

Incamicatura di pilastri in calcestruzzo armato: vantaggi nell'impiego di betoncini strutturali (Classe R4 – UNI EN 1504-3) e di microcalcestruzzi fibrorinforzati ad elevate prestazioni HPFRC

Davide Orbolato, Matteo Antonel, Agostino Cadarin | **GENERAL ADMIXTURES S.p.A.**
 Felice M. Liberatore | INGEGNERE CIVILE

1. GENERALITÀ SULLA TECNICA DELL'INCAMICIATURA IN C.A.

Il rinforzo di pilastri in c.a. mediante incamicatura è una tecnica di intervento che prevede il ringrosso delle sezioni esistenti mediante una “camicia” corticale in calcestruzzo, ovvero una nuova sezione (cava) che, opportunamente armata con barre longitudinali e trasversali, collabora con la sezione originaria. Il trasferimento degli sforzi (tangenziali) tra il nuovo getto ed il pilastro esistente è assicurato da specifici connettori che, opportunamente ancorati, contrastano lo scorrimento reciproco tra il “nucleo” (ovvero il pilastro originario) e la periferia (ovvero la nuova camicia) dell'elemento rinforzato.

Come specificato anche dalla Circolare n.7 del 21 gennaio 2019 (p.to C8.7.4.2.1), i principali vantaggi della incamicatura in c.a. sono:

- Aumento della capacità portante verticale;
- Aumento della resistenza a flessione e/o taglio (Figura 1);
- Aumento della capacità deformativa;
- Incremento della durabilità strutturale;

In Figura 1 viene rappresentato un “tradizionale” intervento di incamicatura in c.a.

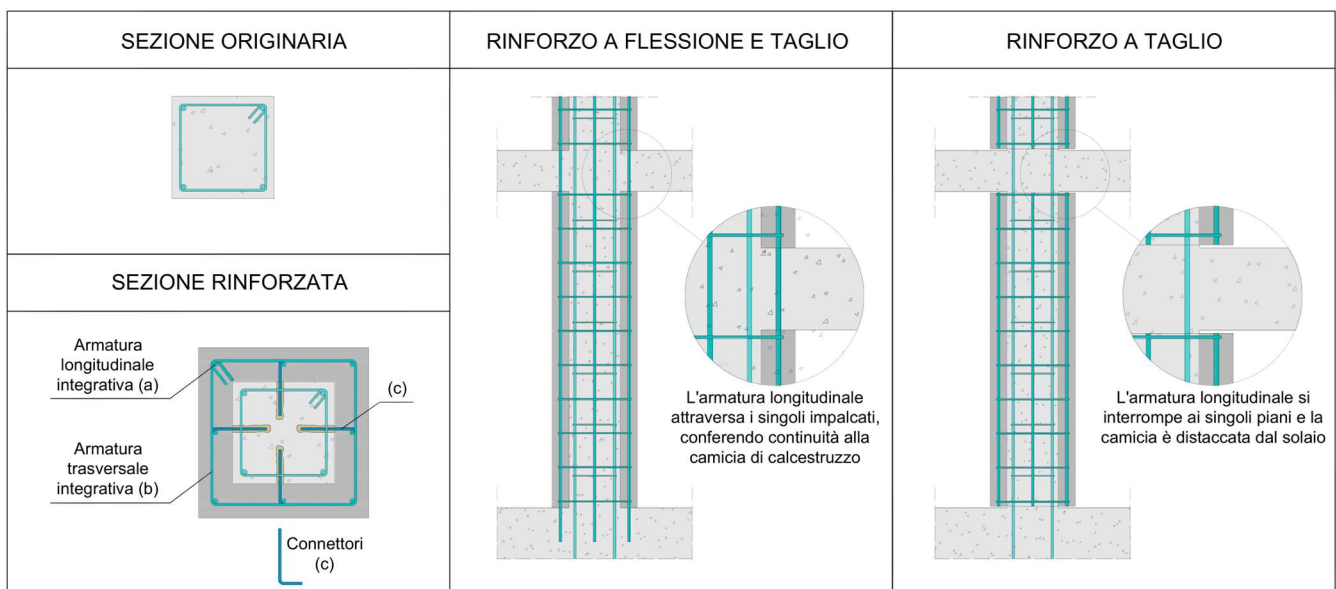


Figura 1 – Schema generale di una incamicatura “tradizionale” in c.a., nel caso di un rinforzo a flessione e taglio e nel caso di un rinforzo solo a taglio.

Lo schema riportato in Figura 1 chiarisce un aspetto essenziale di questa tipologia di rinforzo. Se l'incamicatura si propone di aumentare la resistenza flessionale dei pilastri, le barre longitudinali devono essere continue attraverso i vari piani dell'edificio.

