

Ing. Federico Alberio
R&D Manager

Lorenzo Pietrosanti
Tunneling Division Italia



Calcestruzzo fibrorinforzato per la costruzione di conci prefabbricati ad elevate prestazioni per gallerie

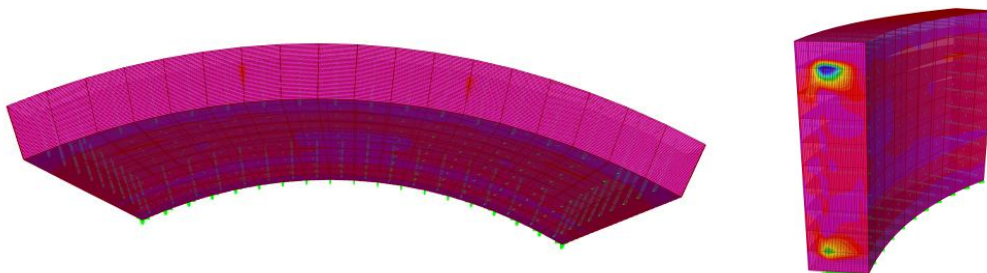
Le normative nazionali e internazionali che regolano oggi il comportamento del calcestruzzo fibrorinforzato permettono di progettare e realizzare conci di galleria ad elevate prestazioni e alto contenuto tecnologico con il solo composito fibrorinforzato, in assenza totale di armatura lenta.

La progettazione dei conci prefabbricati in calcestruzzo fibrorinforzato si è progressivamente affermata a partire dalla fine degli anni '90, sebbene il primo esempio realizzato in Italia risalga al 1982.

Dall'emissione del fib Model Code 2010 [1] sino all'avvento di Linee Guida e normative, come le NTC 2018 [2] e la successiva Circolare Esplicativa [3], il calcestruzzo fibrorinforzato è stato introdotto e poi legalmente riconosciuto come composito da costruzione per uso strutturale.

Oggi, infatti, grazie alla recentissima emissione delle *Linee guida per la progettazione, messa in opera, controllo e collaudo di elementi strutturali in calcestruzzo fibrorinforzato con fibre di acciaio o polimeriche* pubblicata a Maggio 2022 [4] dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che richiama espressamente i rivestimenti di galleria al capitolo dedicato 5.1.7, è possibile progettare elementi prefabbricati prendendo in considerazione il contributo fornito dalle fibre e successivamente realizzare gli stessi elementi qualificando il materiale come un nuovo composito strutturale dotato, dopo la fessurazione, di una significativa resistenza residua a trazione, assente in un calcestruzzo ordinario.

Il Dipartimento Tecnico di Fibrocev, diretto da Ing. Alberio Federico (f.alberio@fibrocev.it), grazie alla particolare cura riservata alla formazione ed all'aggiornamento continui dei propri ingegneri, prediligendo anche le esperienze dirette in cantiere, è a disposizione dei propri Clienti per garantire un servizio autorevole in grado di fornire tutte le indicazioni necessarie alla corretta progettazione, costruzione e controllo di opere in calcestruzzo fibrorinforzato.



CONCI PREFABBRICATI AD ALTE PRESTAZIONI

Nel campo delle costruzioni di gallerie, il calcestruzzo fibrorinforzato FRC è da tempo largamente utilizzato per la realizzazione dei rivestimenti provvisori in calcestruzzo proiettato. Grazie all'introduzione delle nuove normative che regolano il comportamento prestazionale del FRC, negli ultimi vent'anni le fibre sono state adottate anche per la realizzazione dei rivestimenti finali, come mostrato in numerosi esempi di gallerie a conci prefabbricati costruite in tutto il mondo.

La realizzazione di una galleria con conci prefabbricati, inoltre, garantisce un notevole risparmio dal punto di vista economico e un più rapido avanzamento del processo costruttivo, aumentando notevolmente la sicurezza delle maestranze, durante gli scavi, evitando l'utilizzo di esplosivi.

Una struttura di rivestimento in conci prefabbricati, soggetta prevalentemente a sollecitazioni normali e flessionali, richiede un quantitativo minimo di armatura di rinforzo. Poiché le sezioni trasversali dell'arco raggiungono lo stato limite ultimo durante la fase di crescita delle fessure formatesi in zona tesa, lo sforzo massimo di trazione sopportato dall'armatura ordinaria risulta assimilabile a quello assorbito dal FRC teso.

