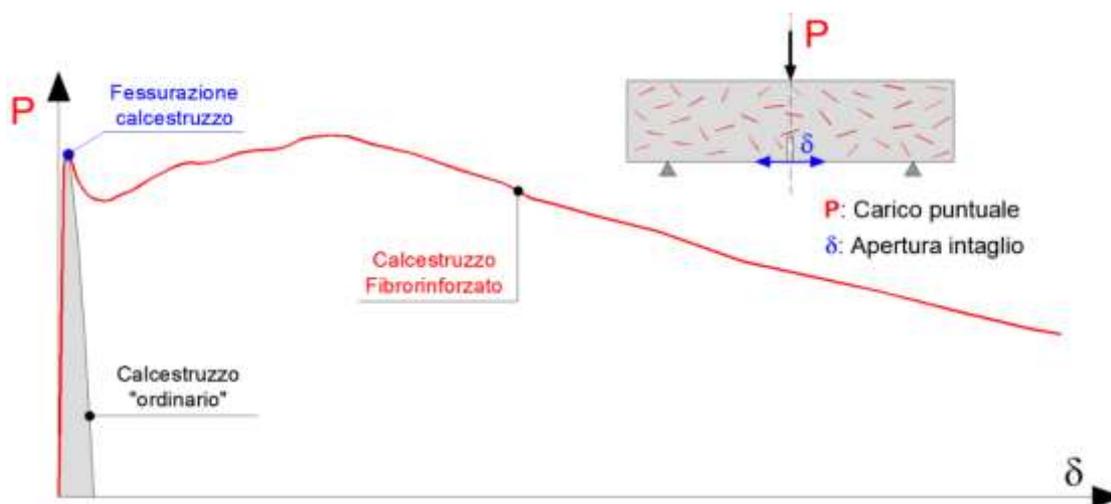


## MICROCALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO AD ELEVATE PRESTAZIONI COMPOSITE M130: INNOVAZIONE NEL RIPRISTINO E RINFORZO STRUTTURALE

Ing. Felice Marco Liberatore – Divisione Ingegneria G.A.

### 1. Principali riferimenti normativi per il calcestruzzo fibrorinforzato

Il D.M. 17 gennaio 2018 [1] definisce per la prima volta (par. 11.2.12) le procedure e le modalità di impiego dei calcestruzzi fibrorinforzati per applicazioni strutturali. In effetti tali materiali sono noti da tempo, essendo stati impiegati per anni nell'ambito di specifici settori delle Costruzioni, quali ad esempio la prefabbricazione o le pavimentazioni industriali. Tuttavia, le NTC [1] modificano radicalmente l'approccio a questo materiale, trasformandolo da "composizionale" a "prestazionale". Utilizzare oggi un calcestruzzo fibrorinforzato significa poter contare su specifiche prestazioni che dovranno essere prescritte dal Progettista, fornite dal Produttore e controllate dal Direttore dei Lavori. Ci si riferisce, in particolare, ad una prestazione che di fatto caratterizza questa tipologia di conglomerato, ovvero la **Resistenza a trazione residua**. Il termine "residua" indica che detta prestazione è fornita dal materiale dopo la fessurazione della matrice cementizia (Figura 1).



**Figura 1** – A differenza di un calcestruzzo "ordinario", quello fibrorinforzato è in grado di sostenere tensioni di trazione anche dopo la fessurazione della matrice cementizia

In [1] è sottolineata in maniera chiara (par. 11.2.12) la necessità di caratterizzare preliminarmente tale prestazione, indicando come specifico riferimento procedurale la norma UNI EN 14651 e richiamando, nella Circolare NTC n.7 del 21.01.2019 [2], anche consolidate Documentazioni Tecniche quali la CNR-DT 204/2006 [3]. Infine, l'emanazione da parte del C.S.LL.PP. della "Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)" [4] consente ai Fornitori di calcestruzzo fibrorinforzato di "certificare" i propri materiali richiedendo lo specifico **CVT (Certificazione di Valutazione Tecnica)**, indispensabile per poterli utilizzare in applicazioni strutturali ([1], paragrafo 11.1 – Caso B).

## 2. Microcalcestruzzi fibrorinforzati nel ripristino e rinforzo strutturale

I microcalcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni, tipo **COMPOSITE M130** di General Admixtures, noti con l'acronimo **HPFRC** (High Performance Fiber Reinforced Concrete), rappresentano una evoluzione tecnologica dei *tradizionali* conglomerati additivati con fibre e rappresentano oggi uno dei materiali cementizi più all'avanguardia disponibili sul Mercato. Negli ultimi anni l'attenzione verso le strutture esistenti è aumentata in maniera esponenziale, alla luce della ormai improcrastinabile necessità di adeguarle agli standard normativi attuali. Le peculiari caratteristiche (reologiche, meccaniche e di durabilità) dell'HPFRC lo rendono particolarmente adatto alla realizzazione di interventi di riabilitazione strutturale, dai semplici **interventi locali** ai più complessi interventi di **miglioramento/adeguamento sismico** (paragrafo 8.4 di [1]). Decennali esperienze sperimentali hanno dimostrato come questo tipo di materiale possa essere utilmente impiegato, in forma di **applicazioni corticali di basso spessore**, per il ripristino ed il rafforzamento di elementi strutturali quali pilastri, travi, nodi, solai.

Dal punto di vista reologico, il Prodotto si presenta estremamente "sottile", nel senso che gli aggregati che lo compongono sono di piccolo diametro ( $d_{max} \approx 2$  mm), e con una elevata lavorabilità (Figure 2 e 3).



