

CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO: VERIFICA AGLI STATI LIMITE

Bruno ROSSI *

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

REQUISITI ESSENZIALI PER L'USO STRUTTURALE DEL CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

In linea di principio, l'uso del calcestruzzo fibrorinforzato è indicato soprattutto per le strutture iperstatiche, in quanto lo sforzo residuo di trazione può aumentare la capacità portante complessiva della struttura e migliorarne la duttilità. Le proprietà meccaniche del calcestruzzo fibrorinforzato devono essere direttamente determinate su provini mediante prove normalizzate. In assenza di specifiche sperimentazioni le proprietà che non sono di seguito espressamente indicate possono essere assimilate a quelle del calcestruzzo ordinario.

Di seguito si riportano i requisiti minimi, come espressi dalle "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato - CNR_DT204_2006":

- Il dosaggio minimo delle fibre per impieghi strutturali non deve essere inferiore allo 0,3% in volume;
- L'utilizzo per scopi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato con comportamento degradante è consentito purché la resistenza residua a trazione in esercizio f_{Fts} sia superiore di almeno il 20% di quella della matrice f_{ct} ;
- In tutte le strutture di calcestruzzo fibrorinforzato occorre garantire che il carico massimo sia superiore di almeno il 20% a quello di prima fessurazione; in alternativa si può accettare che sia uguale o superiore a patto che il rapporto tra lo spostamento massimo e quello di prima fessurazione sia almeno pari a 5;
- Possono essere realizzati elementi monodimensionali in calcestruzzo fibrorinforzato in assenza di armatura tradizionale se, oltre ad essere soddisfatte le precedenti limitazioni, il calcestruzzo fibrorinforzato abbia un comportamento incrudente a trazione tale per cui il rapporto tra la resistenza residua ultima f_{Ftu} e la resistenza della matrice f_{ct} sia almeno pari a 1,05.

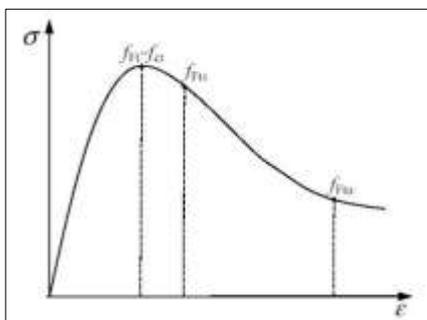


Figura 1

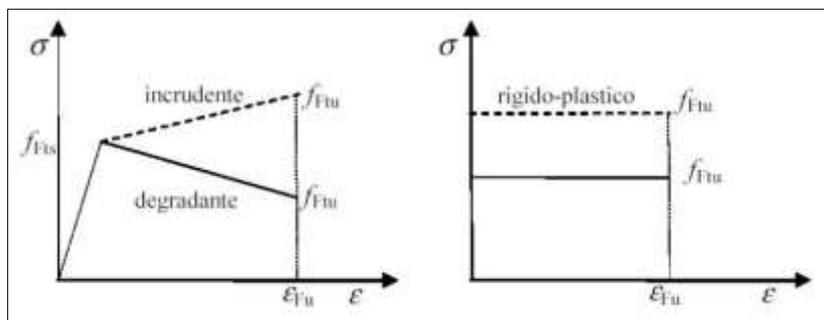


Figura 2

ISTRUZIONI PER LA PROGETTAZIONE DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

La progettazione delle strutture in calcestruzzo fibrorinforzato è basata sui principi enunciati dagli Eurocodici per le strutture in calcestruzzo ed in calcestruzzo armato. Nel presente paragrafo si accennerà alle regole contenute nelle "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato - CNR DT-204/2006" e nel documento "RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – σ - ϵ Design Method".

La resistenza ed il legame costitutivo a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato possono essere assimilati a quelli del calcestruzzo ordinario (Figura 2), quindi in accordo con quanto previsto da EUROCODE 2, "Design of Concrete Structures", ENV 1992-1-2, 2003.

Per la trazione, a meno di un comportamento incrudente che si raggiunge solo per dosaggi dell'ordine di 1.5–2 % in volume, la resistenza a trazione è la stessa della matrice cementizia f_{ct} , la quale può essere ricavata a partire dalla resistenza di prima fessurazione rilevata dalla prova di flessione (CNR_DT204_2006 e RILEM TC 162-TDF).