Inoltre, grazie alla presenza delle fibre disperse nella matrice cementizia, è possibile riscontrare tensioni di trazione anche in presenza di ampie aperture di fessura. Per questo motivo, il calcestruzzo fibrorinforzato è un materiale che permette di considerare l'effetto benefico fornito dalle fibre in termini di resistenza a trazione.

La progettazione di conci prefabbricati in FRC si basa proprio su queste considerazioni, in quanto il composito fibrorinforzato conferisce alcuni vantaggi rispetto a elementi analoghi in calcestruzzo ordinario. La presenza delle fibre consente, infatti, di ridurre significativamente il quantitativo di armatura tradizionale e, in alcuni casi, anche di sostituirla interamente. In un concio fibrorinforzato, le barre di acciaio vengono quindi concentrate soprattutto ai bordi dell'elemento, che risultano essere le zone più sensibili in quanto soggette alle azioni di spinta esercitate dai martinetti della fresa meccanica a sezione piena TBM (Tunnel Boring Machine).

FIBRAG® STEEL

Per la realizzazione di composito fibrorinforzato strutturale, destinato alla costruzione di conci fibrorinforzati, Fibrocev consiglia l'utilizzo di fibre in acciaio ottenute da filo trafilato a freddo ad alta resistenza a trazione ed alto tenore di carbonio, con estremità uncinata della serie SHT.

FIBRAG® STEEL: F-WG 35/65 SHT e **FIBRAG® STEEL: F-WG 60/80 SHT** sono infatti le fibre in grado di migliorare notevolmente le proprietà meccaniche dei conglomerati cementizi e in particolare la durabilità, la resistenza ultima a trazione e a fatica e la duttilità del calcestruzzo.



FIBRAG® STEEL: F-WG 35/65 SHT

Gruppo	I (EN 14889-1)
Lunghezza (L)	35 mm
Diametro (D)	0,53 mm
Rapporto d'aspetto (L/D)	65
Forma	Uncinata alle estremità
Tipo	Incollate in placchette
Resistenza a trazione	1.855 MPa
Peso fibre (gr/CAD)	0,0606
N. di fibre per kg	16.485

FIBRAG® STEEL: F-WG 60/80 SHT

Gruppo	I (EN 14889-1)
Lunghezza (L)	60 mm
Diametro (D)	0,75 mm
Rapporto d'aspetto (L/D)	80
Forma	Uncinata alle estremità
Tipo	Incollate in placchette
Resistenza a trazione	1.855 MPa
Peso fibre (gr/CAD)	0,2082
N. di fibre per kg	4.800

Da un punto di vista fessurativo, invece, per le verifiche in esercizio di strutture in calcestruzzo armato, la valutazione dell'ampiezza di fessura e della spaziatura tra le medesime è fondamentale al fine di limitare, a seconda dell'aggressività dell'ambiente, la corrosione dell'armatura. La presenza di fibre all'interno del composito fornisce un valido contributo in tal senso, dal momento che le fibre stesse incrementano in modo significativo le azioni di cucitura lungo le fessure, riducendone o controllandone quindi l'apertura e dando luogo ad una microfessurazione diffusa.

Un ulteriore vantaggio dato dall'aggiunta di fibre in un concio prefabbricato è, a parità o anche in questo caso riducendo la percentuale di armatura lenta, la possibilità di realizzare conci di minor spessore, con conseguenti effetti benefici da un punto di vista strutturale, in quanto ne derivano una riduzione dei momenti flettenti ed un miglioramento del comportamento membranale, garantendo al tempo stesso un notevole risparmio dal punto di vista economico e un più rapido avanzamento del processo costruttivo.

L'obiettivo principale di Fibrocev e della sua Divisione Tecnica è quello di assicurare la massima competenza nel settore del calcestruzzo fibrorinforzato oltre alla completa disponibilità e assistenza al Cliente, supportandolo in ogni fase progettuale e di realizzazione dell'opera, grazie alla costante e continua presenza in cantiere in fase di esecuzione dell'opera.

L'EVOLUZIONE NORMATIVA

L'aggiunta di fibre disperse in una matrice cementizia ne modifica le proprietà meccaniche e, in particolare, migliora il comportamento a trazione contrastando l'apertura progressiva delle fessure.