Figura 2



Figura 3

Tale reologia permette di realizzare sia interventi su superfici orizzontali, come ad esempio il **rinforzo estradossale di solai o solette in genere**, che getti entro cassero, come ad esempio il **rinforzo di pilastri, travi e nodi**.

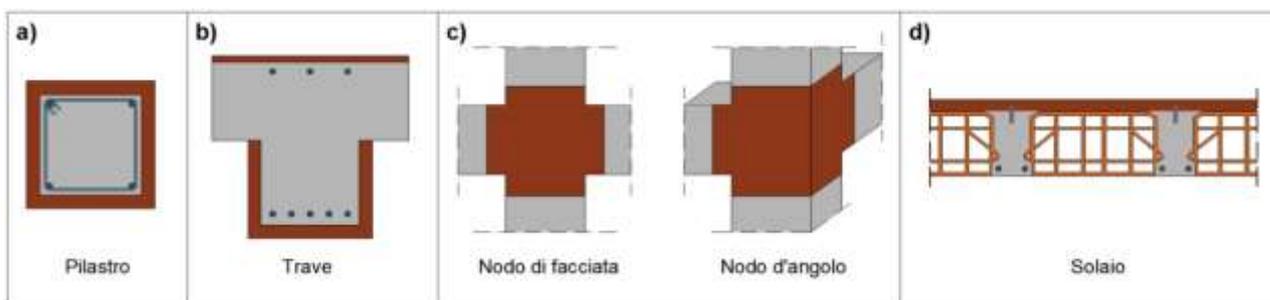
Lo spessore applicativo, generalmente compreso tra i 20 mm ed i 50 mm, è perfettamente coerente con le diverse caratteristiche del materiale:

- Aggregati di ridotte dimensioni (compatibilità aggregato/spessore minimo del getto)
- Elevata fluidità (elevato grado di compattazione con una limitata compattazione)
- Elevate resistenze (**130 MPa a compressione** a 28 giorni): ottimizzazione delle sezioni resistenti
- Ridottissima porosità: durabilità strutturale nei riguardi di tutti gli agenti aggressivi

La possibilità di chiamare il materiale a “lavorare” a trazione, consente poi di ottimizzare il contenuto e la tipologia delle eventuali armature integrative: barre longitudinali di ridotto diametro e riduzione del numero (e diametro) delle staffe, in coerenza con il ridotto spessore applicativo. Nel Prospetto 1 si propone uno schema dei principali tipi di intervento e relativi benefici realizzabili attraverso l’impiego di un microcalcestruzzo HPFRC come il **COMPOSITE M130** nel rinforzo a basso spessore delle strutture in c.a.

**Prospetto 1** – Possibili impieghi del microcalcestruzzo fibrorinforzato **COMPOSITE M130** nel ripristino/rinforzo strutturale di strutture in c.a.

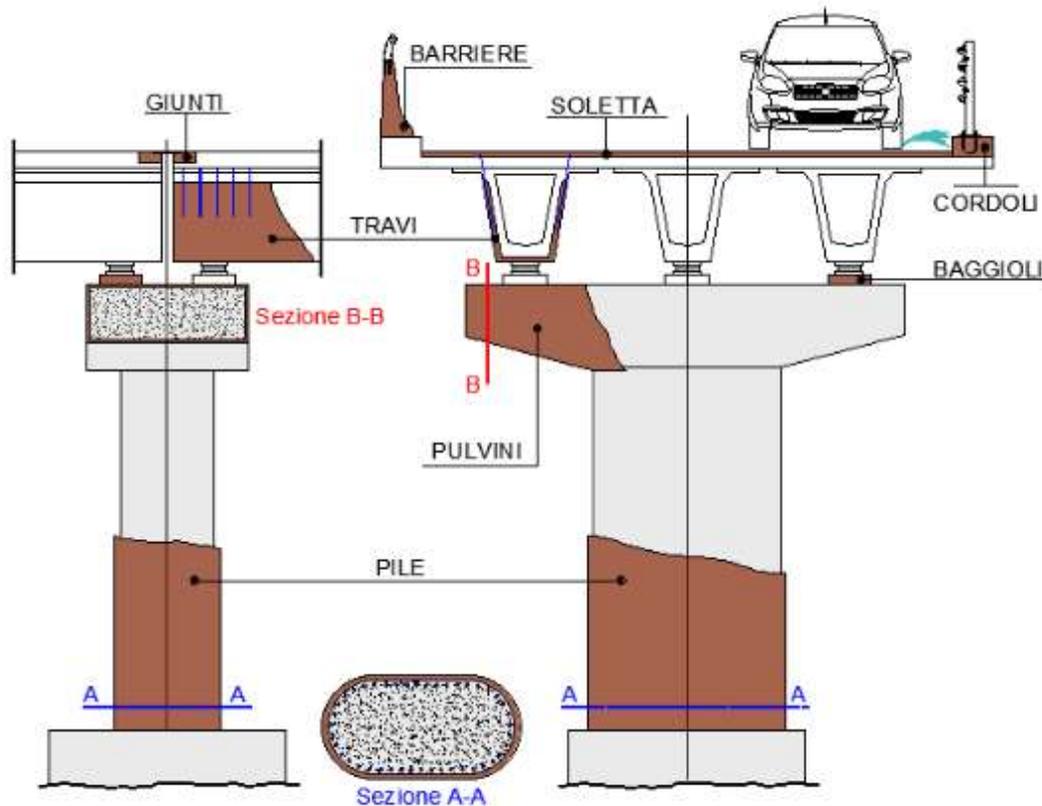
ELEMENTO	TIPOLOGIA DI INTERVENTO	BENEFICI
PILASTRO	Camicia corticale in basso spessore (Fig. 4a)	Incremento resistenza a pressoflessione Incremento resistenza a taglio Incremento di duttilità Incremento di durabilità
TRAVE	Camicia in basso spessore all'intradosso di travi “fonde” (Fig. 4b)	Incremento di resistenza a flessione (momento positivo) Incremento di resistenza a taglio Incremento di duttilità Incremento di durabilità
	Soletta in basso spessore all'estradosso (Fig. 4b)	Incremento di resistenza a flessione (momento negativo)
NODO Trave-Pilastro (di bordo o d'angolo)	Camicia corticale in basso spessore (Fig. 4c)	Incremento della resistenza del pannello nodale (Gerarchia delle Resistenze)
SOLAIO	Soletta a basso spessore all'estradosso (Fig. 4d)	Incremento della rigidezza nel piano del solaio (effetto diaframma) Incremento della rigidezza fuori dal piano (incremento portanza, riduzione deformazioni, riduzione vibrazioni)



