

# Optimized Fabric-Reinforced Cementitious Matrix composite for retrofitting of existing structures

## FRCM ottimizzati per il rinforzo di strutture esistenti

M. C. Rampini<sup>1</sup>, G. Zani<sup>1</sup>, M. Colombo<sup>1</sup>, M. di Prisco<sup>1</sup>

**ABSTRACT:** In Italy, recent seismic events have highlighted the vulnerability of a large part of existing historical buildings. As shown in literature, FRCM composite (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) is a good solution for restoring and upgrading of load carrying capacity of structural elements in accordance with recent anti-seismic dispositions. The main advantages of this solution compared to other technologies, like FRP, are: the better compatibility with irregular surfaces, the easier applicability, the better fire resistance, the greater permeability and the lower cost of installation. In this article the results of an experimental campaign aimed at mechanical characterization and optimization of FRCM composite (AR glass fabrics, matrices and added short fibers) under uniaxial tensile load and the study of interface bond-slip behaviour considering different supports are presented. / In Italia i recenti eventi sismici hanno messo in evidenza la vulnerabilità di una gran parte di edifici storici esistenti. I materiali FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) risultano, come mostrato da alcuni articoli presenti in letteratura, una buona soluzione per il ripristino di strutture danneggiate e per l'incremento della capacità portante degli elementi strutturali in accordo con le recenti disposizioni antisismiche. I principali vantaggi di questa soluzione rispetto ad altre tecnologie, come gli FRP, sono: la buona compatibilità con superfici irregolari, la più semplice applicazione, la miglior resistenza al fuoco, la maggiore permeabilità e i minori costi di installazione. In questo articolo vengono presentati i risultati di una campagna sperimentale volta alla caratterizzazione meccanica e all'ottimizzazione del rinforzo (reti in vetro AR, matrici e fibre corte) in trazione diretta e allo studio del comportamento di interfaccia su supporti di diversa natura.

**KEYWORDS:** Fabric-Reinforced Cementitious Matrix materials; textile reinforced concrete; alkali-resistant glass fabric, retrofitting design; structural robustness; material heterogeneity / materiali a base cementizia rinforzati con tessuti; calcestruzzo tessile; reti in vetro alkali-resistente; progettazione ripristino strutturale

### 1 INTRODUZIONE

I recenti eventi sismici occorsi in Italia hanno messo in evidenza la vulnerabilità di un gran numero di edifici esistenti storicamente non progettati secondo normative antisismiche e, di conseguenza, la necessità di intervenire per garantire la salvaguardia del patrimonio storico nazionale. I materiali compositi FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) rappresentano una buona soluzione per il rinforzo strutturale, come mostrato in letteratura (de Felice G. et al. 2015). Questa tecnologia rispetto ad altre tipologie di rinforzo, come ad esempio i materiali FRP (Fiber Reinforced Polymer), mostra una miglior compatibilità con superfici irregolari (calcestruzzo e muratura), una più semplice lavorabilità ed applicazione, una miglior resistenza al fuoco, una miglior permeabilità del vapore e, inoltre, dei minori costi di installazione.

Nei paragrafi successivi verranno presentati i risultati della prima parte di una campagna sperimentale in corso di svolgimento presso il Laboratorio Prove Materiali del campus di Lecco del Politecnico di Milano in riferimento ai lavori del consorzio interuniversitario ReLUIIS. In questa prima fase l'obiettivo è quello di ottimizzare le prestazioni dei materiali FRCM, sia riguardo alla risposta in trazione che al comportamento di interfaccia, consideran-

do l'applicazione su supporti di diversa natura e grado di lavorazione superficiale.

Infine viene presentata e discussa la procedura proposta dalle nuove linee guida in fase di approvazione per qualificare convenzionalmente i sistemi compositi FRCM.

### 2 MATERIALI

Le tipologie di rinforzo considerate sono quattro differenti reti in fibra di vetro alkali-resistente, le cui caratteristiche principali in direzione ordito sono riportate in Table 1. Le principali differenze riguardano il passo, la quantità di vetro, indicata come grammatura non apprettata, e la tipologia di appretto utilizzata durante la fase di produzione. I differenti appretti utilizzati sono tre: uno realizzato con una resina epossidica ("Epoxy") e due in stirene-butadiene ("SBR"). La differenza tra la soluzione "new" rispetto alla soluzione denominata "old" riguarda l'incremento di additivo indurente, la riduzione del quantitativo di appretto, in modo da ridurre lo scorrimento tangenziale, e l'incremento della temperatura durante la fase di produzione.

Tre differenti tipi di matrici sono state utilizzate per la realizzazione dei sistemi compositi: una matrice, HPC (High-Performance Concrete) (Rampini

M. C. et al. 2018), che consiste in un calcestruzzo auto-compattante ad alte prestazioni con resistenza cubica caratteristica  $f_{cc} > 90\text{MPa}$  e resistenza a trazione per flessione  $f_{ctf} > 14\text{MPa}$ , e due matrici commerciali, premiscelate, tixotropiche e a ritiro compensato, TIX<sub>A</sub> e TIX<sub>B</sub>. Le caratteristiche meccaniche dichiarate dal produttore sono  $f_{cc} > 45\text{MPa}$  e  $f_{ctc} > 8\text{MPa}$  per la TIX<sub>A</sub>, matrice a base cementizia adatta ad applicazioni su superfici in calcestruzzo con differente grado di rugosità superficiale, e  $f_{cc} > 15\text{MPa}$  per la TIX<sub>B</sub>, matrice a base calce specificatamente indicata per applicazioni su supporti in muratura.