Se invece lo scopo della camicia è quello di incrementare la sola resistenza a taglio del pilastro, le armature e la camicia si interromperanno al singolo piano.

In Figura 2 una sequenza fotografica che mostra alcune fasi salienti di una incamiciatura tradizionale, partendo dalla installazione delle armature integrative principali (Figura 2a e 2b), alla realizzazione della necessaria casseratura (Figura 2c), fino al risultato finale (Figura 2d) dell'intervento.

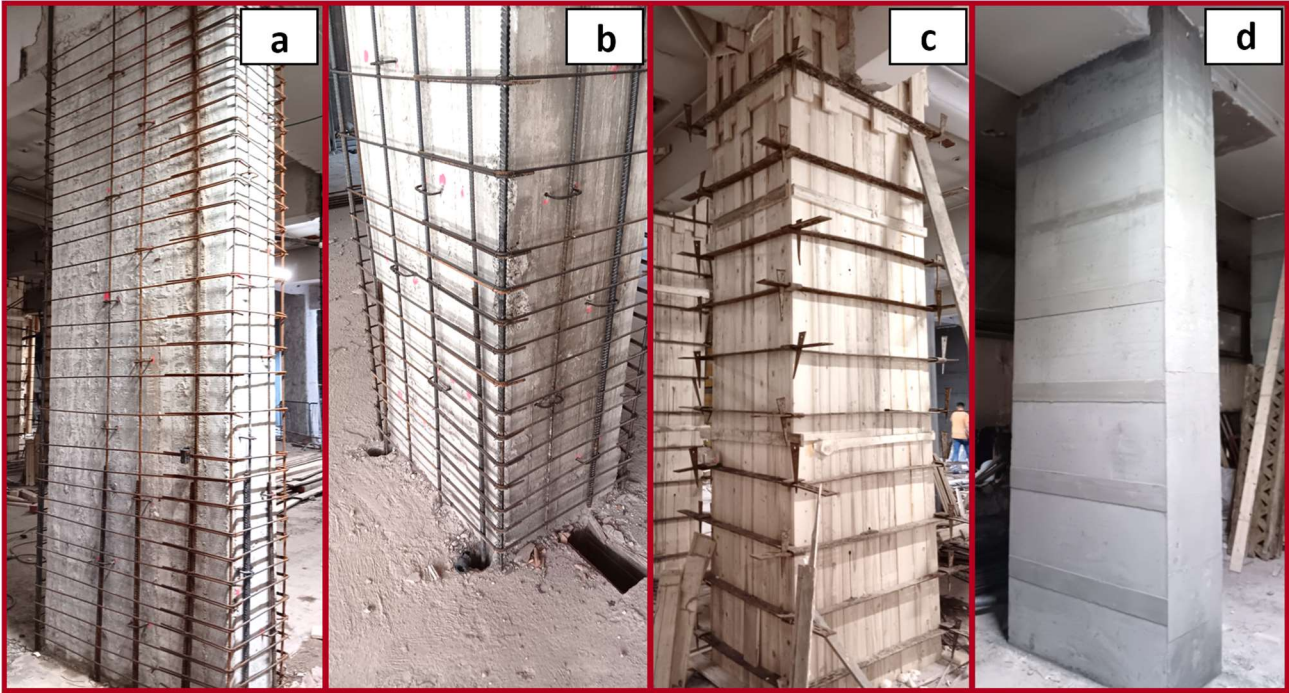


Figura 2 – Principali fasi della realizzazione di una incamiciatura tradizionale realizzata mediante il betoncino premiscelato di Classe R4 (UNI EN 1504-3) **STRUCTURE BF4-B**

2. INCAMICIATURE CON BETONCINI PREMISCELATI STRUTTURALI (CLASSE R4 – UNI EN 1504-3)

Le immagini di Figura 2 riportano una incamiciatura realizzata impiegando uno specifico betoncino premiscelato (**STRUCTURE BF4-B**) reoplastico, bicomponente e con classe di resistenza R4 secondo UNI EN 1504-3.

I betoncini sono caratterizzati dalla presenza di un aggregato con diametro massimo di circa 10 mm, e questo li rende adeguati alla esecuzione di getti con spessori generalmente compresi tra 50 e 100 mm.

