



Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
Servizio Tecnico Centrale

***Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo
e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo
fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche.***

Edizione maggio 2022

INDICE

1	SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	4
2	MATERIALI	5
2.1	Calcestruzzo fibrorinforzato	5
2.2	Componenti del FRC	5
2.3	Prestazioni di un calcestruzzo fibrorinforzato	5
3	PROPRIETA' MECCANICHE DEL MATERIALE FRC	6
3.1	Lunghezza caratteristica strutturale	6
3.2	Fattori di efficacia strutturale del FRC	8
3.3	Legame costitutivo uniassiale semplificato	10
3.3.1	Trazione uniassiale	10
3.3.2	Compressione uniassiale	11
3.4	Legame costitutivo uniassiale per analisi strutturali avanzate	12
3.4.1	Comportamento a trazione	12
3.4.2	Comportamento a compressione	16
3.5	Prestazioni meccaniche minime del FRC per le applicazioni strutturali	16
4	COEFFICIENTI PARZIALI DI SICUREZZA	17
5	PROGETTAZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI IN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO FRC	17
5.1	Verifica agli stati limite ultimi	17
5.1.1	Elementi lineari	17
5.1.1.1	Flessione composta retta in elementi monodimensionali	17
5.1.1.2	Taglio	18
5.1.1.2.1	Taglio in elementi senza armatura trasversale	18
5.1.1.2.2	Taglio in elementi con armatura longitudinale e trasversale	19
5.1.1.3	Torsione nelle travi con armatura longitudinale	19
5.1.1.3.1	Torsione in elementi senza armatura trasversale	19
5.1.1.3.2	Torsione in elementi con armatura trasversale	20
5.1.2	Elementi bidimensionali caricati nel piano medio (stato piano di tensione)	20
5.1.2.1	Elementi senza armatura secondaria	20
5.1.2.2	Elementi con armatura secondaria	20
5.1.3	Elementi Bidimensionali verticali caricati normalmente al piano medio	21
5.1.4	Elementi Bidimensionali orizzontali caricati normalmente al piano medio	21
5.1.4.1	Flessione di elementi bidimensionali con portanza bidirezionale	21
5.1.4.2	Flessione di elementi bidimensionali inflessi con portanza unidirezionale	22
5.1.4.3	Punzonamento	22
5.1.4.3.1	Elementi senza armatura trasversale	22
5.1.4.3.2	Elementi con armatura trasversale	22
5.1.5	Pavimentazioni con funzione strutturale (piastre con supporto continuo)	23
5.1.5.1	Analisi strutturale delle pavimentazioni	24
5.1.6	Zone diffusive (D-regions): progettazione con modelli a traliccio (strut-and-tie)	24

5.1.7	Rivestimenti di galleria _____	24
5.2	Verifiche agli stati limite di esercizio _____	25
5.2.1	Verifica delle tensioni _____	25
5.2.2	Determinazione dell'ampiezza delle fessure _____	25
5.2.2.1	Elementi con armatura longitudinale _____	25
5.2.2.2	Elementi senza armatura longitudinale _____	25
5.2.2.3	Ampiezza massima delle fessure in elementi senza armatura convenzionale ____	26
5.2.2.4	Armatura minima per il controllo della fessurazione _____	26
5.3	Resistenza alle alte temperature _____	27
5.4	Resistenza a fatica _____	27
6	COPRIFERRO E INTERFERRO _____	28
7	ANCORAGGI E SOVRAPPOSIZIONI DELLE ARMATURE _____	28
8	MESSA IN OPERA CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO _____	28
8.1	Procedure di accettazione in cantiere _____	28
8.2	Esecuzione dei getti _____	29
9	ELEMENTI STRUTTURALI IN CALCESTRUZZO FRC PREFABBRICATI _____	29
10	CONTROLLO E COLLAUDO _____	30
	APPENDICE A – NORMATIVA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO _____	31
	APPENDICE B – SIMBOLOGIA _____	33
	ALLEGATO 1 _____	35
	ALLEGATO 2 _____	38

1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 (di seguito NTC) prescrivono, al § 11.1, che tutti i materiali e i prodotti da costruzione, quando impiegati per uso strutturale, debbano essere identificati e in possesso di specifica qualificazione all'uso previsto e debbano altresì essere oggetto di controlli in fase di accettazione da parte del direttore dei lavori (DL).

A tal fine, le citate Norme prevedono che i calcestruzzi fibrorinforzati per uso strutturale debbano essere in possesso di un “Certificato di Valutazione Tecnica” (nel seguito CVT) rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, sulla base di linee guida approvate dallo stesso Presidente.

Inoltre, le medesime NTC, al § 11.2.12 CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO (FRC) stabiliscono che *“sia per la qualificazione dei calcestruzzi fibrorinforzati che per la progettazione delle strutture in FRC, si dovrà fare esclusivo riferimento a specifiche disposizioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, rese attraverso apposite Linee Guida”*.

La presente Linea Guida fornisce le procedure per la progettazione, l'esecuzione e il controllo nel caso di impiego di calcestruzzi fibrorinforzati, denominati *FRC* (Fibre Reinforced Concrete), per la realizzazione di nuovi elementi strutturali e per il consolidamento di strutture esistenti in cemento armato.

Il calcestruzzo fibrorinforzato per impieghi strutturali deve essere qualificato in accordo al caso C) di cui al § 11.1 delle vigenti NTC ed in conformità alla *“Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”*. Le caratteristiche meccaniche prestazionali del FRC alla base della progettazione sono definite nelle Linee Guida di cui sopra, sono contenute nel CVT di qualificazione e sono garantite dal Fabbricante.

I calcestruzzi fibrorinforzati possono essere preparati nello stabilimento del Fabbricante e forniti in cantiere come prodotto pronto per l'impiego, oppure forniti in cantiere come prodotto secco premiscelato, al quale va aggiunta l'acqua in cantiere. In ogni caso il Direttore dei Lavori può accettare soltanto prodotti in possesso della qualificazione di cui alle Linee Guida sopra citate.

Gli elementi strutturali in FRC possono essere classificati come:

- elementi lineari (travi, colonne, etc.);
- elementi prevalentemente bidimensionali verticali (lastre, setti, etc.);
- elementi prevalentemente bidimensionali orizzontali (piastre, pavimentazioni, etc.);
- elementi a guscio (tubi, conci di tunnel prefabbricati, rivestimenti per gallerie, etc.);
- elementi tridimensionali le cui tre dimensioni sono paragonabili (fondazioni, frangiflutti, etc.).

Per quanto non specificato nella presente Linea Guida valgono i riferimenti e le prescrizioni di cui alle NTC.

2 MATERIALI

Nel § 11 delle NTC sono indicati i contenuti tecnici e le regole di qualificazione, certificazione ed accettazione dei materiali e dei prodotti per uso strutturale, in coerenza con le procedure consolidate del Servizio Tecnico Centrale (di seguito STC) e del Consiglio Superiore, nonché delle disposizioni comunitarie in materia.

2.1 Calcestruzzo fibrorinforzato

Il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale composito caratterizzato da una matrice cementizia e da fibre discrete (discontinue). La matrice è costituita da calcestruzzi o da malte, normali o ad alte prestazioni; le fibre possono essere di acciaio, di materiale polimerico, di vetro, di carbonio o di materiale naturale.

Le presenti Linee Guida si applicano ai soli calcestruzzi fibrorinforzati costituiti da fibre di acciaio o da fibre polimeriche: il § 11.2.12 delle NTC definisce il Calcestruzzo fibrorinforzato (FRC) come *“caratterizzato dalla presenza di fibre discontinue nella matrice cementizia; tali fibre possono essere realizzate in acciaio o materiale polimerico, e devono essere marcate CE in accordo alle norme europee armonizzate, quali la UNI EN 14889-1 ed UNI EN 14889-2 per le fibre realizzate in acciaio o materiale polimerico. La miscela del calcestruzzo fibrorinforzato deve essere sottoposta a valutazione preliminare secondo le indicazioni riportate nel precedente § 11.2.3 con determinazione dei valori di resistenza a trazione residua f_{R1k} per lo Stato limite di esercizio e f_{R3k} per lo Stato limite Ultimo determinati secondo UNI EN 14651:2007”*.

2.2 Componenti del FRC

I componenti del FRC sono descritti nella *“Linea guida per l’identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”*.

2.3 Prestazioni di un calcestruzzo fibrorinforzato

Le prestazioni di un calcestruzzo fibrorinforzato sono definite nella *“Linea guida per l’identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”* al § 2.3.2 e sono dichiarate dal Fabbrikante in conformità alla Scheda Tecnica di cui all’Allegato 2 delle medesime LL.GG..

Il progettista deve utilizzare le classi di resistenza definite nel sopracitato documento di riferimento per la qualificazione; tali valori sono dichiarati dal Fabbrikante, esplicitamente riportati nel CVT di qualificazione e garantiti dal Fabbrikante stesso. Il valore caratteristico della resistenza a

compressione va definito analogamente alle modalità previste per i calcestruzzi privi di fibre. La resistenza residua a trazione, in accordo con la Linea Guida per la qualificazione, è definita attraverso i valori caratteristici delle resistenze f_{R1k} e f_{R3k} , da valutare a partire dalla classe di resistenza riportata nel CVT e non direttamente sulla base di prove sperimentali, riferendosi alla progettazione di nuovi elementi strutturali.

La resistenza f_{R1k} , espressa in MPa, corrisponde alla resistenza utilizzata per definire la classe di resistenza residua, mentre f_{R3k} è dato dalla Tabella 1 in funzione della lettera che compare nella classe di resistenza residua e di f_{R1k} . Ad esempio per un FRC con classe di resistenza 2.5c si avrà $f_{R1k} = 2.50$ MPa e $f_{R3k} = 2.25$ MPa.

Tabella 1: Valori di f_{R3k} in MPa in funzione dei parametri utilizzati per definizione della classe di resistenza residua.

		f_{R1k} [MPa]											
		1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0
Classificazione sulla base del rapporto $\frac{f_{R3k}}{f_{R1k}}$	a	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
	b	0.70	1.05	1.40	1.75	2.10	2.80	3.50	4.20	5.60	7.00	8.40	9.80
	c	0.90	1.35	1.80	2.25	2.70	3.60	4.50	5.40	7.20	9.00	10.80	12.60
	d	1.10	1.65	2.20	2.75	3.30	4.40	5.50	6.60	8.80	11.00	13.20	15.40
	e	1.30	1.95	2.60	3.25	3.90	5.20	6.50	7.80	10.40	13.00	15.60	18.20

3 PROPRIETA' MECCANICHE DEL MATERIALE FRC

3.1 Lunghezza caratteristica strutturale

Quando si considerano FRC con comportamento post-fessurativo degradante, la definizione del legame costitutivo sforzo-deformazione si basa sull'identificazione della apertura di fessura, w , e sulla corrispondente lunghezza caratteristica strutturale, l_{cs} , dell'elemento. Quest'ultima corrisponde alla lunghezza del tratto di elemento strutturale interessato dalla fessura e generalmente coincide con la distanza tra le fessure in caso di multi-fessurazione e con l'altezza della sezione in assenza di multi-fessurazione. Pertanto, la deformazione può essere assunta pari a:

$$\varepsilon = w / l_{cs} \quad (1)$$

Negli elementi con o senza armatura convenzionale (barre o reti), laddove si faccia uso di un modello a sezioni piane, l_{cs} è quindi così definita:

$$l_{cs} = \min \{s_{rm}, h\} \quad (2)$$

dove:

- s_{rm} è la distanza media tra le fessure (Eq. 3);
- h è l'altezza dell'elemento strutturale.

