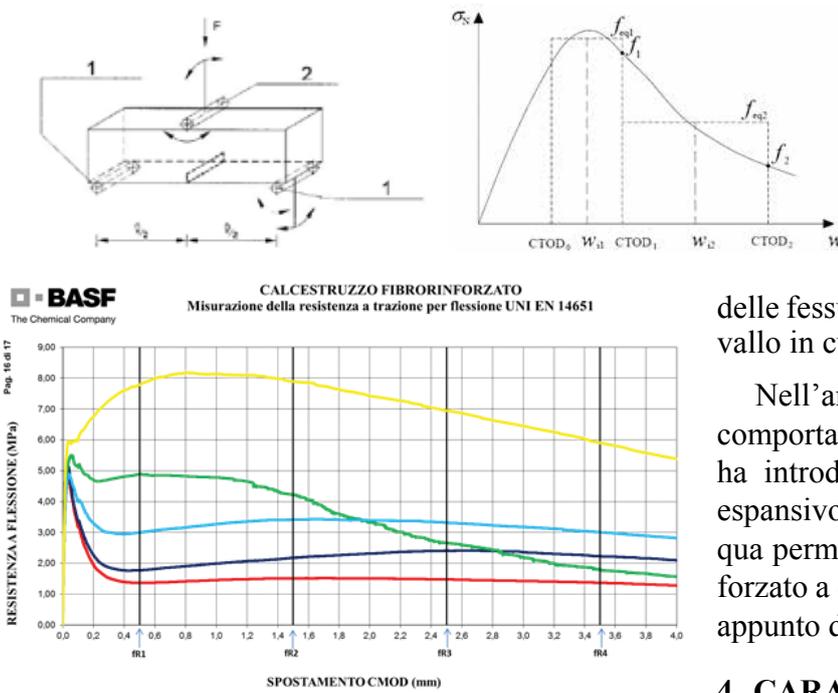


Fig. 4 – Le prove di flessione sec. UNI EN 14651 con dati sperimentali

poter assicurare la formazione di una sola fessura in una posizione definita e su un percorso definito (quello verticale). La curva tensione nominale $\sigma_N (= 6 \cdot P \cdot l / b \cdot h^2)$ – apertura della fessura w può, quindi, essere direttamente impiegata nella modellazione numerica, oppure, attraverso alcune semplici equazioni, si ottiene il legame costitutivo in trazione del calcestruzzo HPFRC che riproduce, con le leggi della meccanica al continuo, la reale risposta in flessione, vedi Fig. 5.

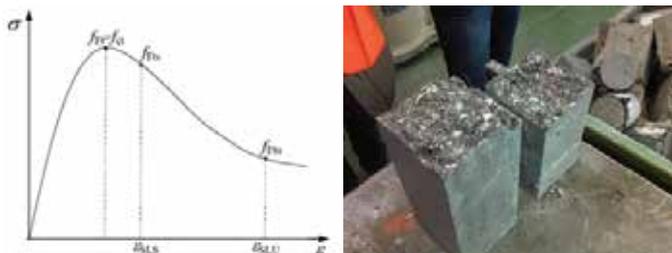


Fig. 5 – I diagrammi costitutivi in trazione

Nella trattazione semplificata del CNR DT 204, valida quindi per calcestruzzi fibrosi di tipo softening, i valori più importanti che definiscono la curva di Fig. 2.5 sono così desunti:

$$- f_{Fts} = 0.45 f_{eq1}$$

$$- f_{Ftu} = k \cdot \left[f_{Fts} \frac{W_u}{W_{i2}} \cdot (f_{Fts} - 0.5 \cdot f_{eq2} + 0.2 \cdot f_{eq1}) \right] \geq 0$$

- f_{eq1} e f_{eq2} sono, rispettivamente, le resistenze equivalenti post-fessurazione significative per lo stato limite di esercizio e per lo stato limite ultimo;
- k è un coefficiente da assumersi pari a 0.7 per sezioni interamente tese e pari a 1 negli altri casi;
- w_{i2} è il valore medio delle aperture delle fessure corrispondenti agli estremi dell'intervallo in cui è valutato f_{eq2} .

Nell'ambito dei materiali cementizi HPFRC a comportamento softening in trazione, BASF CC ha introdotto sul mercato uno speciale legante espansivo, che miscelato con sabbia, ghiaia ed acqua permette di ottenere un calcestruzzo fibrorinforzato a comportamento duttile a comportamento appunto di tipo softening.

4. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI HPFRC A COMPORTAMENTO HARDENING

Per calcestruzzi fibrosi a comportamento hardening la prova di flessione produce l'apertura di una o più fessure con andamento non sempre definito e per di più senza corrispondenza diretta tra il carico massimo e l'apertura della prima lesione, vedi Fig. 6. Per poter realizzare questo test occorrono macchine di prova a "controllo di spostamento": infatti, dopo la fase di caricamento iniziale, si attraversa una fase "ampiamente fessurata" dove si assiste a piccole cadute di carico, poi a successive riprese e così via.

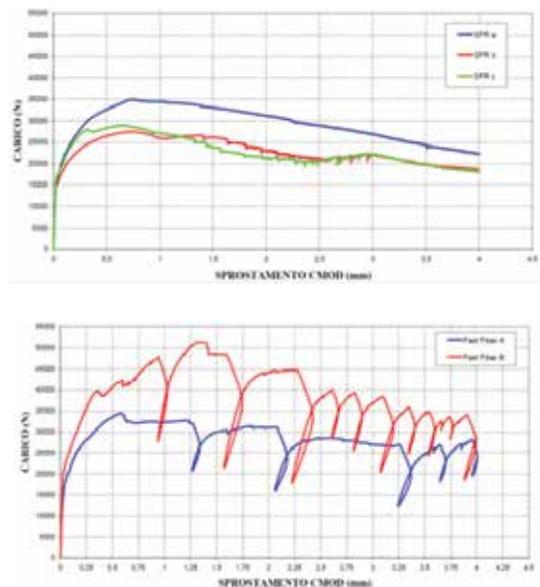


Fig. 6 – Le curve carico - apertura di fessura su provini intagliati di Emaco SFR ed Amaco Fast Fiber

Nell'ambito dei materiali cementizi HPFRC a comportamento hardening in trazione, BASF CC ha introdotto sul mercato due malte a colaggio: Emaco SFR ed Emaco Fast Fiber. Il primo prodotto ha una stagionatura di tipo normale, il secondo prodotto è estremamente rapido e può essere impiegato anche con temperature ambientali molto basse. Queste malte sono ideali per il ripristino ed il ringrosso di elementi in calcestruzzo per spessori centimetrici.

In un recente lavoro di Baby et al. (1) si è proposto un metodo semplice per l'esecuzione delle prove di flessione e la caratterizzazione precisa del legame carico-spostamento anche per calcestruzzi fibrosi di tipo hardening.

Si tratta di semplici prove di flessione su travetto non intagliato 50x50x430mm con i due coltelli di appoggio ad una distanza di 355mm e due punti di carico distanti 10cm. Il provino deve essere necessariamente snello, per indurre principalmente flessione senza comportamenti ad arco. All'intradosso nella zona soggetta a momento flettente costante sono installati due estensometri (trasduttori a punte) contrapposti. Il primo registra lo spostamento orizzontale tra la sezione di mezzeria e il punto di carico a sinistra, il secondo lo spostamento tra la sezione di mezzeria ed il punto di carico a destra. Si registra il diagramma deformazione media – deformazione dei singoli trasduttori e, in funzione del tipo di materiale saggiato, si possono ottenere tre tipologie di risultato, vedi Fig. 7.

Con questo tipo di misura il fenomeno della prima fessurazione si mostra in modo più evidente.

Nel caso in cui si formi una sola lesione si otterrà una risposta come quella di Fig. 7 a), nel caso in cui si formino più fessure durante la fase di caricamento si otterrà una risposta come quella di Fig. 7 b) e la localizzazione del crack sarà, ancora una volta, meglio colta. Altre tipologie di prodotto, invece, possono originare la forma di Fig. 7 c), si tratta di HPFRC aventi comportamento tendente alla perfetta elasto-plasticità in trazione, alla comparsa di una prima lesione si ha un complessivo aumento di curvatura circa a parità di carico che è però dovuto ad un incremento di ampiezza di lesione e ad uno scarico tensionale nelle zone limitrofe.

