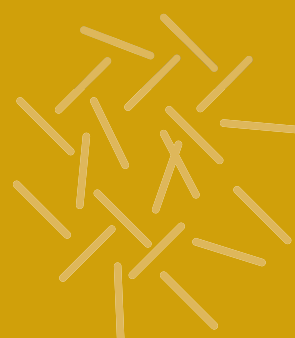




**LE FIBRE E IL
CALCESTRUZZO
FIBRORINFORZATO**





Il concetto che l'inserimento di un rinforzo discreto direttamente nell'impasto di un materiale a comportamento fragile (come una matrice di terra cruda, gesso, calce aerea, calce idraulica, cemento) potesse colmare alcune delle sue intrinseche debolezze, fonda le sue radici in tempi remoti. Basti pensare a quando nei mattoni in terra cruda veniva aggiunta all'impasto di argilla la paglia prima di modellarli e lasciarli asciugare al fine di prevenire la comparsa di fessure legate proprio all'essiccazione del materiale. Ancora oggi i tetti delle capanne nei paesi andini vengono realizzati con impasti di terra cruda rinforzati con fibre di *cardones* (i cactus dell'America Latina). Alla fine dell'800, la necessità di produrre manufatti in cemento di ridotto spessore (quali lastre di copertura, ma anche vasche di contenimento di liquidi e tubazioni) indusse ad un massiccio impiego di fibre naturali a base di amianto, rivelatosi solo successivamente pericoloso per la salute dell'uomo e abbandonato in favore di altre tipologie di fibre più sicure. Già durante la seconda guerra mondiale vennero testate le fibre in acciaio per il miglioramento delle proprietà dei calcestruzzi cui seguirono quelle in vetro e a metà degli anni '70 le fibre in materiale polimerico. Come già accennato, il calcestruzzo è un materiale a comportamento fragile che, unitamente alla modesta resistenza a trazione (nella progettazione strutturale di gran parte degli elementi in c.a. la resistenza a trazione del calcestruzzo si assume pari a zero affidando completamente gli sforzi di trazione all'armatura) e all'innata tendenza a contrarsi per effetto del ritiro idraulico (la contrazione di volume che qualsiasi elemento in calcestruzzo subisce allorché è esposto ad un'atmosfera insatura di vapore), tende a fessurarsi in maniera più o meno evidente. Nella maggior parte dei





casi le fessure che si generano per il “fisiologico” ritiro idraulico della pasta cementizia costituiscono un problema di natura estetica più che di natura strutturale. Tuttavia, se consideriamo anche gli aspetti legati alla durabilità delle strutture, in accordo a quanto richiesto dalle norme vigenti, le fessure insorte negli elementi in c.a. potrebbero ridurre la vita nominale delle opere in quanto, queste soluzioni di continuità, favoriscono l’ingresso di agenti aggressivi quali l’anidride carbonica e i cloruri che proprio attraverso le fessure possono raggiungere rapidamente i ferri di armatura promuovendone in tempi molto rapidi i fenomeni di corrosione e di conseguente formazione di ruggine accompagnata dall’espulsione del copriferro. Fenomeni precoci di degrado possono essere determinati dagli agenti chimici aggressivi quali solfati, ammonio e magnesio presenti nel terreno o disciolti in acque a contatto con gli elementi in calcestruzzo soggetti a fessurazione da ritiro idraulico. Infine, la presenza di fessure può esaltare la disgregazione della matrice in quelle strutture esposte a cicli di gelo/ disgelo e/o ridurre la resistenza all’abrasione nel caso delle pavimentazioni. Negli anni passati si è cercato di ovviare a queste carenze intrinseche del calcestruzzo utilizzando, nelle sezioni degli elementi in c.a. maggiormente esposti a questo rischio, un’armatura cosiddetta di ripartizione, costituita solitamente da barre di piccolo diametro disposte secondo reticoli a maglia quadrata con lato piccolo. Tuttavia, queste armature possono fronteggiare soltanto gli sforzi che insorgono nelle due direzioni in cui sono disposti i ferri. In realtà, gli sforzi di trazione generati dall’impedimento alla contrazione da ritiro si manifestano anche in direzioni diverse da quelle in cui sono disposte le armature di ripartizione con il risultato che le fessurazioni non possono essere



fronteggiate soltanto dall'impiego delle armature tradizionali. Da queste considerazioni nasce l'idea di inserire all'interno dell'impasto un rinforzo diffuso in tutte le direzioni in grado di colmare la carenza di resistenza a trazione del calcestruzzo e ridurre la formazione di fessure da ritiro sia in estensione che in ampiezza. Il rinforzo fibroso, inoltre, può consentire di ottenere un generale miglioramento della resistenza a fatica, ai carichi impulsivi e al fuoco del calcestruzzo armato. I fattori che influenzano le proprietà dei materiali cementizi fibrorinforzati sono:

- i. proprietà chimico-fisiche delle fibre
- ii. proprietà chimico-fisiche della matrice cementizia;
- iii. aderenza tra i due materiali.