I principali vantaggi dell'impiego di un betoncino premiscelato in sostituzione del calcestruzzo preconfezionato sono:

- Possibilità di confezionare il conglomerato direttamente in cantiere con l'ausilio di una semplice betoniera;
- Prestazioni, meccaniche, fisiche e di durabilità particolarmente elevate (Tabella 1);
- Ottima costanza delle prestazioni;
- Eliminazione del problema logistico del trasporto del calcestruzzo, soprattutto nel caso di cantieri situati in area urbana;
- Eliminazione, nella stagione calda, del problema del mantenimento della lavorabilità, in quanto il punto di miscelazione del materiale è adiacente al punto di getto;
- Migliore organizzazione del cantiere.

In Tabella 1 si riportano le principali prestazioni meccaniche del betoncino **STRUCTURE BF4-B**.

Tabella 1 – Principali caratteristiche del betoncino **STRUCTURE BF4-B** indicato per incamiciature in c.a.

Caratteristiche	Metodo di Prova	U.M.	Valore
Diametro massimo dell'aggregato	EN 933-1	mm	≤ 10
Classe di consistenza	EN 12350/2	Classe	S5 (superfluida)
Resistenza a compressione			
1 giorno	EN 12190	MPa	30
7 giorni			60
28 giorni			70
Resistenza a trazione per flessione			
1 giorno	EN 1961-1	MPa	5
7 giorni			7
28 giorni			8
Adesione al calcestruzzo (28 giorni)	EN 1542	MPa	> 2
Permeabilità all'acqua di pressione	EN 12390-8	mm	< 5
Resistenza alla carbonatazione	EN 13295	-	Passa
Reazione al fuoco	EN 13501-1	Classe	A1

La Figura 3 mostra la elevata scorrevolezza del materiale evidenziata durante un test di lavorabilità condotto in cantiere prima del getto.



Figura 3 – Elevata lavorabilità e robustezza del betoncino strutturale **STRUCTURE BF4-B**

In Figura 4 si riportano le principali fasi di gestione del betoncino premiscelato in cantiere, a partire dal suo temporaneo stoccaggio (Figura 4a e 4b), da effettuare, chiaramente, in luogo chiuso e riparato.



Figura 4 - Betoncino strutturale **STRUCTURE BF4-B**, dallo stoccaggio alla sua posa in opera

In Figura 4c l'immagine della classica betoniera impiegabile per miscelazione del prodotto. Questa dovrà essere di dimensioni e potenza commisurate ai quantitativi che di volta in volta si vorranno impastare.

In Figura 4d un momento del "getto", effettuato in corrispondenza del piano superiore a quello del pilastro oggetto di incamiciatura, attraverso un foro passante nel solaio.

Il risultato del getto, già presentato in Figura 2d, viene riproposto in maniera più dettagliata in Figura 5.

Si può constatare come l'elevata scorrevolezza del materiale (Figura 3 e Figura 4d) gli consenta di riempire completamente ed "a rifiuto" il cassero (massima compattazione).

Questo risultato è fondamentale sia dal punto di vista strutturale, in quanto le resistenze ottenute "in opera" sono di fatto le stesse ottenute sui cubetti, che dal punto di vista della durabilità (massima compattezza si traduce in minima porosità) e dell'aspetto estetico.



Figura 5 – Aspetto finale degli elementi rinforzati con incamiciatura in c.a. realizzata con betoncino premiscelato.

3. INCAMICIATURE CON MICROCALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO AD ELEVATE PRESTAZIONI HPFRC

Il microcalcestruzzo fibrorinforzato **COMPOSITE M130** (HPFRC, High Performance Fiber Reinforced Concrete) è una malta cementizia composta, tricomponente, autolivellante e fibrorinforzata con fibre corte in acciaio. Allo stato indurito è caratterizzato da elevatissime prestazioni meccaniche (Classe di resistenza a compressione **C90/105**) e da un comportamento duttile (conferito, questo, proprio dalla presenza delle fibre metalliche).

Trattandosi, a tutti gli effetti, di un **calcestruzzo fibrorinforzato**, il **COMPOSITE M130** è conforme alle richieste del D.M. 17 gennaio 2018 in termini di Qualificazione ed Identificazione.

In particolare, esso è dotato di **Certificazione di Valutazione Tecnica**, rilasciata dal C.S.LL.PP., ottenuto con riferimento 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)".