Table 1. Alkali-resistant glass fabric characteristics (weft direction) / Proprietà reti in fibra di vetro alkali-resistente (direzione ordito)

Characteristics	F1	F2	F3	F4
Fabrication technique	Single Leno weave	Double weave	Double weave	Single Tela legata
Warp spacing [mm]	18	38	38	5
Weft spacing [mm]	18	38	38	12
Uncoated gramm. [g/m <sup>2</sup> ]	134	127	255	480
Equiv. cross section [mm <sup>2</sup> ]*	3.43	3.22	6.51	12.53
Coating	SBR <sub>new</sub>	Epoxy	Epoxy	SBR <sub>old</sub>
Average tensile load [kN]**	5.71	6.31	13.03	15.98

\* on 70 mm

\*\* average value of 5 nominally identical direct tensile tests

Alla matrice sono aggiunte, in quantitativo pari all'1% in volume, micro-fibre di differente natura per studiarne l'effetto in termini di durabilità e prestazioni del composito. Si sono utilizzate fibre in PVA alcali-resistenti (diametro equivalente 0.16÷0.20 mm, lunghezza 18 mm, rapporto di aspetto pari a 90 e sforzo di snervamento di 760÷1160 MPa) e micro-fibre in acciaio (diametro 0.21 mm, lunghezza 13 mm, rapporto di aspetto pari a 62 e resistenza in trazione 2750 MPa). Si è scelto di utilizzare le sole fibre in PVA per i compositi realizzati con matrici tixotropiche poiché si è osservato, a seguito di risultati sperimentali preliminari, che l'aggiunta di fibre in acciaio per miscele porose incrementa la quantità di difetti riducendo l'aderenza con la rete e l'efficienza globale del composito.

### 3 PROGRAMMA SPERIMENTALE

In questa memoria verranno mostrati i risultati di una campagna sperimentale volta alla caratterizzazione preliminare di materiali FRCM mediante prove di trazione diretta su lastre di composito e prove di strappo su singolo lato considerando differenti tipologie di supporto. I setup di prova e le dimensioni nominali dei provini sono riportate in Figura 1. Le prove sono state eseguite mediante l'utilizzo di un martinetto elettro-meccanico con una capacità massima di carico pari a 30 kN, in controllo di sposta-

mento a velocità costante pari a 0.02 mm/s per le prove di trazione e 0.01 mm/s per le prove di strappo. Tutte le prove sono effettuate considerando sempre le reti di rinforzo nella sola direzione ordito.

In aggiunta alla lettura dello spostamento dell'attuatore (stroke) sono stati utilizzati, nel caso della prova di strappo, 2 LVDT disposti in modo da misurare lo spostamento relativo della testa del provino rispetto al supporto ( $\delta_{slip}$ ).

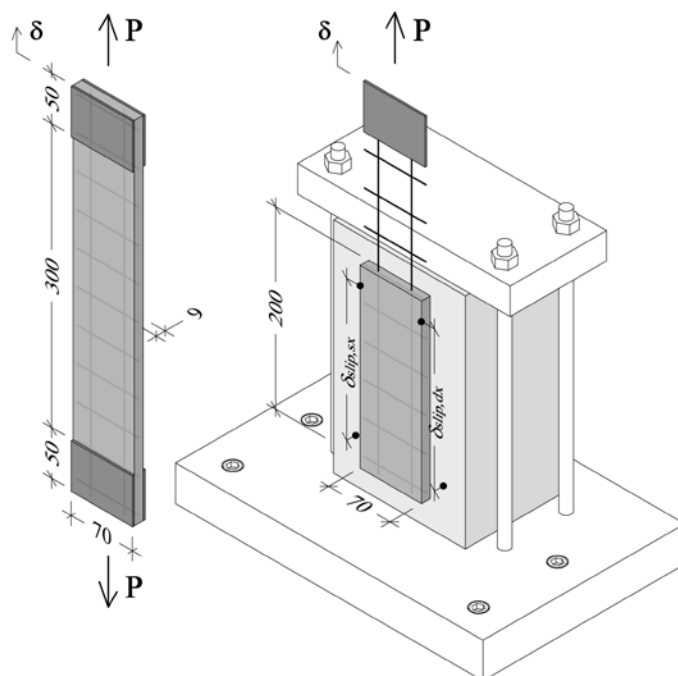


Figure 1. FRCM uniaxial tensile test (left) and single lap shear test setup (right) / Setup prova di trazione diretta (sinistra) e prova di strappo su singolo lato (destra)

#### 3.1 Risultati prove di trazione diretta su composito FRCM

I risultati delle prove di trazione diretta verranno riportati in termini di sforzo sulla sezione effettiva del composito e allungamento normalizzato (stroke diviso per la lunghezza iniziale del provino). Le curve di risposta riportate sono quelle medie relative a tre provini nominalmente identici.

##### 3.1.1 Utilizzo di differenti appretti e matrici

L'utilizzo di un appretto di differente natura influenza sia la capacità resistente della rete di rinforzo che l'efficacia della stessa all'interno del composito FRCM. Questo è dovuto principalmente alla diversa capacità di ciascun tipo di appretto di penetrare tra i fili di tessuto e di farli lavorare in parallelo riducendo il rischio di una rottura telescopica in trazione (Cohen Z. et al. 2010). A seguito di prove in trazione diretta sulla sola rete, è possibile notare la ridotta efficienza dei tessuti prodotti con resina SBR rispetto a quelli con resina epossidica, confrontando i valori di sforzo calcolato sull'area di rinforzo secco, riportati in Table 2, con il valore di sforzo ultimo resistente del filo di vetro pari a circa 2000 MPa.

Table ##. Average tensile loads on 70 mm and average stress on the fabric. / Valori del carico ultimo medio in trazione diretta su provini di larghezza 70 mm e valori medi di sforzo ultimo con riferimento all'area di rinforzo secco.

