

# FOCUS

## Il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre in acciaio

di ING. RICCARDO SCHVARCZ  
auditor ICMQ S.p.A.

Il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio (Steel Fiber Reinforced Concrete) è un calcestruzzo cementizio additivato con fibre corte di acciaio, cui possono aggiungersi in opera usuali barre di armatura, lente o pretese.

Essendo i calcestruzzi fibrorinforzati materiali cosiddetti "innovativi", occorre far riferimento al paragrafo 4.6 delle Ntc-2008 "Costruzioni di altri materiali", il quale prescrive che "I materiali non tradizionali o non trattati nelle presenti norme tecniche potranno essere utilizzati per la realizzazione di elementi strutturali od opere, previa autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici...". Inoltre il capitolo 12 delle stesse Ntc-2008 asserisce che "Possono essere utilizzati anche altri codici internazionali, purché sia dimostrato che garantiscano livelli di sicurezza non inferiori a quelli delle presenti norme tecniche".

Ad oggi è quindi consentito l'utilizzo dei calcestruzzi fibrorinforzati (secondo il paragrafo 4.6 sopra citato) con o senza la presenza di armatura tradizionale utilizzando come codice di calcolo e procedurale le Istruzioni del Consiglio nazionale delle ricerche (Cnr), ovvero le Istruzioni Cnr-Dt 204/2006 *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato*, in riferimento al capitolo 12 delle stesse Ntc-2008. Rimane necessario qualificare tale sistema di produzione al Servizio Tecnico Centrale ai fini del rilascio del Certificato di idoneità tecnica all'impiego secondo il punto C del cap. 11 delle Ntc-2008). Per le considerazioni riportate in seguito si farà quindi riferimento alle Cnr-Dt 204/2006.

L'aggiunta di fibre in forma dispersa in un conglomerato cementizio ne modifica le proprietà meccaniche e fisiche e, in particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure. Una volta raggiunta la fessurazione del conglomerato, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, conferendo al composito una resistenza post-fessurazione assente nella matrice senza fibre.

La presenza delle fibre conferisce al calcestruzzo, dopo la fessurazione, una significativa resistenza residua a trazione, la tenacità, la durabilità, nonché la resistenza all'urto (resilienza), alla fatica e all'abrasione.

Le fibre di acciaio hanno una lunghezza compresa generalmente tra 6 e 70 mm e un diametro equivalente compreso tra 0,15 e 1,20 mm.

Nell'esperienza maturata dal sottoscritto si sono constatati interessanti risultati nell'impiego di calcestruzzi destinati alla realizzazione di pavimentazioni industriali e nella prefabbricazione di strutture in c.a. e c.a.p.; in quest'ultimo caso sono stati interessati calcestruzzi ad alta resistenza a compressione  $R_{ck} > 55 \text{ N/mm}^2$  in Scc (calcestruzzo autocompattante - *Self Compacting Concrete*) con l'obiettivo di ridurre significativamente la quantità di armatura per c.a. tradizionale, a parità di prestazioni meccaniche.

L'utilizzo per scopi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato con comportamento degradante è consentito purché sia rispettato il seguente rapporto:  $f_{Ftsk}/f_{Ftk} > 0,2$ , dove  $f_{Ftsk}$  e  $f_{Ftk}$  sono definite a seconda del comportamento in figura 2. È necessario inoltre che sia garantita e soddisfatta la seguente relazione:  $\alpha_u \geq 1,2 \cdot \alpha_1$ , dove  $\alpha_u$  rappresenta il carico massimo ed  $\alpha_1$  quello di prima fessurazione.

Le verifiche delle strutture in calcestruzzo Sfr (calcestruzzo rinforzato con fibre in acciaio) devono essere condotte nei riguardi sia degli stati limite di esercizio (Sle), sia dello stato limite ultimo (Slu), come definiti nella normativa vigente. Pertanto nulla cambia rispetto al sistema di calcolo adottato per verificare elementi tradizionali.