Dai dati sperimentali ottenuti su almeno 5 provini, si determina, in primis, la “risposta caratteristica”, cioè quella curva momento – deformazione in mezzeria che ha, per ogni deformazione crescente il valore di $M=M_{medio}-2.132 \text{ dev std}$.

Con questa curva si attua una “analisi inversa” che, partendo dalle classiche equazioni di equilibrio della sezione permette di identificare la forma

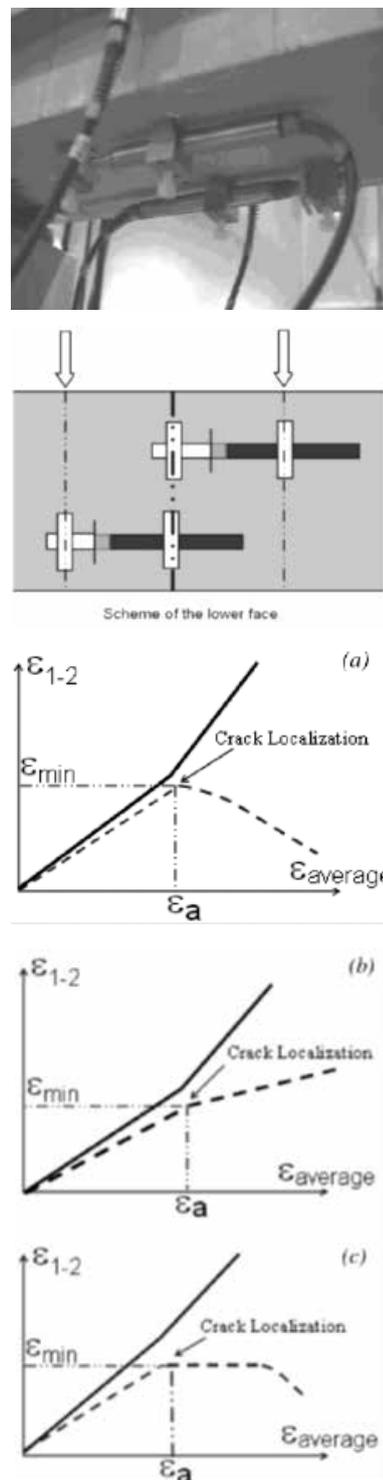


Fig. 7 – Le tre tipologie di acquisizioni possibili su provino inflesso non intagliato

del legame costitutivo in trazione in grado di riprodurre il dato sperimentale.

Questo processo di analisi ha permesso di identificare i legami costitutivi delle miscele prima definite, esse sono riportate in Fig. 8.

Questi legami costitutivi sono inseriti all'interno del software BASF per il dimensionamento dei rinforzi a flessione.

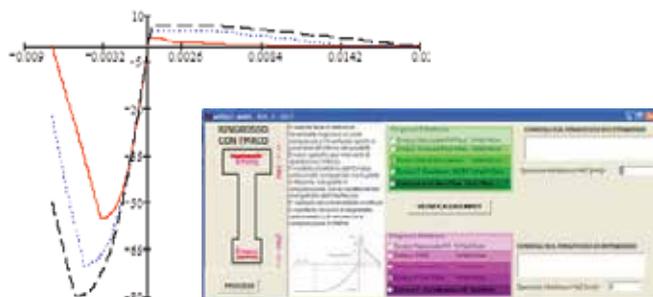


Fig. 8 – I legami costitutivi in trazione delle malte e dei betoncini BASF nel software prodotto da BASF

5. ESEMPI DI APPLICAZIONE

Le malte ed i betoncini fibrorinforzati duttili trovano svariati settori di applicazione.

Nelle costruzioni nuove possono essere impiegati per tutti quegli elementi strutturali soggetti a stati tensionali in più direzioni oppure negli elementi strutturali che devono possedere spiccate doti di duttilità: ad esempio nei confronti del sisma.

Nelle strutture esistenti possono essere impiegati per interventi di riparazione e/o di rinforzo.

In Fig. 9 si riporta il recente caso di ringrosso di pilastri prefabbricati di 60x60cm per l'adeguamento sismico di un importante centro commerciale. Nel caso in esame si è impiegato Emaco A660 FR per un ringrosso di 8-9 cm di spessore. Grazie



Fig. 9 - Il ringrosso di pilastri prefabbricati per l'adeguamento sismico dallo spiccato della fondazione con cls con EMACO A660 FR

allo specifico legame costitutivo del prodotto, alla grande adesione che esercita sia sul supporto che sulle armature, il diagramma momento resistente – curvatura del pilastro viene a modificarsi come indicato in Fig. 10, con un incremento dell'80% delle resistenze a flessione.

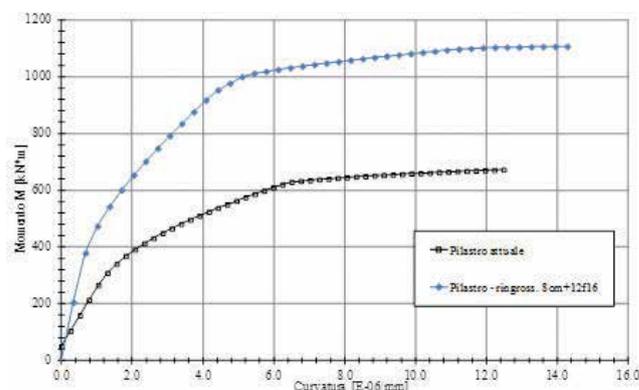


Fig. 10 – Momento resistente – curvatura delle sezioni originaria e rinforzata

In Fig. 11 si mostra un intervento di rinforzo su un tirante di una capriata in c.a. di notevole luce, eseguito con Emaco SFR; in questo caso la malta duttile è stata applicata con uno spessore di 5cm ad integrazione del copriferro fortemente degradato e ad integrazione delle staffature e delle armature fortemente corrose.



Fig. 11 – Il ringrosso con malta Emaco SFR dei tiranti degradati della capriata

6. Bibliografia

- [1] CNR DT 204 /2006 – Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato
- [2] F. Baby, B. Graybeal, P. Marchand, F. Toutlemonde - Proposed Flexural Test Method and Associated Inverse Analysis for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete - ACI Materials Journal/September-October 2012

CALCESTRUZZO AUTOCOMPATTANTE RINFORZATO CON FIBRE POLIMERICHE IBRIDE



Giovanni Mantegazza e Alessandra Gatti

Ruredil, San Donato Milanese

1. INTRODUZIONE

Con il termine di calcestruzzo autocompattante (SCC) si indica una nuova categoria di calcestruzzo prestazionale, in grado di essere messo in opera e di raggiungere i punti più difficili delle casseforme senza necessitare né di vibrazione né di alcuna forza esterna se non quella rappresentata dal peso proprio. Le medesime prestazioni devono essere richieste ad un SCC contenente fibre.

L'SCC è un calcestruzzo dotato di un'adeguata coesione tra gli inerti e la pasta di cemento che contemporaneamente impartisce un'elevata mobilità allo stato fresco e un'elevata resistenza alla segregazione sia durante la messa in opera sia a riempimento ottenuto del cassero, evitando così la sedimentazione degli aggregati grossi sul fondo e la conseguente risalita di acqua di bleeding in superficie.

Dal punto di vista della composizione i calcestruzzi autocompattanti presentano caratteristiche diverse rispetto ai tradizionali conglomerati cementizi, che principalmente consistono in: un maggior volume di materiale con finezza inferiore a 150 µm, un minor contenuto degli aggregati grossi per ridurre l'attrito interno, e nell'utilizzo di additivi modificatori di viscosità, in grado di conferire alla miscela la giusta reologia.

Il calcestruzzo autocompattante può essere schematizzato da un sistema costituito da due fasi di cui una – la pasta- costituisce il fluido trasportatore; l'altra, invece, costituita dagli aggregati rappresenta la fase "trasportata".