La distanza media tra le fessure può essere calcolata come segue:

$$s_{rm} = 1,5 \cdot c + (k_{fl} \cdot k_b) / 7,2 \cdot \Phi / \rho_{p,eff} \cdot (1 - \alpha_f) \quad (3)$$

dove:

- $\alpha_f = f_{Fts,ef} / f_{ctm} \leq 1,0$ dove $f_{Fts,ef}$ è la resistenza residua in esercizio, definita al §3.3, ed f_{ctm} è la resistenza media a trazione,
- $\rho_{p,eff} = (A_s + \xi_l A_p) / A_{c,eff}$ rapporto geometrico di armature totale efficace,
- A_s e A_p sono rispettivamente le aree di armatura lenta e armatura da precompressione aderente agenti in zona tesa,
- $A_{c,eff}$ l'area efficace di calcestruzzo tesa,
- $\xi_l = \xi \Phi / \Phi_p$ dove Φ e Φ_p sono, rispettivamente, il diametro dell'armatura lenta e il diametro (o il diametro equivalente $\Phi_{p,eq}$) dell'armatura da precompressione. I valori di ξ sono indicati in Tabella 1. In caso di assenza di armatura lenta $\xi_l = \xi$.

Tabella 2: Rapporto tra le resistenze di aderenza dell'armatura da precompressione e dell'armatura ordinaria

Acciaio da precompressione	Rapporto di resistenza all'aderenza ξ		
	Pre-tensione	aderenza, post-tensione	
		$f_{ck} \leq 50$ MPa	$f_{ck} \geq 70$ MPa
barre lisce e fili	non applicabile	0.30	0.15
trefoli	0.60	0.50	0.25
fili indentati	0.70	0.60	0.30
barre nervate	0.80	0.70	0.35

Nota: possono essere interpolati valori intermedi tra 50 MPa < f_{ck} < 70 MPa.

il diametro $\Phi_{p,eq}$ equivalente può essere calcolato come:

- $\Phi_{p,eq} = 1,60 (A_p)^{1/2}$ per armature in gruppo;
- $\Phi_{p,eq} = 1,75 \Phi_{filo}$ per singoli trefoli a 7 fili, ove Φ_{filo} rappresenta il diametro del filo;
- $\Phi_{p,eq} = 1,20 \Phi_{filo}$ per singoli trefoli a 3 fili;
- $k_{fl} = (h - h_{c,eff}) / h$ avendo indicato con $h_{c,eff}$ l'altezza della zona tesa efficace del tirante equivalente;
- $k_{fl} = 1$ in caso di pura trazione;
- $k_b = 0,9 + 0,6 \Phi / c_v$ avendo indicato con Φ il diametro della barra e c_v il copriferro verticale per barre in condizioni di cattiva aderenza;
- $k_b = 0,9$ per barre in condizioni di buona aderenza.

Nel caso di una modellazione della struttura agli elementi finiti, il parametro l_{cs} (lunghezza caratteristica strutturale) precedentemente definito non può essere utilizzato. In tal caso, deve essere considerata un'espressione alternativa che tenga conto del diverso modello cinematico introdotto dalle funzioni di forma rispetto al modello di sezione piana per elementi lineari o di segmento rettilineo per elementi bidimensionali: tale parametro risulta generalmente correlato alla dimensione dell'elemento finito.

La resistenza residua f_{Fu} è associata all'apertura della fessura presa come riferimento dello Stato Limite Ultimo w_u : quest'ultima può essere calcolata come:

$$w_u = \min (l_{cs} \times \varepsilon_{fu}; 2,5 \text{ mm}) \quad (4)$$

assumendo ε_{fu} pari a:

- 2% per una distribuzione di deformazione variabile sull'altezza della sezione con deformazioni estreme di segno opposto;
- 1% per una distribuzione costante della deformazione lungo la sezione con deformazioni positive (elongazione);
- $\varepsilon_{fu} = 1\% + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / 2$ per una distribuzione lineare delle tensioni positive, avendo indicato con ε_2 la massima deformazione positiva e con ε_1 la minima deformazione positiva.

Nell'espressione precedente, la prima condizione ($l_{cs} \times \varepsilon_{fu}$) esprime il soddisfacimento di un livello minimo di duttilità, mentre la seconda (2,5 mm) rappresenta un limite sperimentale che garantisce un comportamento privo di discontinuità significative nella resistenza residua.

Nel caso di FRC con comportamento post-fessurazione incrudente (in trazione), viene meno l'esigenza di utilizzare la lunghezza caratteristica strutturale in quanto non si manifesta alcuna fessurazione ma solo la formazione di micro fessure multiple per deformazioni complessive non inferiori all'1%. In questo caso il legame sforzo-deformazione si determina sperimentalmente in maniera diretta attraverso una prova di trazione uniassiale.

3.2 Fattori di efficacia strutturale del FRC

Il comportamento del materiale evidenziato dai test condotti per la qualificazione (EN 14651) può differenziarsi anche significativamente (in modo vantaggioso o svantaggioso) dal comportamento del FRC nell'elemento strutturale. Il progettista deve quindi tener conto della procedura di getto e della consistenza del calcestruzzo, utilizzando per la progettazione valori delle resistenze tramite coefficienti (definiti nel seguito) che tengono conto dell'orientamento e della distribuzione delle fibre, mediante un coefficiente κ_0 che correla il comportamento del FRC nel generico punto della struttura ed in una specifica direzione, al comportamento rilevato nella prova di flessione EN 14651, usata per classificare il materiale.

Una distribuzione isotropa ed omogenea di fibre orientate nelle tre direzioni comporta teoricamente un coefficiente κ_0 di poco inferiore all'unità, oscillante tra 0.85 e 0.95 a seconda della geometria della fibra. Infatti, il valore di $\kappa_0 = 0.85$ corrisponde al valore, deducibile teoricamente e confermato sperimentalmente per un calcestruzzo con fibre di lunghezza 60 mm e nasce dal rapporto tra il fattore di orientamento $\alpha_f = 0.5$, corrispondente al caso 3D perfettamente isotropo ed omogeneo ed il fattore di orientamento $\alpha_0 = 0.58$, che caratterizza i provini usati per la caratterizzazione. I valori κ_0 da utilizzare nelle applicazioni più comuni sono indicati nel Paragrafo 5 e nell'Allegato 1. Se non diversamente specificato, per tener conto a fini cautelativi di possibili disomogeneità ed anisotropie del materiale, sulla base dei valori riscontrati nelle esperienze finora disponibili, si assume un valore $\kappa_0 = 0.5$.

Nell'ipotesi di distribuzione omogenea delle fibre, quando l'orientamento delle stesse ha effetti favorevoli (cioè quando le fibre sono prevalentemente allineate ortogonalmente al piano di frattura), si può assumere un coefficiente di orientamento $1 < \kappa_0 < 1.7$, purché verificato sperimentalmente per lo specifico elemento/struttura che si andrà a realizzare e specificando la modalità di getto. Viceversa, se l'orientamento ha effetti sfavorevoli in una direzione, cioè quando le fibre sono prevalentemente allineate parallelamente al piano di frattura, si dovrà applicare un coefficiente di orientamento $\kappa_0 < 1$; alcuni casi strutturali significativi sono riportati nell'Allegato 1.

Quando si utilizza $\kappa_0 > 1.0$ in una direzione, il materiale deve essere considerato con proprietà resistenti ortotrope e pertanto in direzione ortogonale occorre assegnare un adeguato valore $\kappa_0 < 1.0$.

Oltre al coefficiente di orientamento, per situazioni caratterizzate da iperstaticità bidirezionale o multi-direzionale, i valori delle risposte strutturali risultano caratterizzati da valori di resistenza che si avvicinano ai valori medi in quanto, per volumi di frattura significativi, la variabilità dei valori di resistenza residua viene fortemente ridotta, rispetto a quanto rilevato nella prova di flessione utilizzata per la qualificazione, nella quale è rilevante l'eterogeneità del numero di fibre nella sezione interessata dal processo di frattura. A tale scopo viene inserito l'ulteriore fattore geometrico $\kappa_G \geq 1.0$ così definito:

$$\kappa_G = 1 + 0.5 A_{ct} [m^2] \leq 1.25 \quad (5)$$

ove A_{ct} risulta l'area della sezione coinvolta dal processo di frattura specifico considerato.

Nel caso di elementi con spessore inferiore a 60 mm, a causa del marcato orientamento delle fibre, si suggerisce di ottenere valori maggiormente rappresentativi delle caratteristiche meccaniche post-fessurative mediante provini che riproducono gli elementi strutturali reali, caratterizzati dallo stesso spessore e realizzati con le stesse modalità di getto, privi di intaglio. La verifica sperimentale è obbligatoria nel caso di calcestruzzi auto-compattanti o con classe di lavorabilità S5. Tali provini, definiti nel seguito come "provini strutturali", si aggiungono ai provini previsti per le prove di

accettazione e devono essere realizzati in fase di pre-qualifica, prima della realizzazione dell'elemento strutturale.

I valori rilevati dai provini strutturali devono essere identificati da almeno 6 prove con le modalità descritte nell'Allegato 2.

3.3 Legame costitutivo uniassiale semplificato

3.3.1 Trazione uniassiale

Per le verifiche di sicurezza allo Stato Limite Ultimo (SLU), la resistenza post-fessurativa a trazione degli elementi in FRC (normalmente trascurata nel calcestruzzo ordinario) può essere considerata attraverso uno dei legami costitutivi semplificati (sforzo-apertura di fessura) descritti nel seguito: un modello lineare che può essere incrudente o degradante (*Figura 1a*), oppure un modello rigido-plastico (*Figura 1b*). Il parametro f_{Ftld} rappresenta la resistenza di progetto per apertura di fessura w nulla; il parametro f_{Ftud} rappresenta la resistenza di progetto allo stato limite ultimo assunta pari al valore residuo per $w = w_u$.

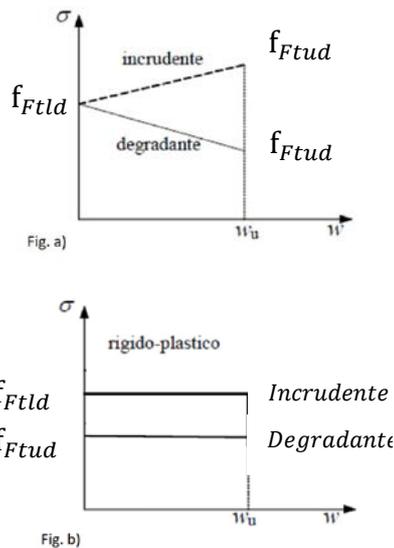


Figura 1: Legame sforzo-apertura di fessura semplificato:
(a) modello lineare; (b) modello rigido plastico.

Il modello lineare identifica due valori di progetto

$$f_{Ftld} = f_{Ftlk,ef} / \gamma_{cf} \quad (6a)$$

$$f_{Ftud} = f_{Ftuk,ef} / \gamma_{cf} \quad (6b)$$

dove γ_{cf} indica il coefficiente parziale per il calcestruzzo fibrorinforzato definito nel § 4 mentre $f_{Ftlk,ef}$ e $f_{Ftuk,ef}$ rappresentano i valori efficaci delle resistenze caratteristiche a trazione per $w = 0$ e per $w = w_u$, calcolati, in funzione dei fattori di efficacia strutturale definiti nel §3.2, come

$$f_{Ftlk,ef} = \kappa_0 \kappa_G f_{Ftlk} \quad (7a)$$

$$f_{Ftuk,ef} = \kappa_0 \kappa_G f_{Ftuk} \quad (7b)$$

con

$$f_{Ftlk} = 0,53f_{R1k} - 0,14f_{R3k} \quad (8a)$$

$$f_{Ftuk} = f_{Ftlk} - \frac{w_u}{CMOD} (f_{Ftlk} - 0,57f_{R3k} + 0,26f_{R1k}) \quad (8b)$$

dove w_u è la massima apertura di fessura prevista (a favore di sicurezza) nella progettazione strutturale, data dall'Eq. 4.