Le proprietà strutturali di un calcestruzzo fibrorinforzato vanno riferite al materiale in opera e devono essere valutate e qualificate a partire da provini aventi la stessa dimensione significativa della struttura realizzata o da realizzarsi. I provini devono essere maturati nello stesso ambiente della struttura di provenienza e la direzione del carico di prova, rispetto a quella del getto, deve essere la stessa delle tensioni cui è sottoposta la struttura.

Un aspetto importante e da non sottovalutare è il compor-



Fig. 1 – Spandimento del calcestruzzo autocompattante Uni En 12350-8 e prova L-Box Uni En 12350-10

tamento reologico del calcestruzzo Sfr, in quanto la presenza di fibre, con dosaggi tipici delle applicazioni strutturali, riduce significativamente la lavorabilità degli impasti, soprattutto nel caso di fibre con forme complesse e con elevati rapporti d'aspetto. Ove ciò si manifesta, la lavorabilità può essere migliorata mediante opportuni interventi sulla composizione:

- aumentando la frazione fine e/o riducendo il diametro massimo dell'aggregato;
- selezionando e dosando opportunamente additivi fluidificanti.

La presenza di fibre in acciaio favorisce anche la riduzione di ampiezza delle fessure da ritiro in fase plastica.

Facendo riferimento alla figura 2, il comportamento degradante del calcestruzzo si ha per contenuti di fibre non elevati (con percentuale volumetrica indicativamente inferiore al 2%). Nel caso di contenuti elevati la resistenza può essere superiore a quella della matrice per effetto di un compor-

tamento incoerente, legato a un fenomeno di multifessurazione. In entrambi i casi (comportamento degradante o incoerente), la resistenza a trazione uniassiale residua ultima del materiale,  $f_{Ftu}$ , è significativamente influenzata dalla frazione volumetrica di fibre, dal rapporto d'aspetto (lunghezza/diametro) e dall'aderenza tra matrice e fibra.

Per una valutazione corretta del comportamento del calcestruzzo Sfr a trazione, si ricorre a un approccio di tipo prestazionale che identifichi sperimentalmente la curva costitutiva a trazione attraverso opportune prove su campioni di calcestruzzo fibrorinforzato. Il legame tensione nominale-apertura di fessura può essere determinato mediante prove di trazione uniassiale o di flessione. Semplificando, attraverso una serie di prove sperimentali si giunge a determinare il legame costitutivo tensione-deformazione sulla base dell'ampiezza di apertura della fessura.

A titolo esemplificativo si riporta l'esito ottenuto attraverso una campagna di prove sperimentali eseguita presso un'azienda di prefabbricazione e il supporto di un laboratorio prove accreditato. Il calcestruzzo esaminato Scc di progetto qualificato con fibre in acciaio nella quantità di  $25 \text{ Kg/m}^3$  ha una resistenza a compressione  $R_{ck} > 55 \text{ N/mm}^2$ . La scheda mostra l'evidenza sperimentale di una delle prove di flessione condotte secondo le modalità descritte dalla norma Uni 11039-2.

Più nel dettaglio, nel corso della campagna di prove sono stati testati 18 provini prismatici con dimensioni pari a  $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$  intagliati in mezz'opera (larghezza dell'intaglio pari a 3 mm con forma terminale a V). Nella figura 3 è indicata la curva tensione nominale-apertura di fessura media all'apice dell'intaglio.

La resistenza post-fessurazione viene definita sulla base delle resistenze equivalenti post-fessurazione,  $f_{eq,i}$ , calcolate su assegnati intervalli di apertura della fessura che a sua volta, nel caso di provino intagliato, può essere assunta convenzionalmente pari allo spostamento tra due punti posti all'apice dell'intaglio, CTOD.