Una volta raggiunta la fessurazione della matrice, infatti, le fibre sono in grado di manifestare il proprio contributo, fornendo al composito una significativa resistenza residua a

trazione assente nella matrice senza fibre, denominata tenacità.

Quest'ultima dipende da molteplici fattori come, ad esempio, la lunghezza della fibra, il rapporto di aspetto (ossia il rapporto lunghezza/diametro delle fibre), la percentuale volumetrica delle fibre e le caratteristiche fisico-meccaniche di queste ultime.

Il comportamento fortemente degradante, tipico di una prova di trazione monoassiale sul calcestruzzo ordinario, può essere modificato in modo significativo dall'aggiunta di fibre, al crescere della percentuale volumetrica di esse. Per piccole percentuali volumetriche di fibre il legame carico-spostamento a trazione di un FRC presenta ancora un ramo discendente definendo un comportamento cosiddetto degradante, ma è caratterizzato ugualmente da una resistenza residua e da una maggiore tenacità. Per percentuali volumetriche di fibre superiori, il comportamento può invece diventare incrudente, grazie alla comparsa di una multi-fessurazione.

Le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2018 [2] prescrivono, al punto 11.1, che tutti i materiali e prodotti da costruzione, quando impiegati per uso strutturale, debbano essere identificati e in possesso di specifica qualificazione all'uso previsto e debbano inoltre essere oggetto di controlli in fase di accettazione da parte del Direttore dei Lavori.

A tal fine, le NTC [2] prevedono che i materiali ed i prodotti da costruzione per uso strutturale, quando non marcati CE ai sensi del Regolamento UE n.305/2011 o non provvisti di ETA (European Technical Assessment) ai sensi dell'art. 26 del Regolamento (UE) n. 305/2011, debbano essere in possesso di un Certificato di Valutazione Tecnica CVT rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale, sulla base di linee guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

La recente Linea Guida pubblicata nel 2019 con successivo aggiornamento del Novembre 2021 [5] fornisce le procedure per l'identificazione,

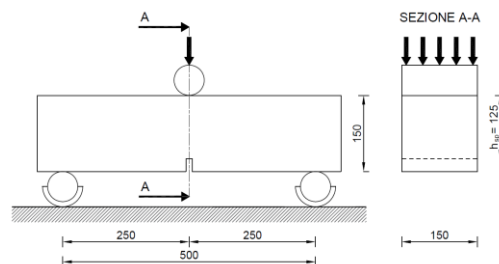
la qualificazione ed il controllo di calcestruzzi fibrorinforzati, denominati FRC (Fiber Reinforced Concrete), impiegati per la realizzazione di nuovi elementi strutturali e per il consolidamento di strutture esistenti.

Facendo riferimento a quanto previsto dalla Circolare esplicativa delle Norme tecniche (emanata nel 2019) di cui al punto C11.2.12 e alle sopraccitate LLGG, si definisce un parametro chiave in merito alla presenza di fibre nel composito, in quanto viene precisato che un calcestruzzo fibrorinforzato ad uso strutturale, per essere definito tale, oltre ai requisiti minimi prestazionali, deve essere caratterizzato da un dosaggio minimo delle fibre al suo interno “non inferiore allo 0.3% in volume”.

Inoltre, viene riportato che i calcestruzzi fibrorinforzati FRC devono essere preparati nello stabilimento del Fabbricante e forniti in cantiere come prodotto pronto per l'impiego oppure come prodotto secco premiscelato al quale va aggiunta l'acqua in cantiere.

In accordo con il fib Model Code [1], il fib Bulletin 83 [6] e le nuove Linee Guida sulla progettazione di elementi in FRC [4], la progettazione strutturale degli elementi FRC si basa sulla resistenza a trazione residua post-fessura fornita dalle fibre. I valori nominali delle proprietà del materiale sono determinati eseguendo una prova di trazione per flessione in accordo alla norma EN 14651 [7], che si basa su una prova di flessione su tre punti su un provino intagliato in mezzzeria. Secondo le *Linee Guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)* di cui al cap. 3.6, per ottenere il rilascio del sopraccitato Certificato di Valutazione Tecnica CVT, sono necessarie almeno 12 prove a flessione su travetto.