Il modello rigido-plastico (Fig. 1b) identifica un valore di resistenza unico, f_{Ftud} , basato sul comportamento allo stato limite ultimo. Per materiali con comportamento degradante tale valore è dato da

$$f_{Ftud} = \frac{\kappa_0 \kappa_G f_{R3k}}{\gamma_{cf} \cdot 3} \quad (9a)$$

mentre per materiali incrudenti si utilizza

$$f_{Ftud} = f_{Ftd} \quad (9b)$$

Per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio si fa riferimento alla resistenza di progetto f_{Ftsd} definita dalla relazione

$$f_{Ftsd} = f_{Ftsk,ef} / \gamma_{cf} \quad (10a)$$

con

$$f_{Ftsk,ef} = \kappa_0 \kappa_G f_{Ftsk} \quad (10b)$$

e

$$f_{Ftsk} = 0.37f_{R1k} \quad (10c)$$

3.3.2 Compressione uniassiale

Per calcestruzzi fibrorinforzati con resistenza residua a flessione f_{R1k} inferiore a 5 MPa è possibile trascurare il contributo delle fibre alla resistenza a compressione ed assumere la legge costitutiva uniassiale in compressione definita per calcestruzzi ordinari.

Per calcestruzzi con f_{R1k} superiore a 5 MPa, il legame costitutivo sforzo-deformazione ($\sigma_c - \epsilon_c$) in compressione, definito nelle NTC, risulta modificato per effetto del confinamento passivo esercitato dalle fibre nella direzione ortogonale alla direzione dello sforzo di compressione.

In via semplificata è possibile adottare il diagramma parabola-rettangolo di seguito definito in base alla resistenza di progetto f_{cd} e alla deformazione ultima di progetto ϵ_{cu} .

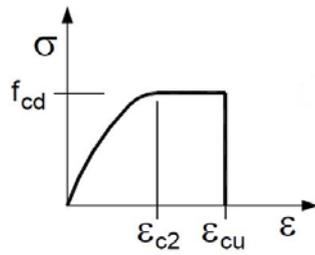


Figura 2 – Modello σ - ε a compressione per il calcestruzzo fibroso

Il diagramma di Figura 2 è individuato dalle seguenti relazioni (resistenze espresse in MPa)

$$\varepsilon_{c2} (\text{‰}) = 0.7f_{cm}^{1/3} (1+0.03f_{R1k}) \quad (11a)$$

$$\varepsilon_{cu} = k \cdot \varepsilon_{c2} \quad (11b)$$

$$k = 1 + 7 / (82 - 2.2 f_{R1k})^{0.5} \quad (11c)$$

$$f_{cd} = 0.85 f_{ck} / \gamma_c \quad (11d)$$

dove f_{ck} indica la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo fibrorinforzato, γ_c il coefficiente parziale per il calcestruzzo (definito dalla normativa vigente) e f_{cm} la resistenza media a compressione, valutabile secondo le NTC2018 come $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa.

3.4 Legame costitutivo uniassiale per analisi strutturali avanzate

3.4.1 Comportamento a trazione

Per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio (SLE) e per modellazioni non-lineari con gli elementi finiti, la resistenza post-fessurativa degli elementi in FRC può essere considerata attraverso uno dei legami costitutivi riportati nel seguito (le grandezze fanno riferimento ai valori caratteristici).

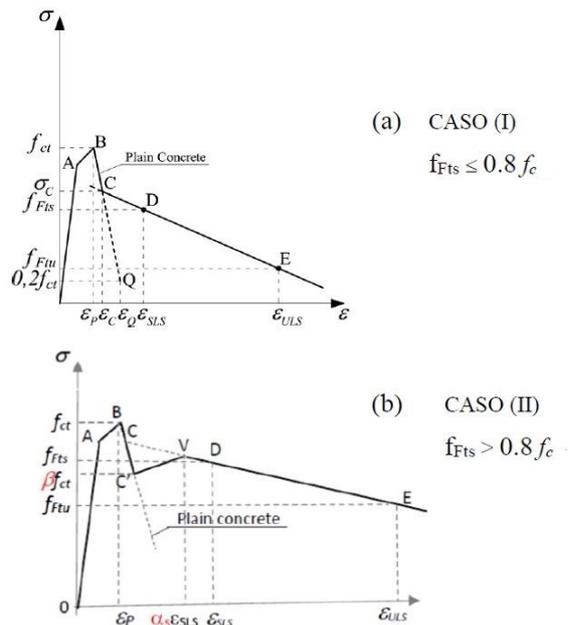


Figura 3: Legami costitutivi post-fessurazione semplificati per legami degradanti e quasi-plastici (CASO I e CASO II)

In Figura 3 il comportamento pre-fessurativo del calcestruzzo è rappresentato da una bilatera dove il Punto A corrisponde al limite elastico, e ha coordinate $(0.9 f_{ctk}/E_{ct}, 0.9 f_{ctk})$, dove f_{ctk} rappresenta la resistenza a trazione uniassiale del calcestruzzo, E_{ct} il modulo elastico a trazione del FRC che può essere posto pari a quello al modulo elastico a compressione definito dalla normativa vigente, mentre il Punto B corrisponde al picco di fessurazione, associato al valore di deformazione $\varepsilon_p=0,015\%$. In alternativa, nel caso di materiali degradanti (CASO I), in fase pre-fessurativa ($\sigma < f_{ctk}$) si può adottare lo stesso legame costitutivo adottato per il calcestruzzo senza fibre che può essere assunto, in forma semplificata, come lineare.

In fase fessurata si può adottare un legame bilineare (Figura 3a) dove il primo ramo della bilatera (\overline{BC}) è descritto analiticamente dalle espressioni riportate nel seguito:

$$\frac{\sigma - f_{ctk}}{0,2f_{ctk} - f_{ctk}} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_P}{\varepsilon_Q - \varepsilon_P}, \text{ per } \varepsilon_P \leq \varepsilon \leq \varepsilon_C \quad (12)$$

con

$$\varepsilon_Q = \frac{G_f}{f_{ctk} \cdot l_{cs}} + \left(\varepsilon_P - \frac{0,8f_{ctk}}{E_c} \right) \quad (13)$$

dove E_c è il modulo elastico del calcestruzzo, valutabile secondo la normativa vigente, G_f rappresenta l'energia di frattura del calcestruzzo senza fibre, valutabile come

$$G_f = 73 f_{ck}^{0,18} \text{ [N/m]} \quad (14)$$

e f_{ck} è la resistenza caratteristica cilindrica a compressione espressa in MPa.

Per materiali degradanti, la resistenza residua del quarto ramo (rappresentativa dello sfilamento delle fibre) è definita da due punti con coordinate $(\varepsilon_{SLS}, f_{Ftsk,ef})$ e $(\varepsilon_{ULS}, f_{Ftuk,ef})$ dove:

$$\varepsilon_{SLS} = 0.5/l_{cs} \text{ (con } l_{cs} \text{ in mm)} \quad (15a)$$

$$\varepsilon_{ULS} = w_u/l_{cs} = \min(\varepsilon_{Fu}, 2,5/l_{cs}) \quad (15b)$$

con ε_{Fu} descritta nel § 3.1 e $f_{Ftsk,ef}$ e $f_{Ftuk,ef}$ definiti nel § 3.3.1.

Per materiali quasi-plastici (CASO II), ovvero materiali caratterizzati da una resistenza residua $f_{Ftsk,ef} \geq 0.8f_{ctm}$, il processo di frattura mostra ancora una localizzazione, ma la resistenza residua oltre la fessurazione rimane prossima alla resistenza di picco della matrice. In questo caso la legge che ne descrive il comportamento oltre la fessurazione viene definita da una trilatera, dove il primo ramo (B-C') è ancora quello del calcestruzzo privo di fibre, mentre il secondo ramo (C'-V) è descritto dalla relazione analitica:

$$\frac{\sigma - \beta f_{ctk}}{\sigma_V - \beta f_{ctk}} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{C'}}{\alpha_S \varepsilon_{SLS} - \varepsilon_{C'}} \quad (16)$$

per $\varepsilon_{C'} \leq \varepsilon \leq \alpha_S \varepsilon_{SLS}$

Raggiunto il punto V il materiale segue il ramo di pull-out caratterizzato dalla pendenza stabilita dai punti D ed E analoghi a quelli del Caso I. I valori α_s e β sono definiti, a favore di sicurezza, pari ai valori $\alpha_s = 1$ e $\beta = 0.75$.

Per materiali incrudenti, il legame costitutivo a trazione del calcestruzzo in fase fessurata è determinato sperimentalmente attraverso prove di trazione diretta con provino vincolato alle estremità libere di ruotare (vincolo a cerniera). Le prove andranno eseguite su un numero di provini non inferiore a 6. Il legame costitutivo per le analisi numeriche corrisponderà al valore caratteristico della curva sperimentale.

Tra i materiali incrudenti si distinguono due casi: i materiali che mostrano un ramo incrudente pre-picco con deformazione limite minore dell'1% (CASO III, Figura 4;) e quelli con deformazione limite maggiore o uguale all' 1% (CASO IV, Figura 5). In entrambi i casi il valore di picco (ϵ_P , f_{Ftk}) eccede il valore di resistenza a trazione f_{ctm} relativo alla sola matrice, determinato a partire dalla resistenza a compressione f_{ck} secondo la Normativa vigente.

Il modulo elastico E_F (tratto O-A) è calcolato in funzione della resistenza a compressione. Il valore f_{Flk} , dove il materiale cambia la sua rigidità ed inizia ad accumulare danno e deformazioni irreversibili associati alla micro-fessurazione (punto A), spesso eccede il valore di f_{ct} e risulta prossimo al 90% del valore di resistenza al picco.

Nel Caso III, il ramo pre-picco è confinato allo S.L.E., perché spesso la massima deformazione ϵ_P non eccede il 5‰; il ramo degradante può essere ancora descritto con una legge bilineare, con apertura di fessura limite variabile, a causa delle deformazioni irreversibili accumulate nel tratto pre-picco (ϵ_R ; Figura 4). Le equazioni che descrivono il ramo di pull-out, tuttavia, non risultano più valide per correlare i valori della resistenza residua in corrispondenza dei punti C e D (Fig. 4) ai valori $f_{R,1k}$ ed $f_{R,3k}$ poiché non tengono conto nelle equazioni di equilibrio del ramo incrudente.

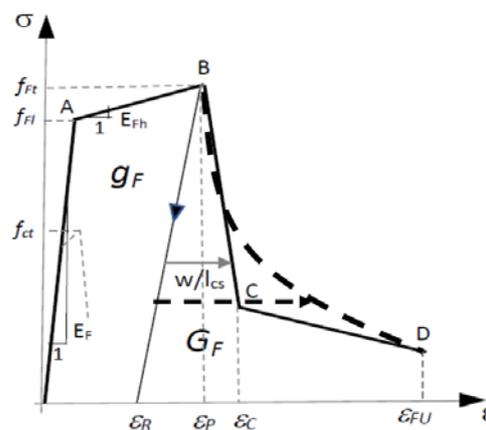


Figura 4: Legame costitutivo post-fessurazione per legami parzialmente incrudenti (CASO III).