Per quanto concerne le fibre utilizzabili come rinforzo nel calcestruzzo esse debbono essere marcate CE e conformi alla norma UNI EN 14889 parte 1 e 2 rispettivamente per quelle in acciaio e polimeriche. Le principali proprietà delle fibre che influenzano in termini di prestazioni reologiche e meccaniche il calcestruzzo sono:

- natura/materiale;
- lunghezza della fibra (l_f);
- lunghezza in sviluppo della fibra (l_d);
- diametro equivalente (d_f);
- rapporto di forma (l_f/d_f).

Le fibre di acciaio sono disponibili in forma di aghi di diversa conformazione geometrica: a sezione circolare o rettangolare, a estremità piegate, dentate, ecc. con diametro equivalente (d_f) compreso fra 0.4 e 1.2 mm e lunghezza (l_f) variabile tra 25 e 80 mm. In funzione delle prestazioni da conseguire, il dosaggio delle fibre di acciaio può variare da 25 a 150 kg/m³.





Le fibre metalliche possono essere in acciaio al carbonio, zincate o inox. Per quanto concerne le fibre non metalliche esse si suddividono in:

- a) fibre non metalliche strutturali – di tipo II - di lunghezza variabile tra 20 e 60 mm e diametro equivalente di 0.8-1.3 mm aggiunte in quantità comprese fra 2.5 e 6.0 kg/m³ per la produzione di conglomerati destinati alle stesse applicazioni di quelli prodotti con le fibre di acciaio;
- b) fibre non metalliche non strutturali – di tipo IA - di lunghezza variabile da 10 a 30 mm e diametro di 0.1-0.2 mm aggiunte in misura di 0.8-1.2 kg/m³ per la realizzazione di calcestruzzi destinati prevalentemente a solette e pavimenti di piccolo spessore per attenuare il rischio fessurativo derivante dal ritiro plastico del conglomerato.



In generale le fibre non metalliche possono essere o in vetro o di natura organica (prevalentemente poliacrilonitrile, poliestere e polipropilene). Attualmente quelle strutturali maggiormente utilizzate sono in polipropilene. La differenza di dosaggio tra le fibre in acciaio e quelle polimeriche è legata ai diversi pesi specifici dei materiali. Infatti, se si considerano i dosaggi delle fibre in volume e non in massa, il range di variazione è pari a 1.5-8.0 l/m³ indipendentemente dalla natura del rinforzo, limitato superiormente per non avere eccessivi problemi di reologia degli impasti. Se si utilizzano elevati dosaggi di fibre, infatti, si rischia di rendere l'impasto poco fluido e non raggiungere i livelli di lavorabilità richiesti per una corretta messa in opera. In ogni caso, in queste evenienze, sarà necessario riformulare la ricetta dell'impasto eventualmente modificando dosaggi e tipologie di additivi utilizzati.



Ciò che riveste un ruolo di primaria importanza per il calcestruzzo fibrorinforzato oltre che al tipo e al dosaggio delle fibre e alla classe di resistenza del calcestruzzo, è l'aderenza matrice-fibra in quanto, essendo l'allungamento a rottura di tutte le fibre circa 2-3 ordini di grandezza superiore alla deformazione a rottura della matrice, il conglomerato subirà la rottura molto prima che si possa verificare quella delle fibre, che, quindi, assumeranno importanza predominante solo dopo la fessurazione. Le fibre, infatti, si attivano dopo la fessurazione della matrice e controllano la fessurazione del calcestruzzo, migliorandone la tenacità post-fessurazione ossia la resistenza opposta dal materiale all'avanzamento del processo di frattura per effetto della sua capacità di dissipare energia di deformazione. Pertanto, la proprietà meccanica principale dei calcestruzzi fibrorinforzati è rappresentata non tanto dalla resistenza a compressione, come avviene per la maggior parte dei conglomerati, ma dalla resistenza residua a trazione, ossia dalla capacità di sopportare ancora il carico dopo l'innescò della prima fessurazione. Tale caratteristica è definita tenacità ed è valutata attraverso la prova di flessione secondo la norma UNI EN 14651:2005+A1:2007. I provini prismatici, confezionati in accordo alla UNI EN 12390-1, vengono intagliati in mezzera e sottoposti a una prova di flessione su tre punti di carico in controllo di CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), ovvero lo spostamento rilevato fra due punti alla base dell'intaglio. Il calcestruzzo fibrorinforzato viene classificato sulla base di valori puntuali della tensione nominale $f_{R,j}$, corrispondenti a prefissati valori di CMOD e derivati dal carico F_j :

