

# CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO: COMPORTAMENTO STRUTTURALE

Bruno ROSSI \*

\* *Ingegnere Civile Edile; Corporate Technical Specialist, Officine Maccaferri S.p.A*

## INTRODUZIONE

Aggiungendo al calcestruzzo fibre di varia natura, siano esse micro o macro fibre, si ottiene un nuovo materiale dalle caratteristiche meccaniche differenti da un normale calcestruzzo. Tale composito è chiamato *Calcestruzzo Fibrorinforzato (Fiber Reinforced Concrete)*. Ove si tratti di un rinforzo costituito da fibre di acciaio si parla di *Steel Fiber Reinforced Concrete*.

La valutazione delle differenti proprietà tecnologiche del FRC viene effettuata tramite prove normalizzate, alcune delle quali tipiche del calcestruzzo ordinario, altre create appositamente per il fibrorinforzato.

### Proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato allo stato indurito

I fattori che influenzano le proprietà di un calcestruzzo fibrorinforzato sono i seguenti:

- *Le fibre: geometria, rapporto d'aspetto, contenuto, orientamento e distribuzione;*
- *La matrice: resistenza e dimensione massima degli aggregati;*
- *L'interfaccia fibra-matrice;*
- *I provini: dimensioni, geometria e metodologia di prova.*

Le proprietà del calcestruzzo fibrorinforzato sotto carico (statico e dinamico) possono essere classificate secondo le seguenti azioni:

- *Compressione;*
- *Trazione diretta uniassiale;*
- *Trazione indiretta – Prova Brasiliana;*
- *Trazione indiretta – Flessione (misura della tenacità e dell'energia di frattura);*
- *Taglio e torsione;*
- *Fatica;*
- *Impatto;*
- *Abrasione;*
- *Deformazione viscosa (Creep).*

Per ognuna delle suindicate caratteristiche verranno forniti adeguati riferimenti normativi.

## COMPRESSIONE

La resistenza a compressione del calcestruzzo non viene sostanzialmente modificata dall'aggiunta delle fibre.

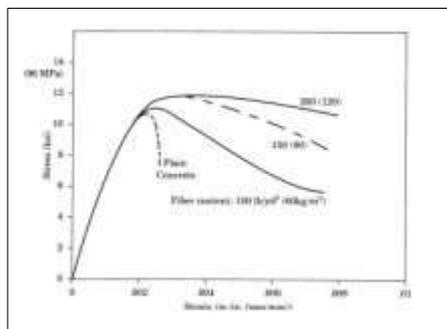


Figura 1

Si può osservare un modesto incremento per percentuali rilevanti di fibre di acciaio (non meno di 1,5% in volume, circa). Dopo il raggiungimento del picco, il materiale mostra una marcata duttilità fortemente dipendente dal contenuto di fibre (Figura 1).

Sempre sul comportamento del fibrorinforzato a compressione, il modulo elastico ed il rapporto di Poisson risultano sostanzialmente invariati per percentuali di fibre minori del 2% in volume. Le prove di resistenza vengono effettuate su provini cilindrici (diametro 150 mm, altezza 300 mm) o cubici (lato 100 oppure 150 mm). Le norme di riferimento sono le stesse che si applicano al calcestruzzo ordinario (*ASTM C39, EN 12390-3, etc.*).

## TRAZIONE DIRETTA UNIASSIALE

Il comportamento a trazione uniassiale del fibrorinforzato è fortemente influenzato dalla presenza delle fibre, specie nella fase seguente la prima fessurazione.

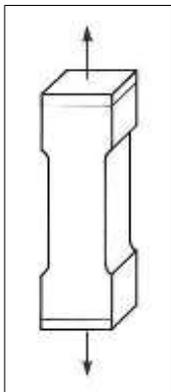


Figura 2

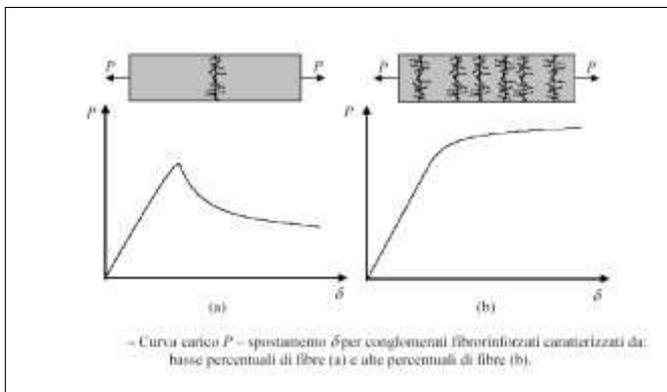


Figura 3

Soltanto utilizzando elevati dosaggi, soprattutto di microfibre (nell'ordine dell'1,5 – 2 % in volume e superiori) si possono ottenere rilevanti incrementi del valore di picco (Figura 3).