**Figura 4**

Le applicazioni ora riassunte sono quelle tipiche per strutture che potremmo definire “ordinarie”, ovvero le strutture intelaiate in c.a. relative ad opere più o meno grandi. Tuttavia, il materiale in questione si candida ad essere un vero protagonista anche nell’ambito dei rinforzi di strutture, o meglio, di infrastrutture di importanza strategica: **ponti e viadotti**.

È ben noto come la questione della valutazione della sicurezza dei ponti italiani sia un argomento di grande attualità, soprattutto a causa di recenti eventi drammatici che hanno visto il crollo di importanti strutture. Ed è proprio in tale ambito che le peculiarità di un materiale come il **COMPOSITE M130** possono trovare innumerevoli applicazioni. In Figura 5 uno schema qualitativo che ben rappresenta le potenzialità di questo Prodotto nella manutenzione ordinaria e straordinaria di ponti e viadotti.



**Figura 5** – Microcalcestruzzo fibrorinforzato **COMPOSITE M130** nel ripristino e rinforzo di ponti

La possibilità di ottimizzare lo spessore delle camicie corticali consente di rinforzare **pile**, **pulvini** e **travi** limitando notevolmente l'incremento delle masse e favorendo nel contempo una eccezionale protezione nei confronti dell'aggressione ambientale.

Le pile potranno beneficiare, in particolare, di un rilevante incremento di resistenza a pressoflessione e taglio, nonché un importante aumento di duttilità. Pulvini e travi potranno godere di rilevanti incrementi di resistenza a taglio, spesso trovata carente in diverse strutture. Interessanti applicazioni a carico dei **baggioli**, elementi estremamente sollecitati da carichi puntuali di compressione e soggetti spesso a elevata aggressione ambientale in caso di cattiva regolamentazione delle acque piovane (infiltrazioni attraverso i giunti).

Anche il ripristino delle **solette** potrà essere realizzato con un materiale che, alla luce del rilevante contenuto di fibre metalliche, presenta al suo interno una sorta di armatura diffusa indispensabile per i compiti cui la soletta è generalmente chiamata a rispondere.

Non meno interessanti sono le applicazioni che potremmo definire "*non strutturali*" come quelle legate alla **sostituzione dei giunti** (si ricorda che il conglomerato adiacente ai giunti è sottoposto a sollecitazioni cicliche piuttosto severe), **rifacimento dei cordoli** (spesso fortemente degradati da cicli di gelo/disgelo che compromettono la perfetta tenuta delle barriere stradali) e la realizzazione di **barriere di sicurezza** (guard-rail) più resistenti e leggere di quelle tradizionalmente realizzate in calcestruzzo.

### 3. Principali caratteristiche composizionali e prestazionali del materiale

Il microcalcestruzzo fibrorinforzato **COMPOSITE M130** è un **materiale premiscelato**, fornito in tre componenti (Figura 6) che devono essere miscelati in cantiere nel rispetto della procedura fornita dal Produttore. La presenza di una rilevante quantità di fibre metalliche (dotate di Marcatura CE secondo UNI EN 14899) uniformemente diffuse nella matrice cementizia, conferisce al materiale la sua peculiare duttilità.



**Figura 6** – Diverse componenti del microcalcestruzzo **COMPOSITE M130**

In ottemperanza a quanto previsto da [1] e [4], il materiale in questione è dotato del **Certificato di Valutazione Tecnica**, rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale. Grazie a tale Certificazione, il **COMPOSITE M130** può essere impiegato negli interventi di carattere strutturale ai sensi dei paragrafi 11.1 – Caso B e 11.2.12 di [1].

In Tabella 1 si riportano le principali prestazioni, fisiche, meccaniche e di durabilità, che caratterizzano il microcalcestruzzo **COMPOSITE M130**.