	F1 (SBR)	F2 (epoxy)	F3 (epoxy)	F4 (SBR)
P [kN]	5.71	6.31	13.03	15.98
$\sigma_{rin,secco}$ [MPa]	1664.72	1959.63	2001.54	1275.34

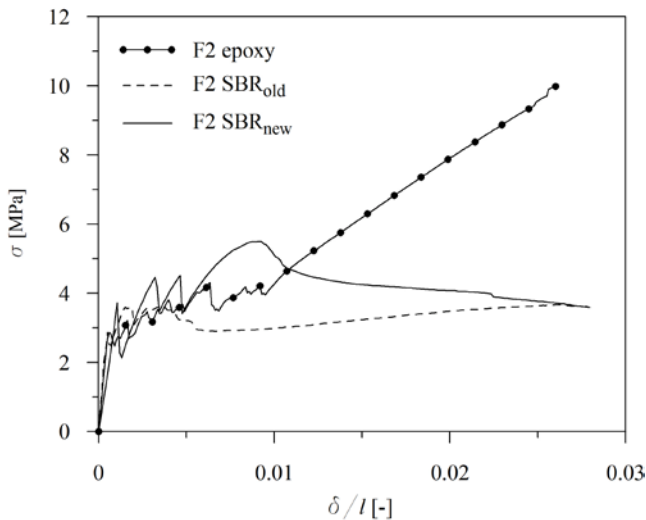


Figure 2. Effect of different coatings under uniaxial tensile load for F2-M1 composite. / Effetto dell'utilizzo di un differente appretto sulla risposta in trazione di compositi realizzati con rete F2 e matrice M1.

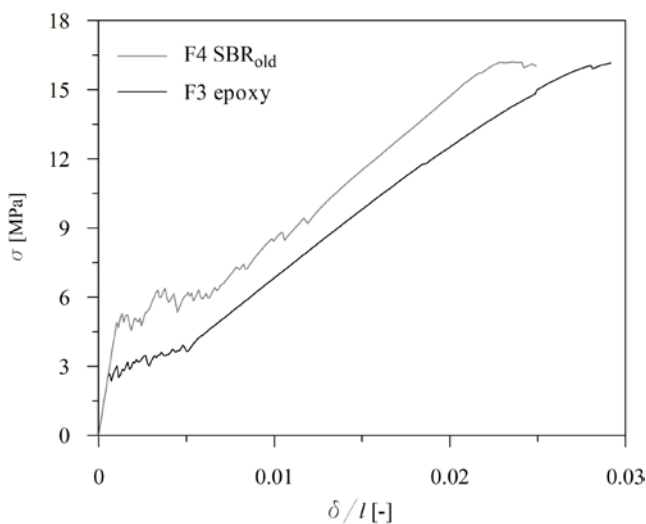


Figure 3. Effect of different coatings under uniaxial tensile load for F3/F4-M1 composite. / Effetto dell'utilizzo di un differente appretto sulla risposta in trazione di compositi realizzati con reti F3/F4 e matrice M1.

Ulteriori considerazioni rispetto all'effetto di appretti differenti possono essere fatte a partire dalla risposta in trazione del sistema composito. Si può notare come sia possibile ottenere la tipica curva tri-lineare in trazione (Colombo I. G. et al. 2013) soltanto mediante l'utilizzo di un appretto in resina epossidica per una rete a maglia larga, rete F2 in Figure 2, mentre, per una rete a maglia stretta e con

grande quantitativo di vetro come la rete F4, sia sufficiente un appretto di tipo SBR ma il valore di carico ultimo raggiunto sia circa il medesimo di un sistema rinforzato con un quantitativo di vetro pari a circa la metà, rete F3 in Figure 3.

In Figure 4 sono mostrate le curve di risposta in trazione di compositi realizzati con differenti tipologie di matrici. Si può osservare una riduzione del carico di picco sperimentale raggiunto dai compositi realizzati con matrice TIX<sub>A</sub> rispetto a quelli con matrice HPC. Questo effetto è dovuto alla maggiore porosità della matrice tixotropica che causa una minor aderenza matrice-rete e una conseguente rottura anticipata del tessuto dovuta alla non uniforme distribuzione degli sforzi sullo stesso.

Per quel che riguarda i compositi realizzati con matrice TIX<sub>B</sub> è necessario sottolineare che i provini, a causa di un eccessivo contenuto d'acqua nell'impasto, hanno mostrato la formazione di una diffusa fessurazione da ritiro che ha inficiato i risultati delle prove sperimentali. È tuttora in fase di studio la riduzione del quantitativo d'acqua da considerarsi nel mix design per simulare l'effetto della ritenzione d'acqua dovuta alla porosità superficiale dei supporti in muratura.

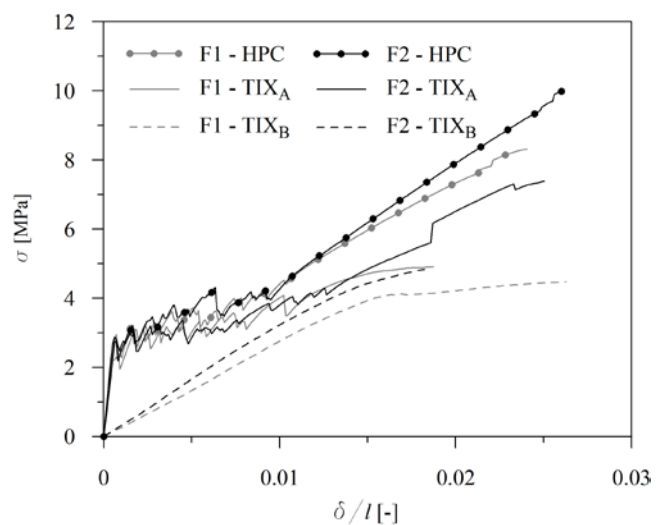


Figure 4. Effect of different matrices combined with fabrics F1 and F2 on the uniaxial tensile response. / Effetto dell'utilizzo di differenti matrici combinate con reti F1 e F2 sulla risposta in trazione uniaassiale.