È il caso di composti cementizi ad alte prestazioni (*High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*,  $f_{ck} > 100$  MPa) e con elevati dosaggi di fibre corte ( $L_f < 13$  mm, dosaggio  $> 2\%$  volume), dove il comportamento diventa di tipo incrudente.

La prova di trazione diretta del calcestruzzo fibrorinforzato è di non facile esecuzione.

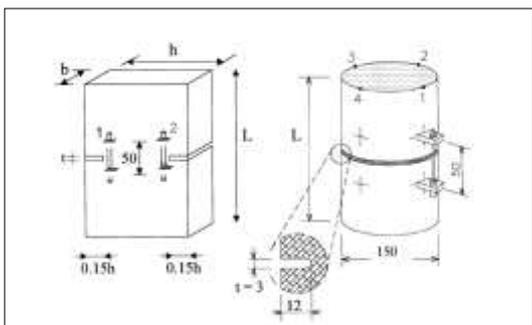


Figura 4

Come si può osservare nella Figura 4, è preferibile intagliare il provino in modo da localizzarne la fessura.

Attualmente non esistono normative sulla trazione diretta. In Italia è in corso di approvazione la norma *UNI U73041440* nella quale si forniscono alcune indicazioni sulle dimensioni del provino, cilindrico o prismatico, sulla profondità dell'intaglio, in corrispondenza del quale misurare l'apertura di fessura.

## TRAZIONE INDIRECTA - PROVA BRASILIANA

Le difficoltà pratiche di eseguire la trazione diretta hanno portato a procedimenti alternativi, quali quello della prova di trazione indiretta per *splitting*, anche detta "prova brasiliana":

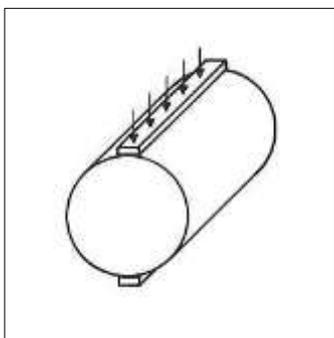


Figura 5



Figura 6



Figura 7

Nella Figura 6 e Figura 7 il provino è cilindrico ma è possibile testare anche provini cubici o prismatici. La prova consiste nel sottoporre un provino cilindrico ad una forza di compressione applicata ad una zona ristretta per tutta la lunghezza del cilindro. La rottura avviene per raggiungimento della massima resistenza a trazione in direzione ortogonale alla forza applicata. Dal carico massimo si ricava la resistenza a trazione indiretta del calcestruzzo fibrorinforzato. Per la determinazione di tale proprietà si può fare riferimento alla *ASTM C496* ed alla *EN 12390-6*. Per calcestruzzi ordinari, si può dedurre la resistenza a trazione diretta a partire da quella indiretta (*EC 2, NT Italiane, ACI*). Non sono codificate, al momento, analoghe correlazioni per i calcestruzzi fibrorinforzati.

### TRAZIONE INDIRECTA - FLESSIONE

La prova di flessione è certamente la più diffusa per la sua relativa facilità di esecuzione e perché è rappresentativa di molte situazioni pratiche. Un altro motivo del successo di questa prova si deve al maggior grado di iperstaticità della prova, che mette in miglior evidenza la duttilità apportata dal rinforzo fibroso, più di quanto non avvenga nelle prove precedenti (compressione e trazione diretta, Figura 8).

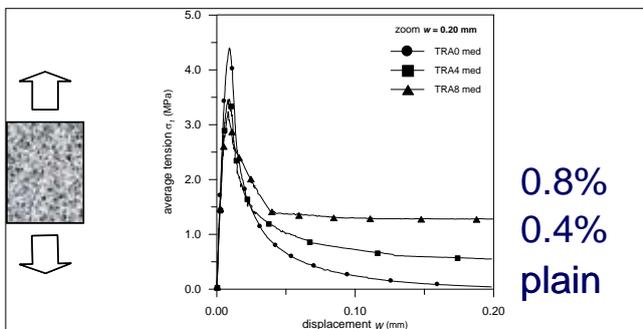


Figura 8

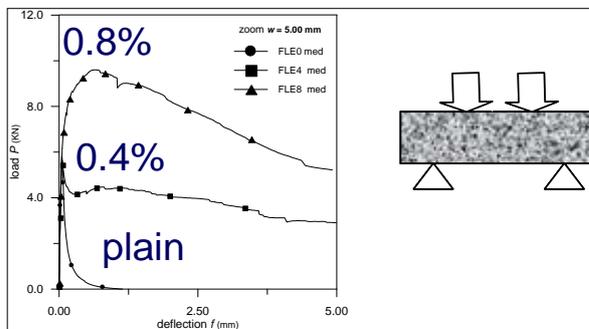


Figura 9

Esistono due tipi di prove: prova di flessione su provino prismatico (travetto) e prova di punzonamento su piastra (circolare o quadrata).