**Tabella 1** - Principali prestazioni del microcalcestruzzo fibrorinforzato **COMPOSITE M130**

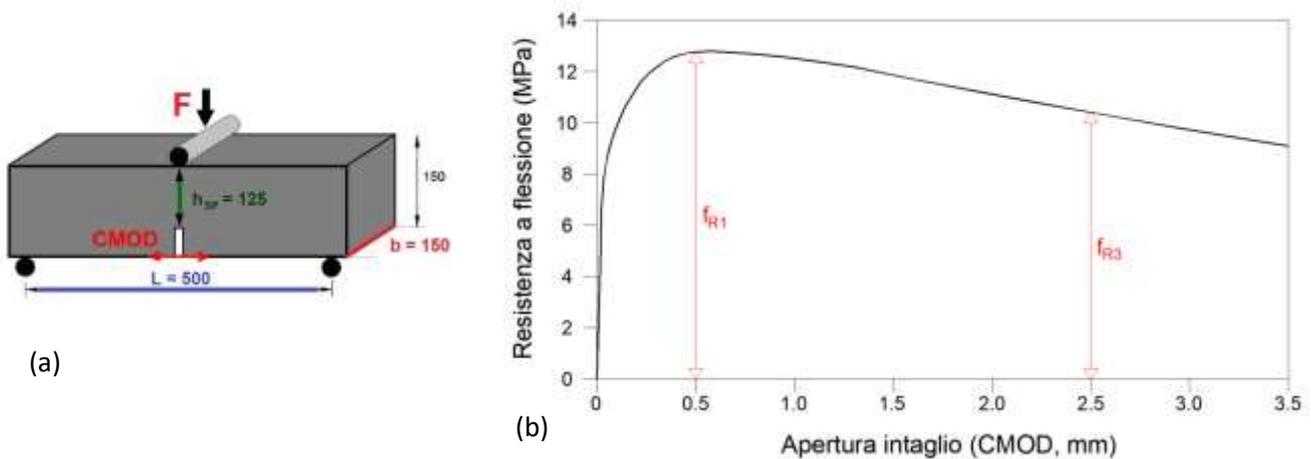
PRESTAZIONE	NORMA DI RIFERIMENTO	VALORE
Classe di Resistenza a Compressione	NTC 2018	C90/105
Classe di Consistenza	UNI EN 12350-2 ; UNI EN 12350	S5 ; SF2
Classe di Esposizione	UNI EN 206	Tutte
Diametro massimo dell'aggregato	UNI EN 933-1	2 mm
Classe di Tenacità	Linea guida FRC	8b
Massa volumica del fresco	UNI EN 12350-6	2370 kg/m <sup>3</sup>
Resistenza al gelo/disgelo	Procedura Linea guida FRC	Esito positivo
Aderenza acciaio-calcestruzzo (pull-out)	RILEM-CEB RC6	≥ 35 MPa
Adesione al calcestruzzo (28 gg)	UNI EN 1542	≥ 2,7 MPa
Modulo elastico	UNI EN 13412	≈ 37000 MPa
Resistenza a flessione (28 gg)	UNI EN 1504-3 ; UNI EN 196-1	≥ 20 MPa
Classe di reazione al fuoco	UNI EN 13501-1	A1, A1 <sub>FL</sub>

I valori riportati in Tabella 1 descrivono, come anticipato in precedenza, un materiale ad elevate prestazioni ed estremamente innovativo. Innanzitutto è classificato come un calcestruzzo con **Classe di Resistenza C90/105** (massima classe ammessa dall'attuale normativa cogente, Tabella 4.1.I di

[1]). Con tale resistenza è possibile contare su una elevata tensione di progetto utile ad ottimizzare le sezioni resistenti.

La **Classe di Tenacità**, che di fatto riassume la prestazione distintiva di ogni “calcestruzzo fibrorinforzato” è, nel caso in questione, pari a “**8b**”. Per chiarire il significato di questo parametro è necessario riferirsi innanzitutto alla procedura di caratterizzazione prevista da [1] al paragrafo 11.2.12. Tutti i calcestruzzi fibrorinforzati devono infatti essere “identificati” con due specifici valori di resistenza a trazione residua:  $f_{R1k}$  e  $f_{R3k}$ .

Tali valori vengono determinati su specifici provini prismatici sottoposti a flessione secondo la procedura di prova UNI EN 14651 (Figura 7a, dimensioni in millimetri).



**Figura 7 – (a)** Schema di prova UNI EN 14651 utilizzato per la caratterizzazione, in termini di Classe di Tenacità, dei calcestruzzi fibrorinforzati. **(b)** Tipici valori di resistenza a flessione del **COMPOSITE M130** in funzione dell’apertura dell’intaglio.

Dopo aver preliminarmente intagliato un provino prismatico di adeguate dimensioni, lo si sottopone ad una prova di flessione applicando su di esso un carico concentrato in mezzzeria. In corrispondenza dei singoli valori di forza applicata (adeguatamente trasformata in tensioni di trazione per flessione) viene misurata l’apertura dell’intaglio, in modo da poter costruire un diagramma come quello riportato in Figura 7b. Da tale diagramma si desume il valore della **resistenza residua a trazione** in corrispondenza di una apertura di intaglio di 0,5 mm ( $f_{R1}$ ) e di 2,5 mm ( $f_{R3}$ ). Tali valori, rilevati su un numero di campioni staticamente valido, vengono quindi espressi in forma caratteristica.

Nel caso specifico (classe 8b), il **COMPOSITE M130** presenta un valore  $f_{R1k} > 8$  Mpa ed un rapporto  $f_{R3k}/f_{R1k}$  compreso tra 0,7 e 0,9.

Altro aspetto essenziale riguarda la **Classe di Esposizione**. Il materiale ha una porosità talmente ridotta da risultare praticamente inattaccabile da tutte le forme di aggressione previste dalla norma. In Figura 8 l’immagine di un provino di **COMPOSITE M130** esposto ad un ambiente contenente  $CO_2$  ad elevata concentrazione per circa 1 mese. Il successivo test colorimetrico con fenolftaleina evidenzia la totale insensibilità del materiale alla **carbonatazione**.

In particolare, per quanto attiene al degrado per **cicli di gelo/disgelo**, il materiale non ha mostrato alcuna penalizzazione della sua resistenza a trazione residua anche a seguito di una serie di cicli termici condotti tra  $-20^\circ C$  e  $+38^\circ C$ .