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$





dove:

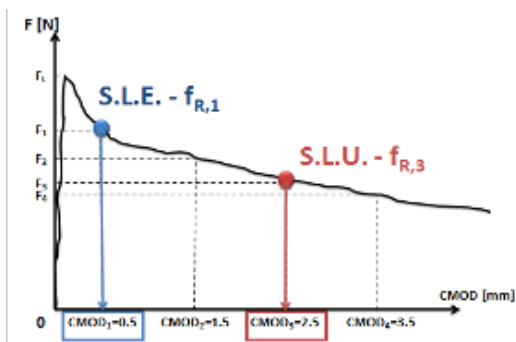
$F_{R,j}$ = resistenza residua a trazione valutata per CMOD = CMOD_j (j = 1, 2, 3, 4) [N/mm²];

F_j = carico corrispondente a CMOD = CMOD_j o $\delta = \delta_j$ (j = 1,2,3,4) [N];

l = luce del provino [mm];

b = larghezza del provino [150 mm];

h_{sp} = distanza tra l'apice dell'intaglio e la superficie superiore del provino [125 mm].



I calcestruzzi fibrorinforzati, in accordo al FIB MC 20101, possono essere denominati mediante la resistenza a flessione ($f_{R,1k}$) corrispondente a un'apertura di fessura di 0.5 mm (Tabella 1) seguita da una lettera che quantifica il rapporto tra $f_{R,3k} / f_{R,1k}$ (Tabella 2). Se ad esempio un calcestruzzo fibrorinforzato, che, a seguito delle prove sperimentali fornisce dei valori di resistenza $f_{R,1k} = 3.1$ N/mm² e $f_{R,3k} = 2.1$ N/mm², sarà classificato 3a, in quanto:

1. $f_{R,1k} = 3.1$ N/mm² → classe 3;
2. $f_{R,3k} / f_{R,1k} = 2.1 / 3.1 = 0.67 \rightarrow a$

Tabella 1 - Classi di resistenza in funzione del valore di $f_{R,1k}$

Classe $f_{R,1k}$ [N/mm ²]	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
--	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabella 2 - Lettera per la denominazione del calcestruzzo fibrorinforzato in funzione del rapporto $f_{R,3k} / f_{R,1k}$

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



Come si può notare, i due parametri fondamentali in termini di prestazioni, necessari anche alla progettazione di elementi in calcestruzzo fibrorinforzato sono rappresentati dalle tensioni residue all'apertura della fessura di 0.5mm ($f_{R,1}$) e 2.5mm ($f_{R,3}$). In particolare, il calcestruzzo fibrorinforzato può essere utilizzato per fini strutturali allorquando le fibre vengono utilizzate in sostituzione della tradizionale armatura di acciaio secondo la norma:



- CNR-DT 204/2006 se il dosaggio è superiore allo 0.3% in volume
- fib MC 20101 se la resistenza residua all'apertura della fessura di 0.5 mm è almeno pari al 40% della resistenza che il materiale aveva al momento dell'innesco della prima soluzione di continuità (f_{Lk}), nonché all'aumentare dell'ampiezza della fessura da 0.5 a 2.5 mm, la resistenza residua non deve diminuire più del 50%:

$$\begin{cases} \frac{f_{R,1k}}{f_{Lk}} > 0.4 \\ \frac{f_{R,3k}}{f_{R,1k}} > 0.5 \end{cases} \rightarrow \text{calcestruzzo fibrorinforzato strutturale.}$$