#### Prova di flessione su travetto

Lo scopo di tale prova è la determinazione della tenacità apportata dalle fibre al calcestruzzo. La tenacità è la resistenza opposta dal materiale all'avanzamento del processo di frattura (statico, dinamico o per urto) per effetto della sua capacità di dissipare energia di deformazione.

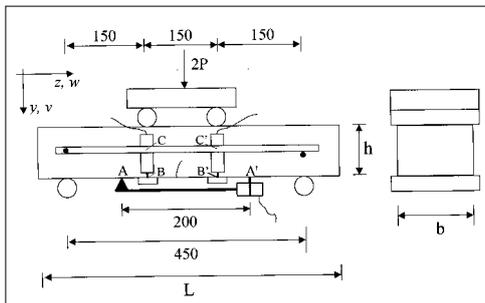


Figura 10

Il provino è appoggiato su due punti, ed è caricato in uno o due punti: nel primo caso si parla di *Three Point Bending Test (3PBT)*, nel secondo di *Four Point Bending Test (4PBT)* (Figura 10).

Il travetto su tre punti di carico è caricato a metà luce, mentre per quello a quattro punti di carico la luce è divisa in tre parti di uguale lunghezza. Le dimensioni dei travetti nelle principali normative non sono molto diverse tra di loro. Nella *ASTM C1018*, in base alla lunghezza delle fibre, è possibile scegliere tra due diverse geometrie.

N°	Country	Standard	Issued	Dimensions/Span w x d x l [- / mm]	Stiffness ratio W/s [mm <sup>3</sup> ]	System/ Loading	Flex. Strength	eq. flex. strength @	res. flex. strength @	Tensile strength	Specialties
1	World	Rilem TC 167-TDF	2000	150 x 150 x 550 / 500 (150 x 125 x 550 / 500)	781,3	3 pt/centrally	LOP (Fu) 0.05 mm interval	V1000 (0.5 mm) V200 (2.5 mm)	---	0.37 x flex. 0.45 x flex.	Notched beams Concrete part of absorption taken into account
1	Suisse	SIA 162/6	1936	h0 x h0 x 6h0 / 4.5h0 (h0 100)	370,4	4 pt/3rd pt	---	dep. on crack location	---	---	Crack location normalized
2	Norway	NB Publication No. 7	1999	125 x 75 x l / 450 (l 550)	260,4	4 pt/3rd pt	Fu (1st crack)	---	---	---	---
3	Germany	DBV Tunneling	1996	150 x 150 x 700 / 600	937,5	4 pt/3rd pt	Fu (1st crack) 0.05 mm interval	V1200 (0.5 mm) V700 (3.0 mm)	---	0.37 x flex. 0.45 x flex.	Concrete part of absorption taken into account
4	Sweden	SB Rapport nr 4	1997	125 x 75 (125) x l / 450 (l 550)	260,4 723,4	4 pt/3rd pt	Fu, Fcr (special method)	---	fcr x R10 x /100 (ASTM 1018)	0.37 x flex	refers to ÖGV, ASTM
5	Spain	AENOR UNE 83-5xx CIMNE N° 54 CUR 35	2000 1989 1994	150 x 150 x 600 / 450	1250,0	4 pt/3rd pt	Fu, Fcr Fu (1st crack)	V300 (1.5 mm) V150 (3.0 mm) V500 (1.5 mm)	---	---	---
6	Netherlands	Komp-Allest	1997	150 x 150 x 600 / 450	1250,0	4 pt/3rd pt	0.05 mm interval	V150 (3.0 mm)	R = fcu/fcr	---	---
7	Austria	ÖBV Guideline for shotcrete	1996	100 x 100 x 400 / 300, 150 x 150 x 600 / 450	555,6 1250,0	4 pt/3rd pt	---	(see DBV) V500 (1.5 mm) V150 (3.0 mm)	Toughness classes V600 V150	---	---
8	Belgium	NBN B-15-238	1992	150 x 150 x 600 / 450	1250,0	4 pt/3rd pt	Fu, Fr 0.05 mm interval	V300 (1.5 mm) V150 (3.0 mm)	---	---	---
9	France	NF P 18-409	1993	140 x 140 x 560 / 420	1085,9	4 pt/3rd pt	Fu (0.05 mm interval)	---	V600 (0.7 mm) V300 (1.4 mm) V150 (2.8 mm)	---	Reloading factor dx x = Fx x / cr
10	Japan	JCI-SF4	1984	100 x 100 x 380 / 300 150 x 150 x 630 / 450 100 x 100 x 380 / 300	555,6 1250,0 555,6	4 pt/3rd pt	Fu	V600 (0.75 mm) V300 (1.5 mm) V200 (2.25 mm) V150 (3.0 mm)	Residual factor after reloading F0.0/Fu	---	Reloading of specimen Evolution stages depending on cracking displacement
11	USA	ASTM C 1018	1997	150 x 150 x 500 / 450	1250,0	4 pt/3rd pt	Fcr	Toughness indices Ixx	Residual strength factors Rxx	---	---