Inoltre l’**adesione** del materiale al supporto ed alle barre di armatura risulta molto elevata. In Figura 9 si riporta l’immagine di una prova di adesione per trazione diretta (UNI EN 1542) eseguita su una

porzione di camicia realizzata con il microcalcestruzzo **COMPOSITE M130**. Si evidenzia come la rottura del campione (preliminarmente isolato dal resto della camicia) sollecitato a trazione, avvenga in corrispondenza del supporto di calcestruzzo e non all'interfaccia di adesione tra i due materiali. In Figura 10 si riporta l'immagine di una prova "pull-out" eseguita su una barra di armatura  $\varnothing 10$  ancorata nel **COMPOSITE M130** per soli 5 cm. L'adesione tra il materiale e la barra è tale da comportare, anche per modeste lunghezze di ancoraggio, la rottura dell'acciaio piuttosto che lo sfilamento dell'armatura dalla matrice cementizia.

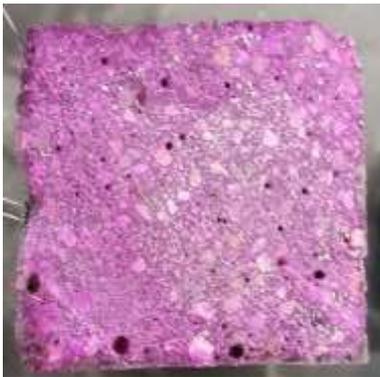


Figura 8



Figura 9



Figura 10

#### 4. Approcci di calcolo e software

Nel caso di rinforzi corticali a basso spessore di elementi strutturali in c.a. eseguiti con il microcalcestruzzo fibrorinforzato **COMPOSITE M130**, l'aspetto progettuale dell'intervento, con specifico riferimento alle procedure di calcolo e valutazione dell'efficacia del rinforzo, richiede che vengano considerati una serie di aspetti, più o meno complessi. I principali sono:

- La definizione del legame costitutivo in compressione del microcalcestruzzo
- La definizione del legame costitutivo in trazione del microcalcestruzzo
- La valutazione della resistenza a pressoflessione della sezione rinforzata
- La valutazione della resistenza a taglio della sezione rinforzata

Per quanto attiene al punto (a), si tratta certamente dell'aspetto più semplice in quanto il legame costitutivo del microcalcestruzzo fibrorinforzato viene definito in maniera del tutto analoga a qualsiasi calcestruzzo, con riferimento alle indicazioni riportate al paragrafo 4.1.2.1.2 di [1]. Si potrà optare tra 3 diversi tipi di legame costitutivo (Figura 11), ciascuno dei quali individuato da una sequenza di parametri ( $f_{cd}$ ,  $\epsilon_{c2}$ ,  $\epsilon_{c3}$ ,  $\epsilon_{c4}$ ,  $\epsilon_{cu}$ ) di facile determinazione.

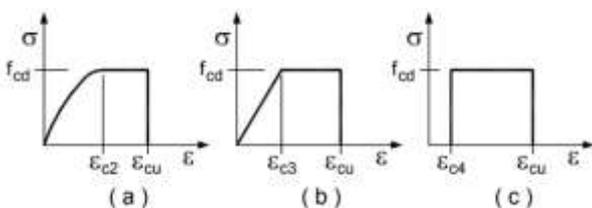


Figura 11

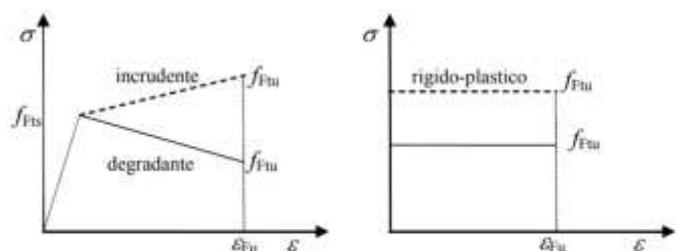


Figura 12

In merito al punto (b), un utile riferimento è sicuramente il documento [3] che propone due distinti legami costitutivi per modellare il comportamento (allo S.L.U.) del materiale a trazione. Il primo (Figura 12, sinistra), denominato “*legame lineare*” prevede la definizione di due tensioni di progetto,  $f_{Fts}$  (resistenza a trazione rappresentativa per lo SLE) e  $f_{Ftu}$  (resistenza a trazione rappresentativa per lo SLU). Tali tensioni vengono definite sulla base di formulazioni attualmente riportate all’interno di documenti di riferimento molto accreditati ([3],[5]). Il secondo modello (Figura 12, destra), denominato “*legame rigido-plastico*” prevede la definizione dell’unica resistenza di riferimento allo S.L.U.  $f_{Ftu}$ .

Nello specifico, in caso di legame rigido-plastico, la  $f_{Ftu}$  vale esattamente  $f_{R3k}/3$  (vedi paragrafo precedente). Ovviamente, per determinare la resistenza di calcolo occorrerà applicare, come per tutti i materiali, un opportuno coefficiente parziale di sicurezza ( $\gamma_f=1.5$ , secondo [2]).

Una volta individuate le leggi costitutive del materiale, occorre procedere con la vera e propria **Analisi delle Sezioni** rinforzate, con particolare riferimento alle sollecitazioni di **pressoflessione** (N, M) e **taglio** (V). Parlando di interventi di ripristino/rinforzo di elementi in c.a., tale aspetto si complica, dovendo tener conto, nell’ambito della stessa sezione, di due materiali molto diversi tra loro: il calcestruzzo “originario” (spesso non molto prestazionale) e la camicia corticale in HPFRC (ad elevate prestazioni).

L’approccio di calcolo “semplificato” proposto da [2] (par. C8.7.4.2.1 “Incamiciature in c.a.”) non può essere perseguito in quanto per la sua applicazione “*le proprietà meccaniche del calcestruzzo della camicia si considerano estese alla intera sezione incamiciata se le differenze tra i due materiali non sono eccessive*”.