La resistenza residua è espressa in termini di



tensione nominale, corrispondente a specifici valori dell'apertura della base dell'intaglio (CMOD), pari a 0.5, 1.5, 2.5 e 3.5 mm secondo la seguente equazione:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

Dove:

$f_{R,j}$ [MPa] è la resistenza residua del composito corrispondente ad un valore CMOD = CMOD_j

F_j [N] è la forza residua corrispondente a CMOD = CMOD_j

l [mm] è la distanza tra gli appoggi della travetta (500 mm)

b [mm] è la larghezza della sezione trasversale della travetta (150 mm)

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

Per classificare in modo univoco il comportamento post-fessurativo di un FRC sono presi in esame due parametri: la resistenza nominale caratteristica per f_{R1k} ed il rapporto f_{R3k}/f_{R1k} , che consentono di identificare la cosiddetta classe di tenacità, necessaria ai fini della progettazione strutturale.

La resistenza nominale per f_{R1k} è definita dal numero appartenente alla seguente successione, immediatamente inferiore al valore stesso di f_{R1k} determinato sperimentalmente:

1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 8.0,
10.0, 12.0, 14.0 [MPa]

Il rapporto f_{R3k}/f_{R1k} viene invece indicato con una delle lettere *a, b, c, d, e*, ciascuna delle quali indica un intervallo di valori, come specificato nel seguito:

a per $0.5 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0.7$

b per $0.7 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 0.9$

c per $0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.1$

$$d \text{ per } 1.1 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.3$$

$$e \text{ per } 1.3 \leq f_{R3k}/f_{R1k}$$

Pertanto, la classe di tenacità di un FRC viene definita da un numero (resistenza nominale per f_{R1k}) e da una lettera (intervallo di valori in cui ricade f_{R3k}/f_{R1k}).

Come indicato al cap. 5.1.7 delle LLGG per la progettazione [4], per rivestimenti in galleria in cui non è presente armatura ordinaria occorre utilizzare un calcestruzzo con una prestazione minima non inferiore alla classe 4.0c. A titolo esemplificativo, quindi, un FRC di questa classe di resistenza residua ha una resistenza nominale per f_{R1k} pari almeno a 4.0 MPa (essendo: $4.0 \leq f_{R1k} < 5.0$) e un valore del rapporto f_{R3k}/f_{R1k} compreso nell'intervallo indicato dalla lettera c: $0.9 \leq f_{R3k}/f_{R1k} < 1.1$.

La resistenza flessionale residua caratteristica, necessaria per la determinazione della classe di tenacità, si riferisce ad un frattile del 5% della distribuzione statistica dei risultati sperimentali. Per il FRC si assume una distribuzione log-normale.

Come indicato all'Allegato 1 delle LLGG FRC sulla qualificazione [5], la resistenza flessionale residua caratteristica è calcolata secondo l'espressione:

$$f_{R1k} = e^{(m_y - k_n s_y)}$$

Dove:

$$m_y = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(f_{Ri,i})}{n} \quad s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(f_{Ri,i}) - m_y)^2}{n-1}}$$

(quando V_x è incognito, mentre $s_y = V_x$ quando V_x è noto)

k_n valore in funzione del numero di campioni e della deviazione standard determinato come da Tabella 1, dove "n" indica il numero di campioni e " V_x " la deviazione standard



Vantaggi dei conci prefabbricati in FRC

- ✓ Controllo e riduzione delle fessurazioni durante le fasi di costruzione e in opera
- ✓ Maggior resistenza agli urti e alla caduta di materiali
- ✓ Distribuzione omogenea di fibre all'interno della matrice cementizia
- ✓ Ottimizzazione del processo produttivo
- ✓ Riduzione dei tempi di costruzione e dei costi

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
V_x noto	2.31	2.01	1.89	1.83	1.80	1.77	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64
V_x incognito	-	-	3.37	2.63	2.33	2.18	2.00	1.92	1.76	1.73	1.64

Tabella 1. Valori di k_n per la determinazione delle resistenze flessionali residue caratteristiche

Di seguito viene proposto un grafico tecnico-prestazionale delle performances raggiungibili al variare del contenuto di fibre in acciaio **FIBRAG® STEEL: F-WG 60/80 SHT** (calcestruzzo di riferimento C40/50), comparate rispetto a un calcestruzzo ordinario.