La presenza delle fibre metalliche conferisce al materiale, dopo la sua fessurazione, una significativa **resistenza residua a trazione (Classe 8b)** che, in fase progettuale, può essere portata in conto nella valutazione della resistenza delle sezioni. Le elevate resistenze a compressione, la capacità di resistenza a trazione e la ridotta porosità della matrice, comportano interessanti vantaggi, tra i quali i più rilevanti sono:

- Forte riduzione degli spessori della camicia (30÷50 mm);
- Elevata ottimizzazione delle armature integrative, sia longitudinali che trasversali;
- Elevatissima adesione al calcestruzzo, con possibilità di eliminare i connettori trasversali;
- Elevatissima adesione alle barre di armatura;

- Limitate modifiche alla geometria della sezione trasversale;
- Ridotto incremento di massa a seguito dell'intervento;
- Elevatissimo incremento di durabilità nei confronti delle aggressioni esterne;
- Ottima compattazione in opera del materiale (autocompattante);
- Sviluppo di elevate resistenze, sia a breve che a lungo termine;
- Elevata resistenza agli urti.

In Tabella 2 si riportano le principali prestazioni meccaniche del microcalcestruzzo HPFRC **COMPOSITE M130**.

Tabella 2 – Principali caratteristiche dell'HPFRC **COMPOSITE M130**

Caratteristiche	Metodo di Prova	U.M.	Valore
Diametro massimo dell'aggregato	EN 933-1	mm	2
Classe di consistenza	EN 12350/8	Classe	SF2
Classe di Resistenza a compressione	NTC 2018	Classe	C90/105
Resistenza a flessione (valore medio) a 28 gg	EN 196-1	MPa	≥ 20
Classe di Resistenza residua a trazione	LL.GG. FRC	Classe	8b
Classe di Esposizione	EN 206	Classe	Tutte
Modulo Elastico	EN 13412	MPa	≅ 37000
Adesione al calcestruzzo	EN 1542	MPa	≥ 2,7
Resistenza al gelo e disgelo	LL.GG. FRC	-	Test superato
Resistenza allo sfilamento delle barre di acciaio	EN 1881	mm	≤ 0,4
Resistenza alla penetrazione dell'acqua in pressione	EN 12390-8	mm	≤ 3
Resistenza alla carbonatazione accelerata	EN 13295	-	Test superato
Reazione al fuoco	EN 13501-1	Classe	A1, A1 _{FL}

Trattando di incamiciature di elementi in c.a. due aspetti risultano particolarmente interessanti:

- 1) Aderenza del **COMPOSITE M130** al calcestruzzo esistente;
- 2) Aderenza del **COMPOSITE M130** alle barre di armatura, esistenti ed integrative;

Questo perché nella realizzazione di camicia cementizia di rinforzo lo scopo essenziale dell'intervento deve essere quello di pervenire, al termine delle lavorazioni, ad un **elemento strutturale monolitico**.

Questo obiettivo si consegue quando, a seguito delle azioni esterne, non si abbiano scorrimenti all'interfaccia tra il calcestruzzo originario ed il nuovo materiale (nelle incamiciature "tradizionali" questo aspetto viene in qualche maniera affidato ai connettori metallici).

Numerose esperienze sperimentali hanno evidenziato che, nel caso di materiali estremamente performanti quali gli HPFRC come il **COMPOSITE M130**, l'adesione calcestruzzo-HPFRC può raggiungere una efficienza tale da poter evitare l'installazione di specifiche connessioni meccaniche.

Due sono le condizioni necessarie per ottenere questo risultato:

- a) Ottimale preparazione del supporto esistente, consistente nella sua pulizia e scarifica generale fino ad ottenere una scabrosità media di circa 5 mm (±2,5 mm rispetto ad un piano medio);
- b) Adeguata saturazione del supporto prima del getto (al momento del getto la superficie dell'elemento da rinforzare deve essere in condizioni sature a superficie asciutta).

Il rispetto delle condizioni ora indicate, associato ad una corretta preparazione e posa in opera del prodotto (corretti rapporti di miscelazione tra i componenti, adeguati tempi di miscelazione e completa compattazione del materiale) consente di pervenire a tensioni di aderenza (tangenziali) estremamente elevate e tali da impedire gli scorrimenti sopra richiamati.

Per quanto attiene invece all'aderenza con le barre di armatura, specifiche prove di aderenza "pull-out" (RILEM RC 6: 1983) hanno evidenziato tensioni medie di aderenza tra il **COMPOSITE M130** e le barre di armatura dell'ordine dei 46 MPa. Ancorando barre $\varnothing 8$, $\varnothing 10$ e $\varnothing 12$ nel **COMPOSITE M130** per una lunghezza di appena 5 diametri, la prova di pull-out non è riuscita ad estrarre la barra dal materiale a causa della sopraggiunta rottura, per trazione, della stessa (Figura 6).

A tale riguardo, si sottolinea il fatto che il microcalcestruzzo **COMPOSITE M130** è in possesso, oltre che della **Marcatura CE secondo 1504-3** (Prodotto per ripristini strutturali), anche della **Marcatura CE secondo 1504-6** (Prodotto per ancoraggio delle armature).