Nel caso di prova di flessione su quattro punti, secondo lo standard Uni 11039, i valori caratteristici delle resistenze

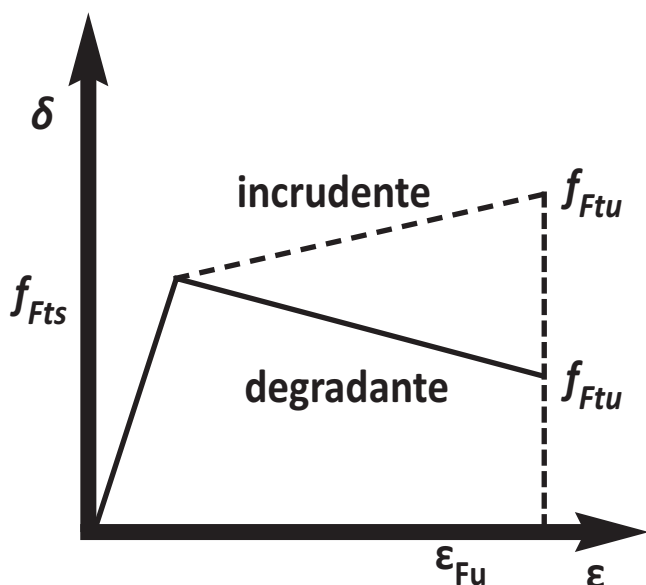
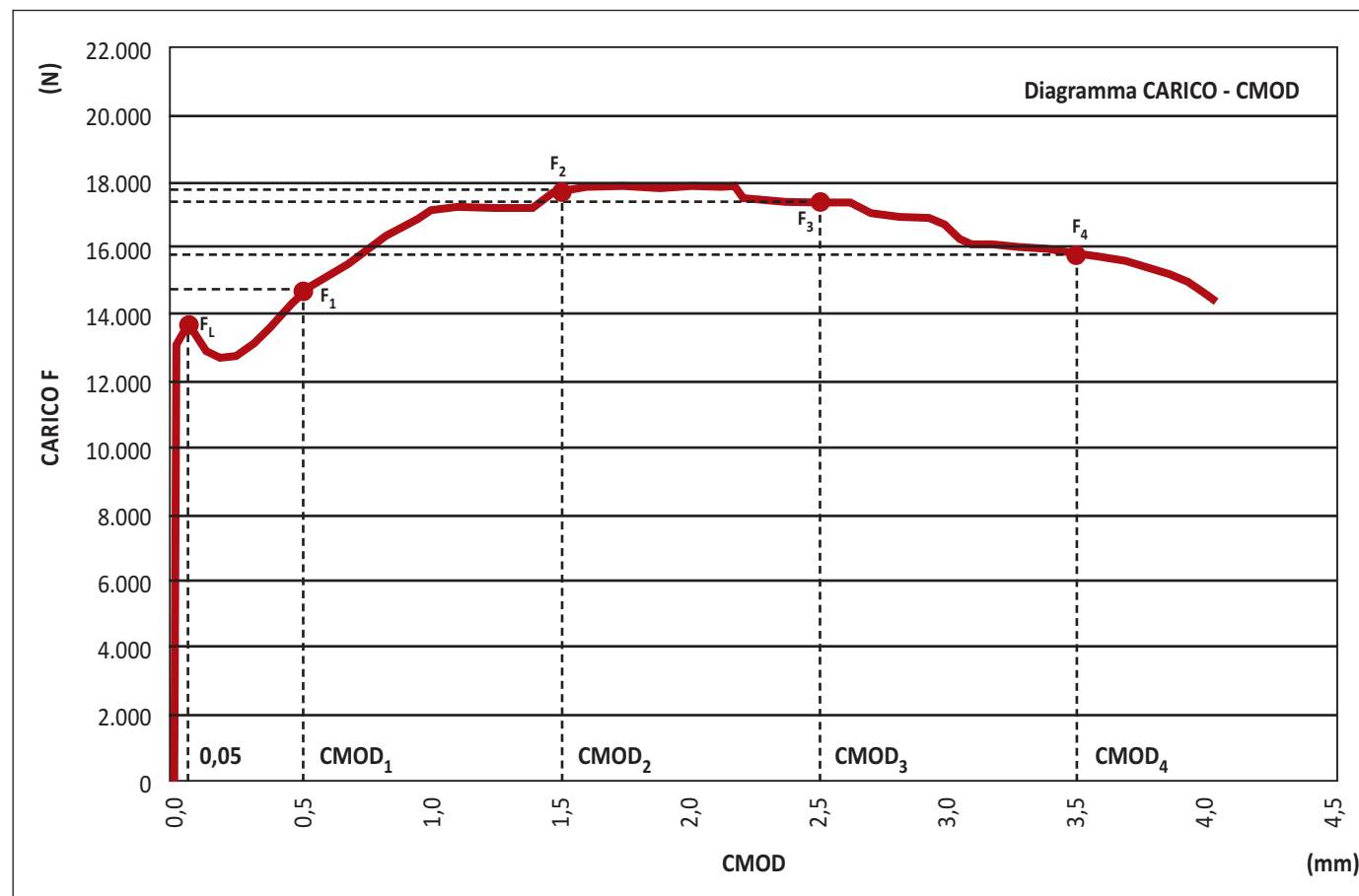