Nel caso non risulti disponibile il ramo di softening della prova di trazione diretta, spesso assimilabile ad una bilatera, si può procedere facendo uso della prova di flessione secondo la norma EN 14651, imponendo il passaggio nel punto B, assumendo l'incipiente fessurazione (macro-localizzazione) nel punto B e trascurando il danneggiamento nel ramo pre-picco ed il passaggio e la tangente nel punto D:

$$\varepsilon_D = \varepsilon_{FU} = 2.5\text{mm}/l_{cs}$$

$$w_D \cong 2.5\text{mm} - l_{cs}\varepsilon_R$$

con $l_{cs} = 125$ mm, mentre il valore di deformazione ε_R può essere stimato con la relazione approssimata $\varepsilon_R = \varepsilon_P - f_{Ft}/E_c$ che trascura il danno accumulato nel ramo pre-picco corrispondente alla multi-fessurazione con micro-fessure pressoché invisibili e pertanto assunte come deformazioni plastiche, il ramo di softening può essere descritto dalla relazione parabolica:

$$\sigma(w) = aw^2 + bw + c \quad (17a)$$

dove le costanti a, b, c possono essere determinate imponendo:

$$w = 0 \quad \sigma = f_{Ftk,ef} \quad (17b)$$

$$w = w_D \quad \sigma = f_{Ftuk,ef} \quad \frac{d\sigma}{dw} = \frac{-f_{Ftuk,ef}}{\left(\frac{l_f}{2} - w_D\right)} \quad (17c, 17d)$$

ed imponendo iterativamente l'equilibrio alla rotazione ed in direzione longitudinale per $w = w_D$ assumendo la distribuzione delle deformazioni lineare sulla sezione intagliata e ponendo come incognite la posizione dell'asse neutro x e la tensione $\sigma(w_D) = f_{Ftuk,ef}$, ottenuta considerando il momento flettente associato al valore $f_{R3k,ef} = \kappa_0\kappa_G f_{R3k}$.

Nel caso di materiali incrudenti con $\varepsilon_{pk} > 1\%$ in trazione uniassiale (CASO IV), il legame costitutivo si arresta al valore di picco ($\varepsilon_{pk}, f_{Ftk}$).

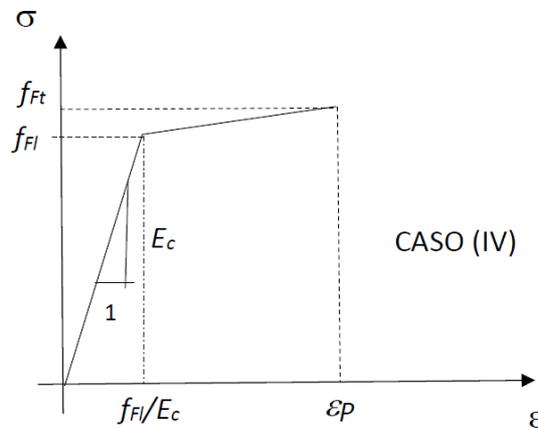


Figura 5: Legame costitutivo per legami incrudenti (CASO IV).

3.4.2 Comportamento a compressione

Per sezioni o parti di sezioni soggette a distribuzioni di tensione di compressione approssimativamente uniformi, si assume per la deformazione ultima di progetto il valore ε_{c2} anziché ε_{cu} (Eq. 11a)

Per analisi non lineari avanzate si deve fare riferimento ai valori medi del comportamento a compressione del calcestruzzo e si può utilizzare il diagramma in Figura 6, definito dall'equazione

$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k' \eta - \eta^2}{1 + (k' - 2) \eta} \quad (18a)$$

con

$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \quad (18b)$$

$$k' = \frac{1.05 E_{cm} \cdot |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad (18c)$$

$$\varepsilon_{c1} (\text{‰}) = 0.7 f_{cm}^{1/3} (1 + 0.03 f_{R1k}) \quad (18d)$$

$$\varepsilon_{cu1} = k \cdot \varepsilon_{c1} \quad (18e)$$

$$k = 1 + 20 / (82 - 2.2 f_{R1k})^{0.5} \quad (18f)$$

Nell'Eq. 18c il modulo E_{cm} è assunto pari al modulo elastico del calcestruzzo ordinario.

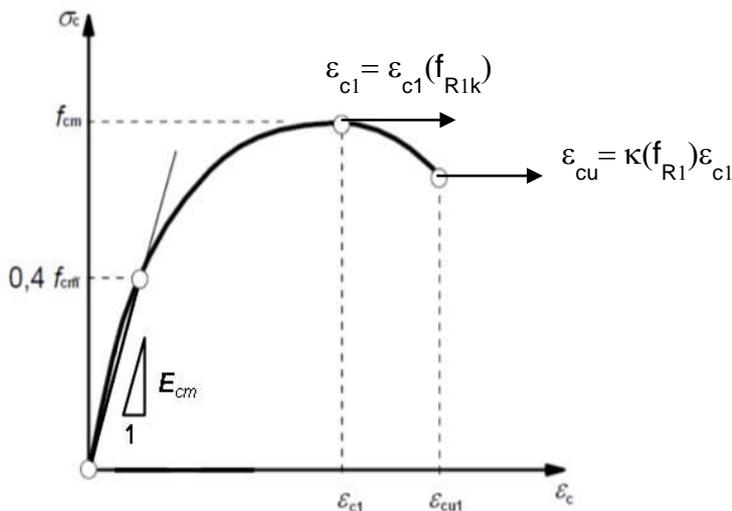


Figura 6: Legame costitutivo a compressione uniaassiale per $f_{R,1k} \geq 5 \text{ MPa}$.

3.5 Prestazioni meccaniche minime del FRC per le applicazioni strutturali

Il FRC può essere impiegato per la realizzazione di elementi strutturali se la classe di resistenza a compressione è conforme a quanto previsto dalle vigenti NTC per un calcestruzzo privo di fibre (§4.1, Tab. 4.1.II).

Inoltre, il calcestruzzo fibrorinforzato può sostituire (anche solo in parte) l'armatura tradizionale se è rispettata la seguente condizione:

$$f_{R1k} > 0.1 * (f_{ck})^{2/3} \quad (19)$$

4 COEFFICIENTI PARZIALI DI SICUREZZA

I valori di progetto della resistenza post-fessurazione per la verifica agli Stati Limite si possono determinare come:

$$f_{Ftsd} = f_{Ftsk,ef} / \gamma_{cf} \quad (20a)$$

$$f_{Ftud} = f_{Ftuk,ef} / \gamma_{cf} \quad (20b)$$

$$f_{Ftld} = f_{Ftlk,ef} / \gamma_{cf} \quad (20c)$$

I coefficienti parziali di sicurezza sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3: Coefficienti di sicurezza parziali per la verifica di elementi in FRC agli Stati Limite.

<i>Materiale</i>	<i>Coefficienti parziali di sicurezza</i>
<i>FRC in compressione</i>	$\gamma_{cf} = 1,5$
<i>FRC in trazione</i>	$\gamma_{cf} = 1,5$
<i>FRC per situazioni di esercizio ed eccezionali (trazione e compressione; vedi § 2.5.3 delle NCT 2018)</i>	$\gamma_{cf} = 1,0$

I valori di resistenza $f_{Ftsk,ef}$ e $f_{Ftuk,ef}$ sono i valori caratteristici dei valori di resistenza comprensivi dei fattori di efficacia strutturale definiti al §3.3.1.

5 PROGETTAZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI IN CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO FRC

5.1 Verifica agli stati limite ultimi

5.1.1 Elementi lineari

Per gli elementi lineari si utilizza $\kappa_0 = 1.0$ per la determinazione dei valori efficaci delle resistenze a trazione (si veda §3.2 e §3.3.1).

5.1.1.1 Flessione composta retta in elementi monodimensionali

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. Le ipotesi fondamentali su cui si basa l'analisi allo SLU delle sezioni in calcestruzzo fibrorinforzato sono le medesime utilizzate per l'analisi delle sezioni in calcestruzzo armato, con l'aggiunta del contributo resistente a trazione definito da legami costitutivi del tipo specificato nel § 3.3.

Si assume che la rottura per flessione si manifesti quando si verifica una delle seguenti condizioni:

- raggiungimento della massima deformazione di compressione, ε_{cu} , nel *FRC*;

- raggiungimento della massima deformazione di trazione, ε_{su} , nell'acciaio d'armatura (ove presente);
- raggiungimento della massima deformazione di trazione, ε_{Fu} , nel *FRC*.

Nel caso di legame costitutivo di tipo degradante (sia con il modello lineare, sia con il modello rigido-plastico definiti nel §3.3.1), la massima deformazione a trazione, ε_{Fu} , è assunta pari al 2%. Il valore ultimo dell'apertura di fessura, w_u , deve comunque soddisfare la limitazione: $w_u = \varepsilon_u \cdot l_{cs} \leq 2.5$ mm. Il corrispondente valore di tensione (nel ramo post-fessurativo del legame costitutivo) è assunto come valore della tensione residua ultima. Nel caso di legame costitutivo di tipo incrudente, la deformazione massima di trazione, ε_{Fu} , è assunta pari all'1% (sia con il modello lineare, sia con il modello rigido-plastico).

Per garantire la duttilità flessionale indicata per la progettazione di strutture in calcestruzzo armato per azioni non sismiche della Normativa Tecnica vigente, in presenza di fibre è necessario che l'armatura longitudinale sia almeno pari al doppio dell'armatura minima calcolata in assenza di fibre.

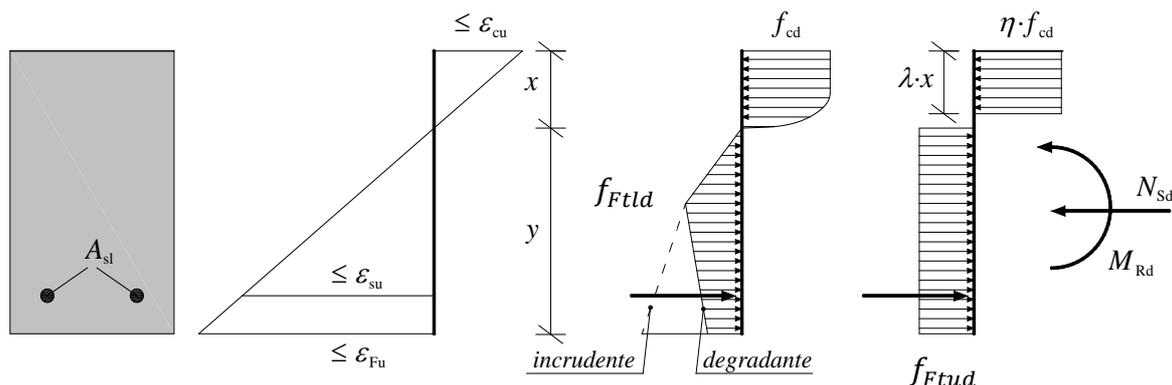


Figura 7: Stato limite ultimo per pressoflessione: utilizzo dei legami semplificati (stress-block con coefficienti η e λ secondo le NTC 2018).

5.1.1.2 Taglio

Per le verifiche allo SLU a taglio, gli elementi monodimensionali (travi) e bidimensionali (piastre) devono rispettare le prescrizioni di cui ai paragrafi successivi.

5.1.1.2.1 Taglio in elementi senza armatura trasversale

Il valore di progetto della resistenza a taglio in elementi con armature longitudinali e senza armature trasversale è data da (in N):

$$v_{RFd} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} k \left[100 \rho_l \left(1 + 7.5 \frac{f_{Ftuk,ef}}{f_{ctk}} \right) f_{ck} \right]^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right\} \quad (21a)$$

$$V_{RFd} = v_{RFd} b_w d \quad (21b)$$

dove:

γ_c è il coefficiente parziale del calcestruzzo;

k è un fattore che include l'effetto scala ed è uguale a:

$$1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0 \quad (22)$$

d [mm] è l'altezza utile della sezione;

ρ_l è la percentuale di armatura longitudinale ed è uguale a: $\rho_l = A_{sl} / b_w d \leq 0.02$

A_{sl} [mm²] è l'area dell'armatura longitudinale che si estende per una distanza $\geq l_{bd} + d$ oltre la sezione considerata;

$\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c < 0.2 f_{cd}$ [MPa] è lo sforzo di compressione medio agente sulla sezione trasversale di calcestruzzo, A_c [mm²], relativo all'azione assiale N_{Ed} [N] dovuta ai carichi o alla precompressione ($N_{Ed} > 0$ se di compressione);

b_w [mm] è la larghezza minima nella zona tesa della sezione trasversale;

k_l è pari a 0.15.