Figura 11

Standard	Specimen and loading	Specimen dimensions	Parameters monitored	Measurements
ASTM C 10 18-92	□ Beam □ Third-point loading	100x(100x350 mm) preferred (Variations permitted)	□ Load □ Net deflection at midspan	□ First crack strength and deflection □ Toughness Index IS, I10, I20 (Ratio of energy absorbed up to $\delta_1$ and that absorbed energy up to $\delta_1$ ( $n=3, 5, 5; 10, 5$ )). □ Residual strength factor(s)
Norma Española UNE 83-510-89	□ Beam □ Third-point loading	$d/b \leq 1.5$ $l \geq 3d$ $s > 14 \times 50$ mm	□ Load □ Deflection at midspan	□ First crack strength □ Energy absorbed until the deflection of 1/150 □ Ratio of energy absorbed up to deflection of 15.5 $\delta_1$ to that up to $\delta_1$ .
Normalisation Française P 15-409	□ Beam □ Third-point loading	$b=d=140$ mm $l=420$ mm $s=560$ mm	□ Load □ Deflection at midspan (avg.)	□ First crack load $P_f$ □ Ratio of load at deflection $\delta$ to load $P_f$ ( $\delta=0,7; 1,4; 2,8$ mm)
Norme Belge NBN B 15-238	□ Beam □ Third-point loading	$b=d=150$ mm $l=3d$ $4d \leq s \leq 5d$	□ Load □ Net deflection at midspan	□ First crack strength □ Flexural strength □ Energy absorbed up to deflection $l/n$ ( $n=300, 150$ ) □ Equivalent flexural strength up to deflection $l/n$ ( $n=300, 150$ ) □ Ratio of load at a deflection of $l/n$ ( $n=300, 150$ ) to the first crack load.
Japan Concrete Institute Standard JCI-SF4	□ Beam □ Third-point loading	$h=d=100$ mm for $l \leq 40$ mm $h=d=140$ mm for $l \leq 40$ mm $l=3d \pm 90$ mm	□ Load □ Net deflection at midspan, or Net deflection at load points	□ Flexural Strength □ Load ratio $P^*_{res}/P^*_{max}$ ( $P^*_{max}$ = Maximum load on reloading after unloading at 0,9 $P^*_{max}$ in the post-peak region; $P^*_{max}$ = Maximum load)
DBV Recommendation (Germany)	□ Beam □ Third-point loading	$h=d=150$ mm $l=600$ mm $s=700$ mm	□ Total load □ Net deflection at midspan (avg.)	□ First crack strength □ First crack load □ Equivalent flexural load carrying capacity until deflection $\delta_{lim} = G_{lim}/\delta$ □ Equivalent flexural strength until deflection $\delta_{lim}$
CUR Recommendation (The Netherlands)	□ Beam □ Third-point loading	$h=d=150$ mm $l=450$ mm $s=600$ mm	□ Total load □ Net deflection at midspan	□ First crack strength and load □ Energy absorbed up to deflection $\delta$ ( $\delta=1,5, 3$ mm) □ Equivalent flexural strength up to deflection $d$ to the first crack strength.
Norwegian Concrete Association Recommendation	□ Beam □ Third-point loading	$h=125$ mm $d=75$ mm $l=450$ mm $s=550$ mm	□ Total load □ Load point deflection	□ Flexural strength □ Residual flexural strength at deflections of 1 mm and 2 mm □ Toughness classification based on residual flexural strength.

$d$  = Depth,  $b$  = Thickness,  $l$  = Span,  $s$  = Overall length.  
 $\delta_1$  = Deflection limits for the test,  $P_f$  = Load limits for the test

Figura 12

La prova di flessione può essere rappresentata da una curva Carico – Spostamento verticale (misurato sotto i punti di carico) oppure, nel caso il provino sia intagliato, da una curva Carico – Apertura di fessura (*Crack Opening Displacement* o *COD*), così come si vede in Figura 13.