Fig. 2 – Legami costitutivi semplificati tensione-deformazione.





**Fig. 3 – Curva sperimentale carico–apertura della fessura**

equivalenti  $eq_1$  e  $eq_2$  sono valutati negli intervalli  $0 \leq CTOD \leq 0,6$  e  $0,6 \leq CTOD \leq 3,0$  mm. Pertanto, adottando la simbologia della norma Uni 11039, si assume:

$$f_{eq1k} = f_{eq(0-0,6)k} \quad f_{eq2k} = f_{eq(0,6-3,0)k}$$

Tali resistenze equivalenti corrispondono, rispettivamente, ad aperture di fessura  $w_{i1}$  pari a 0,3 mm e  $w_{i2}$  pari a 1,8 mm, corrispondenti ai valori medi degli intervalli selezionati.

Ricordando quanto succitato, il modello elastico lineare individua due punti di riferimento,  $f_{fTs}$  e  $f_{fTu}$ , sulla base del comportamento allo  $S_{le}$  ed allo  $S_{lu}$ . Essi possono essere definiti sulla base di valori equivalenti delle resistenze a flessione mediante le seguenti relazioni:

$$f_{Fts} = 0,45 \cdot f_{eq1}$$

$$f_{Fts} = K \cdot \left[ f_{Fts} - \frac{W_u}{W_{i2}} \cdot (f_{Fts} - 0,5 \cdot f_{eq2} + 0,2 \cdot f_{eq1}) \right] \geq 0$$

dove:

■  $f_{eq1}$  e  $f_{eq2}$  sono, rispettivamente, le resistenze equivalenti significative per lo stato limite di esercizio e per lo stato limite ultimo;

■  $k$  è un coefficiente da assumersi pari a 1 per sezioni non interamente tese;

■  $w_{i2}$  è il valore medio delle aperture delle fessure corrispondenti agli estremi dell'intervallo in cui è valutato  $f_{eq2}$ . La modellazione pertanto può essere sviluppata adottando il legame tensioni-deformazioni dedotto dalla metodologia sperimentale-analitica proposta.

Nel caso in esame, in conclusione, determinata la curva di riferimento tensioni-deformazioni del calcestruzzo additivato con fibre in acciaio attraverso prove sperimentali, modellata la struttura agli elementi finiti e calcolata secondo le norme tecniche cogenti, si è riscontrata una riduzione significativa del quantitativo d'armatura tradizionale paragonabile al costo relativo all'introduzione delle fibre.

Il vero vantaggio dello studio effettuato va ricondotto ai risparmi indiretti dovuti sia alla riduzione dei tempi di messa in opera che di assemblaggio dell'armatura tradizionale comunque presente.

Resta indubbio il miglioramento dell'aspetto estetico con la riduzione e spesso l'eliminazione di porosità e di vespai riconducibili anche alla minore presenza di armatura tradizionale, che normalmente ostacola la movimentazione del conglomerato cementizio all'interno del cassero.