La resistenza di progetto a taglio, V_{Rfd} , non potrà essere inferiore ad un valore minimo, $V_{Rd\ min}$, in analogia a quanto definito per il calcestruzzo privo di fibre:

$$V_{Rd,\min} = (v_{\min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (23)$$

dove $v_{\min} = 0.035 \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$

5.1.1.2.2 Taglio in elementi con armatura longitudinale e trasversale

La resistenza a taglio di elementi in FRC con armatura trasversale è data da:

$$V_{Rd} = \min(\max(V_{Rsd}; 0.75 V_{Rsd} + f_{Ftud} b_w d); V_{Rcd}) \quad (24)$$

dove:

V_{Rsd} è la resistenza a taglio dovuta all'armatura trasversale data dalle vigenti norme tecniche.

V_{Rcd} è la resistenza a taglio dovuta al calcestruzzo data dalle vigenti norme tecniche.

5.1.1.3 Torsione nelle travi con armatura longitudinale

5.1.1.3.1 Torsione in elementi senza armatura trasversale

In travi in FRC, l'armatura minima a torsione prevista dalle NTC 2018 può essere omessa se è verificata la condizione:

$$\sigma_l \leq f_{Ftud} \quad (25)$$

5.1.1.3.2 Torsione in elementi con armatura trasversale

Il contributo resistente del FRC potrà essere quantificato considerando lo sforzo residuo tangenziale resistente, valutando la capacità del rinforzo trasversale come:

$$T_{RFd} = \max(T_{Rsd}; 0,75 * T_{Rsd} + 2Atf_{Ftud}) \quad (26)$$

ove T_{Rsd} è il momento torcente resistente dovuto alla staffatura ed è valutato secondo quanto specificato nelle Norme Tecniche vigenti, A e t sono definite secondo quanto specificato nelle Norme vigenti.

5.1.2 Elementi bidimensionali caricati nel piano medio (stato piano di tensione)

5.1.2.1 Elementi senza armatura secondaria

Negli elementi bidimensionali caricati nel piano (Figura 8) è possibile verificare la sicurezza agli Stati Limite Ultimi (SLU) definendo un dominio di resistenza biassiale, dove la resistenza a trazione uniassiale è assunta pari a f_{Ftud} per lo SLU; l'armatura principale convenzionale deve essere pari almeno al 70% di quella necessaria in assenza di fibre. I coefficienti di orientamento sono specificati in Allegato 1.

5.1.2.2 Elementi con armatura secondaria

Negli elementi bidimensionali in FRC con armatura trasversale il contributo della resistenza a trazione del FRC può essere opportunamente considerato:

- 1) attraverso modelli a traliccio (strut-and-tie) considerando il valore dello sforzo a trazione residuo (f_{Ftud}) isotropo, laddove non è richiesta una specifica duttilità, ma solo la portata limite;
- 2) con analisi agli elementi finiti non lineari adottando i legami costitutivi definiti in precedenza

Il contributo delle fibre in sostituzione delle armature principali non può eccedere il 30% della capacità a trazione richiesta.

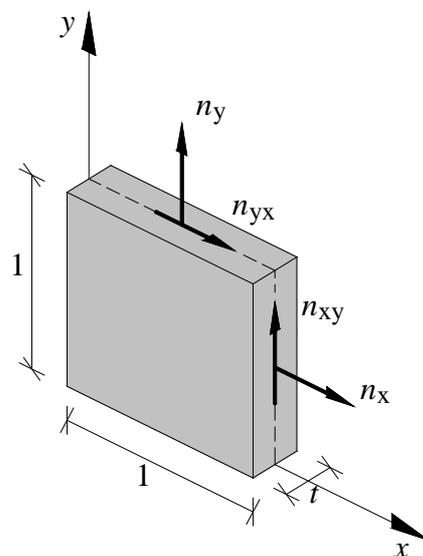


Figura 8: Elemento soggetto a stato di sforzo piano

5.1.3 Elementi Bidimensionali verticali caricati normalmente al piano medio

Per le pareti sottoposte prevalentemente ad azione flessionale in una direzione (come ad esempio nelle pareti di sostegno), l'armatura trasversale (secondaria) può essere sostituita (parzialmente o integralmente) da un FRC con $f_{R1k} > 2.0$ MPa e $f_{R3k}/f_{R1k} > 0.9$. Il valore del contributo delle fibre in direzione verticale, se l'elemento è gettato in sito sarà considerato sulla base del coefficiente κ_0 definito nei precedenti capitoli e indicato in casi di esempio all'Allegato 1. Il coefficiente κ_G sarà posto pari ad 1.

Per la verifica a flessione nella direzione principale valgono le regole riportate per gli elementi lineari.

5.1.4 Elementi Bidimensionali orizzontali caricati normalmente al piano medio

5.1.4.1 Flessione di elementi bidimensionali con portanza bidirezionale

Negli elementi bidimensionali prevalentemente inflessi (Figura 9) il valore di κ_0 per il calcestruzzo fibrorinforzato può essere posto pari ad 1.

L'armatura principale può ridursi al 50% dell'armatura minima calcolata in assenza di fibre compatibilmente con le procedure e modalità di messa in opera, se il rapporto tra i lati della piastra è inferiore ad 1,5: in questa situazione può essere considerato un coefficiente $\kappa_G > 1$, nel rispetto dei limiti espressi dall'Eq. 5. Se il calcestruzzo fibrorinforzato risulta di classe "c", "d" o "e", con resistenza $f_{R1k} > 3.0$ e $f_{R3k}/f_{ctf,m} > 1$, dove $f_{ctf,m}$ rappresenta la resistenza media a trazione per flessione definita secondo la normativa vigente, può essere condotta l'analisi plastica, ovvero la verifica di resistenza con il metodo delle linee di rottura.

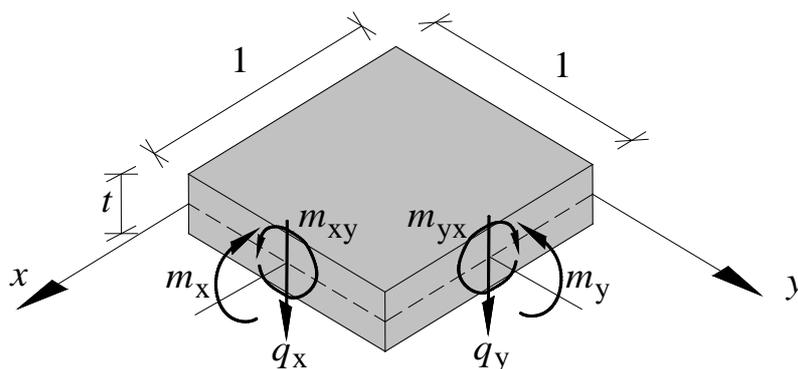


Figura 9 - Elemento di piastra inflessa.

In entrambe le direzioni principali, nelle piastre in elevazione in assenza di travi perimetrali, dovrà essere presente un'armatura minima nella parte inferiore della piastra lungo le linee congiungenti i pilastri che deve soddisfare la condizione riportata nel seguito:

$$A_{s,ac} = V_{Ed}/f_{yk} \quad (27)$$

dove V_{Ed} è il carico trasmesso dalla piastra alla colonna, per garantire la robustezza strutturale. In ogni caso, per usuali dimensioni e tipologie, l'armatura minima non potrà essere inferiore a $6,0 \text{ cm}^2$ in entrambe le direzioni. La lunghezza degli ancoraggi e delle eventuali sovrapposizioni dovranno essere conformi alle vigenti Norme Tecniche.

5.1.4.2 Flessione di elementi bidimensionali inflessi con portanza unidirezionale

Per elementi di piastra con portanza prevalentemente unidirezionale si adottano le stesse regole valide per gli elementi lineari.

5.1.4.3 Punzonamento

Le fibre presenti nel FRC migliora la resistenza a punzonamento rispetto al calcestruzzo ordinario senza fibre. Le verifiche associate alla rottura a compressione del calcestruzzo (perimetro del pilastro o perimetro dell'area caricata) sono invariate rispetto a quanto previsto dalla normativa vigente. Le altre verifiche sono descritte nei capitoli seguenti.

5.1.4.3.1 Elementi senza armatura trasversale

Per elementi in FRC senza armatura trasversale, la resistenza a punzonamento sul perimetro di riferimento definito dalla vigente normativa è data dalla Eq. (21a) nella quale si pone $k_1=0.1$.

5.1.4.3.2 Elementi con armatura trasversale

Per elementi in FRC con armatura trasversale, la resistenza a punzonamento è data da:

$$v_{Rd,FS} = 0.75v_{RFd} + v_{Rsd} \quad (28)$$

dove v_{RFd} è dato dalla Eq. (21a) nella quale si pone $k_1 = 0.1$ mentre il contributo dell'armatura trasversale risulta:

$$v_{Rsd} = 1,5 \frac{d}{s_r} \frac{A_{sw} f_{ywd,ef}}{u d} \cdot \sin \alpha \quad (29)$$

dove:

A_{sw} è l'area di armatura a taglio a punzonamento situata su di un perimetro intorno al pilastro;

α è l'angolo di inclinazione dell'armatura rispetto al piano medio della piastra;

s_r è il passo radiale dei perimetri dell'armatura a taglio di punzonamento;

u è il perimetro di riferimento, definito dalle vigenti Norme Tecniche;

d è l'altezza utile della piastra, definita come distanza media tra il baricentro delle armature (nelle due direzioni) e l'estradosso della piastra;

$f_{ywd,ef}$ è la resistenza di progetto efficace dell'armatura a taglio-punzonamento definita dalla normativa vigente.

5.1.5 Pavimentazioni con funzione strutturale (piastre con supporto continuo)

Le indicazioni della presente Linea Guida si applicano alle pavimentazioni nel caso in cui queste siano considerate dal progettista come opere strutturali, ai sensi del cap. § 11.1 delle NTC 2018.

Le pavimentazioni con funzione strutturale sono piastre su appoggio continuo cedevole con funzione portante per carichi verticali e orizzontali. Questo tipo di pavimentazioni sono molto utilizzate in aree industriali, sia interne (ad esempio magazzini o aree di lavorazione industriale in genere) che esterne (aree di stoccaggio o di movimentazione merci), ma anche per la realizzazione di vie di transito quali piste aeroportuali o vie stradali per il traffico su ruota.

In accordo con il parere espresso dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nell'Agosto 2019 (Disposizione Prot. M_INF.CSLP.REGISTRO_UFFICIALE.U.0007221 del 08/08/2019), le pavimentazioni svolgono una funzione strutturale, quando:

a) in caso di “fallimento” per cedimento strutturale o eccessive deformazioni, possono rappresentare un pericolo per la pubblica incolumità ovvero determinare la perdita del requisito base della sicurezza meccanica e stabilità (così come definito all’Allegato I del Regolamento (UE) n. 305/20111); inoltre, diversi possono essere i casi in cui la pavimentazione assume una funzione portante atta a sostenere tutti i carichi di entità rilevante (peso proprio, carichi accidentali, azioni esterne, carichi dinamici) gravanti sulle stesse e provenienti, ad esempio, da scaffalature industriali di rilevanti dimensioni, macchine complesse o gru, automezzi pesanti etc.;

b) sono connesse alle strutture di elevazione e/o di fondazione, costituendone il collegamento o comunque interagendo con esse.