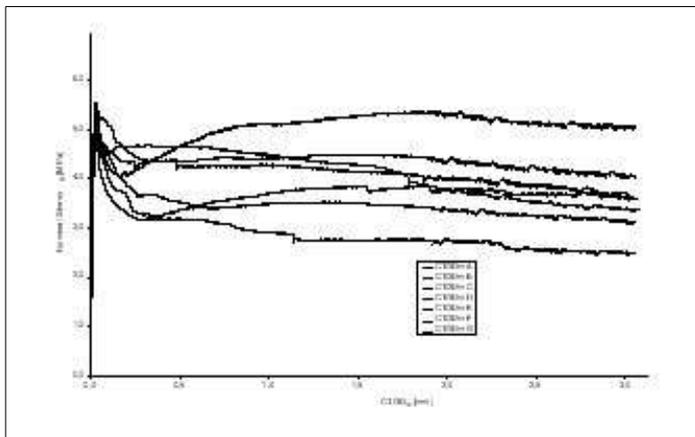


Figura 13

Un parametro di particolare interesse è il “punto di prima fessurazione”, a partire dal quale le fibre iniziano a dare il proprio contributo. Tale parametro è convenzionale, a causa della difficoltà nella determinazione dell’innescio del processo di fessurazione. La formazione della prima fessura viene associata da alcune normative alla perdita di linearità della curva carico-spostamento (ASTM), mentre in altri casi essa viene fatta coincidere con l’intersezione tra la curva Carico-Spostamento ed una parallela al tratto lineare a partire da un valore costante di 0,05 mm sull’asse delle ascisse (spostamento verticale) (RILEM, CUR, DBV, AFNOR, NBN).

Per quanto riguarda il comportamento in fase postfessurativa, le normative si basano sulla definizione di indici di duttilità adimensionali basati sull’energia dissipata nel processo di frattura e/o sulla resistenza residua.

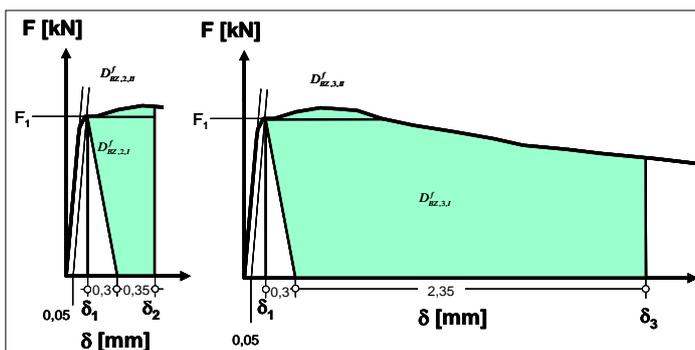


Figura 14

Nella norma ASTM C1018 viene calcolata l’area sottesa dalla curva Carico-Spostamento per valori multipli dello spostamento di prima fessurazione; in altri casi si assume la resistenza residua puntuale per uno spostamento verticale espresso come percentuale della luce della trave (NBN, JCI-SF4).

Nel caso della recente normativa Europea EN 14651 si individuano i valori di resistenza residua postfessurativa per valori puntuali dell’apertura di fessura: nel caso della norma RILEM, si assumono valori di resistenza “equivalenti” che vengono ricavati dall’energia assorbita in intervalli di apertura di fessura.

La norma Italiana *UNI 11039* si basa su prove di flessione su 4 punti in controllo di apertura di fessura. La Figura 15 mostra la geometria e i vincoli per i travetti di calcestruzzo fibrorinforzato; la Figura 16 mostra il particolare dell'intaglio a forma triangolare, mentre la Figura 17 mostra la vista frontale di un provino strumentato prima dell'inizio della prova.

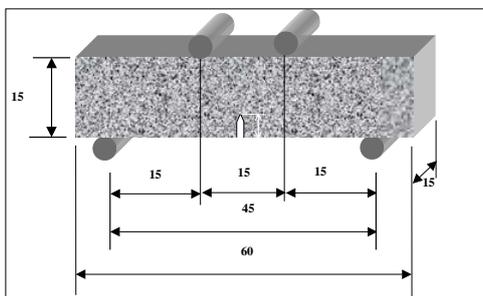


Figura 15

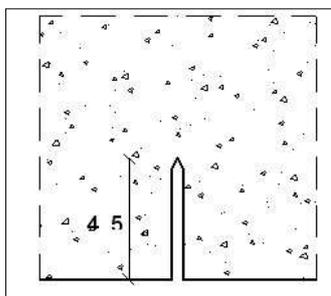


Figura 16



Figura 17

La normativa *UNI 11039* consente di classificare il calcestruzzo fibrorinforzato in base alla sua resistenza ed alla sua tenacità. La resistenza di prima fessurazione ( $f_{lf}$ ) è fornita dalla relazione:

$$(1) \quad f_{lf} = \frac{P_{lf} \cdot l}{b \cdot (h - a_0)^2}$$

nella quale:

$l$  è la distanza tra gli appoggi inferiori (450 mm)

$b$  è la larghezza della trave (150 mm)

$h$  è l'altezza della trave (150 mm)

$a_0$  è la profondità dell'intaglio (45 mm)