La minor presenza di armatura tradizionale infine favorisce una maggiore uniformità dello spessore del copriferro migliorando la durabilità della struttura stessa. ■

## SCHEDA DI PROVA

**A richiesta n. 6452V del 10.08.2015**

**Data della prova: 12.8.2015**

Descrizione del campione:  
travetto in cls con fibre metalliche (25 kg/m<sup>3</sup>)

**PROVINO N. 2**

Lunghezza media del provino:	600 mm (L)
Lunghezza dell'interasse:	500 mm (l)
Larghezza media del provino:	150,0 mm (b)
Distanza tra sommità ed apice dell'intaglio:	125,0 mm ( $h_{sp}$ )
Larghezza media dell'intaglio:	4,8 mm (x)
Distanza tra parte inferiore e il trasduttore:	2,5 mm (y)
Velocità di aumento di CMOD:	0,2 mm/min

### LIMITE DI PROPORZIONALITÀ (LOP)

$$f_{ctI}^f = 4,4 \text{ MPa } (F_I = 13.810 \text{ N})$$

## RESISTENZA RESIDUA A FLESSIONE

$f_{R1} = 4,7 \text{ MPa } (F_1 = 14.694 \text{ N})$   
 $f_{R2} = 5,7 \text{ MPa } (F_2 = 17.828 \text{ N})$   
 $f_{R3} = 5,6 \text{ MPa } (F_3 = 17.521 \text{ N})$   
 $f_{R4} = 5,1 \text{ MPa } (F_4 = 15.880 \text{ N})$

# Quine Business Publisher | LSWR GROUP

## YOUR INFORMATION PARTNER

Organo ufficiale AiCARR  
LA RIVISTA PER I PROFESSIONISTI  
DELL'HVAC&R

www.audiofader.com  
WEBSITE AGGIORNATO QUOTIDIANAMENTE  
LA PIATTAFORMA ITALIANA DELLA PRODUZIONE MUSICALE E DELL'AUDIO PROFESSIONALE

MAGAZINE MENSILE DIGITALE

Organo ufficiale ANGAISA  
LA VOCE PIÙ AUTOREVOLE DEL  
SETTORE IDROTHERMOSANITARIO

www.bluerosso.it  
LA VOCE AUTOREVOLE DEL CANALE  
IDRO-TERMO SANITARIO PIÙ DINAMICA

Organo ufficiale FINCO  
LA RIVISTA CHE HA PORTATO LA  
PROGETTAZIONE SOSTENIBILE IN ITALIA

www.casaclima.com  
L'INFORMAZIONE EFFICIENTE, COMPLETA E  
IN TEMPO REALE OLTRE 200.000 UTENTI MESE

Organo ufficiale FME  
IL BUSINESS MAGAZINE DEI  
DISTRIBUTORI E GROSSISTI DI  
MATERIALE ELETTRICO

DAL 1952 IL PERIODICO D'INFORMAZIONE  
PER INGEGNERI E ARCHITETTI  
NEWSLETTER - L'AGGIORNAMENTO  
PROFESSIONALE VIA MAIL  
Ogni 15 giorni raggiunge oltre 42.000 iscritti

LA GUIDA DA PORTARE SEMPRE  
CON SÉ PER CONOSCERE TUTTI  
I TRUCCHI DEL MESTIERE

PERIODICO BUSINESS TO  
BUSINESS NEL MONDO  
DELL'INDUSTRIA MECCANICA  
E DELLE MACCHINE UTENSILI

MENSILE DI FORMAZIONE  
E AGGIORNAMENTO PER IL  
MECCATRONICO

IL PUNTO DI RIFERIMENTO PER CHI  
OPERA NEL CAMPO DELLA PULIZIA  
INDUSTRIALE, SANIFICAZIONE E  
FACILITY MANAGEMENT

www.pulizia-industriale.it  
DA 50 ANNI LA VOCE  
AUTOREVOLE DEL CLEANING