In tali situazioni il Progettista è chiamato doverosamente ad una specifica calcolazione, modellazione e verifica della struttura, che sia coerente con i principi della Scienza e Tecnica delle Costruzioni, nonché aderente alle prescrizioni, ai metodi di verifica ed ai dettagli costruttivi previsti dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni.

Le azioni agenti sulle pavimentazioni di calcestruzzo comportano stati di sollecitazione piuttosto complessi. Ad esempio, i carichi mobili provocano azioni cicliche variabili, per cui la pavimentazione risulta sottoposta ad azioni flettenti con tensioni di trazione sia all'intradosso sia all'estradosso della piastra. Per la descrizione puntuale dei carichi sulle pavimentazioni si rimanda al documento CNR DT 211 che tratta anche gli aspetti tecnologici del calcestruzzo e dello strato di finitura superficiale, in aggiunta alle caratteristiche del sottofondo.

La verifica strutturale delle pavimentazioni richiede una attenta valutazione della capacità portante ultima (SLU) ma anche dei fenomeni fessurativi in esercizio (SLE), soprattutto quando riguardano l'estradosso della pavimentazione stessa.

L'elevato grado di iperstaticità delle piastre su appoggio continuo favorisce la redistribuzione degli sforzi nella struttura e rende particolarmente conveniente l'utilizzo del FRC, anche con

comportamento degradante in flessione. Nelle pavimentazioni, il FRC può consentire la sostituzione parziale o totale dell'armatura tradizionale, generalmente rappresentata da una rete elettrosaldata.

5.1.5.1 Analisi strutturale delle pavimentazioni

L'analisi strutturale delle pavimentazioni in FRC, coerentemente con quanto riportato in precedenza, può essere fatta con:

- un'analisi elastica lineare
- un'analisi limite basata sulle linee di rottura (Yield Lines)
- un'analisi incrementale non lineare.

Si deve però osservare che:

- data la notevole capacità di redistribuzione degli sforzi, l'analisi elastica lineare delle pavimentazioni sottostima il contributo di resistenza offerto dal FRC dopo la formazione delle microfessure;
- l'analisi limite richiede la conoscenza delle possibili linee di rottura per le diverse tipologie di carico, alcune delle quali sono riportate nel documento CNR DT 211;
- l'analisi incrementale non lineare, basata sulla modellazione FE con la meccanica della frattura non lineare (NLFM), considera in modo più appropriato il contributo di resistenza post-fessurazione del FRC.

Nel caso di pavimentazioni in FRC senza armatura tradizionale, la resistenza a taglio specifica (riferita alla larghezza b unitaria) può essere assunta pari a:

$$V_{Rd} = f_{Ftud} bh \quad (30)$$

5.1.6 Zone diffuse (D-regions): progettazione con modelli a traliccio (strut-and-tie)

Nel caso di elementi strutturali progettati con modelli a traliccio, le fibre possono sostituire completamente l'armatura trasversale e, fino al 30%, l'armatura principale. Lo sforzo massimo nel FRC nelle aree interessate può essere assunto pari a f_{Ftud} .

5.1.7 Rivestimenti di galleria

Il calcestruzzo rinforzato può essere utilizzato per la realizzazione di rivestimenti di galleria permanenti, sia con getti in opera sia mediante l'utilizzo di conci prefabbricati.

Vista la configurazione strutturale dei rivestimenti di galleria, è possibile eliminare anche totalmente l'armatura ordinaria. Per rivestimenti in galleria in cui non è presente armatura ordinaria occorre utilizzare un calcestruzzo con una prestazione minima non inferiore alla classe 4 c.

La verifica a flessione può essere condotta in accordo con quanto descritto al punto 5.1.1.1 (Flessione composta retta in elementi monodimensionali).

Nel caso di elementi caratterizzati da materiale con comportamento a trazione degradante il valore di progetto della resistenza a taglio è dato dall'Equazione (30) con b , larghezza effettiva dell'elemento.

5.2 Verifiche agli stati limite di esercizio

5.2.1 Verifica delle tensioni

Nelle condizioni di esercizio, lo sforzo di compressione nel calcestruzzo e lo sforzo di trazione nell'armatura devono essere conformi alle NTC.

Negli elementi *FRC* con $f_{R3k}/f_{R1k} < 0,9$ (*FRC* classe a e b), la verifica in esercizio delle trazioni in fase fessurata non è necessaria se l'elemento è verificato agli SLU.

Negli elementi in *FRC* con comportamento post-fessurativo incrudente in trazione uniassiale, la trazione massima post-fessurativa deve soddisfare la limitazione riportata nel seguito:

$$\sigma_t \leq 0.6 f_{Ftsk} \quad (31)$$

5.2.2 Determinazione dell'ampiezza delle fessure

5.2.2.1 Elementi con armatura longitudinale

La distanza media Δ_{sm} tra le fessure in elementi in *FRC* è definita al §3.1 e coincide con la lunghezza caratteristica.

Il valore di progetto dell'apertura di fessura in elementi in *FRC* è data da:

$$w_d = 1.7 l_{cs} \sigma_{sm} / E_s = 1.7 l_{cs} \frac{1}{E_s} (\sigma_s - \beta \sigma_{sr} + \eta_r \varepsilon_r E_s) \quad (32)$$

con

$$\sigma_{sr} = (f_{ctm} - f_{Ftsk,ef}) \times (1 + \alpha_e \rho_s) / \rho_{s,eff} \quad (33)$$

dove:

β è il fattore legato al tension stiffening e può essere assunto pari a 0.6 o a 0.4 rispettivamente per fessurazione a breve o a lungo termine

$f_{Ftsk,ef}$ è il valore indicato nell'Eq. 10b, calcolato ponendo $\kappa_0 = 1$.

α_e è il rapporto tra il modulo elastico dell'acciaio e del calcestruzzo (E_s/E_c);

$\rho_{s,eff}$ è la percentuale di armatura efficace prevista dalle NTC 2018.

Nella valutazione di σ_s si dovrà considerare il contributo offerto dalle fibre ($f_{Ftsk,ef}$).

5.2.2.2 Elementi senza armatura longitudinale

La verifica a fessurazione è possibile solo negli elementi con comportamento incrudente a flessione ($f_{R3k}/f_{R1k} \geq 1,1$); la verifica può essere fatta utilizzando i legami completi proposti al § 3.4, limitando la deformazione ε_{Ft} del *FRC* in relazione all'apertura di fessura di progetto.

L'ampiezza della fessura in elementi di *FRC* inflessi con comportamento incrudente a flessione può essere calcolata come:

$$w_k = \varepsilon_{Ft} \times l_{cs} \quad (34)$$

dove:

ε_{Ft} è la deformazione per trazione nel *FRC*

l_{cs} è la lunghezza caratteristica definita al § 3.1.

Nelle strutture iperstatiche con tutti gli elementi parzialmente compressi, la limitazione della larghezza della fessura nel *FRC* senza armatura convenzionale può essere determinata considerando la redistribuzione degli sforzi, tenendo conto degli effetti dei vincoli.

5.2.2.3 Ampiezza massima delle fessure in elementi senza armatura convenzionale

Negli elementi in *FRC* con fibre di acciaio e senza armatura convenzionale il valore massimo dell'ampiezza delle fessure è riportato nella Tabella 4 per la combinazione di carico quasi permanente.

Tabella 4: Valori raccomandati di w_{max} (mm) per il calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio.

Classe di esposizione (UNI EN 206)	Ampiezza massima delle fessure (in mm)
XO, XC1, XC2, XC3	0,3
XC4	0,2
XD1, XS1, XS2, XA1, XA2	0,15
XD3, XS3, XA3	0,0

L'utilizzo di *FRC* con comportamento post-fessurativo incrudente assicura valori ridotti dell'ampiezza delle fessure anche per valori elevati di deformazione. In tal caso, ai fini della durabilità, il calcestruzzo può essere considerato non fessurato.

In presenza di armatura ordinaria i valori raccomandati di apertura di fessura sono quelli indicati nella Normativa Vigente se più cautelativi rispetto a quelli riportati in Tabella 4.

5.2.2.4 Armatura minima per il controllo della fessurazione

Per il controllo della fessurazione negli elementi inflessi, se necessario, deve essere posizionata un'armatura minima non inferiore a:

$$A_{s,min} = k_c k (f_{ctm} - f_{Ftsk,ef}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (35)$$

dove:

f_{ctm} è il valore medio della resistenza a trazione della matrice di calcestruzzo;

$f_{Ftsk,ef}$ è dato dall'Eq. 10b;

- A_{ct} è la parte tesa della sezione di calcestruzzo, valutata considerando il campo di sforzi al limite elastico;
- σ_s è la massima tensione nell'armatura in fase fessurata che può essere assunta pari alla tensione di snervamento dell'acciaio;
- k_c è un coefficiente che considera la distribuzione di sforzi nella sezione trasversale appena prima della fessurazione e del cambio di braccio della coppia interna. Per sezioni rettangolari si può assumere $k_c = 1$;
- k è un coefficiente che considera la presenza di sforzi auto-equilibrati non uniformi che comporta una variazione del carico di prima fessurazione e può essere assunto pari a 1 per elementi (anime o solette) di altezza inferiore a 300 mm e pari a 0.65 per elementi di altezza superiore a 800 mm. Per elementi di altezza intermedia è ammessa l'interpolazione lineare.

Quando $A_{s,min}$, calcolato con l'Eq. 35, è negativo, l'armatura minima può essere completamente sostituita dal FRC. Tale armatura negli elementi lineari inflessi può risultare inferiore a quella richiesta per garantire la duttilità del comportamento a flessione (§5.1.1.1).

5.3 Resistenza alle alte temperature

Per quanto riguarda la resistenza a trazione dei calcestruzzi fibrorinforzati quando soggetti alle alte temperature, si deve fare riferimento all'Eurocodice 2, parte 1-2: i parametri di riferimento sono quelli indicati nelle relazioni (20a), (20b) e (20c).

Per i calcestruzzi rinforzati con fibre di acciaio la legge di decadimento di detti parametri coincide con quella del calcestruzzo privo di fibre soggetto a trazione.

Per quanto riguarda, invece, la resistenza a compressione dei calcestruzzi fibrorinforzati quando soggetti alle alte temperature, ci si deve riferire alla resistenza a compressione di un calcestruzzo privo di fibre.

5.4 Resistenza a fatica

In funzione della sua classe prestazionale il FRC può migliorare considerevolmente il comportamento a fatica del calcestruzzo, in particolare nella fatica a compressione a bassa frequenza (≤ 1 Hz) e nella fatica flessionale in fase post-fessurativa.

Tuttavia, al momento non sono disponibili regole di progettazione generali e convalidate. Per le applicazioni in cui lo stato limite di fatica è determinante, può essere applicata la progettazione assistita da prove secondo la EN 1990.

6 COPRIFERRO E INTERFERRO

Per quanto riguarda il valore del copriferro, si farà riferimento alla normativa vigente per le strutture in calcestruzzo armato ordinario. Un copriferro minimo pari a 20 mm va in ogni caso garantito per evitare zone in cui le fibre non sono presenti.

Si raccomanda una distanza netta tra le barre non inferiore a 1,5 volte la lunghezza della fibra.

7 ANCORAGGI E SOVRAPPOSIZIONI DELLE ARMATURE

Le fibre possono migliorare l'ancoraggio delle barre d'armatura ordinaria e da precompressione grazie alla maggior azione di confinamento sulla barra e al contenimento della fessurazione di splitting che si potrebbe sviluppare lungo la barra. In particolare, le lunghezze di ancoraggio e di sovrapposizione possono essere ridotte. Tuttavia, al momento non sono disponibili regole di progettazione convalidate e pertanto, dovranno essere applicate le regole previste dalle vigenti norme tecniche per i calcestruzzi senza fibre.