La normativa prevede inoltre la determinazione di due resistenze post-fessurazione: la prima, tipica per le condizioni di esercizio, è la tensione media nel tratto con apertura di fessura all'apice dell'intaglio (CTOD) variabile tra 0 e 0,6 mm ( $f_{eq(0-0.6)}$ ); la seconda, tipica delle condizioni di collasso, è la tensione media nel tratto di apertura di fessura variabile tra 0,6 e 3,0 mm ( $f_{eq(0.6-3.0)}$ ):

$$(2) \quad f_{eq(0-0.6)} = \frac{l}{B \cdot (h - a_0)^2} \cdot \frac{U_1}{0,6} \quad U_1 = \int_0^{0,6} P(CTOD)d(CTOD)$$

$$(3) \quad f_{eq(0.6-3)} = \frac{l}{B \cdot (h - a_0)^2} \cdot \frac{U_2}{2,4} \quad U_2 = \int_{0,6}^3 P(CTOD)d(CTOD)$$

La Figura 18.a mostra la tipica curva Carico – CTOD mentre la Figura 18.b mostra gli intervalli di fessura considerati per il calcolo delle tensioni equivalenti.

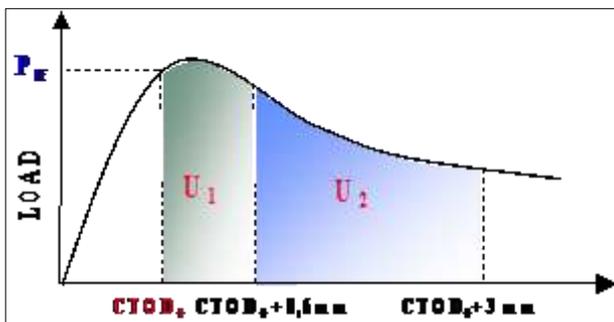


Figura 18.a

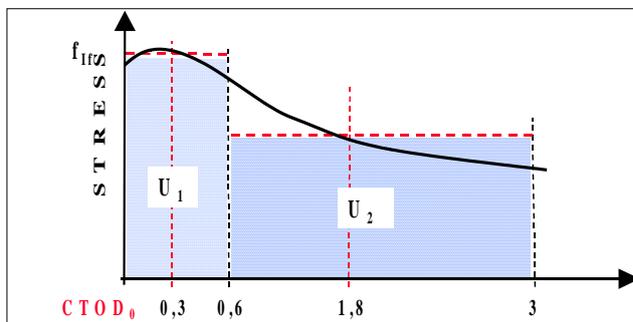


Figura 18.b

La normativa *UNI 11039* (2003) propone di determinare due "Indici di duttilità" definiti come:

$$(4) \quad D_0 = \frac{f_{eq(0-0.6)}}{f_{lf}}$$

$$(5) \quad D_1 = \frac{f_{eq(0,6-3,0)}}{f_{eq(0-0,6)}}$$

**Prova di flessione su piastra**

La prova di flessione su piastra, anche detta prova di punzonamento, è stata codificata per la prima volta dalla SNCF (Ente Ferrovie Francese) nel 1989. A differenza della prova di flessione su travetto, in questo caso si tratta di sottoporre a carico concentrato centrale una piastra, quadrata o circolare, al fine di determinare, per un prefissato abbassamento del punto di carico, l'energia assorbita

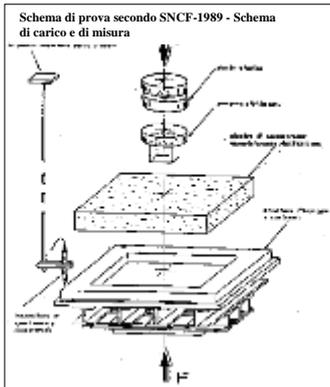


Figura 19



Figura 20

Sia nel caso di piastra quadrata che in quello di piastra circolare, l'abbassamento è dell'ordine di 1/20 della luce libera, così da produrre un quadro fessurativo molto ampio, che interessa più linee di frattura di rilevante ampiezza. Ciò comporta un'energia di deformazione molto elevata. Questo tipo di prova si è imposto nella pratica comune per la relativa facilità di esecuzione.

Per contro, i risultati presentano una marcata dispersione statistica, a causa dell'assetto iperstatico: per questo motivo, si sta diffondendo, a partire dagli USA, la prova su piastra circolare appoggiata su 3 cerniere sferiche e per questo staticamente determinata (Figura 21).



Figura 21

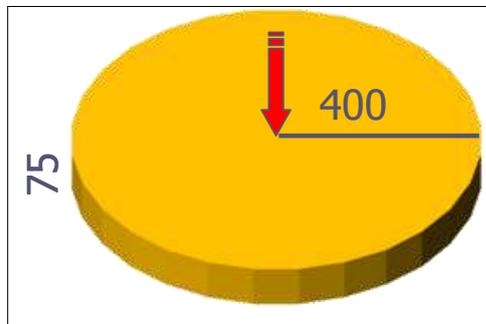


Figura 22

Di seguito in Figura 23 un quadro delle normative esistenti.