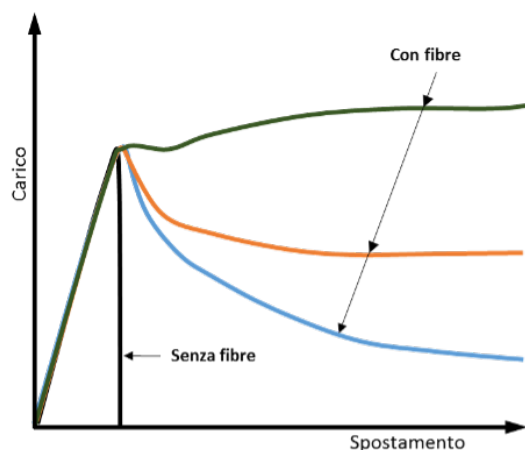
- CNR-DT 211/2014 (solo per pavimentazioni) se la resistenza residua all'apertura della fessura di 0.5 mm e 2.5 mm è almeno pari al 35% e al 25% della resistenza che il materiale aveva al momento dell'innesco della prima soluzione di continuità (f_{Lm})rispettivamente:

$$\begin{cases} \frac{f_{R,1m}}{f_{Lm}} > 0.35 \\ \frac{f_{R,3m}}{f_{Lm}} > 0.25 \end{cases} \rightarrow \text{calcestruzzo fibrorinforzato strutturale per pavimentazioni.}$$

Per poter confrontare tipologie di fibre diverse in termini prestazionali è obbligo per il produttore allegare alla marcatura CE delle fibre anche una DoP (Dichiarazione di



prestazione) nelle quale si riporta il dosaggio minimo di fibre che si deve utilizzare per raggiungere una resistenza residua a flessione di 1.5 MPa a 0.5 mm CMOD ($f_{R,1}$) e di 1.0 MPa a 3.5 mm CMOD oltre che al tempo di Vebè ottenuto con un determinato dosaggio. Ovviamente le miscele di calcestruzzo utilizzate sono standardizzate in accordo alla norma UNI EN 14845, in modo che l'unica variabile sia rappresentata dal tipo e dosaggio di fibre. Rispetto al calcestruzzo tal quale che ha un comportamento spiccatamente fragile in quanto dopo la comparsa della fessurazione volge immediatamente al collasso, il calcestruzzo fibrorinforzato è capace, grazie all'azione di cucitura dei cigli fessurativi, esercitata proprio dalla presenza delle fibre, di sopportare ancora livelli di carico più o meno elevati a seconda del tipo e della conformazione della fibra. In definitiva, aggiungendo le fibre agli impasti a base cementizia, non si hanno sostanziali variazioni in termini di resistenza a compressione, ma è possibile aumentarne la duttilità e di conseguenza la capacità resistente a flessione dopo la fessurazione. Il reale andamento della curva nella fase post-fessurativa dipende da una serie di fattori che generalizzando sono legati al dosaggio e tipo di fibra utilizzata.



Molti elementi strutturali e non sono progettati con l'utilizzo di calcestruzzo rinforzato con fibre sia in parziale che totale sostituzione dell'armatura tradizionale quali:

- pavimentazioni industriali e parcheggi
- elementi prefabbricati strutturali e non
- rivestimenti di gallerie.

Ai fini progettuali, attualmente esistono documenti di comprovata validità che consentono di dimensionare elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato quali



fib MC 2010 e CNR DT 204; specifici per pavimentazioni ci sono CNR DT 211-2014 e CSTR n.34. cui è possibile far riferimento per avere tutte le indicazioni necessarie per poter procedere ad un corretto progetto di elementi/strutture realizzate in calcestruzzo fibrorinforzato. I principali vantaggi legati all'utilizzo di un calcestruzzo fibrorinforzato sono pertanto riassumibili tra strutturali e realizzativi. In dettaglio, a livello strutturale l'impiego di fibre come rinforzo della matrice cementizia consente di ridurre le dimensioni delle fessure, garantendo una maggiore durabilità dell'opera, aumentare la resistenza a fatica, all'abrasione e ai carichi impulsivi del materiale. Infine, a livello realizzativo, la posa del calcestruzzo fibrorinforzato consente di ridurre i tempi di esecuzione e il costo della manodopera in quanto non si deve posare l'armatura; conseguentemente, è possibile garantire un maggior livello di sicurezza per le maestranze, soprattutto nel caso delle pavimentazioni, poiché gli operai non devono camminare in equilibrio precario sopra l'armatura sia durante le fasi di posa in opera che di getto del calcestruzzo. Infine, distribuire omogeneamente il rinforzo all'interno della miscela evita eventuali problemi connessi alla non corretta disposizione dei ferri all'interno del getto.





via della Vittorina, 60
06024 Gubbio (PG) - Italy
T +39 075 92401
F +39 075 9273965

www.colabeton.it
info@colabeton.it