I legami costitutivi σ - ϵ si ricavano dalle curve σ - ω ottenute dalle prove di flessione (UNI 11039 oppure RILEM TC 162-TDF – Bending test).

Nel caso di comportamento a flessione incrudente o degradante vengono date alcune formule di equivalenza per ricavare i valori di resistenza residua a trazione in servizio f_{Fts} ed ultima f_{Ftu} a partire dalle resistenze equivalenti $f_{eq(0.6-0.6)}$ e $f_{eq(0.6-3.0)}$. Nel caso di comportamento rigido plastico, nelle Istruzioni CNR si usano formule leggermente diverse:

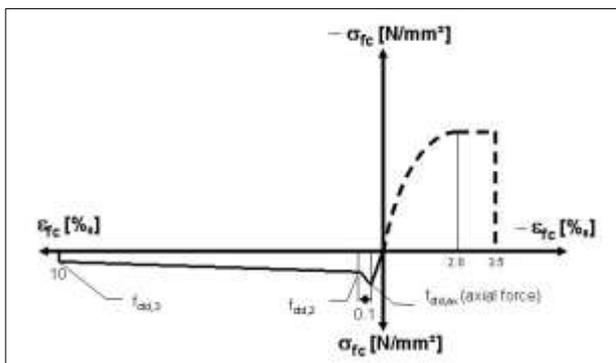


Figura 3

Lo stesso vale per le Raccomandazioni RILEM, con qualche differenza nel legame costitutivo e nelle formule che correlano le resistenze residue a flessione e quelle a trazione (Figura 3).

VERIFICHE DI RESISTENZA AGLI STATI LIMITE

Le verifiche degli elementi fibrorinforzati devono essere condotte sia nei riguardi degli *Stati Limite di Esercizio (SLE)*, che nei riguardi dello *Stato Limite Ultimo (SLU)*, come definiti nella Normativa vigente. La verifica nei riguardi di uno stato limite può essere omessa a favore di quella nei confronti di un altro stato limite, sempre che la prima sia una conseguenza della seconda. Si deve verificare, mediante il metodo dei coefficienti parziali, che, in tutte le situazioni di progetto, adottando i valori di progetto delle azioni, delle sollecitazioni e delle resistenze, non sia violato alcuno stato limite. Deve cioè risultare:

$$(1) \quad E_d \leq R_d$$

dove E_d ed R_d sono, rispettivamente, i valori di progetto del generico effetto preso in considerazione e della corrispondente resistenza nell'ambito dello stato limite esaminato. I valori di progetto si ricavano da quelli caratteristici, ricavati da prove normalizzate di laboratorio, attraverso opportuni coefficienti parziali, i cui valori, per i vari stati limite, sono indicati dalla Normativa vigente, opportunamente integrati per quanto attiene alla resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato.

I coefficienti parziali di sicurezza sui materiali, nella verifica allo SLU, possono essere ridotti nel caso di elevati controlli di qualità. Le proprietà meccaniche di resistenza e deformazione dei materiali, come già detto, sono quantificate dai corrispondenti valori caratteristici. I soli parametri di rigidezza (moduli di elasticità) dei materiali sono valutati attraverso i corrispondenti valori medi. Il valore di progetto della generica proprietà di resistenza, X_d , può essere espresso in forma generale mediante una relazione del tipo:

$$(2) \quad X_d = \frac{X_k}{\gamma_m}$$

dove X_k è il valore caratteristico della generica proprietà e γ_m è un coefficiente parziale del materiale. Nella determinazione del valore caratteristico della resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato si può tenere in conto dell'iperstaticità strutturale:

$$(3) \quad f_{Ftk} = f_{Ftm} - \alpha ks$$

dove f_{Ftm} è il valor medio, k è il *fattore di Student*, s lo scarto quadratico medio mentre α è un coefficiente che diminuisce all'aumentare dell'iperstaticità strutturale.