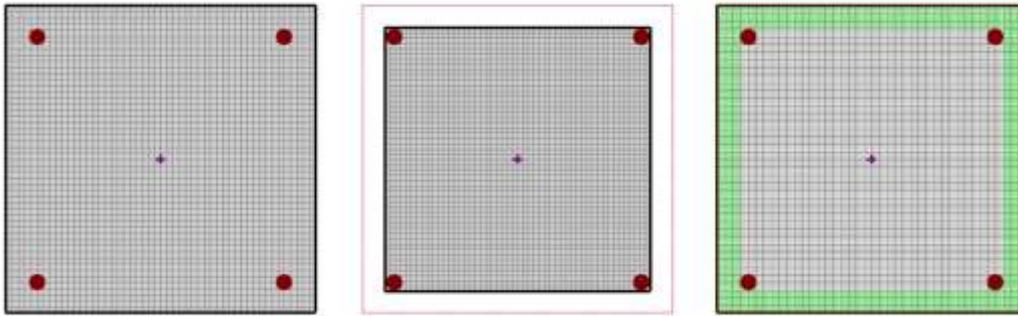
Nel caso dell’HPFRC, le proprietà meccaniche della camicia sono notevolmente superiori a quelle del nucleo di calcestruzzo. Per questo motivo occorre evidentemente utilizzare un approccio di calcolo più raffinato che tenga effettivamente conto della differenza di comportamento tra i due materiali. Si ritiene che il miglior approccio sia quello dell’analisi numerica della sezione rinforzata, previa sua opportuna discretizzazione in *strisce* oppure in *fibres*.

Ovviamente un tale approccio non può prescindere dall’automatizzazione del calcolo. L’interessante **applicativo software STRUCTURE.4R**, scaricabile gratuitamente da internet (→ <https://www.gageneral.com/download/>) è stato realizzato proprio come ausilio all’analisi delle sezioni ripristinate/rinforzate corticalmente con materiali cementizi. Tra i diversi materiali di ripristino disponibili in archivio è possibile scegliere anche il microcalcestruzzo fibrorinforzato tipo HPFRC **COMPOSITE M130**.

In Figura 13 un esempio di valutazione che vede il confronto tra:

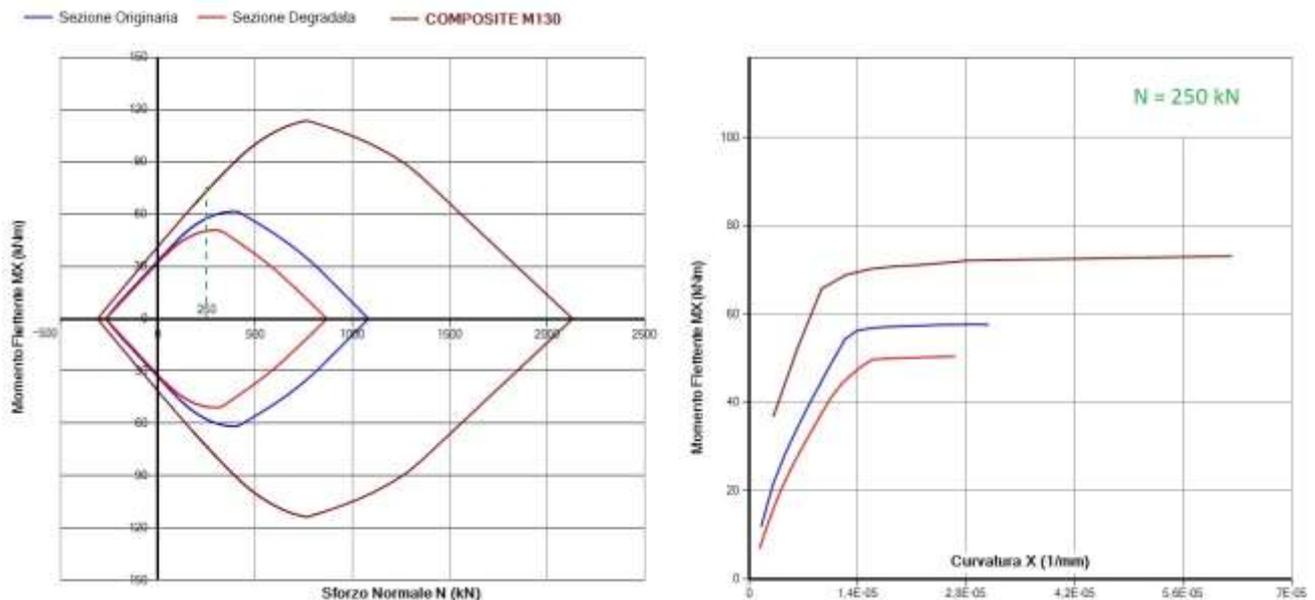
- Sezione “Originaria”: Pilastro 30 x 30 – Calcestruzzo C16/20 - 4Ø16 FeB38k – Copriferro 22 mm
- Sezione “Degradata”: Come l’originale ma senza il copriferro
- Sezione “Rinforzata”: Come la Degradata, con il ripristino del copriferro con **COMPOSITE M130**

Le sezioni vengono discretizzate con elementi a fibre in modo che a ciascuno di essi possa essere associato uno specifico materiale. Questo consente di tener debitamente conto della differenza di prestazioni tra il calcestruzzo “originario” e la camicia corticale



**Figura 13 – Software STRUCTURE.4R:** Discretizzazione a fibre delle sezioni analizzate

Nella seguente Figura 14 si riportano i risultati dell’analisi numerica, in termini di **Domini di resistenza M-N** e **diagrammi Momento-Curvatura** delle sezioni di cui alla Figura 13. I diagrammi Momento-Curvatura sono stati tracciati con riferimento ad uno sforzo normale pari a 250 kN.