### 3.1.2 Effetto dell'aggiunta di fibre disperse

L'incremento dello sforzo di prima fessurazione, la formazione di un panorama fessurativo più denso e con fessure meno aperte e l'incremento dei valori di sforzo sul secondo e terzo ramo della risposta in trazione, sono i principali effetti dell'aggiunta di micro-fibre disperse nella matrice del composito (Barhum R. et al. 2011).

In Figures 5-6 si può osservare l'effetto dell'aggiunta di micro-fibre sulla risposta meccanica dei compositi in trazione. Si può notare un generale incremento delle prestazioni per tutti i compositi considerati ad eccezione del caso F4-TIX<sub>A</sub> a causa

dell'effetto combinato della debolezza della matrice tixotropica e della ridotta spaziatura della griglia del tessuto. Come si può vedere, infine, in Figure 7, i panorami fessurativi a termine prova, confermano l'incremento del numero di micro-fessure e il conseguente miglioramento del comportamento in termini di durabilità del sistema grazie all'aggiunta di fibre disperse.

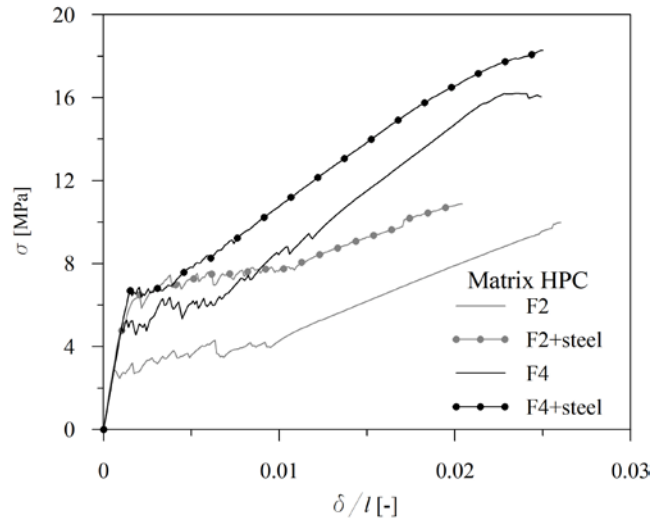


Figure 5. Effect of steel micro-fibers addition under uniaxial tensile load for HPC matrix composite. / Effetto dell'aggiunta di microfibre di acciaio sulla risposta in trazione di compositi realizzati con matrice HPC.

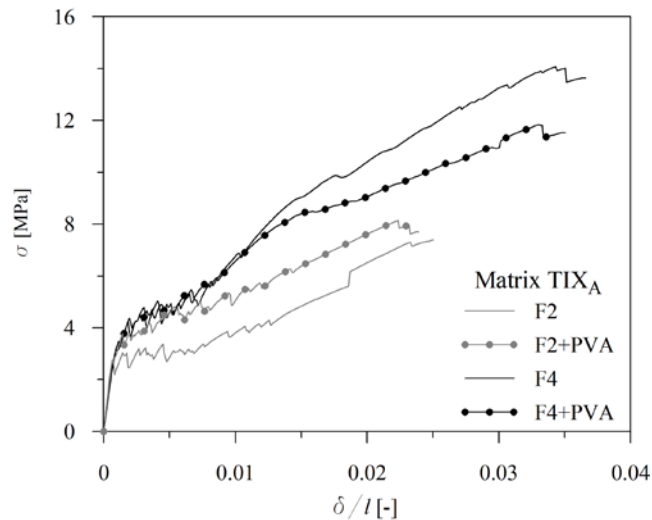


Figure 6. Effect of steel micro-fibers addition under uniaxial tensile load for TIX<sub>A</sub> matrix composite. / Effetto dell'aggiunta di microfibre di acciaio sulla risposta in trazione di compositi realizzati con matrice TIX<sub>A</sub>.

### 3.1.3 Parametri di duttilità e di efficienza

Per quantificare al meglio gli effetti delle diverse componenti precedentemente mostrate sulla risposta meccanica in trazione dei compositi, si è scelto di considerare dei parametri di duttilità e di efficienza.

Come mostrato in Figura 8, si sono definiti i seguenti parametri di duttilità: i) l'area sottesa al di sotto dei primi due rami della curva di risposta in trazione (A1+A2); ii) il valore di deformazione al

termine del ramo di multi-fessurazione ( $\epsilon_2$ ) e iii) il valore di sforzo medio ottenuto imponendo l'equivalenza di area sottesa fino al termine del secondo ramo ( $\sigma_{av}$ ). Si è scelto, inoltre, di considerare il valore di sforzo ad un limite convenzionalmente posto ad una deformazione del 2%. Per i compositi prodotti con matrice HPC, il valore di questi parametri, normalizzati rispetto a ciascun caso senza l'aggiunta di micro-fibre, è riportato in Figure 9.