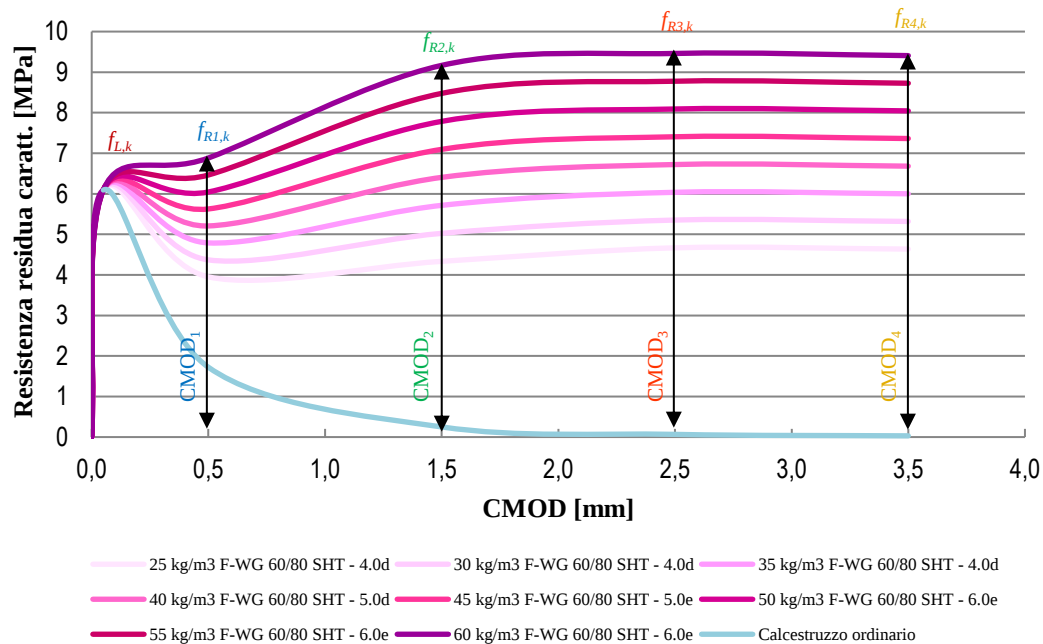


Figura 1. Grafico tecnico-prestazionale al variare del contenuto di fibre in acciaio **FIBRAG® STEEL: F-WG 60/80 SHT**

Questione Di Precisione

Per la realizzazione di conchi di galleria e per tutti gli interventi per i quali è richiesto un attento e preciso monitoraggio sui materiali utilizzati, Fibrocev Srl è in grado di fornire impianti di controllo del dosaggio di fibre ad altissima precisione, installati su misura per gli spazi e le esigenze di ogni specifico cantiere, con sopralluoghi preventivi, formazione sull'uso dei macchinari e continua e pronta assistenza al Cliente, garantendo la produzione continuativa dei conchi stessi.



Figura 2. Impianto dosatore automatico di fibre (conforme a Industria 4.0)



Figura 3. Fase di stoccaggio di conci prefabbricati



Massima Professionalità

da parte di tutto il Team Fibrocev, formato da tecnici specializzati con approfondita formazione ed esperienza nel settore FRC



Aggiornamento Continuo

in modo da offrire sempre la migliore soluzione innovativa e più vantaggiosa da un punto di vista tecnico ed economico



Ricerca & Sviluppo

grazie al laboratorio mobile e presso il laboratorio interno Fibrocev, per un continuo controllo e sviluppo della tecnologia FRC



Supporto al Cliente

continuo e costante, sostenendolo in ogni fase dell'opera e supportandolo nelle scelte più opportune



Rapidità di Risposta

e massima disponibilità, in modo da garantire i tempi previsti di consegna di progetto e operativi di cantiere



Sopralluoghi in Cantiere

costanti durante ogni fase dell'opera, per un supporto continuo al Cliente

BIBLIOGRAFIA

- [1] fib Model Code for Concrete Structures
- [2] Norme tecniche per le Costruzioni - D.M. 17/01/2018
- [3] Circolare del 21 gennaio 2019 Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni NTC 2018»»
- [4] 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
- [5] Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete) – Aggiornamento Novembre 2021
- [6] fib Bulletin 83 - Precast tunnel segments in fibre-reinforced concrete
- [7] UNI EN 14651 - Metodo di prova per calcestruzzo con fibre metalliche - Misurazione della resistenza a trazione per flessione [limite di proporzionalità (LOP), resistenza residua]