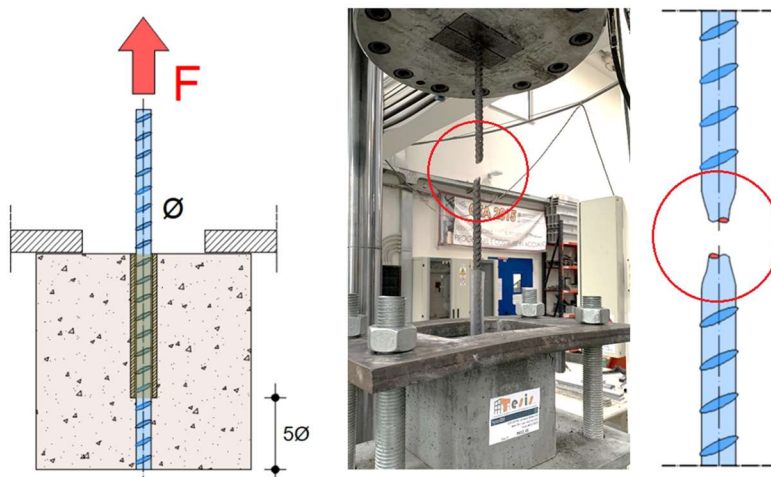


Figura 6 – Prove "pull-out" condotte su barre di armatura ancorate per lunghezze di appena 5 diametri all'interno del **COMPOSITE M130** si sono concluse con la rottura per trazione delle barre piuttosto che con il loro sfilamento. Il risultato dimostra l'elevatissimo legame di aderenza che si instaura tra l'HPFRC e le armature in acciaio.

In Figura 7 alcune fasi di controllo qualità condotte sul microcalcestruzzo fibrorinforzato direttamente in cantiere, in concomitanza con le quotidiane lavorazioni.



Figura 7 – Controlli di qualità ed assistenza in cantiere durante la posa in opera del **COMPOSITE M130**

Si riportano, in Figura 8, le principali fasi di preparazione dell'HPFRC in cantiere. Per la miscelazione del materiale è fortemente consigliato l'impiego di un mescolatore planetario (Figura 8a) ad asse verticale, perché grazie ad una efficienza (nella miscelazione) superiore a quella di una tradizionale betoniera, consente di

ottimizzare i tempi di impasto. In alternativa, può essere impiegata anche una betoniera “tradizionale” ma, come detto, mettendo in conto la necessità di tempi di miscelazione più lunghi.

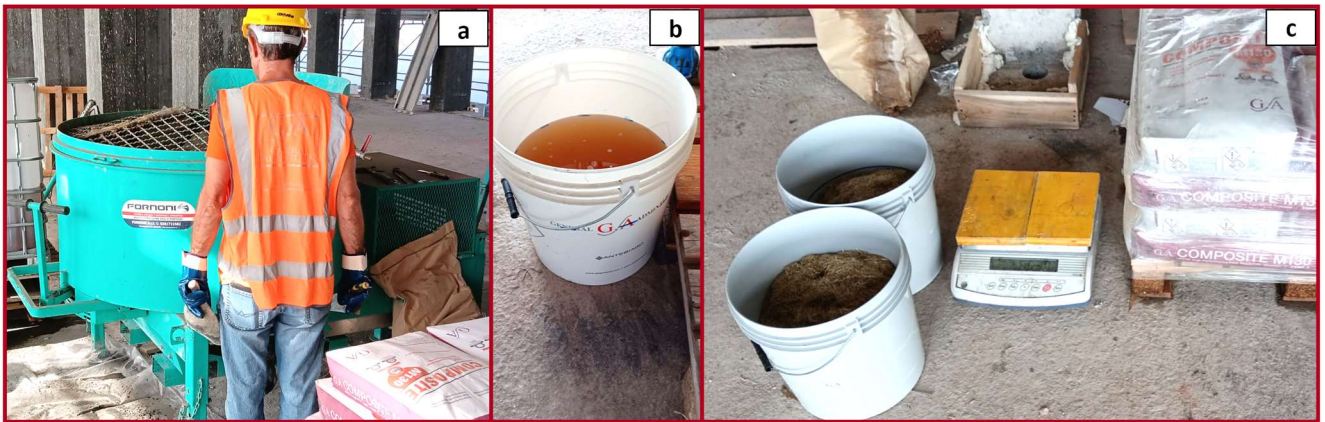


Figura 8 – Confezionamento del **COMPOSITE M130** in cantiere con miscelatore ad asse verticale (Figura 8a), dopo la preliminare dosatura del componente liquido (Figura 8b) e delle fibre metalliche (Figura 8c)

Le procedure di dosaggio e miscelazione sono dettagliatamente riportate nella documentazione tecnica del prodotto, con particolare riferimento al “Manuale di preparazione ed installazione” ed alla Scheda tecnica. In Figura 9 alcune fasi preliminari alla posa in opera del **COMPOSITE M130**.