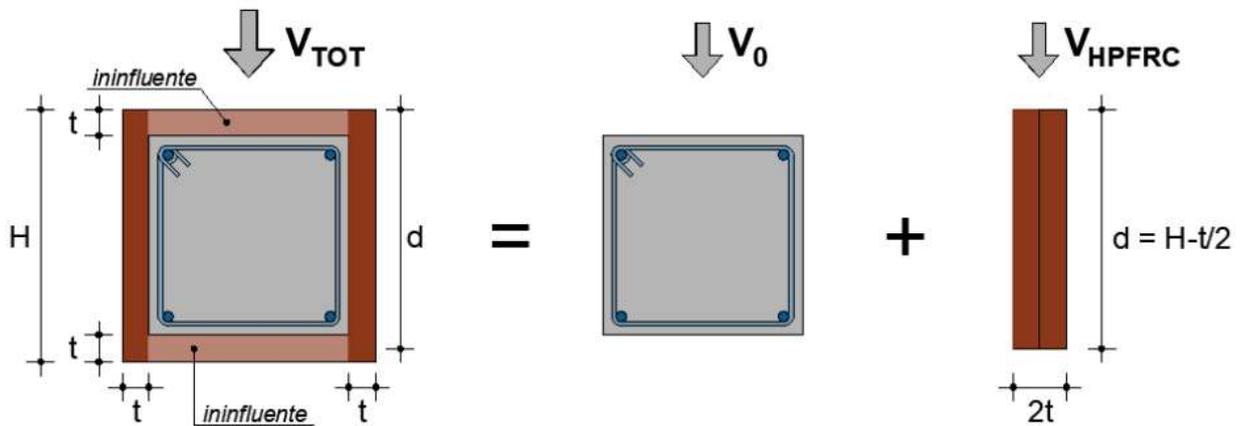
**Figura 14 – Domini di interazione e Diagrammi Momento-Curvatura** delle sezioni di Figura 13

Dai diagrammi riportati in Figura 13 sono evidenti i benefici della tecnica di ripristino/rinforzo qui presentata, sia in termini di **Resistenza** che di **Duttilità** della sezione.

Infine, in merito alla valutazione del contributo della camicia in **COMPOSITE M130** alla **resistenza a taglio** della sezione, è opportuno sottolineare che diverse formulazioni disponibili in letteratura consentono di considerare, per il conseguimento di tale obiettivo, la resistenza a trazione del calcestruzzo fibrorinforzato. Innanzitutto il documento [3] che, per il calcolo della resistenza a taglio di sezioni realizzate con calcestruzzo fibrorinforzato ma prive di armature “a taglio” (staffe), propone una “specializzazione” della formula generica indicata in [1] (espressione [4.1.23] del paragrafo 4.1.2.3.5.1 “Elementi senza armature trasversali a taglio”) nella quale viene introdotto il **parametro**  $f_{Ftuk}$ , ovvero la Resistenza caratteristica a trazione residua del conglomerato (eq. 4.2 di [2]).

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0.18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[ 100 \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 + 7.5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad [\text{tensioni in MPa}], \quad (4.2)$$

Nel caso di un rinforzo corticale, la precedente espressione (si rimanda a [3] per chiarimenti sul significato dei parametri) deve evidentemente essere applicata in maniera ragionata, tenendo conto della effettiva porzione di rinforzo resistente a taglio. Con riferimento allo schema di Figura 15, si può considerare la camicia di HPFRC come una sezione “aggiuntiva” il cui contributo di resistenza a taglio si va a sommare alla resistenza dell’elemento esistente.



**Figura 15** – Schema teorico per la valutazione del contributo a taglio della camicia HPFRC [6]

Evidentemente, la porzione superiore e quella inferiore (trasversali rispetto alla direzione del taglio sollecitante) possono considerarsi ininfluenti ai fini della resistenza a taglio e pertanto vengono trascurate. Inoltre, essendo la camicia in HPFRC realizzata attorno ad un pilastro/trave già esistente, l’eventuale sforzo normale presente nell’elemento non si trasferirà in maniera significativa sulla camicia. Pertanto, a vantaggio di sicurezza, nella precedente espressione è opportuno porre  $\sigma_{cp}=0$  (tensione di compressione sulla camicia).

Un approccio alternativo è quello di considerare il rinforzo HPFRC come una “**armatura trasversale equivalente**” da sommare a quella già esistente nell’elemento originario. Questo approccio è del tutto analogo a quello utilizzato nel caso di rinforzi con FRP [7]. In questo caso, la porzione “efficace” del rinforzo (Figura 15) viene trasformata in “*area equivalente*” di staffe  $A_{sw,eq}/s$  e sommata a quella originaria. Questo consentirà di utilizzare, per le verifiche, le usuali formulazioni proposte dalla Normativa [1].