Ove gli ancoraggi e le sovrapposizioni siano particolarmente importanti, può essere applicata la progettazione assistita da prove secondo la UNI EN 1990.

8 MESSA IN OPERA CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO

8.1 Procedure di accettazione in cantiere

Il Direttore dei Lavori, in fase di accettazione, deve verificare che ciascuna miscela omogenea sia coperta da CVT in corso di validità, di cui una copia deve essere presente in cantiere.

Il Direttore dei Lavori deve, inoltre, eseguire i controlli di accettazione, come riportato al § 5.1 delle “Linee guida per l’identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)”. Nel caso di prodotti a secco premiscelati oppure costituiti da diversi componenti a secco, da miscelare con acqua in cantiere, è necessario eseguire, in aggiunta alle prove di accettazione, anche le prove di pre-qualifica descritte nel § 5.2 delle sopracitate Linee Guida.

Nel caso di elementi con spessore inferiore a 60 mm oppure realizzati con calcestruzzi auto-compattanti, è necessario svolgere, secondo le modalità descritte nell’Allegato 2, prove di pre-qualifica su almeno 6 provini che riproducono gli elementi strutturali reali, caratterizzati dallo stesso spessore e realizzati con le stesse modalità di getto, privi di intaglio.

Il Direttore dei Lavori, prima della messa in opera, è tenuto a rifiutare le eventuali forniture non conformi, ferme restando le responsabilità del Fabbrikante.

Ai fini della rintracciabilità dei prodotti, l'esecutore dei lavori deve inoltre assicurare la conservazione di tutta la documentazione, unitamente a marchiature o etichette di riconoscimento ed alle eventuali annotazioni trasmesse dal Direttore dei Lavori, almeno fino al completamento delle operazioni di collaudo statico.

8.2 Esecuzione dei getti

Per quanto concerne le specifiche delle casseforme e dei loro trattamenti superficiali, dei sistemi di supporto e delle fondazioni, si deve fare riferimento alle NTC 2018.

Il calcestruzzo fibrorinforzato deve essere prodotto seguendo le stesse modalità di confezionamento dei conglomerati cementizi ordinari ad eccezione di quanto deriva dall'introduzione delle fibre, rispettando tutte le indicazioni presenti nel manuale di preparazione ed installazione, così come definito dalle "Linee guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)"

Al fine di garantire l'uniformità della distribuzione delle fibre nell'impasto, si deve valutare, in funzione delle esigenze specifiche, lo stato delle fibre (sfuse, impacchettate con colle idrosolubili) prima del loro inserimento nella matrice, anche in relazione alla necessità di adottare sistemi per la loro setacciatura (sbrogliatori).

È raccomandata la realizzazione di miscele di prova, con l'utilizzo degli stessi macchinari e modalità realizzative previsti per le attività di cantiere, per verificare l'uniformità del contenuto di fibre e l'assenza di agglomerati.

L'impasto fresco deve essere posato in modo che sia garantita una buona compattazione e una sufficiente omogeneità, affinché le sue caratteristiche nominali e strutturali di progetto possano essere raggiunte.

Si deve pertanto porre attenzione alla durata di una eventuale vibrazione ed alla modalità di esecuzione (a banco, esterna), al fine di evitare la segregazione delle fibre che comprometterebbe la loro uniforme distribuzione.

Le fibre possono agglomerarsi in aree con elevata densità di armatura: particolare attenzione dovrà essere dedicata alla lavorabilità del *FRC*, al posizionamento delle armature e ai dettagli costruttivi.

Per specifiche indicazioni relative alle pavimentazioni si rimanda al documento CNR DT 211.

9 ELEMENTI STRUTTURALI IN CALCESTRUZZO FRC PREFABBRICATI

I componenti strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato FRC prodotti in stabilimenti permanenti mediante processi industrializzati, oltre che essere dimensionati in accordo alle presenti Linee Guida,

devono rispettare i requisiti previsti per i componenti prefabbricati in c.a. e c.a.p. di cui ai §§ 4.1.10 ed 11.8 delle NTC 2018; in particolare, ove prodotti in serie, devono essere preliminarmente qualificati secondo le procedure indicate al § 11.8.4.

10 CONTROLLO E COLLAUDO

Per elementi strutturali di calcestruzzo fibrorinforzato FRC nelle cui verifiche di resistenza interviene il contributo delle fibre, devono essere previste opportune prove di carico al fine di validare le ipotesi di progetto.

Tali prove devono riguardare tutti i tipi di elementi realizzati e, ove possibile, per ogni tipo, l'elemento più sollecitato.

Per elementi strutturali di spessore inferiore a 60 mm, le prove di carico sono obbligatorie, con provini strutturali. Le modalità di collaudo da seguire sono le medesime di quanto disciplinato dalla normativa tecnica vigente (NTC).

APPENDICE A – NORMATIVA E DOCUMENTI TECNICI DI RIFERIMENTO

- 1) DM Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17 Gennaio 2018, “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”.
- 2) UNI EN 206 (2016), “Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità”.
- 3) UNI 11104 (2004), “Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità – Specificazioni”.
- 4) UNI EN 1990 (2006), “Eurocodice - Criteri generali di progettazione strutturale”.
- 5) UNI EN 1992-1-1 (2015), “Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici”.
- 6) UNI EN 14651 (2005), “Test method for metallic fibre concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)”.
- 7) UNI 11188 (2006), “Progettazione, esecuzione e controllo degli elementi strutturali in calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio”.
- 8) UNI EN 12390 (2012), Prove sul calcestruzzo indurito.
- 9) Colombo, M., Martinelli, P., di Prisco, M., (2017), On the evaluation of the structural redistribution factor in FRC design: a yield line approach, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50 (1), art. no. 100.
- 10) di Prisco, M., Martinelli, P., Parmentier, B., (2016), On the reliability of the design approach for FRC structures according to fib Model Code 2010: the case of elevated slabs, *Structural Concrete*, 17 (4), pp. 588-602.
- 11) Ferrara, L., Ozyurt, N., di Prisco, M., (2011), High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: The role of "casting-flow induced" fibre orientation, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 44 (1), pp. 109-128.
- 12) Soroushian, P. and Lee C.-D.: Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *ACI Material Journal*, 1990, 87, pp. 433–439, doi:10.14359/1803.
- 13) Naaman, AE. & S.P. Shah, Pullout mechanism in steel fibre reinforced concrete, *ASCE Journal Struct. Div.*, Vol. 102, 1976, pp. 1537-1548.
- 14) Schönlin, K.: Ermittlung der Orientierung, Menge und Verteilung der Fasern in faserbewehrtem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 1988, 83, No. 6, pp. 168-171 (in German).
- 15) Stroeven, P. and Shah, S.P.: Use of radiography-image analysis for steel fiber reinforced concrete, *Testing and Test Methods of Fiber Reinforced Composites*. In *Proceeding RILEM*

- conference (ed. R.N. Swamy) Testing and Test Methods for Fibre Cement Composites, The Construction Press, Lancaster, England, 1978, pp. 275–288.
- 16) Ozyurt, N., Woo, L.Y., Mason, T.O. and Shah, S.P.: Monitoring fiber dispersion in fiber reinforced cementitious materials: comparison of AC impedance spectroscopy and image analysis. *ACI Material Journal*, 2007, 104, No .4, pp. 434–435.
- 17) Žirgulis, G., Švec, O., Sarmiento, E.V., Geiker, M.R., Cwirzen A. and Kanstad, T.: Importance of quantification of steel fibre orientation for residual flexural tensile strength in FRC. *Materials and Structures*, 2016, 49, No. 9, pp. 3861-3877, doi: 10.1617/s11527-015-0759-3.
- 18) Tiberti G, Germano F, Mudadu A, Plizzari G A (2017) An overview of the flexural post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, pp 1–24. DOI: 10.1002/suco.201700068.
- 19) Švec O, Žirgulis G, Bolander JE, Stang H, 2014. Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements. *Cem Concr Compos* 50:60–72. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.12.002.
- 20) Kang S-T, Kim J-K (2012) Numerical simulation of the variation of fiber orientation distribution during flow molding of ultra high performance cementitious composites (UHPC). *Cement Concr Compos* 34:208–217. doi:10. 1016/j.cemconcomp.2011.09.015.
- 21) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE – Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni - *Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo delle Pavimentazioni di Calcestruzzo*- CNR-DT 211/2014 – Edizione CNR 16 giugno 2016;
- 22) CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE – Commissione di studio per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche relative alle costruzioni - *Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione ed il Controllo di strutture di Calcestruzzo* - CNR-DT 204/2006 – Edizione CNR 18 Giugno 2007 - rev. 4 Febbraio 2008.

APPENDICE B – SIMBOLOGIA

Si riporta di seguito la legenda dei simboli maggiormente utilizzati nella presente Linea Guida allo scopo di individuare più agevolmente il loro significato.

f_{RI} = resistenza post-fessurazione corrispondente a $CMOD=0,5$ mm;

f_{R3} = resistenza post-fessurazione corrispondente a $CMOD=2,5$ mm;

ε = deformazione

ε_{Ft} = deformazione per trazione del calcestruzzo fibrorinforzato

w = apertura di fessura

w_d = apertura di fessura di progetto

l_{cs} = lunghezza caratteristica strutturale

s_{rm} = distanza media tra le fessure

h = altezza dell'elemento strutturale

$\rho_{p,eff}$ = rapporto geometrico di armature totale efficace

A_s = area di armatura lenta in zona tesa

$A_{s,min}$ = area minima di armatura lenta in zona tesa

A_p = area armatura da precompressione aderente in zona tesa

$A_{c,eff}$ = area efficace di calcestruzzo tesa

ξ = Rapporto di resistenza all'aderenza

$f_{Fts,ef}$ = resistenza residua in esercizio

f_{Ftl} = resistenza per apertura di fessura w nulla

f_{Ftu} = resistenza residua allo Stato Limite Ultimo

w_u = apertura di fessura allo Stato Limite Ultimo

f_{Fts} = resistenza per apertura di fessura w

Φ = diametro dell'armatura lenta

Φ_p = diametro dell'armatura da precompressione

$\Phi_{p,eq}$ = diametro equivalente dell'armatura da precompressione

$h_{c,eff}$ = altezza della zona tesa efficace del tirante equivalente

α_0 = fattore di orientamento

κ_G = fattore geometrico

A_{ct} = area della sezione coinvolta dal processo di frattura

$f_{Ftk,ef}$ = valore efficace della resistenza caratteristica a trazione per w nulla

$f_{Ftuk,ef}$ = valore efficace della resistenza caratteristica a trazione per $w = w_u$

f_{Ftld} = resistenza di progetto per apertura di fessura w nulla

f_{Ftud} = resistenza di progetto allo stato limite ultimo assunta pari al valore residuo per $w = w_u$

f_{Ftsd} = resistenza di progetto in fase di esercizio

f_{cd} = resistenza a compressione di progetto

ε_{cu} = deformazione ultima di progetto

f_{ck} = resistenza caratteristica cilindrica a compressione

γ_c = coefficiente parziale per il calcestruzzo

f_{cm} = resistenza media a compressione

f_{ctk} = resistenza a trazione uniassiale

f_{ctm} = resistenza media a trazione della matrice di calcestruzzo senza fibre

E_{ct} = il modulo elastico a trazione

E_c = modulo elastico

G_f = energia di frattura della matrice di calcestruzzo senza fibre

γ_{cf} = coefficiente parziale per il calcestruzzo fibrorinforzato

V_{Rfd} = valore di progetto della resistenza a taglio

$V_{Rfd\ min}$ = valore minimo di progetto della resistenza a taglio

T_{Rsd} = momento torcente resistente dovuto alla staffatura

$A_{s,ac}$ = area di armatura minima nella parte inferiore della piastra

V_{Ed} = carico trasmesso dalla piastra alla colonna

$V_{Rd,Fs}$ = resistenza al punzonamento per elementi con armatura trasversale

ALLEGATO 1

Fattori di orientamento in elementi strutturali significativi

Il fattore di orientamento del FRC α_f considera la distribuzione delle fibre nel volume di calcestruzzo e l'orientamento delle stesse rispetto alla superficie di frattura. Esso dipende principalmente dai seguenti fattori:

- geometria dell'elemento con relativi effetti sull'orientamento delle condizioni al contorno (Soroshian & Lee, 1990);
- tipologia di rinforzo (solo rinforzo fibroso oppure in combinazione con barre di armatura);
- tipologia di matrice cementizia con particolare riferimento alla lavorabilità della stessa ed al metodo di vibrazione;
- tipologia di rinforzo fibroso e suo dosaggio con riferimento alla spaziatura tra le fibre (Naaman & Shah, 1976);
- modalità di getto del conglomerato secondo aspetti quali la direzione del getto rispetto a quella attesa degli sforzi di trazione (Schönlin, 1988) oppure con riferimento alla posizione del punto di getto rispetto alle dimensioni geometriche della stessa struttura.