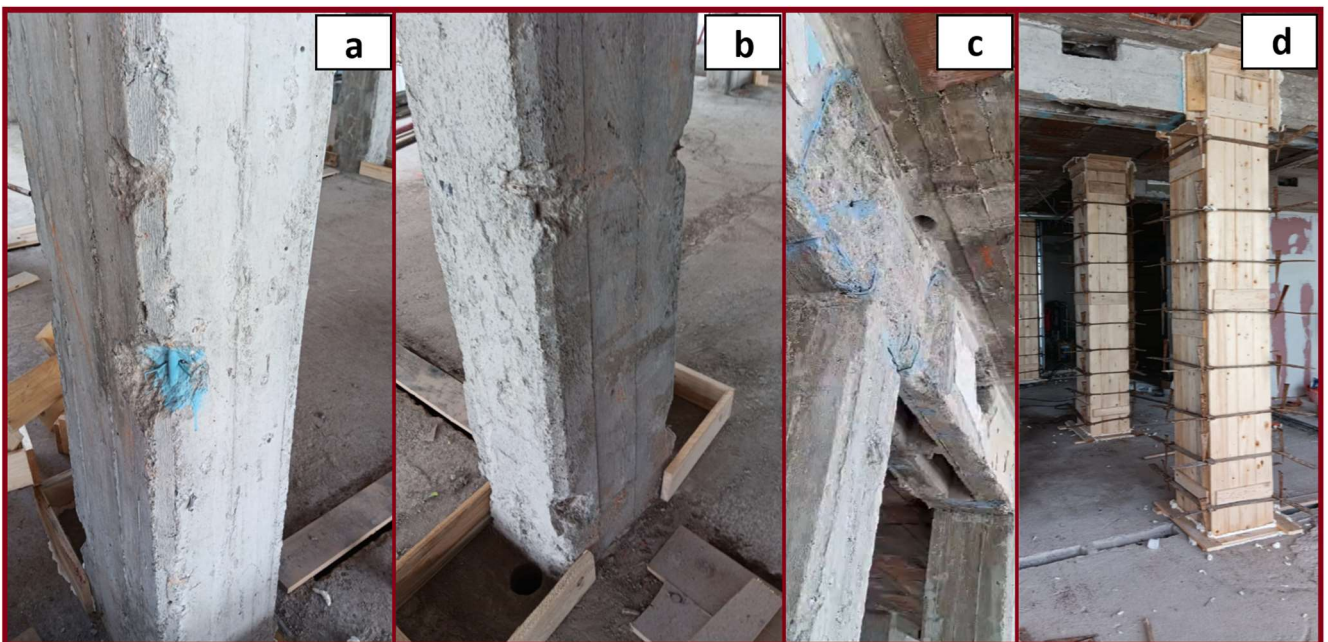


Figura 9 – Fasi preliminari alla incamiciatura di un pilastro con HPFRC **COMPOSITE M130**. In particolare le Figure 9b e 9c mostrano il foro attraverso il quale viene eseguito il getto del materiale all’interno della casseratura (Figura 9d).

Come descritto in precedenza, uno dei vantaggi dell’impiego di un microcalcestruzzo fibrorinforzato nella realizzazione di incamiciature di elementi in c.a. è quello di poter ottimizzare, spesso in maniera estrema, le armature integrative, sia quelle principali che quelle secondarie (staffe).

Nel caso di Figura 9, le valutazioni di calcolo hanno verificato la sussistenza delle condizioni per poter realizzare la camicia di rinforzo senza specifiche armature integrative. Questo comporta, evidentemente, una rilevante semplificazione delle lavorazioni, con conseguente incremento della produttività e riduzione dei costi.

In ogni caso, anche qualora fosse necessaria una (minima) armatura integrativa, i vantaggi ora richiamati si potranno in ogni caso apprezzare, alla luce del fatto che tale armatura sarà certamente più contenuta rispetto a quella necessaria nel caso di incamiciatura tradizionale.

Per concludere, in Figura 10 si riportano alcune fasi di posa in del microcalcestruzzo e l'aspetto finale di alcuni elementi rinforzati.