Pertanto la reale possibilità di confezionare un calcestruzzo autocompattante di elevata fluidità è

associata alla necessità di aumentare il volume di materiale finissimo introducendo un filler quali fly ash, silica fume o carbonato di calcio, che costituisce il fluido trasportatore, a scapito di un minor volume di aggregato grosso, che deve essere trasportato.

Per non pregiudicare le capacità di scorrimento del sistema, e al fine di limitare il volume d'acqua, occorre utilizzare un riduttore d'acqua ad altissima efficienza di tipo policarbossilico. Tuttavia, l'elevata stabilità ed assenza di bleeding viene conseguita introducendo un Additivo Moderatore di Viscosità (AMV) - tipo Ergomix VEA - che consente di lasciare sostanzialmente immutata l'elevata deformabilità garantendo un decisivo incremento della coesione del calcestruzzo. Nello schema, qui sotto riportato (Fig. 1 e 2), viene evidenziato il comportamento del calcestruzzo che fluisce attraverso le barre d'armatura utilizzando il modello del calcestruzzo autocompattante come sistema bifasico.

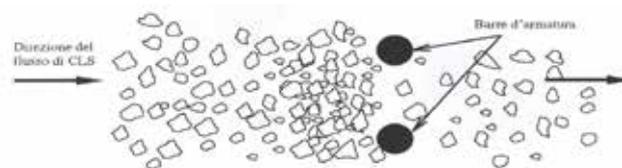


Fig. 1 - Schematizzazione del flusso del calcestruzzo ordinario superfluido attraverso le barre di armatura

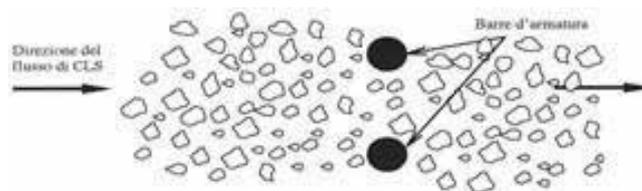


Fig. 2 - Schematizzazione del flusso del calcestruzzo autocompattante attraverso le barre di armatura

Nel flusso di un calcestruzzo superfluido (Fig. 1), all'approssimarsi di un restringimento di sezione all'interno del cassero (ferro d'armatura), la differenza di velocità degli aggregati e della "pasta" e l'aumento del numero di collisioni tra i granuli dell'aggregato provocano un notevole incremento della probabilità che il flusso si arresti (fenomeno di bloccaggio); al contrario, il calcestruzzo atocompattante (Fig. 2) possiede una elevata resistenza alla segregazione e conserva un'uniforme distribuzione di tutti gli elementi che lo compongono: cemento, filler, additivi ed acqua.

2 SCOPO DELLA RICERCA

Lo scopo di questa ricerca è quello di studiare le proprietà autolivellanti ed autocompattanti di particolari cls fibrorinforzati con fibre polimeriche ibride strutturali (HPFR-SCC), confrontando i risultati con i tradizionali SCC. In particolare si è voluto verificare se le fibre polimeriche strutturali riducono la fluidità e la lavorabilità nel tempo dei cls con esse confezionate. Quindi abbiamo sviluppato dei HPFR-SCC in cui le fibre sostituiscono in parte o totalmente il filler ed agiscono pertanto anche come agente coesivo, oltre a migliorare nettamente le proprietà meccaniche (duttilità) del cls. I migliori risultati in termini di reologia sono stati ottenuti impiegando un particolare tipo di additivo policarbossilico (comb-type superplasticizer) a catene polietere a lunghezza diversa. Infine sono in corso prove meccaniche (sforzo/deformazione-indici di duttilità, ecc.) confrontando un cls fibrorinforzato tradizionale con un SCC impiegando in entrambi i casi le fibre polimeriche ibride strutturali RXF54.

Il possibile utilizzo di questi HPFR-SCC può essere quello delle pavimentazioni civili ed industriali (slab on ground) e negli elementi prefabbricati quali lastre di copertura, tubi, fosse biologiche, canalette, ecc.

3 MATERIALI

3.1 Cementi:

- CEM II/B-S 32,5 R. Cemento portland alla loppa d'altoforno (tenore di loppa compreso tra 21 e 35%) conforme alla norma UNI EN 197-1
- CEM II/A-LL 42,5R. Cemento portland al calcare (tenore di calcare compreso tra 6 e 20%) conforme alla norma UNI EN 197-1

- CEM II/A-S 42,5R. Cemento portland alla loppa d'altoforno (tenore di loppa compreso tra 6 e 20%) conforme alla norma UNI EN 197-1
- CEM I 52,5R. Cemento portland conforme alla norma UNI EN 197-1

3.2 Filler:

Carbonato di Calcio, conforme alla norma EN 12620, con un passante percentuale al setaccio 63 μm > 85% e superficie specifica Blaine pari a 3350 cm^2/g .

3.3 Aggregati:

Gli inerti impiegati sono tre: due sabbie con diametro massimo 4 mm e modulo di finezza 2,54, ed una ghiaia con diametro massimo di 16 mm. Tutti gli inerti sono di origine alluvionale. Per le sabbie il passante percentuale al setaccio 0,125 mm è da ritenersi zero, pertanto esse non sono da considerarsi nel computo del contenuto totale di finissimi.

3.4 Additivi:

Superfluidificante policarbossilico "Comb-type superplasticizer-CtS" Tipo Ergomix CtS.

I CtS sono additivi policarbossilici raggruppati nelle 5 categorie di Tabella 1. La struttura molecolare di questi additivi è intermedia tra quella del gruppo I e IV di Tabella 1. È stato impiegato un nuovo additivo con catene di polietilene ossido (PEO) a lunghezza diversa (corta, inferiore a 15 moli e lunga superiore a 130 moli). Le lunghe catene sono state introdotte per aumentare la dispersione delle particelle di cemento secondo il noto meccanismo dell'ingombro sterico, e per aumentare le resistenze meccaniche alle brevi stagionature.

Quelle più corte, invece, influenzano direttamente la velocità di adsorbimento sulle particelle di cemento, in base al loro rapporto molare con i gruppi carbossilici della catena principale dell'additivo.

Superfluidificante policarbossilato tradizionale, con struttura molecolare del gruppo I (vedi Tabella 1).

Additivo modificatore di viscosità (AMV) a base di biopolimeri modificati, in grado di modificare la reologia del calcestruzzo autocompattante, aumentandone la capacità di resistere alla segregazione (allo stato di riposo).

4 STUDIO DELLE MISCELE SCC E HPFR - SCC

Sono state realizzate 4 tipologie di miscele: due destinate al settore pre-cast e due per il ready-mix.

- Miscela N°1- SCC tradizionale per pre-cast
- Miscela N° 2- HPFR-SCC per pre-cast
- Miscela N°3- SCC tradizionale per ready-mix
- Miscela N° 4-HPFR-SCC per ready-mix

Nelle miscele HPFR-SCC è stata usata la fibra a due diversi dosaggi volumetrici: 0,22 % e 0,28% (v/v). Inoltre non si è utilizzato il carbonato di calcio quale filler coesivizzante.

Le fibre vengono aggiunte durante il confezionamento del cls con gli inerti, per favorirne una perfetta dispersione. In generale la dispersione delle fibre nel calcestruzzo, dopo il suo confezionamento, è ostacolata dai prodotti di idratazione del cemento che tendono a concentrare le fibre solo in alcune parti del conglomerato, compromettendo le prestazioni meccaniche dell'impasto indurito.