Verifica allo Stato Limite Ultimo per elementi monodimensionali

Presso-flessione

Il progetto allo SLU di elementi trave soggetti a flessione richiede la valutazione del momento resistente ultimo ed il confronto con il momento di progetto. Si ipotizza che la rottura per flessione si manifesti quando si verifichi una delle seguenti condizioni:

- Raggiungimento della massima deformazione di compressione nel calcestruzzo;
- Raggiungimento della massima deformazione di trazione nell'acciaio d'armatura (se presente);
- Raggiungimento della massima deformazione di trazione, ε_{Fu} , nel calcestruzzo fibrorinforzato.

La valutazione dello SLU a flessione ed a presso-flessione, con o senza la presenza di armatura ordinaria in barre d'acciaio, si può effettuare sulla base di legami costitutivi semplificati come in Figura 4:

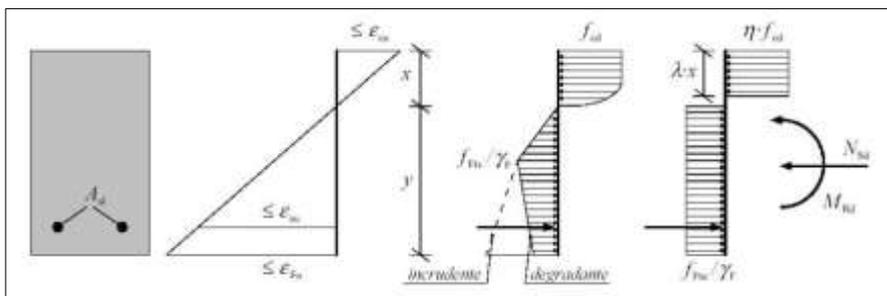


Figura 4

Un approccio analogo viene seguito dalle Raccomandazioni RILEM (Figura 5).

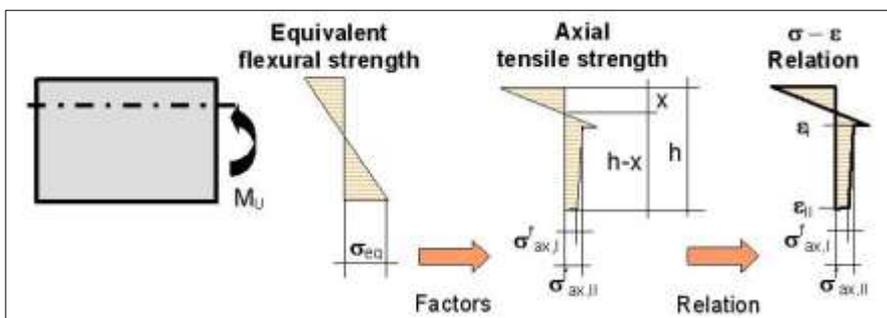


Figura 5

Come già riportato in precedenza, i valori da utilizzare nella verifica derivano dalle prove di flessione in laboratorio e vengono poi convertiti in valori di trazione, ridotti dei coefficienti parziali di sicurezza.

Taglio e torsione

Senza entrare nel dettaglio (si rimanda ai documenti normativi citati per l'approfondimento) è interessante la possibilità di quantificare l'apporto dovuto alle fibre (da determinarsi con lo stesso procedimento seguito per la presso-flessione) che permette di sostituire, parzialmente o totalmente, l'armatura a taglio o a torsione. Ove lo sforzo tagliante, o torcente, fosse di ridotta entità, le norme richiedono, comunque, un'armatura minima che può essere garantita dal rinforzo fibroso.

Verifica allo SLU per elementi piastra

Per elementi piastra senza armatura convenzionale soggetti a prevalenti sforzi di flessione, la verifica di resistenza può essere effettuata con riferimento al momento resistente, m_{Rd} , valutato ipotizzando il legame costitutivo rigido-plastico:

$$(4) \quad m_{Rd} = \frac{f_{Ftud} \cdot t^2}{2}$$

Nel caso di azione contemporanea di due momenti flettenti m_x e m_y agenti in direzioni ortogonali, la verifica allo SLU richiede il soddisfacimento della limitazione:

$$(5) \quad \left(\frac{m_x}{m_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{m_y}{m_{Rd}} \right)^2 \leq 1$$

Vale la pena di notare che la capacità resistente di una lastra appoggiata al suolo, come nel caso delle pavimentazioni, sarebbe ben poca cosa se valutata, con un approccio tradizionale, in termini tensionali, come prescritto da tutte le normative, e le Istruzioni CNR non fanno eccezione.