N°	Country	Standard	Issued	Dimensions/Span a x b x d / s [– / mm]	System/ Loading	Toughness classes	Specialties
nn	EU	CEN TC229	nn	600 x 600 x 100 / 500	allround hinged, centrally loaded 100 x 100	--- (E in [J])	
nn	EU	EFNARC	1996	600 x 600 x 100 / 500	allround hinged, centrally loaded 100 x 100	E1: > 500 J E2: > 700 J E3: > 1000 J (@ 25 mm def.)	
1	Suisse	SIA 162/6	1999	600 x 600 x 100 / 500 Ø 800 x 100 / 700	allround hinged, centrally loaded 100 x 100	I: 500 J (??) II: 800 J III: 1000 J (min G = 4 kN/m)	Calculation of eq. flex. tensile strength
2	Norway	NB Publication No. 7	1999	600 x 600 x 100 / 500	allround hinged, centrally loaded 100 x 100	E700: > 700 J E1000: > 1000 J	
3	Austria	ÖBV Guideline for shotcrete	1998	600 x 600 x 100 / 500	allround hinged, centrally loaded 100 x 100	E1: > 500 J E2: > 700 J E3: > 1000 J (@ 25 mm def.)	
4	USA	ASTM C XXXX-00	Draft	Ø 800 x 75 / 700	4 pt/3 pt support	@ 5, 10, 20, 40 mm	Bernard's statically determined test

Figura 23

## TAGLIO E TORSIONE

In generale, le fibre in acciaio incrementano la resistenza al taglio ed alla torsione del calcestruzzo. Da prove effettuate su travi nelle quali siano state utilizzate fibre per il taglio ed armatura longitudinale per la flessione si può affermare che le fibre possono sostituire parzialmente o totalmente le tradizionali staffe per gli sforzi tangenziali, modificando il meccanismo di rottura per taglio in rottura per flessione, con contenuto e tipo di fibra adeguati. Sono state proposte diverse formulazioni della resistenza a taglio delle travi (*ACI Building Code*, *Walraven*, etc.). Di seguito, se ne riportano alcune:

$$(6) \quad V_C = \left( 0.157\sqrt{f_{C'}} + 17.2\rho \frac{Vd}{M} \right) b_w d \leq (0.29\sqrt{f_{C'}}) b_w d \quad (\text{ACI Building Code})$$

$$(7) \quad V_C = (0.167\sqrt{f_{C'}}) b_w d \quad (\text{ACI Building Code – rel. semplificata})$$

$$(8) \quad V_s = 0.00772 \frac{L}{D} V_f F_f \pi \left( \frac{h^2}{\tan^2 \alpha_p} + \frac{2hr}{\tan \alpha_p} \right) \quad (\text{Walraven})$$

$$(9) \quad V_{Rd,ct} = \left[ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot (1 + 2.5 \cdot \frac{f_{eq(0.6-3)}}{0.3 \cdot (f_{ck})^{2/3}}) \cdot f_{ck})^{1/2} + 0.15 \cdot \sigma_{CP} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (\text{Minelli})$$

In generale, si può affermare che il campo di validità di tutte le espressioni riportate è comunque ancora piuttosto limitato, essendo derivate da osservazioni sperimentali e non esistendo normative specifiche nazionali.

## FATICA

L'aumento di resistenza a fatica dovuto all'introduzione di fibre è ben nota: a supporto esiste una vasta letteratura basata su diverse campagne sperimentali. Le dimensioni e le modalità delle prove sono molto varie: anche in questo caso, non esistono normative al riguardo.

Si può definire la resistenza a fatica come il massimo livello di sforzo al quale il calcestruzzo fibrorinforzato può resistere per un definito numero di cicli di carico prima della rottura, oppure come il massimo numero di cicli di carico necessario alla rottura per un definito livello di sforzo (*ACI Committee: Report 544.1R – Fiber Reinforced Concrete; Report 544.2R – Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*).

## IMPATTO

Il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato può essere studiato con diversi metodi di prova (*ACI Committee: Report 544.2R – Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*):

- *Weighted Pendulum Charpy-type impact test;*
- *Drop-weight test (single or repeated impact);*
- *Constant strain-rate test;*
- *Projectile impact test;*
- *Split-Hopkinson bar test;*
- *Explosive test;*
- *Instrumented pendulum impact test.*

Ad esempio, nel caso 2. si misura il numero di cadute necessario a produrre un certo livello di danno nel provino. Con questi tipi di prova si possono mettere a confronto:

- *Differenza di comportamento tra calcestruzzi fibrorinforzati ed ordinari;*
- *Differenza di comportamento tra fibrorinforzati sottoposti ad impatto e a carico statico.*

Esperienze condotte da diversi ricercatori hanno dimostrato che, utilizzando il metodo *drop-weight*, si registra un incremento molto forte della resistenza di calcestruzzi di normale resistenza, di circa 6-7 volte rispetto a calcestruzzi non rinforzati, con dosaggi in volume dell'ordine di 0,5 % di fibre di acciaio.