Tabella 3 – Composizione delle miscele

	MISCELA 1	MISCELA 2	MISCELA 3	MISCELA 4
Sabbia fine (0,3/0,1 mm)	440 kg/m ³	440 kg/m ³	440 kg/m ³	440 kg/m ³
Sabbia (4,0/0,5 mm)	350 kg/m ³	350 kg/m ³	350 kg/m ³	350 kg/m ³
Ghiaia (16,0/5,0 mm)	810 kg/m ³	810 kg/m ³	810 kg/m ³	810 kg/m ³
Cemento	430 kg/m ³	430 kg/m ³	320 kg/m ³	320 kg/m ³
Carbonato di Calcio	115 kg/m ³	—	220 kg/m ³	—
Fibre	—	2,0 e 2,5 kg/m ³	—	2,0 e 2,5 kg/m ³
Acqua	195 kg/m ³	195 kg/m ³	175 kg/m ³	175 kg/m ³
Additivo super- fluidificante	1-1,1%	1-1,1%	1-1,3%	1-1,3%
Additivo mo- dificatore di viscosità	0,05%	—	0,05%	—

Per le miscele 1 e 2 (vedi Tabella 3), destinate al pre-cast, sono stati impiegati tre differenti cementi: CEM I 52,5R, CEM II/A-LL 42,5R e CEM II/A-S 42,5R.

Per le miscele 3 e 4 (vedi Tabella 3), destinate al ready-mix sono stati impiegati due tipi di cementi: CEM II/A-LL 42,5R e CEM II/B-S 32,5R.

5 DESCRIZIONE DELLE PROVE

Il programma delle prove si è articolato nella valutazione allo stato fresco di miscele autocompattanti, destinate al pre-cast ed al ready-mix, secondo quanto previsto dalla norma UNI 11040 “Calcestruzzo autocompattante. Specifiche, caratteristiche e controlli”.

Nello specifico la reologia degli impasti è stata valutata secondo la UNI 11041 - Determinazione dello spandimento e del tempo di spandimento, la UNI 11043 - Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad L ed, in alcuni casi, secondo la UNI 11042 - Determinazione del tempo di efflusso dall'imbuto.

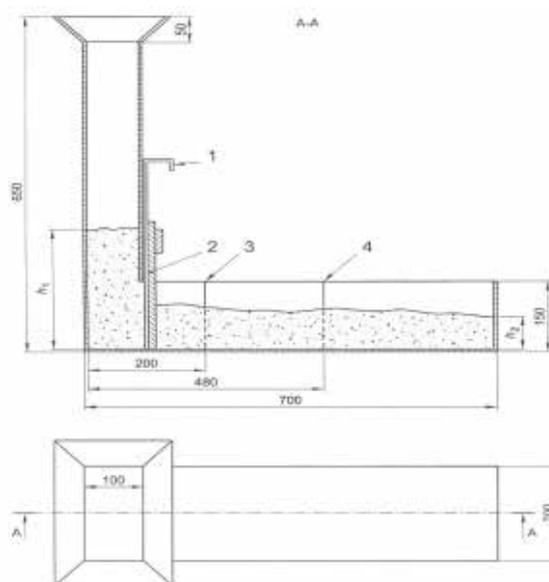


Fig. 3 - Schema di prova L-Box

5.1 Determinazione dello spandimento e del tempo di spandimento (Slump Flow)

La misura dello spandimento si effettua utilizzando il cono di Abrams, lasciando che il calcestruzzo fresco versato nel cono si spanda liberamente sulla base di appoggio.

La norma prevede di misurare il diametro medio di spandimento (> 600 mm) ed il tempo impiegato dal calcestruzzo per espandersi sino al diametro di 500 mm (< 12 secondi).

5.2 Determinazione del tempo di efflusso dall'imbuto (V-Funnel)

Il test fornisce indicazioni sulla deformabilità dell'impasto.

La prova consiste nella misura del tempo im-

piegato da un volume noto di calcestruzzo a fuoriuscire da un imbuto a forma di V di dimensioni stadardizzate.

Il tempo di efflusso deve essere compreso tra 4 e 12 secondi. La norma prevede la facoltà di effettuare una seconda prova in base alla quale, dopo un periodo di riposo del calcestruzzo nell'imbuto per 5 minuti, la differenza del tempo di efflusso dal valore iniziale non superi i 3 secondi.

5.3 Determinazione dello scorrimento confinato mediante scatola ad L (L-Box)

La prova valuta la capacità del calcestruzzo autocompattante a scorrere senza bloccarsi anche in prossimità di barre d'armatura (vedi Fig. 3). Occorre rilevare le due altezze H_2 ed H_1 in almeno tre diverse posizioni equidistanti, determinarne il valore medio e calcolare il rapporto H_2/H_1 . Tale valore deve essere $> 0,8$.

Ogni miscela è stata testata tre volte al fine di verificare la riproducibilità dei dati sperimentali ottenuti.

Per quanto riguarda le miscele HPFR-SCC (con fibre), si è apportata una modifica alla L-Box rispetto allo standard. In particolare l'ostacolo era costituito da due barre (anziché tre) di diametro 16 mm con luce libera di 56 mm (contro i 38 mm previsti).

Il motivo di questa modifica dipende dalla lunghezza della fibra (54 mm) per cui l'interspazio tra le barre (38 mm) sarebbe geometricamente non adatto, così come non lo sarebbe se usassimo un inerte con diametro superiore ai 25-30 mm.

Inoltre è giustificato aumentare la distanza tra le barre perché il cls fibrorinforzato con RXF54 viene impiegato per sostituire l'armatura lenta (reti e barre di acciaio-rinforzo secondario) nelle pavimentazioni slab on round, negli elementi prefabbricati quali coperture, tubi, box, canalette, ecc.

6 RISULTATI

6.1 Miscele per pre-cast

Le Tabelle 4,5 e 6 riportano rispettivamente i risultati ottenuti per le miscele 1 e 2 con le tre differenti tipologie di cementi. La prova di slump flow è stata ripetuta dopo 20 minuti per valutare il mantenimento della lavorabilità dei diversi impasti.

6.2 Miscele per ready mix

Le Tabelle 7 e 8 riportano rispettivamente i risultati ottenuti per le miscele 3 e 4 con i due differenti cementi. La prova di slump flow è stata ripetuta dopo 20 minuti per valutare il mantenimento della lavorabilità dei diversi impasti.

Come si evince dai dati riportati, l'introduzione delle fibre polimeriche strutturali consente la re-

Tabella 4 - Risultati prove per miscele realizzate con CEM I 52.5R

CEM I 52,5R									
	MISCELA 1			MISCELA 2			MISCELA 2-BIS		
Carbonato di Calcio	115 kg/m ³			=====			=====		
Fibre	=====			2,0			2,5 kg/m ³		
Acqua	195 kg/m ³			195 kg/m ³			195 kg/m ³		
Additivo superfluidificante	1%			1%			1,1%		
Additivo modificatore di viscosità	0,05%			=====			=====		
Slump Flow (mm)	770	800	780	790	780	780	750	750	700
Tempo di spandimento (s)	2,49	2,61	2,54	2,70	2,82	2,76	3,00	2,78	2,86
Slump Flow dopo 20 minuti (mm)	770	790	770	780	800	770	740	750	700
L-Box - H_2/H_1	0,88	0,90	0,86	0,83	0,83	0,85	0,83	0,84	0,81
V-funnel: Tempo di efflusso iniziale (s)	5,89	6,00	5,72	6,75	7,00	6,50	8,20	8,00	8,78
V-funnel: Tempo dopo 5 minuti (s)	7,09	6,50	6,86	8,46	8,23	8,18	9,93	9,26	10,78

Tabella 5 - Risultati prove per miscele realizzate con CEM II/A-LL 42,5R

CEM II/A-LL 42,5R									
	MISCELA 1			MISCELA 2			MISCELA 2-BIS		
Carbonato di Calcio	115 kg/m ³			=====			=====		
Fibre	=====			2,0			2,5 kg/m ³		
Acqua	195 kg/m ³			195 kg/m ³			195 kg/m ³		
Additivo superfluidificante	1,1%			1%			1,1%		
Additivo modificatore di viscosità	0,05%			=====			=====		
Slump Flow (mm)	730	750	770	560	580	560	550	570	570
Tempo di spandimento (s)	2,88	2,75	2,84	10,41	10,78	10,55	11,26	11,74	11,56
Slump Flow dopo 20 minuti (mm)	700	740	750	560	580	540	520	550	570
L-Box – H ₂ /H ₁	0,85	0,83	0,85	0,76	0,73	0,65	0,75	0,74	0,77