Le proprietà residuali del calcestruzzo fibrorinforzato sono proporzionali al numero e all'orientamento delle fibre che attraversano l'atteso piano di fessura. Tale numero di fibre dipende ovviamente dalla tipologia di fibra e dal dosaggio impiegato. Nel caso ideale di un elemento in cui tutte le fibre sono parallele rispetto ad un dato piano di fessura (fibre ortogonali rispetto alla direzione degli sforzi di trazione), indipendentemente dal dosaggio, il numero di fibre che attraversa la fessura risulterebbe sempre nullo. Si noti come la densità di fibre che attraversano la fessura ed il relativo orientamento si influenzino vicendevolmente, sebbene la relazione precisa non sia definibile vista la dipendenza da tutti i numerosi fattori prima citati.

A tal proposito, nel caso ideale di uno spazio privo di condizioni geometriche al contorno, riferendosi alla direzione normale alla superficie di fessura, è proposta generalmente in letteratura la seguente relazione per valutare il fattore di orientamento della fibra [Soroshian & Lee, 1990]:

$$\alpha_f = (N_f \cdot A_f) / (A_c \cdot V_f) \quad \text{dove:}$$

N_f è il numero di fibre che attraversano il piano di fessura (con area A_c);

A_c è l'area di calcestruzzo del piano di fessura;

V_f è la frazione volumetrica di fibre, dosaggio per unità di volume;

A_f è l'area della sezione geometrica di ogni singola fibra.

α_f rappresenta il fattore di orientamento della fibra, con i seguenti valori tipici:

$\alpha_{f,3D} = 0.5$ nel caso di un orientamento 3D random delle fibre;

$\alpha_{f,2D} = 2/\pi \sim 0.64$ nel caso di un orientamento 2D random delle fibre, riferendosi quindi ad uno spazio che presenta come unico vincolo interno di essere bidimensionale, ma che non presenta condizioni al contorno geometriche esterne;

$\alpha_{f,1D} = 1$, condizione ideale di allineamento 1D.

I fattori di orientamento sono affetti anche dalle condizioni al contorno geometriche, intendendo con queste per esempio la vicinanza del cassero (effetto parete) oppure di altri elementi geometrici durante il getto, nonché dai fattori di lavorabilità, vibrazione etc. prima citati.

Il coefficiente di orientamento del rinforzo fibroso nella struttura, κ_0 , è il rapporto tra il fattore di orientamento della struttura e quello della travetta EN 14651, e può essere determinato con uno o più dei seguenti metodi:

- prove di pre-qualifica di getto di un provino con relativo conteggio delle fibre lungo le superfici di frattura;
- eventuali carotaggi di prototipi gettati preliminarmente o delle strutture indagate;
- esperienze pregresse (nel caso un numero sufficiente di strutture simili siano stati oggetti di studio in termini di conteggio di fibre secondo gli attesi piani di fessura),

Il conteggio delle fibre può essere effettuato manualmente attraverso l'ispezione della superficie di frattura, nel caso di una sola superficie. In questo caso, in fase di pre-qualifica si possono ispezionare diverse possibili superfici di frattura anche con carotaggi di numerosi cilindri e conteggio delle fibre sulle superfici degli stessi. In tal caso il coefficiente di orientamento κ_0 , può essere valutato considerando un numero di prove non inferiore a 6.

Per il caso di pareti verticali e di piastre, è possibile assumere i coefficienti di orientamento riportati nelle Tabelle A1.1 e A1.2, basati su risultanze sperimentali.

Tabella A1.1 – Coefficienti di orientamento κ_0 per pareti verticali: a può essere assunto pari a $2lf$.

PARETI VERTICALI						
	Zona centrale			Zone di estremità		
	Longitudinale	Verticale	Trasversale	Longitudinale	Verticale	Trasversale
Basso	1,25	0,42	0,42	0,92	0,42	0,42
Centrale	1,00	0,50	0,42	0,83	0,56	0,50
Alto	0,83	0,50	0,27	0,7	0,67	0,50

Tabella A1.2 – Coefficienti di orientamento κ_0 per piastre.

Piastre		
Longitudinale	Verticale	Trasversale
1,00	0,30	1,0

ALLEGATO 2

Prova di flessione per la determinazione delle proprietà strutturali

I parametri strutturali di resistenza a flessione di cui al § 4 possono essere determinati mediante una prova di flessione su 4 punti su provino non intagliato.

Le modalità di prova qui descritte si applicano a FRC con aggregati di pezzatura massima $d_a \leq 32$ mm e da fibre di lunghezza $l_f \leq 60$ mm. Per fibre con lunghezza $l_f > 60$ mm si potrà effettuare la prova con altezza del provino $h = 2,5 l_f$.

Il parametro di deformazione corrisponde all'allungamento δ della fibra di intradosso del provino, considerando una base di misura $a = 200$ mm (Figura A2.1).

Preparazione del provino

Il provino per la prova ha di norma lunghezza $L = 600$ mm e comunque $L \geq 500$ e dimensioni trasversali h altezza e b larghezza scelte come specificato nel seguito.

Dette H l'altezza e B la larghezza dell'elemento strutturale, le dimensioni trasversali del provino (h e b) saranno

$$h = H \leq 150 \text{ mm}$$

$$b \leq B \leq 450 \text{ mm}$$

Esso può essere ottenuto per taglio dall'elemento strutturale oppure gettato contemporaneamente in forma separata con le stesse modalità e la stessa giacitura dell'elemento strutturale stesso. Nel caso sia gettato in forma separata, il provino dovrà essere maturato con le stesse modalità dell'elemento strutturale reale.

Nell'ambito di prove preliminari sul FRC, la maturazione dei provini gettati in forme separate ed il loro trasporto dovranno essere effettuate in conformità alla norma UNI-EN 12390.

Apparecchiatura di prova

La macchina di prova deve essere conforme alle vigenti norme tecniche per le costruzioni per quanto riguarda:

- la misura della forza;
- l'accuratezza della indicazione della forza;
- la frequenza della taratura;
- la sicurezza.

La macchina di prova deve essere dotata di idoneo dispositivo che permetta di effettuare le prove in controllo di spostamento.

Il dispositivo di applicazione del carico è costituito da:

- due cilindri superiori;
- un elemento in grado di ripartire equamente ed uniformemente il carico applicato dalla macchina di prova tra i due rulli superiori;
- due cilindri inferiori di supporto (Figura A2.1).

I cilindri devono essere in acciaio ed avere sezione circolare con un diametro compreso tra i 20 ed i 40 mm; la loro lunghezza deve risultare superiore di almeno 10 mm rispetto alla larghezza del provino. Ciascun cilindro deve essere in grado di ruotare attorno al proprio asse e deve inoltre essere ammessa una rotazione di $\pm 3^\circ$, contenuta nel piano normale all'asse longitudinale del provino.

La distanza fra i cilindri inferiori deve essere uguale a 450 mm. La distanza tra i due cilindri superiori deve essere uguale a 150 mm. I due cilindri superiori devono essere egualmente spazati fra i cilindri inferiori di supporto. La posizione di ciascun cilindro può scostarsi di ± 1 mm rispetto a quella nominale.

La misura del carico deve essere effettuata attraverso un sistema avente un errore relativo contenuto entro $\pm 1\%$, un errore di ripetibilità inferiore all'1%, un errore sul fondo scala inferiore a $\pm 0,2\%$ ed una risoluzione della macchina inferiore allo 0.5%.

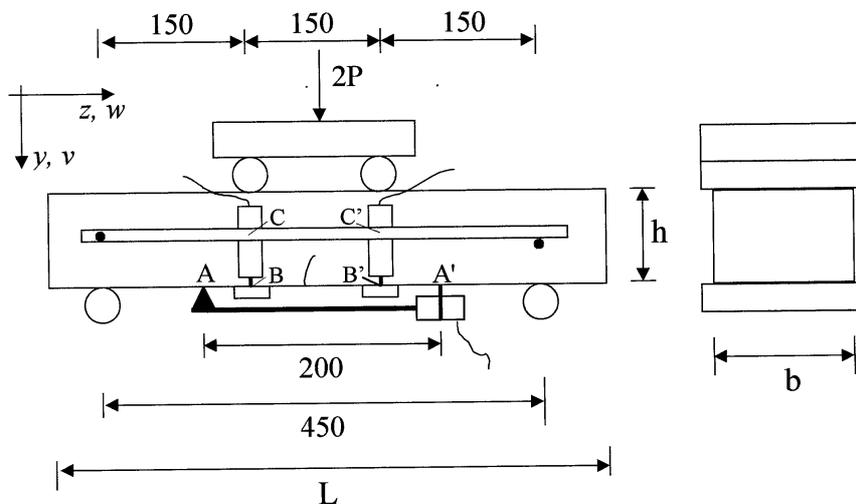


Figura A2.1: Strumentazione per la prova di flessione sul provino strutturale.

L'apparato misura l'allungamento δ del tratto A-A' (Figura A2.1), a cavallo dei due cilindri superiori, in corrispondenza dell'intradosso (COD–Crack Opening Displacement) ed eventualmente lo spostamento verticale v in corrispondenza dei coltelli di carico, da entrambi i lati, depurato dai cedimenti localizzati sotto al carico (ovvero per il lato frontale: $v_I = v_B - v_C$; $v_{I'} = v_{B'} - v_{C'}$).

Modalità di prova

La prova di flessione su quattro punti deve essere effettuata in controllo di deformazione δ . L'accostamento dei cilindri superiori di carico al provino deve essere effettuato con cura per evitare urti.

L'allungamento δ all'intradosso deve essere aumentato ad una velocità costante pari a $0,05 \pm 0,01$ mm/min. Per valori di δ superiori a 0,5 mm la velocità di spostamento può essere progressivamente aumentata fino a $0,5 \pm 0,1$ mm/min con una accelerazione non maggiore di $0,1$ mm/min². Il carico e gli spostamenti devono essere registrati con continuità su un supporto magnetico. La prova dovrà proseguire almeno fino al raggiungimento di un valore di δ non minore di 4 mm.

Risultati sperimentali

Si dovrà determinare la curva carico-allungamento della fibra di intradosso ($P - \delta$) ed eventualmente la curva carico-spostamento verticale in corrispondenza dei punti di carico.

Sarà poi annotata la presenza di una o più fessure e la loro eventuale posizione in assenza di intaglio.

I parametri f_{R1} e f_{R3} corrispondono allo sforzo nominale nella sezione di mezzeria (con l'ipotesi di distribuzione piana degli sforzi) in corrispondenza di un allungamento (δ) di 0,5 mm e di 2,5 mm, rispettivamente.