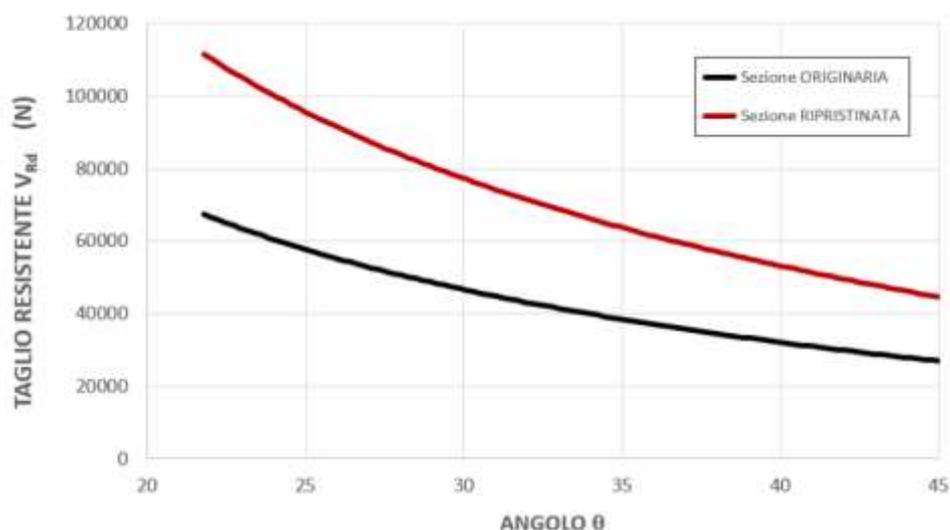
Pertanto, con riferimento alla lunghezza unitaria dell’elemento rinforzato (con riferimento ai simboli di Figura 15) si ha:

$$A_{sw,eq} = 2 \cdot (t \cdot 1000) \cdot (f_{Ftud}/f_{yd}) \quad [\text{mm}^2/\text{m}]$$

$$V_{Rsd,TOT} = 0,9 \cdot d \cdot (A_{sw}/s + A_{sw,eq}/1000) \cdot f_{yd} \cdot \cot\theta$$

Quest’ultimo valore, come previsto dalla [1], andrà confrontato con il valore  $V_{Rcd}$  (Resistenza a taglio “lato calcestruzzo”) per determinare il minore dei due che, in definitiva, rappresenterà la resistenza a taglio dell’elemento rinforzato. Ulteriori riferimenti di calcolo possono essere approfonditi in letteratura [6].

In Figura 16, a titolo di esempio, si mostra l’incremento di resistenza a taglio (variabile in funzione dell’inclinazione  $\theta$  del puntone di calcestruzzo che costituisce il “traliccio resistente”) valutato con il metodo dell’armatura equivalente sulle sezioni di Figura 13 (confronto tra la sezione “originaria” e quella “ripristinata”), nell’ipotesi di staffe (esistenti)  $\varnothing 8/300$  mm (FeB38k).



**Figura 16** – Resistenza a taglio (in funzione dell'inclinazione  $\theta$ ) delle sezioni di Figura 13

Variando l'inclinazione del puntone  $\theta$  tra i  $21,8^\circ$  ed i  $45^\circ$  ( $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$ ), i valori del taglio resistente variano tra 67 kN e 27 kN per la Sezione Originaria e tra 111 kN e 45 kN per la Sezione Ripristinata.

## 5. Conclusioni

I calcestruzzi fibrorinforzati sono la vera novità del recente D.M. 17/01/2018. Tra questi, i **microcalcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni** (noti anche come HPFRC, High Performance Fiber Reinforced Concrete), come il **COMPOSITE M130** di General Admixtures, costituiscono una vera e propria innovazione nel settore dei materiali cementizi. Alla elevata resistenza a compressione (**Classe di Resistenza C90/105**, la massima consentita da [1]) essi associano non trascurabili resistenze a trazione residue (post-fessurative).

Grazie a tali prestazioni ed alle sue peculiari proprietà reologiche, il materiale si presta ad essere impiegato nell'ambito del **ripristino e rinforzo delle strutture ed infrastrutture in c.a. (viadotti)**.

In generale, applicazioni corticali in basso spessore consentono di conseguire una serie di benefici:

- Incremento della resistenza a pressoflessione.
- Incremento della resistenza a taglio.
- Incremento della durabilità strutturale.
- Incremento della duttilità delle sezioni.

Applicazioni specifiche, come quelle su **solai**, consentono di incrementare notevolmente la rigidità e resistenza degli orizzontamenti (in calcestruzzo, acciaio o legno) sia nel piano (**diaframma rigido**) che fuori (incremento della portanza e riduzione delle deformazioni). Inoltre, interessanti applicazioni sono state proposte anche per il rinforzo dei **nodi trave-pilastro** [8] ai fini del miglioramento della **Classe di Rischio Sismica** (incremento della resistenza del pannello nodale, nell'ottica del conseguimento della corretta Gerarchia delle Resistenze). La notevole versatilità di questo materiale lo rende particolarmente adatto alla realizzazione di interventi strutturali che, migliorando il comportamento sismico delle strutture, hanno la possibilità di beneficiare delle note **agevolazioni fiscali**, dal **Sismabonus** classico all'attuale e più recente **Superbonus 110%**, in funzione delle scelte progettuali perseguite dalla Committenza.

## **Bibliografia**

[1] D.M. Infrastrutture e Trasporti 17 gennaio 2018

[2] Circolare Ministeriale Infrastrutture e Trasporti n.7 del 21 gennaio 2019

[3] CNR-DT 204/2006 Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo Fibrorinforzato

[4] Linea guida per l'identificazione, la qualificazione, la certificazione di valutazione tecnica ed il controllo di accettazione dei calcestruzzi fibrorinforzati FRC (Fiber Reinforced Concrete)

[5] fib Bulletin no. 55 - Model Code 2010

[6] M. Del Zoppo, M. Di Ludovico, A. Prota – “Shear capacity models for RC columns with FRCC jacketing”

[7] CNR-DT 200 R1/2013 - Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati

[8] C. Beschi, G. Metelli, P. Riva – “Retrofitting of beam-column exterior joint with HPFRC jacketing”