Tabella 6 - Risultati prove per miscele realizzate con CEM II/A-S 42,5R

CEM II/A-S 42,5R									
	MISCELA 1			MISCELA 2			MISCELA 2-BIS		
Carbonato di Calcio	115 kg/m ³			=====			=====		
Fibre	=====			2,0			2,5 kg/m ³		
Acqua	195 kg/m ³			195 kg/m ³			195 kg/m ³		
Additivo superfluidificante	1%			1%			1%		
Additivo modificatore di viscosità	0,05%			=====			=====		
Slump Flow (mm)	780	790	790	770	760	800	780	760	770
Tempo di spandimento (s)	2,75	2,80	2,70	2,93	3,26	3,16	3,28	3,33	3,56
Slump Flow dopo 20 minuti (mm)	780	790	780	760	760	780	770	770	770
L-Box – H ₂ /H ₁	0,89	0,85	0,87	0,84	0,86	0,86	0,83	0,83	0,85
V-funnel: Tempo di efflusso iniziale (s)	4,66	4,71	4,70	5,90	6,10	5,85	7,00	6,85	6,78
V-funnel: Tempo dopo 5 minuti (s)	5,70	5,23	5,18	7,05	7,26	7,06	8,26	8,21	8,07

alizzazione di calcestruzzi autocompattanti, senza l'impiego di filler e di additivo modificatore della viscosità.

Le prove di slump flow e della L-Box, entrambe fondamentali per valutare la capacità di riempimento, di resistenza alla segregazione e di scorrimento in presenza di fitte armature o variazioni di quote, sono degli indicatori della buona reologia degli impasti HPFR-SCC .

Per quanto riguarda i risultati ottenuti con il cemento CEM II/A-LL 42,5R per le miscele HPFR-SCC si suppone che vi sia un'influenza dell'additivo superfluidificante sulla composizione mineralogica del cemento. Riteniamo, comunque, incoraggianti, anche questi valori, i quali sono di poco inferiori ai limiti di accettazione prefissati dalla normativa.

Tabella 7 - Risultati prove per miscele realizzate con CEM II/A-LL 42,5R

CEM II/A-LL 42,5R									
	MISCELA 3			MISCELA 4			MISCELA 4-BIS		
Carbonato di Calcio	220 kg/m ³			=====			=====		
Fibre	=====			2,0			2,5 kg/m ³		
Acqua	175 kg/m ³			175 kg/m ³			175 kg/m ³		
Additivo superfluidificante	1,1%			1,1%			1,1%		
Additivo modificatore di viscosità	0,05%			=====			=====		
Slump Flow (mm)	760	790	780	580	550	570	540	550	550
Tempo di spandimento (s)	3,07	3,21	2,98	11,36	12,12	12,25	12,52	12,69	12,50
Slump Flow dopo 20 minuti (mm)	750	790	780	570	540	570	500	530	540
L-Box – H ₂ /H ₁	0,82	0,82	0,81	0,73	0,75	0,75	0,72	0,72	0,73

Tabella 8 - Risultati prove per miscele realizzate con CEM II/B-S 32,5R

Tabella 8 - Risultati prove per miscele realizzate con CEM II/B-S 32,5R

CEM II/B-S 32,5R									
	MISCELA 1			MISCELA 2			MISCELA 2-BIS		
Carbonato di Calcio	220 kg/m ³			=====			=====		
Fibre	=====			2,0			2,5 kg/m ³		
Acqua	175 kg/m ³			175 kg/m ³			175 kg/m ³		
Additivo superfluidificante	1,3%			1,2%			1,2%		
Additivo modificatore di viscosità	0,05%			=====			=====		
Slump Flow (mm)	800	780	780	760	770	770	780	780	780
Tempo di spandimento (s)	3,13	3,00	3,28	3,38	3,02	3,09	3,17	3,20	3,16
Slump Flow dopo 20 minuti (mm)	790	760	780	760	770	760	780	770	770
L-Box – H ₂ /H ₁	0,85	0,88	0,86	0,83	0,85	0,85	0,84	0,86	0,85
V-funnel: Tempo di efflusso iniziale (s)	5,21	4,96	5,20	5,80	5,68	5,77	6,32	6,66	6,48
V-funnel: Tempo dopo 5 minuti (s)	6,15	6,00	6,09	6,94	6,68	6,85	7,54	7,79	7,53

7 DISCUSSIONE

Da questi primi risultati sperimentali possiamo tracciare qualche considerazione, anche se non definitiva, sulle possibilità di realizzare degli HPFR-SCC senza l'impiego di parti fini.

L'introduzione delle fibre polimeriche strutturali non influenza particolarmente le proprietà reologiche degli impasti tranne che per le miscele

confezionate con il cemento CEM II/A-LL 42,5R, dove lo slump flow e la L-Box sono leggermente al di sotto dei limiti previsti dalla norma per un SCC.

I risultati ottenuti dipendono dal sinergismo di due fattori:

- l'impiego delle fibre che, oltre a conferire duttilità al calcestruzzo, agendo sulla tixotropia dell'impasto, svolgono l'azione di filler, so-

stituendosi ai tradizionali prodotti impiegati (carbonato di calcio, cenere da carbone),

- l'impiego di un particolare superfluidificante policarbonosilico in grado di disperdere completamente le fibre nell'impasto in modo che le fibre medesime possano agire in fase plastica come tixotropizzanti.

L'additivo superfluidificante utilizzato non è un additivo specifico per il confezionamento di calcestruzzi autocompattanti, pertanto non necessita di un additivo modificatore della reologia dell'impasto che agisca sul limite di scorrimento della pasta cementizia contrastandone la segregazione.

Inoltre il superfluidificante impiegato, è funzionale alle specifiche fibre polimeriche nel progettare una miscela caratterizzata da un'elevata fluidità allo stato fresco in assenza di segregazione che si muove senza necessità di vibrazione, ovvero una miscela "definibile" autocompattante.

L'HPFR-SCC così progettato può facilmente deformarsi/scorrere unicamente sotto l'azione del proprio peso senza separazione tra la matrice e le parti grossolane e grazie alla presenza delle fibre.

Sono in corso le prove meccaniche atte a valutare le eventuali differenze tra un tradizionale calcestruzzo fibroso e un HPFR-SCC impiegando le fibre polimeriche strutturali. Una differenza sostanziale tra i due calcestruzzi è l'assenza di vibrazione nel caso del SCC.

Dalle prime indagini, non sembra che l'assenza di vibrazione, che influenza l'orientamento delle fibre negli impasti, possa modificare le proprietà meccaniche di duttilità degli impasti induriti.

8 APPLICAZIONI

Le applicazioni di HPFR-SCC sono specialmente raccomandate nelle seguenti situazioni:

- la vibrazione non è possibile o estremamente difficile;
- la struttura è fortemente armata; occorre ottimizzare tempi e costi ;
- la struttura o gli elementi che la costituiscono devono essere estremamente duttili, assorbire energia sotto l'azione di forze esterne (carichi non previsti, eventi sismici, ecc.) ed essere altamente durabile.

Un esempio di HPFR-SCC è la produzione di lastre per travi di copertura (Fig. 4) mediante un

calcestruzzo autocompattante, il cui mix è riportato in tabella 9.

Tabella 9 – Composizione del calcestruzzo SCC standard e modificato

	MISCELA 1	MISCELA 2
Sabbia fine (0-4 mm)	795 kg/m ³	850 kg/m ³
Ghiaia (5-15 mm)	730 kg/m ³	680 kg/m ³
CEM 52.5R	400 kg/m ³	400 kg/m ³
Carbonato di Calcio	120 kg/m ³	—
Fibre	—	1,5 e 2,2 kg/m ³
Acqua	180 kg/m ³	180 kg/m ³
Additivo superfluidificante	1%	1,1%
Additivo modificatore di viscosità	0,06%	—

Lo schema delle armature è il seguente:

- un'armatura precompressa costituita da 5 treccie 3x3
- un'armatura lenta costituita da 20 barre \varnothing 6
- una rete di plastica geosintetica 10x10 cm, avente la funzione di trattenere il piede di un uomo in caso di sfondamento dei riquadri della lastrina, essendo stata progettata per essere pedonabile.