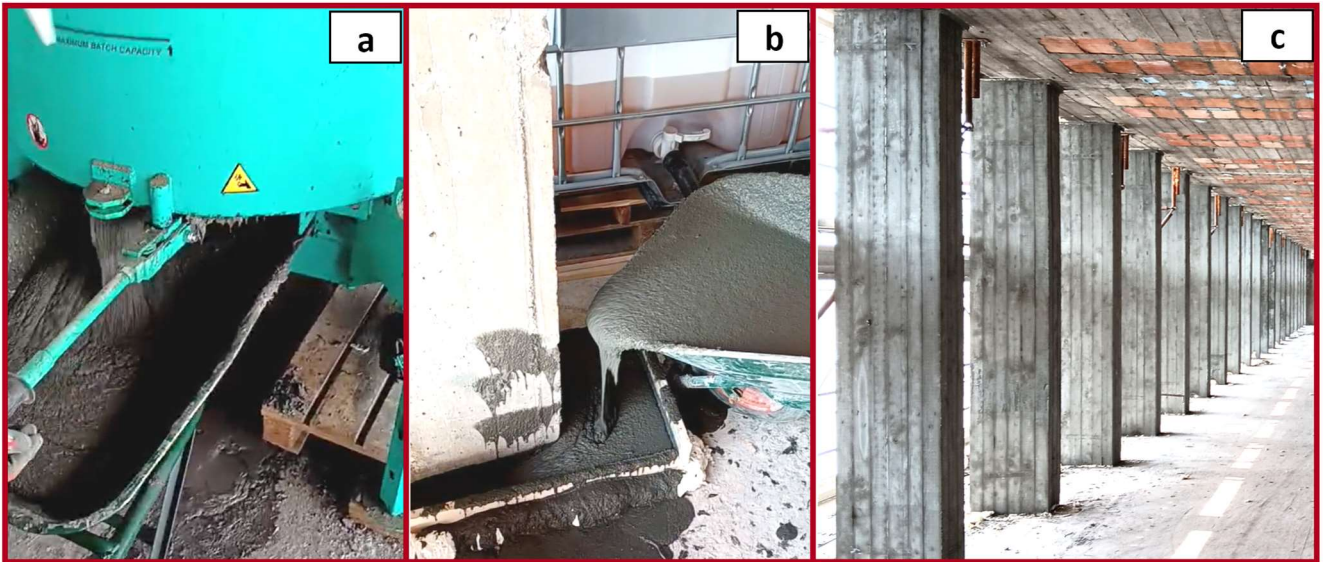


Figura 10 – Posa in opera della camicia in **COMPOSITE M130**, dallo scarico del materiale (Figura 10a) dal mescolatore al suo getto all'interno della cassaforma (situata al piano sottostante). In Figura 10c l'aspetto finale dei pilastri rinforzati.

4. ASPETTI INERENTI LA VALUTAZIONE PRESTAZIONE DELLE CAMICIE AD ELEVATE PRESTAZIONI

Ai fini della valutazione della resistenza e della deformabilità di elementi strutturali incamiciati, la Circolare n.7 del 21 gennaio 2019 consente, al punto C8.7.4.2.1, l'applicazione di alcune ipotesi che permettono di semplificare il calcolo delle incamiciature in c.a. Una di queste è la seguente:

“Le proprietà meccaniche del “calcestruzzo” della camicia si considerano estese all'intera sezione se le differenze fra i due materiali non sono eccessive”.

Tale ipotesi, certamente verosimile nel caso di incamiciatura tradizionale realizzata con calcestruzzo preconfezionato, risulta poco coerente nel caso di impiego di betoncini premiscelati ad alta resistenza, come lo **STRUCTURE BF4-B** e, a maggior ragione, nel caso di utilizzo del **COMPOSITE M130**.

Le elevate resistenze di questi due materiali non consentono di ipotizzare che “*le differenze fra i due materiali (supporto originario e materiale di rinforzo) non sono eccessive*”.

In questi casi, quindi, il calcolo delle prestazioni della sezione rinforzata dovrebbe essere fatta in maniera rigorosa, tenendo opportunamente conto della differenza di resistenza tra il calcestruzzo originario ed il materiale della camicia.

A tale riguardo, General Admixtures mette a disposizione lo specifico software di calcolo **STRUCTURE.4R** che consente appunto di valutare la capacità resistente (in termini di Dominio M-N) di un elemento in c.a. rinforzato corticalmente con materiali cementizi (tra cui anche quelli richiamati nell'articolo). La Figura 11 mostra la modellazione (a fibre) di due sezioni rinforzate. A sinistra una sezione rinforzata con betoncino **STRUCTURE BF4-B** ed a destra la stessa sezione rinforzata con HPFRC **COMPOSITE M130**.