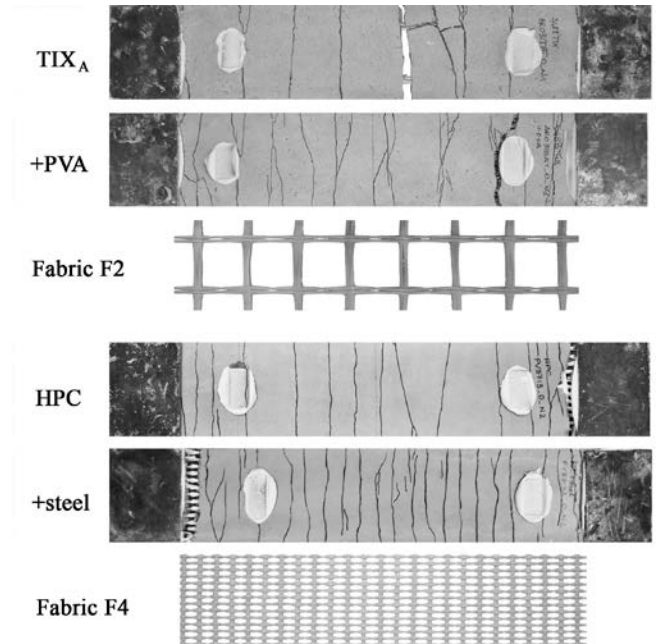


Figure 7. Examples of crack patterns with or without the addition of micro-fibers. / Esempi di panorami fessurativi con e senza l'aggiunta di microfibre al composito.

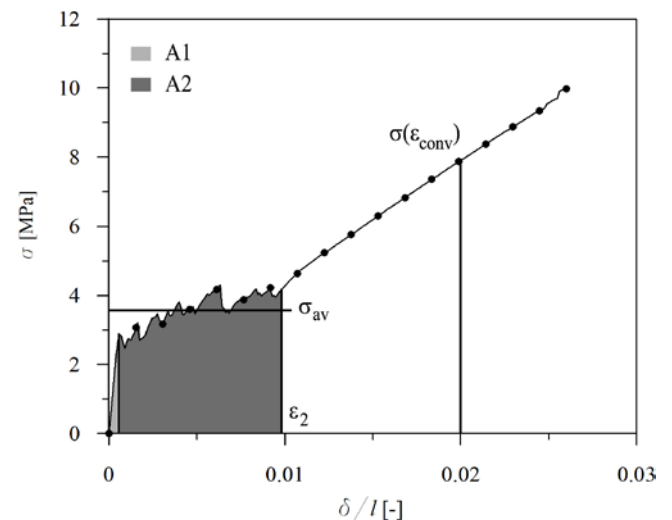


Figure 8. Ductility parameters definition. / Definizione parametri di duttilità.

Per i compositi rinforzati con reti F1 e F2 si può notare che l'aggiunta di fibre comporta un notevole incremento dello sforzo medio  $\sigma_{av}$  e dell'area sottesa  $A1+A2$ , oltre ad una leggera crescita del parametro  $\epsilon_2$ . Al contrario, per i sistemi realizzati con tessuti con un maggior quantitativo di vetro, F3 e F4, la risposta in trazione tende a diventare più rigida (riduzione di  $\epsilon_2$  e di  $A1+A2$ ) e la miglior risposta mecca-

nica è visibile solo considerando l'intera curva, Figures 5-6.

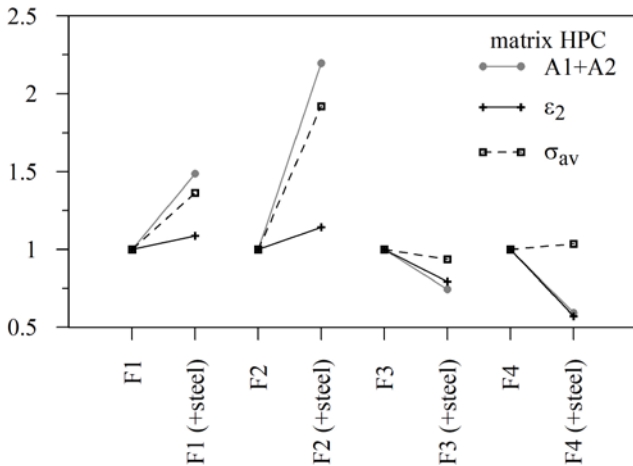


Figure 9. Ductility parameters variation due to addition of steel micro-fibers in HPC matrix composites. / Variazione dei parametri di duttilità causata dall'aggiunta di microfibre di acciaio ai compositi realizzati con matrice HPC.

L'utilizzo dei fattori di efficienza, invece, permette di descrivere in maniera più efficace il comportamento dei compositi FRCM in funzione della loro capacità di carico ultima. In particolare, oltre al fattore di efficienza comunemente considerato, pari al rapporto tra il valore di carico ultimo del composito soggetto a trazione e il valore di carico ultimo ottenuto dalla prova di trazione sulla sola rete ( $EF_{frcm} = P_{frcm} / P_{fabric}$ ), si è definito un nuovo parametro di efficienza pari allo sforzo ultimo del composito, calcolato con riferimento all'area di rinforzo secco ( $\sigma_{dry, textile} = P_{frcm} / A_{fabric}$ ), diviso per lo sforzo di rottura caratteristico del singolo filamento di vetro AR, approssimativamente pari a 2000 MPa ( $EF_{ARglass} = \sigma_{dry, textile} / \sigma_{glass}$ ). Quest'ultimo parametro fornisce un'informazione riguardo allo sfruttamento effettivo della quantità di vetro introdotta come rinforzo nel composito.

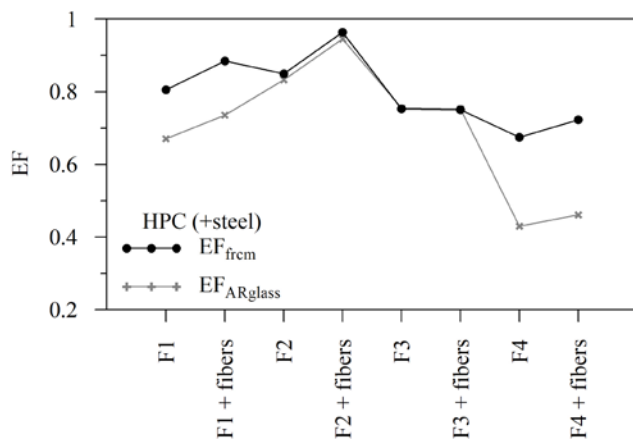


Figure 10. Efficiency factors for HPC matrix composites. / Fattori di efficienza per compositi realizzati con matrice HPC.