Il posizionamento delle rete geosintetica risulta alquanto laborioso ed inoltre crea impedimento durante il getto del calcestruzzo autocompattante nei casseri.

Per questo motivo, frequentemente, il manufatto presenta dei vuoti causati proprio dall'azione frenante della rete nei confronti dell'impasto e talvolta alcune lastre devono essere scartate.

La sperimentazione effettuata, che in seguito ha portato alla produzione seriale degli elementi prefabbricati, ha previsto la modifica del mix abitualmente impiegato (vedi Tabella 9) e la realizzazione di alcune lastre secondo il seguente schema:

- Miscela A (composizione del cliente): lastrina standard (armatura precompressa + armatura lenta + rete)
- Miscela B (composizione modificata Ruredil): lastrina con armatura precompressa + 2,2Kg di fibre polimeriche, senza armatura lenta, senza rete;

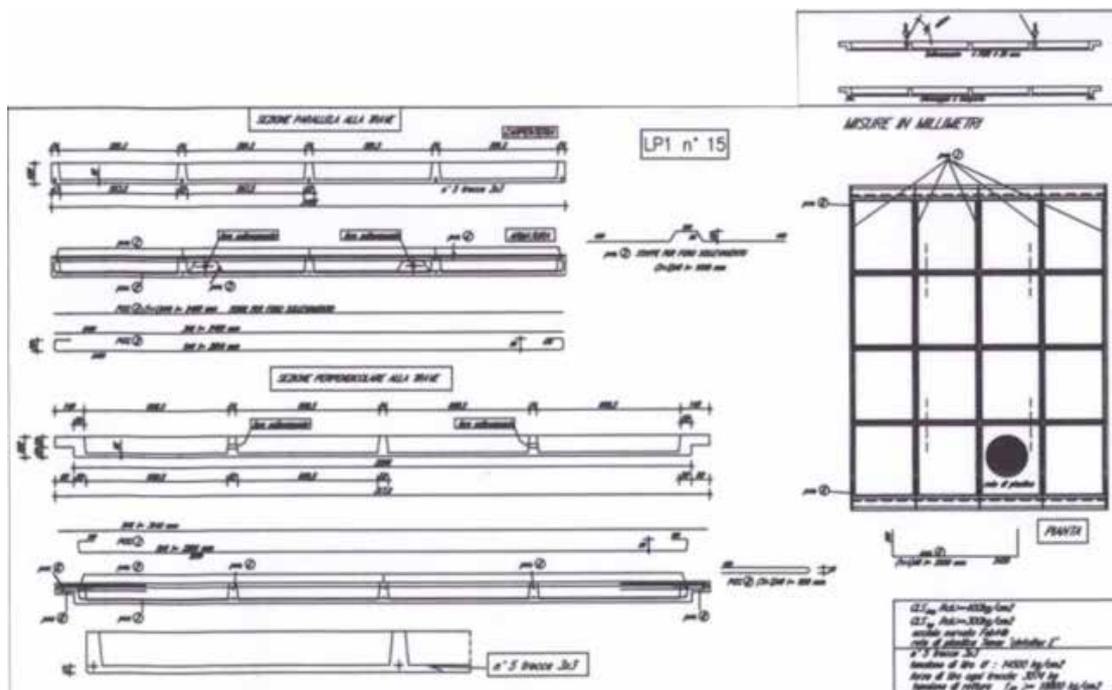


Fig. 4 - Schema progetto lastrine

- Miscela C (composizione modificata Ruredil): lastrina con armatura precompressa + 2,2Kg di fibre polimeriche + armatura lenta, senza rete;
- Miscela D (composizione modificata Ruredil): lastrina con armatura precompressa + 1,1Kg di fibre polimeriche + armatura lenta, senza rete.

La reologia degli impasti allo stato fresco è stata verificata mediante le prove di slump-flow test ed L-Box; mentre le prove di carico sono state effettuate dopo 28gg dal confezionamento dell'impasto, secondo una metodologia normalmente impiegata per verificare periodicamente gli effetti dell'armatura sulla duttilità dell'elemento.

In Tabella 10 sono riportati i valori medi (n° 4 getti per miscela) di slump flow ed L-Box delle miscele realizzate. Come si evince i valori misurati per i calcestruzzi SCC fibrosi sono border-line rispetto ai parametri prefissati dalla norma, ma nonostante ciò gli impasti sono stati gettati senza difficoltà operative ed gli elementi, una volta scasarati, non hanno presentato vuoti od altre imperfezioni.

I calcestruzzi autocompattanti fibrosi sono stati messi in opera senza evidenziare fenomeni d'attrito o frenanti ed inoltre non hanno necessitato di alcuna vibrazione addizionale.

Tabella 10 - Valori “medi” determinati per le diverse miscele

	MIX A	MIX B	MIX C	MIX D
Slump flow (mm)	760	600	580	690
Tempo di span-dimento (s)	3,01	5,45	6,00	3,18
Slump flow dopo 20 minuti (mm)	740	580	570	690
L-Box - H ₁ /H ₂	0,87	0,79	0,78	0,83

La misurazione della variazione della freccia è stata effettuata mediante tre flessimetri applicati lungo un lato della lastrina e secondo i seguenti steps:

- misura della freccia a carico zero;
- caricamento sulla lastrina fino a 215Kg (la norma prevede che la lastrina sopporti un carico puntuale di 200Kg) e misura della freccia a tale carico;
- scarico del peso e misura della freccia in fase di ritorno;
- nuovo caricamento sulla lastrina fino a 215Kg e misura della freccia a tale carico;
- incremento del carico fino a 315Kg e misura della freccia;
- determinazione del valore di carico a rottura ottenibile con le fibre polimeriche.

La prova di carico è stata considerata positiva

avendo rilevato che le fibre polimeriche impiegate, conferiscono un comportamento elastico agli elementi in cui sono state inserite, del tutto comparabile a quello della lastrina realizzata con lo schema tradizionale (armatura precompressa + armatura lenta + rete geosintetica).

Inoltre la rottura avviene sul riquadro interessato dal carico (rottura locale), non coinvolgendo l'intera struttura che si fessura ma non collassa, ed a un valore di carico di 650 Kg.

A fronte di quanto riscontrato durante la sperimentazione in cantiere, si è deciso di intraprendere la produzione seriale degli elementi utilizzando un calcestruzzo HPFR-SCC con fibre polimeriche strutturali.

I vantaggi economici/gestionali derivanti dall'impiego del calcestruzzo HPFR-SCC con fibre polimeriche strutturali sono stati i seguenti:

- 1) eliminazione totale del carbonato quale filler;
- 2) impiego di un unico additivo superfluidificante, anzichè due
- 3) eliminazione dell'armatura lenta e della rete geosintetica;
- 4) eliminazione della vibrazione con conseguente beneficio per le maestranze.

9 CONCLUSIONI

Un calcestruzzo autocompattante è tale da unire due caratteristiche che, solitamente, sono tra di loro antitetiche nella progettazione di un calcestruzzo superfluido.

Queste due caratteristiche sono:

- alta deformabilità della miscela (lavorabilità)
- alta resistenza alla segregazione

Ne consegue che i costituenti fondamentali di una miscela SCC sono i filler e l'additivo modificatore della viscosità.

L'impiego delle fibre ibride polimeriche strutturali nel confezionamento degli SCC, in abbinamento ad un additivo superfluidificante comb-type, ha consentito di realizzare, limitatamente ad alcune miscele, calcestruzzi le cui proprietà reologiche allo stato fresco sono "assimilabili" ad un calcestruzzo autocompattante.

Le miscele HPFR-SCC sottoposte alla prova di slump-flow, L-Box e V-funnel hanno evidenziato

comportamenti border-line rispetto ad una tradizionale miscela SCC: in molti casi i valori di slump-flow sono stati superiori a 700 mm (il valore minimo è 600 mm) ed il rapporto H2/H1 pari a 0,81 (contro un limite di 0,8).