## ABRASIONE

La valutazione della resistenza all'abrasione, cavitazione e/o erosione può essere condotta con prove *ASTM C418* e *C779*. Particolarmente interessante è l'uso del fibrorinforzato per prevenire o riparare i danneggiamenti dovuti alla

cavitazione, come è stato confermato sperimentalmente in laboratorio eseguendo prove secondo la *ASTM C779 - C779M-05 Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces*.

Un altro metodo suggerito è il *CRD-C 63-80 "Test Method for Abrasion-Erosion Resistance of Concrete (Underwater Method)"*, U.S. Army Corps of Engineers.

Al contrario, non è di facile dimostrazione il beneficio apportato dalle fibre nel miglioramento del comportamento delle superfici sottoposte a traffico di mezzi gommati.

## DEFORMAZIONE VISCOSA (CREEP)

La sperimentazione condotta finora non mostra differenze rilevanti tra calcestruzzi ordinari e fibrorinforzati (contenuto di fibre < 1%) sottoposti a compressione prolungata nel tempo. La norma per la prova è la stessa che per il calcestruzzo ordinario: *ASTM C512-02 Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression*.

## NORMATIVA

Di seguito sono riportate tutte le norme citate precedentemente. Esse riguardano le metodologie per testare il materiale, sia sotto l'aspetto meccanico, sia per tutti gli aspetti fisico-chimico. Sono riportate anche tutte le normative relative ai principi di progettazione basati sulle proprietà del materiale ed in funzione dell'assetto statico.

- ACI Committee - Report 544.1R – State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete
- ACI Committee - Report 544.2R – Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete
- ACI Committee – Report 544.4R – Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete
- ASTM C39 - Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- ASTM C157 - Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-cement Mortar and Concrete
- ASTM C418 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete by Sandblasting
- ASTM C496 - Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- ASTM C512 - Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression
- ASTM C666 - Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- ASTM C779 - Standard Test Method for Abrasion Resistance of Horizontal Concrete Surfaces
- ASTM C1018 - Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete
- ASTM C1116 - Standard Specification for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete
- ASTM C1399 – Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber Reinforced Concrete
- ASTM C1550 - Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)
- ASTM C1579 - Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)
- CRD-C 63-80 - Test Method for Abrasion-Erosion Resistance of Concrete (Underwater Method), U.S. Army Corps of Engineers
- AASHTO PP34-98 - Standard Practice for Estimating the Crack Tendency of Concrete
- EFNARC - European Specification for Sprayed Concrete
- EN 206-1 - Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity
- EN 12390-3 - Testing hardened concrete - Compressive strength of test specimens
- EN 12390-6 - Testing hardened concrete - Tensile splitting strength of test specimens
- EN 12390-8 - Testing hardened concrete - Depth of penetration of water under pressure
- EN 13581 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test method - Determination of loss of mass of hydrophobic impregnated concrete after freeze-thaw salt stress
- EN 13687-1 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods – Determination of thermal compatibility - Freeze-thaw cycling with de-icing salt immersion
- EN 14651 – Precast concrete products - Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength
- CEN EN 1992-1-1 - Eurocode 2 – Design of concrete structures - Part 1-1:general rules and rules for buildings
- CEN/TR 15177 - Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage
- RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Bending test
- RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete –  $\sigma$ - $\epsilon$  Design Method
- RILEM CPC-18 – Measurement of hardened concrete carbonation depth
- NF P18-409 – Beton avec Fibres Metalliques. Essai de flexion
- UNE 83-510 – Determination del Indice de Tenacidad y Resistencia a Primera Fisura
- NBN B 15-238 – Essai des bétons renforcés des fibres. Essai de Flexion sur éprouvettes prismatiques
- JCI-SF4 – Method of Tests for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete
- UNI 7087 - Calcestruzzo - Determinazione della resistenza al degrado per cicli di gelo e disgelo

- UNI 9944 - Corrosione e protezione dell'armatura del calcestruzzo. Determinazione della profondità di carbonatazione e del profilo di penetrazione degli ioni cloruro nel calcestruzzo
- UNI 11039-1 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio. Part. I: Definizioni, classificazione e designazione
- UNI 11039-2 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di acciaio. Part. II. Metodo di prova per la determinazione della resistenza di prima fessurazione e degli indici di duttilità
- UNI U73041440 - Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio - Norme Tecniche per le Costruzioni – Decr. 14/09/05 – G.U. 23/09/05
- CNR\_DT204\_2006 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato
- ISO 834 – Fire resistance tests - Elements of building construction
- BS 476 - Fire tests on building materials and structures