Con riferimento ai valori riportati in Figures 10-11 si possono dedurre le seguenti osservazioni valide per i sistemi realizzati con entrambe le matrici HPC e TIX<sub>A</sub>: i) l'aggiunta di micro-fibre disperse

all'interno della miscela permette di ottenere un generale incremento di efficienza per tutti i sistemi, ad eccezione del caso F4-TIX<sub>A</sub> come precedentemente discusso; ii) un alto quantitativo di vetro (reti di rinforzo F3 ed F4) comporta una generale riduzione dei parametri di efficienza e iii) l'utilizzo di un appretto di natura epossidica (reti F2 ed F3) garantisce un migliore sfruttamento del vetro, infatti, i due parametri di efficienza hanno valori molto vicini tra loro.

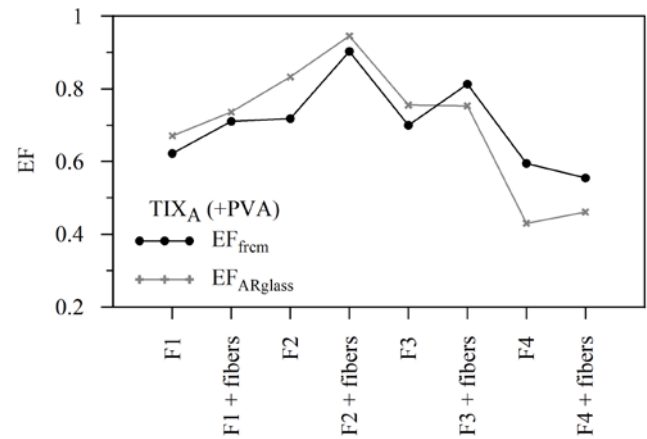


Figure 11. Efficiency factors for TIX<sub>A</sub> matrix composites. / Fattori di efficienza per compositi realizzati con matrice TIX<sub>A</sub>.

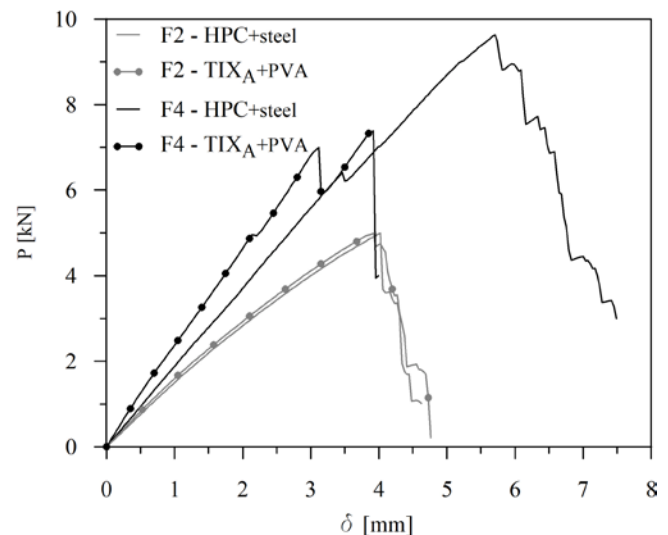


Figure 12. Comparison between the average single lap shear test responses for different FRCM composites applied on a sandblasted concrete support. / Confronto tra le risposte medie di prove di strappo per differenti compositi FRCM applicati su substrati in calcestruzzo idroscarificato.

### 3.2 Risultati prove di strappo

Il comportamento di interfaccia rinforzo-supporto è stato indagato mediante una serie di prove di strappo su singolo lato. Le prove sono state effettuate considerando differenti tipi di substrato: calcestruzzo sabbato e due tipologie di muratura realizzate con mattoni di differente rugosità superficiale (B1 mattoni lisci, B2 ruvidi). I sistemi scelti per il rinforzo sono prodotti con matrici a base cementizia (HPC e TIX<sub>A</sub>) per i supporti in calcestruzzo e con matrici a base calce (TIX<sub>B</sub>) per quelli in muratura. Nel caso delle matrici HPC e TIX<sub>A</sub>, alla luce dei risultati pre-

cedentemente mostrati, si è scelto di aggiungere un quantitativo di micro-fibre disperse pari all'1% in volume rispettivamente in acciaio e PVA.

Dalle curve medie carico-stroke riportate in Figure 12, si può osservare come il carico di rottura nel caso della rete F4 sia più alto per i compositi realizzati in matrice HPC che, essendo una matrice colabile, garantisce una miglior aderenza con il supporto. Il tipo di collasso, a conferma di quanto appena evidenziato, è per rottura della rete nel caso HPC+steel e per completa delaminazione del rinforzo dal supporto nel caso di matrice TIX<sub>A</sub>+PVA. Il confronto tra le curve  $\delta_{stroke}$  e  $\delta_{slip}$ , riportato in Figure 13 per il caso TIX<sub>A</sub>+PVA, conferma la rottura per delaminazione dal supporto; si può notare infatti un incremento non controllato della lettura  $\delta_{slip}$  a seguito del raggiungimento del carico di picco.

Per quanto riguarda i compositi realizzati con rete F2, la tipologia di collasso è sempre la rottura della rete; la curva carico-stroke cresce fino al picco mentre la lettura  $\delta_{slip}$  resta prossima allo zero per tutta lo svolgimento della prova.