Questi risultati ci stimolano a continuare ampliando la sperimentazione, variando la composizione con particolare riferimento al cemento, alla granulometria degli inerti ed ottimizzando, nel contempo, l'additivo superfluidificante più idoneo.

Sempre limitatamente ad alcune miscele, le proprietà reologiche tipiche di un calcestruzzo autocompattante sono state raggiunte: infatti le miscele HPFR-SCC hanno evidenziato la capacità di mantenere la propria composizione omogenea ed invariante sia in movimento sia in riposo, la capacità di scorrimento e deformabilità in presenza di ostacoli.

Sono in corso prove di carico-deformazione atti a confermare la duttilità che ci si aspetta da questi HPFR-SCC, in quanto non si hanno attualmente indicazioni di una distribuzione non omogenea e tridimensionale delle fibre polimeriche strutturali.

L'impiego di un nuovo polimero policarbossilato "Combo-type superplacizer-CtS-", caratterizzato dalla presenza di catene di ossido di polietilene diversa lunghezza, è stato funzionale e fondamentale nell'esplicare un'azione disperdente sulle fibre polimeriche.

Il percorso intrapreso con questa ricerca può aprire futuri scenari i cui sarà possibile progettare e realizzare diversi elementi o strutture mediante getti di calcestruzzi fibrosi, durabili, duttili e che non necessitano di vibrazione per la messa in opera.

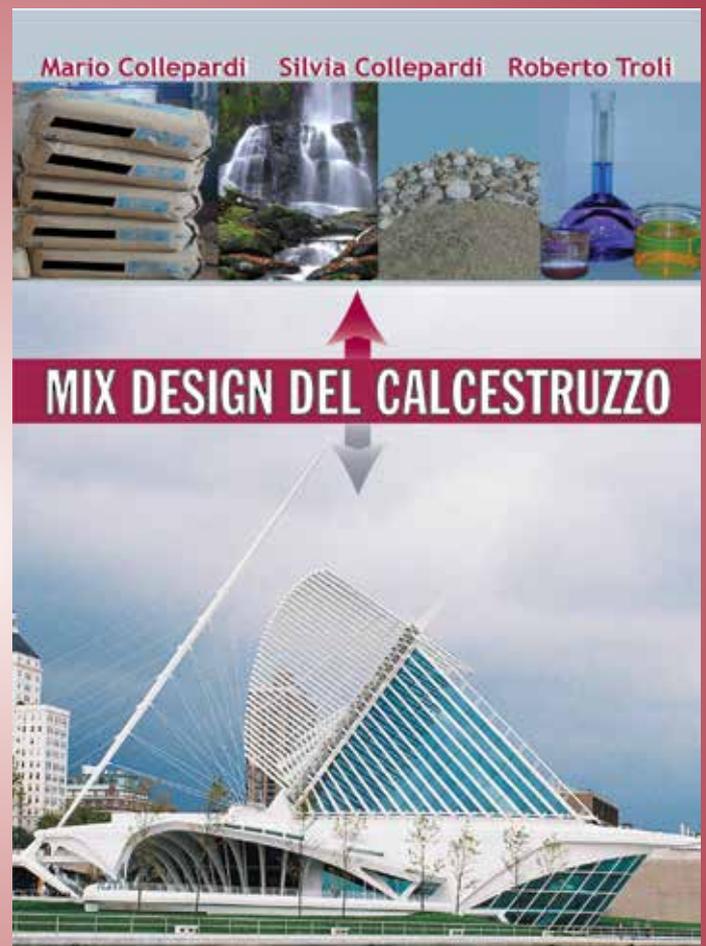
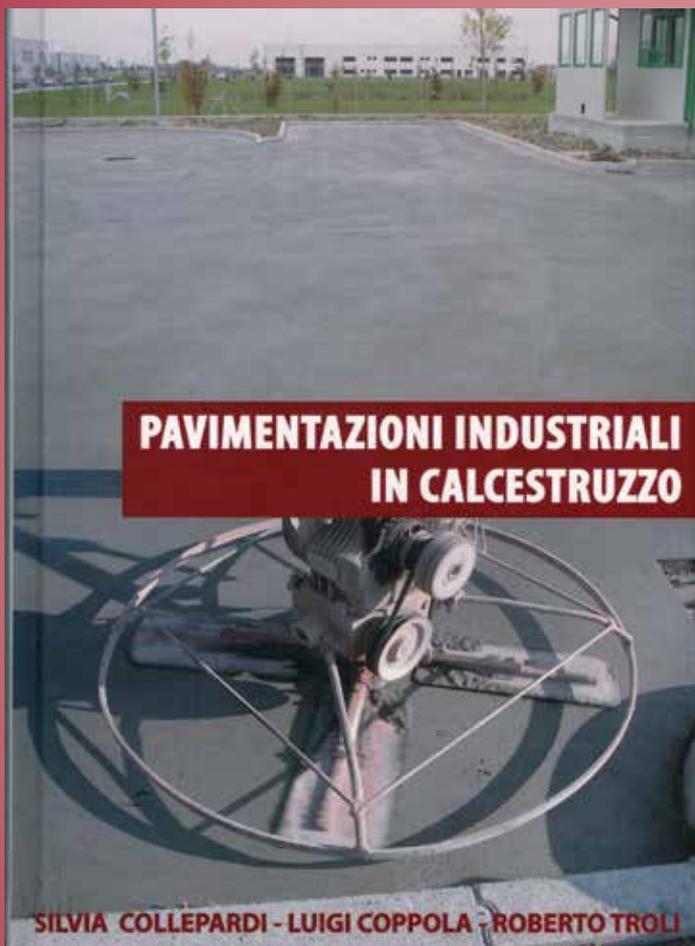
BIBLIOGRAFIA

- ◆ Ohta, A., and Uomoto, T. (1998). "Study on the Dispersion Mechanism of Polycarboxylate-based Dispersing Agent" *Cement Science and Concrete Technology*, No. 52, 138-143 (in Japanese).
- ◆ Sakai, E., and Daimon, M. (1996). "The Dispersion Mechanisms of AE High-Range Water-Reducing Agents Calculation of Inter-particle Potential." *Cement Concrete*, No. 595, 13-22 (in Japanese).
- ◆ Ohta, A., and Uomoto, T. (1998). "Study on the Dispersion Mechanism of Polycarboxylate-based Dispersing Agent" *Cement Science and Concrete Technology*, No.

52, 138-143 (in Japanese).

- ◆ Sakai, E., Kawakami, A., Honda, S., Itoh, A. and Daimon, M. (2003). "Influence of Molecular Structure of Comb-type Polymer on the Fluidity of CaCO₃ Suspension with Inorganic Salts." J, Ceram. Soc. Jpn, 111, 117-121.
- ◆ Ohta, A., Sugiyama, T., and Tanaka, Y. (1997). "Fluidizing Mechanism and Application of Polycarboxylate-Based Superplasticizers." Proc. Fifth CANMET/ACI, Superplasticizers and Other
- ◆ Chemical Admixtures in Concrete, SPI73-19, 359378.
- ◆ Sakai, E., Kawakami, A., Honda, S., Itoh, A. and Daimon, M. (2003). "Influence of Molecular Structure of Comb-type Polymer on the Fluidity of CaCO₃ Suspension with Inorganic Salts." J, Ceram. Soc. Jpn, 111, 117-121
- ◆ Japan Society of Civil Engineers (1998). "Guideline for Self-compacting Concrete."
- ◆ Ohta, A., Sugiyama, T., and Uomoto, T. (2000). "Study of Dispersing Effects of Polycarboxylate-Based Dispersant on Fine Particles." Proc. Sixth CANMET/ACI, Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, SPI95-14, 211228
- ◆ Grunewald, S. Walraven, J.C. (2002c): Sensitivity of the bending behaviour of self-compacting fibre reinforced concrete to the method of casting, 5th Int. Symposium on Cement & Concrete, Shanghai.
- ◆ Grunewald, S., Walraven, J.C. (2003b): Rheological measurements on selfcompacting fibre reinforced concrete, RILEM – Third Int. Symposium on SCC, Augustus 2003, Iceland.
- ◆ Rilem First int. Symposium on Scc September 13-14 1999 Stockholm

I libri



D.M. del 14 Gennaio 2008

Il D.M. del 14 Gennaio 2008, nella sua ultima versione sulle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), individua le responsabilità di tutti gli operatori coinvolti nella costruzione delle opere in c.a. e c.a.p.: il Progettista; il Direttore dei lavori (DL); l'Impresa di Costruzione; il Produttore di calcestruzzo preconfezionato o prefabbricato; il Laboratorio di prove sui materiali; il Collaudatore.