Oltre a poter differenziare le prestazioni della camicia rispetto a quella del “nucleo” esistente, è evidente la possibilità di poter inserire separatamente (e quindi con prestazioni differenti) armature esistenti ed armature integrative.

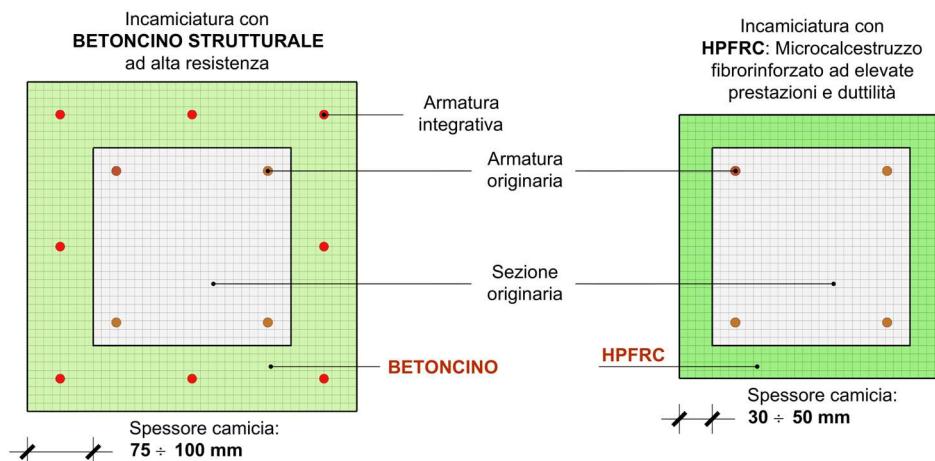


Figura 11 – Modellazioni a fibra di due sezioni in c.a. rinforzate con betoncino strutturale ad alta resistenza **STRUCTURE BF4-B** (a sinistra) e con HPFRC **COMPOSITE M130** (a destra).

A titolo di esempio, si presenta una valutazione numerica (in termini di diagrammi M-N e diagrammi Momento-Curvatura) di una sezione incamicata con microcalcestruzzo fibrorinforzato ad elevate prestazioni (**COMPOSITE M130**).

Si ipotizzano i seguenti dati di progetto:

- Dimensioni pilastro originario: 300 x 300 mm (Figura 11, destra), copriferro 25 mm;
- Resistenza media del calcestruzzo: 25,5 MPa;
- Armatura principale: 4 barre Ø14 aventi una resistenza (media) a snervamento pari a 487 N/mm²;
- Livello di conoscenza: LC2;
- Spessore camicia di rinforzo: 50 mm (HPFRC);

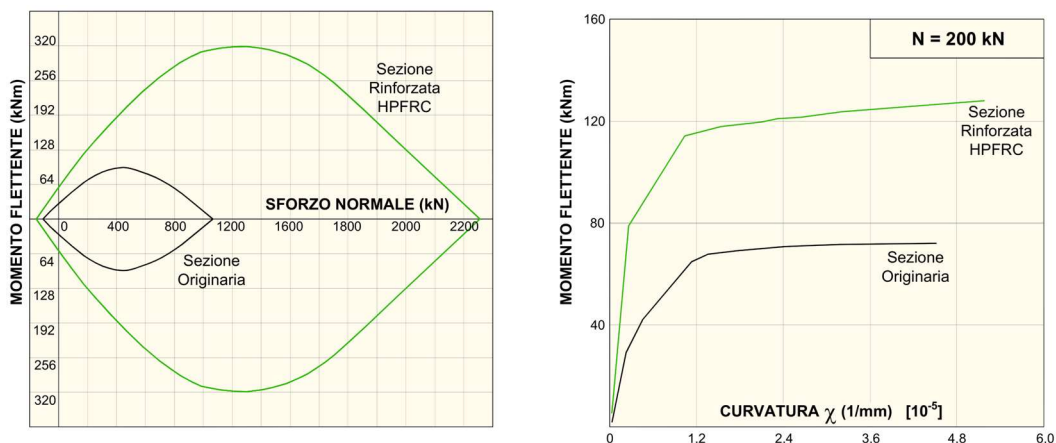


Figura 12 – Modellazione a fibre di due sezioni in c.a. rinforzate con betoncino strutturale ad alta resistenza **STRUCTURE BF4-B** (a sinistra) e con HPFRC **COMPOSITE M130** (a destra).

I diagrammi mostrati in Figura 12 evidenziano il rilevante beneficio conseguibile con una **incamicatura in basso spessore HPFRC**, sia in termini di incremento di resistenza a pressoflessione che di duttilità della sezione.