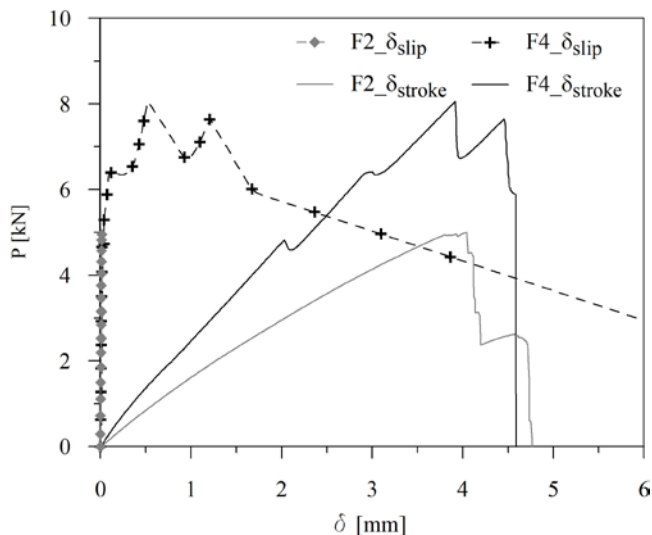


Figure 13. Comparison between single lap shear test responses for different FRCM composites applied on a sandblasted concrete support with TIX<sub>A</sub>+PVA matrix. / Confronto tra le risposte di prove di strappo per differenti composite FRCM applicati su substrati in calcestruzzo idroscarificato utilizzando la matrice TIX<sub>A</sub>+PVA.

Nel caso di applicazione su superfici in muratura utilizzando la matrice TIX<sub>B</sub>, tutti i campioni hanno manifestato rottura della rete di vetro AR, Figure 14, ad eccezione della combinazione rete F2 su supporto in muratura di tipo B1, Figure 15. In quest'ultimo caso la rottura occorsa è stata la delaminazione del rinforzo dal supporto. In Figure 16 è possibile apprezzare il differente comportamento carico-scorrimento con mattoni di differente rugosità superficiale; come prevedibile si può notare un incremento di aderenza meccanica all'interfaccia nel caso di mattoni rugosi (tipo B2) per ogni tipologia di rete considerata.

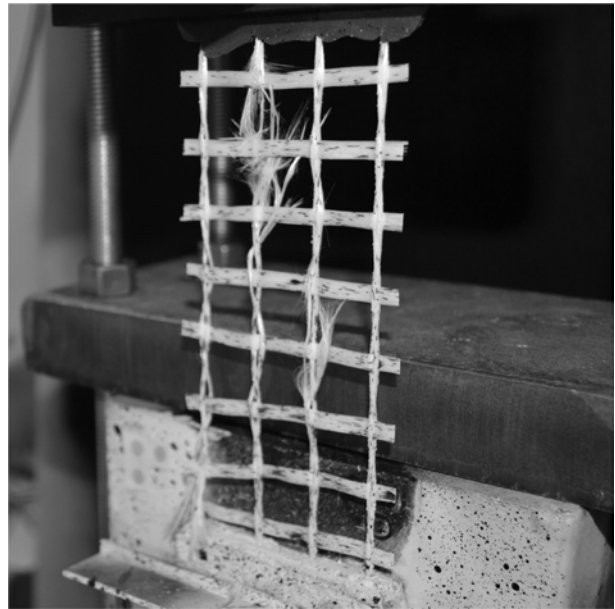


Figure 14. Example of fabric rupture at the end of single lap shear test. / Esempio di rottura della rete al termine della prova di strappo.



Figure 15. Example of delamination of the composite from the substrate at the end of single lap shear test. / Esempio di delaminazione del composito dal supporto al termine della prova di strappo.

In accordo con le nuove Linee Guida per l'identificazione, la qualificazione e il controllo di accettazione dei compositi FRCM, prossime all'approvazione in Italia, è possibile ottenere i parametri meccanici per la progettazione direttamente dalle prove di trazione diretta e di strappo. Il valore di sforzo ultimo calcolato sulla rete di rinforzo e ottenuto dalla prova di strappo viene utilizzato per tagliare la risposta in trazione diretta. In questo modo, come mostrato in Figure 17, è possibile ottenere lo sforzo, la deformazione di picco ( $\sigma_u$ ,  $\epsilon_u$ ) e il modulo elastico secante ( $E_{sec} = \sigma_u / \epsilon_u$ ).

Questa procedura permette di qualificare il comportamento del materiale composito in base al più

debole meccanismo di rottura possibile (il valore ultimo di sforzo  $\sigma_u$  è imposto inferiore alla resistenza ultima in trazione del singolo tessuto e allo sforzo che comporta la delaminazione) (Ascione L. et al. 2015).

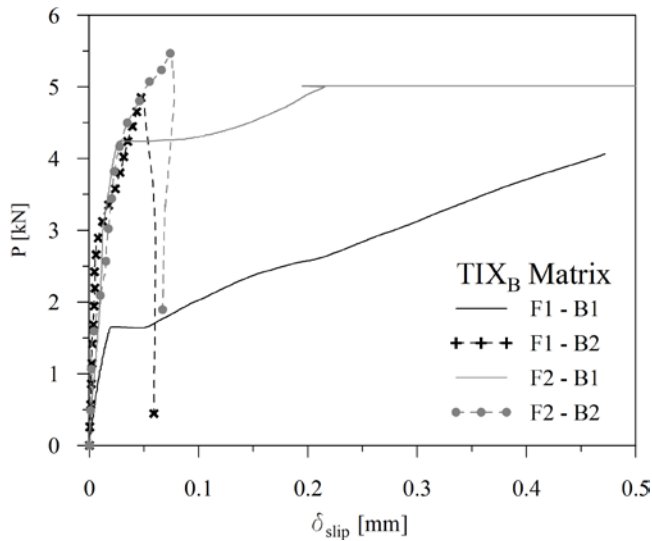


Figure 16. Comparison between single lap shear test responses for different FRCM composites applied on masonry substrates with different roughness. / Confronto tra le risposte di prove di strappo per differenti composite FRCM applicati su supporti in muratura con rugosità differente.