Enco può supportare questi operatori nelle azioni da intraprendere, precisate nei vari paragrafi (§) delle NTC, per raggiungere gli obiettivi posti dal D.M. del 14 Gennaio 2008

PROGETTISTA

- selezionare la vita utile di servizio: ≤ 10 oppure ≥ 50 oppure ≥ 100 anni (§ 2.4.1 e 2.4.2)
- prescrivere la classe di resistenza (f_{ck}/R_{ck}) ed il tipo di controllo A oppure B (§11. 2.1)
- precisare la classe di esposizione (§4. 1.2.2.4.3) in relazione all'ambiente (mare, terreno, ecc.)
- definire lo spessore minimo di copriferro in relazione all'ambiente (§ 4. 1.6.1.3)
- indicare le modalità esecutive: getto, maturazione e stagionatura del calcestruzzo (§11.2.11)

DIRETTORE DEI LAVORI

- verificare la certificazione delle materie prime del calcestruzzo (§ 11.1)
- verificare i risultati delle prove di prequalifica sul calcestruzzo prescritto nel progetto (§ 11.2.3)
- verificare la certificazione del processo di produzione industrializzato del calcestruzzo (§ 11.2.8)
- sovrintendere ai controlli di accettazione sul calcestruzzo fornito in corso d'opera (§11.2.5)
- identificare i provini da inviare al Laboratorio Ufficiale (§11.2.5.3)
- richiedere prove complementari sul calcestruzzo indurito: permeabilità, ecc. (§ 11.2.7)
- controllare la resistenza del calcestruzzo in opera con prove distruttive e non-distruttive (§11.2.6)

IMPRESA DI COSTRUZIONE

- verificare con prove preliminari la composizione del calcestruzzo da impiegare (§11.2.3)
- assumere la responsabilità della qualità del calcestruzzo anche se fornito da terzi (§11.2.3)
- certificare la produzione del calcestruzzo industrializzato se prodotto sul cantiere (§ 11.2.3)

PRODUTTORE DI CALCESTRUZZO

- ottenere la certificazione da un organismo ispettivo sulla qualità del sistema produttivo (§ 11.2.8)
- studiare la composizione del calcestruzzo in conformità alle proprietà prescritte (§11.2.8)
- verificare la qualità del calcestruzzo con prove di auto-controllo (§11.2.2 e 11.2.8)
- produrre il calcestruzzo richiesto dall'Impresa sotto il controllo del DL (§ 11.2.8)

LABORATORIO UFFICIALE

- verificare che la richiesta di prove sia sottoscritta dal DL (§11.2.5.3)
- determinare la classe di resistenza (f_{ck}/R_{ck}) in relazione a quella prescritta (§11.2.6)
- eseguire prove complementari richieste dal DL e/o dal Collaudatore (§ 11.2.7)
- eseguire prove sul calcestruzzo in opera richieste dal DL e/o dal Collaudatore (§11.2.8)

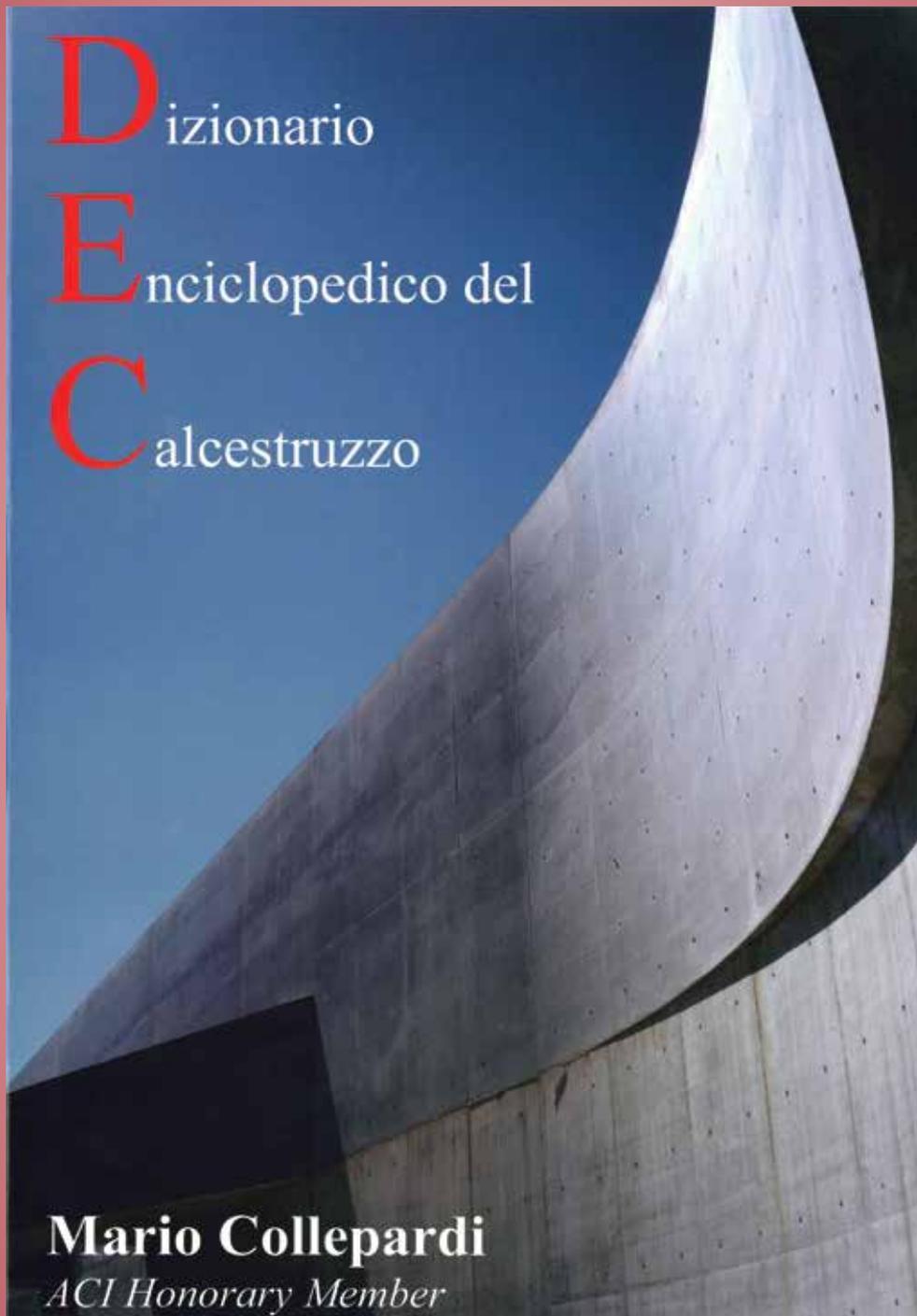
COLLAUDATORE

- controllare i documenti attestanti il possesso delle necessarie autorizzazioni (§9.1 punto a)
- ispezionare l'opera nelle varie fasi costruttive (§9.1 punto b)
- esaminare e verificare il progetto (§9.1 punti f, g, h)
- controllare le certificazioni dei materiali, del calcestruzzo e del processo produttivo (§9.1 punti c,d,e)
- richiedere eventuali carotaggi e/o prove non-distruttive sul calcestruzzo in opera (§9.1 punto i)
- richiedere eventuali prove di carico sulle strutture in opera (§9.2)

Enco srl Via delle Industrie 18/20 - 31050 Ponzano Veneto (TV)
TI 0422 963 771 Fax 0422 963 237 - www.encosrl.it - info@encosrl.it



..... e per avere una risposta
ad ogni domanda



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