Per tenere in dovuto conto il contributo fornito dalla iperstaticità strutturale, indispensabile per comportamenti flessionali degradanti e molto elevata nel caso di pavimentazioni su suolo, si può operare con metodi di analisi non lineare (*Yield lines method* oppure *Non-Linear Fracture Mechanics method*).

Verifica allo Stato Limite di Esercizio

Verifica delle tensioni

La verifica delle tensioni di compressione in esercizio deve essere eseguita in accordo alla Normativa vigente, come per il calcestruzzo ordinario. Se la struttura è realizzata con un fibrorinforzato a comportamento degradante, la verifica delle tensioni di trazione in esercizio è implicitamente soddisfatta se la stessa struttura è stata verificata allo SLU.

Se, invece, il calcestruzzo fibrorinforzato ha comportamento incrudente, è necessario eseguire anche la verifica delle tensioni di trazione in esercizio, controllando che la massima tensione sollecitante rispetti la condizione seguente:

$$(6) \quad \sigma_t \leq 0,6 \cdot f_{Ftuk}$$

Apertura delle fessure

Nella valutazione dell'ampiezza caratteristica delle fessure, è possibile quantificare il contributo offerto dalle fibre tramite l'aliquota di sforzo assorbito dal fibrorinforzato a beneficio dell'armatura ordinaria (RILEM TC 162-TDF ed Istruzioni CNR_DT204_2006). Per far questo le Istruzioni CNR suggeriscono di assumere una distribuzione costante delle tensioni di ampiezza pari alla tensione di trazione caratteristica allo SLE, f_{Ftsk} .

Armatura minima per il controllo della fessurazione

Per governare la fessurazione, negli elementi inflessi è necessario prevedere un'armatura minima. Nelle Istruzioni CNR l'area dell'armatura minima vale:

$$(7) \quad A_{s,min} = (k_c \cdot k_s \cdot k_p \cdot f_{ctm} - f_{Ftsm}) \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

dove:

- A_s è l'area di armatura a flessione tesa [mm²]. In caso A_s risulti negativa, l'armatura minima può essere costituita unicamente da rinforzo fibroso;
- A_{ct} è l'area di calcestruzzo della sezione soggetta a trazione [mm²], determinata assumendo uno stato di sforzo al limite elastico;
- σ_s è la massima tensione nell'armatura ammissibile in fase fessurata. Può essere assunta pari allo snervamento dell'acciaio;
- $f_{ct,ef}$ è la resistenza a trazione del calcestruzzo effettiva al momento della prima fessurazione [mm²]. Dipende dalle condizioni ambientali. In assenza di dati specifici, si deve considerare la resistenza a trazione determinata a 28 giorni dal getto;
- k_c è un coefficiente che tiene conto della redistribuzione sezionale degli sforzi immediatamente prima della fessurazione. $k_c=1$ in presenza di pura trazione, $k_c=0.4$ in presenza di pura flessione,

$$(8) \quad k_c = \frac{1 + \frac{e}{0,4h}}{1 + \frac{6e}{h}} \quad \text{per } e/h < 0.4$$

$$(9) \quad k_c = \frac{1 + \frac{0,4h}{e}}{2,5 \left(1 + \frac{h}{6e} \right)} \quad \text{per } e/h > 0.4$$

- k_s tiene conto dell'effetto di sforzi autoequilibrati non uniformi. In assenza di dati precisi, tale valore può essere preso pari a 0.8;
- k_p tiene conto della presenza di precompressione:

$$(10) \quad k_p = 1 - \frac{\alpha}{k_c} \left(1 - k_c + 2,4 \cdot \frac{e_v}{h} - 6 \cdot \frac{e_v \cdot k_c}{h} \right)$$

dove:

$$(11) \quad \alpha = \frac{\sigma_{cp}}{k_s \cdot f_{ct,ef}}$$

è il rapporto di precompressione, e_v è l'eccentricità della risultante della forza di precompressione,

$$(12) \quad k_p = 1 - \frac{\alpha}{k_c} (1 - k_c)$$

In pura flessione $k_c=0.4$, quindi $k_p=1-1.5\alpha$.

NORMATIVA

Di seguito sono riportate tutte le norme che 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 – σ - ε 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