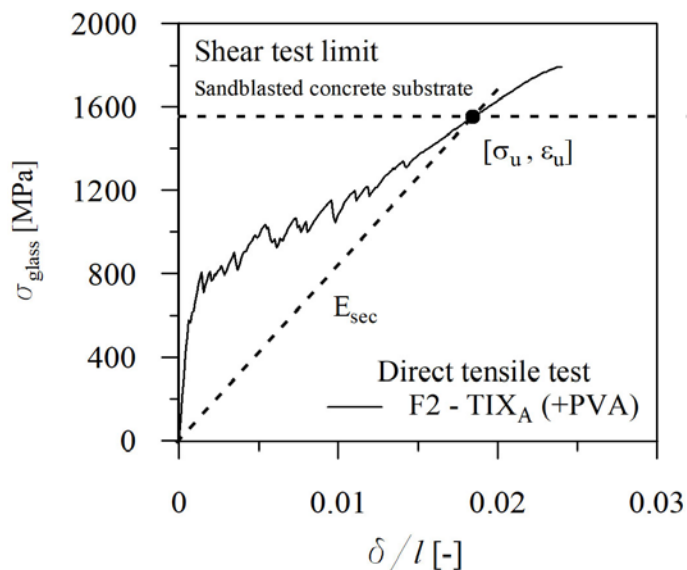


Figure 17. Identification procedure of FRCM composites design parameters. / Procedura di identificazione dei parametri meccanici dei compositi FRCM.

#### 4 CONCLUSIONI

Based on the results presented in this paper, it is possible to draw the following conclusions: 1) the choice of the type of coating influenced a lot the global response of the FRCM composite, in particular in terms of efficiency; 2) the addition of dispersed micro-fibers allow to increase the dissipative capacity of the system and, due to the reduction of the cracks width, to improve its durability; 3) the in-

terpretation of the experimental results considering the effect of each component (fabric, coating, matrix, micro-fibers) helps to better understand the complexity of the involved phenomena and to optimize FRCM composites for each kind of application; 4) the use of ductility parameters and efficiency factors allows to quantitatively compare the behavior of different systems and 5) the machining of the surfaces is a fundamental aspect to have a good exploitation of the mechanical capacity of the system.

Further developments of the research will comprise: i) the continuation of the experimental campaign at the material and meso scale, considering different widths, number of fabric layers and materials; ii) experimental tests on structural elements to verify the effectiveness of FRCM systems in retrofitting and upgrading of the load bearing capacity and iii) the calibration of analytical simplified models for the prediction of the mechanical behavior of the composites and their validation by means of advanced numerical analysis.

Basandosi sui risultati della campagna sperimentale è possibile trarre le seguenti conclusioni: 1) la scelta dell'appretto e della tessitura della rete di rinforzo influenzano fortemente la risposta globale del sistema composito FRCM, soprattutto in termini di efficienza; 2) l'utilizzo di micro-fibre disperse permette, in generale, un incremento della capacità dissipativa del composito e, grazie alla riduzione della dimensione delle fessure, ne migliora le prestazioni in termini di durabilità; 3) l'interpretazione dei risultati sperimentali con riferimento all'effetto di ciascuna delle componenti (rete, appretto, matrice, micro-fibre disperse) permette di comprendere al meglio la complessità dei fenomeni coinvolti e di ottimizzare i compositi FRCM in funzione della tipologia di applicazione; 4) l'utilizzo di parametri di duttilità e fattori di efficienza permette di confrontare quantitativamente tra loro il comportamento di differenti sistemi e 5) la lavorazione superficiale è un aspetto fondamentale per sfruttare al meglio le caratteristiche meccaniche del sistema composito.

Gli sviluppi futuri della ricerca riguarderanno: i) il proseguimento della campagna sperimentale, alla scala del materiale e alla meso-scala, considerando differenti spessori, numero di strati di tessuto e materiali; ii) test sperimentali su elementi strutturali, per verificare l'efficacia dei sistemi FRCM per il rinforzo e il ripristino della capacità portante e iii) la calibrazione di modelli analitici semplificati per stimare il comportamento meccanico dei compositi e la loro validazione mediante analisi numeriche avanzate.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare GAVAZZI Tessuti Spa e BASF Italia Spa per il loro prezioso contributo alla ricerca. La ricerca è stata supportata finanziariamente da ReLUIS PR 5 2017.

## REFERENCES

- de Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L. et al. 2014. "Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry." *Mater. Struct.*, 47 (12),2021-2037.
- Rampini, M. C., Zani, G., Colombo, M., di Prisco, M. 2018. "Identification of FRCC Mechanical Parameters for the Retrofitting Design of Existing Structures." Hordijk D., Luković M. (eds) *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*. Springer.
- Cohen, Z., Peled, A. 2010. "Controlled telescopic reinforcement system of fabric-cement composites – Durability concerns." *Cement and Concrete Research*, 40 (10),1495-1506.
- Colombo, I. G., Magri, A., Zani, G., Colombo, M., di Prisco, M. 2013. "Textile reinforced concrete: experimental investigation on design parameters." *Mater. Struct.*, 46 (11),1953-1971
- Barhum, R., Mechtcherine, V. 2011. "Mechanical Behaviour under Tensile Loading of Textile Reinforced Concrete with Short Fibres." 6th Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS6).
- Ascione, L., de Felice, G., De Santis, S. 2015. "A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCC) strengthening systems" *Composites part B: Engineering*, 78 (2015),497-506.