



Simulazioni numeriche di prove di aderenza su rinforzi FRCCM con rete di carbonio

Francesco Saverio Murgo^a, Francesca Ferretti^a, Claudio Mazzotti^a

^a *Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy*

Keywords: FRCCM, materiali compositi, muratura, prove di aderenza, modellazione numerica.

ABSTRACT

I materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCCM) sono materiali innovativi che possono essere utilizzati per il rinforzo di strutture murarie al fine di migliorare il loro comportamento in presenza di azioni orizzontali. Il loro utilizzo si sta progressivamente diffondendo grazie alla buona compatibilità di questi materiali con il substrato murario e alle buone prestazioni in termini di permeabilità, sostenibilità e facilità di applicazione. L'impiego di compositi FRCCM può influenzare il comportamento a taglio della muratura sia in termini di capacità che di modalità di rottura. Infatti, la presenza dei rinforzi generalmente determina un aumento della resistenza a taglio e un meccanismo di rottura meno fragile. Uno degli aspetti più importanti da analizzare, determinante nel garantire l'efficacia o meno di un sistema di rinforzo, è l'aderenza tra il substrato murario e il composito FRCCM. Per questo motivo, la caratterizzazione meccanica dei materiali compositi prevede l'esecuzione sia di prove di trazione che di prove di aderenza. Nel presente lavoro, sono state condotte simulazioni numeriche di prove di aderenza su rinforzi FRCCM con rete di carbonio applicati su substrato murario con l'obiettivo di calibrare un appropriato legame bond-slip. In particolare, si adotta una strategia di micro-modellazione del rinforzo FRCCM, nel quale le fibre di carbonio sono modellate singolarmente e viene considerato il possibile scorrimento all'interfaccia tra fibre e matrice, tramite elementi di interfaccia, al fine di riprodurre le modalità di rottura tipicamente riscontrate in prove sperimentali. I risultati numerici sono confrontati con quelli provenienti da alcune campagne sperimentali precedentemente condotte sullo stesso sistema FRCCM, arrivando così alla calibrazione di una legge di bond-slip che potrà essere implementata nella modellazione numerica di prove sperimentali su elementi strutturali rinforzati in vera grandezza.

1 INTRODUZIONE

La vulnerabilità sismica delle strutture esistenti in muratura mette in luce, sempre di più, la necessità di sviluppare soluzioni efficaci per il rinforzo strutturale. In questo campo, l'utilizzo di materiali innovativi, quali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCCM), si configura come una tipologia di intervento che può rivelarsi estremamente efficiente nel migliorare il comportamento delle strutture murarie in presenza di azioni orizzontali (Papanicolaou et al. 2011, Ferretti et al. 2016). L'applicazione di sistemi FRCCM negli interventi di riabilitazione strutturale si sta, infatti, progressivamente diffondendo grazie alla buona compatibilità di questi materiali con il substrato murario e alle buone prestazioni in termini di permeabilità, sostenibilità, oltre alla facilità di installazione. Per garantire l'efficacia di

questi sistemi di rinforzo, occorre studiare sia il comportamento a trazione di tali sistemi che l'aderenza tra il pacchetto di rinforzo e il substrato murario (Carozzi et al. 2017, de Felice et al. 2018, Bellini et al. 2019). Dal punto di vista sperimentale, a tal fine, la caratterizzazione meccanica di questi materiali compositi prevede l'esecuzione sia di prove di trazione che di prove di aderenza (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 2018). La modellazione numerica delle suddette prove permette di poter analizzare più nel dettaglio sia lo stato tensionale e deformativo dei materiali che l'evoluzione del meccanismo di crisi. D'altro canto, il supporto dei dati sperimentali permette di calibrare e validare i risultati numerici. Risulta quindi fondamentale combinare i due aspetti, sperimentale e numerico, per poter studiare approfonditamente il comportamento di questi

materiali compositi (Ceroni et al. 2014, Bellini et al. 2019).

Il presente lavoro ha come obiettivo la calibrazione di un legame bond-slip tramite la modellazione di prove di aderenza su rinforzi FRCC applicati su un substrato murario. La modellazione di prove in scala reale su interi pannelli murari rinforzati con FRCC, infatti, richiede la definizione di questo legame. Si sono perciò confrontati i risultati numerici con quelli provenienti da precedenti campagne sperimentali per arrivare alla calibrazione di un'opportuna legge di bond-slip.

2 PROVA DI ADERENZA

Le prove di aderenza svolte nell'ambito del Round-Robin test promosso dal Comitato Tecnico RILEM 250-CSM (Carozzi et al. 2017) sono state usate come riferimento per la calibrazione del legame bond-slip di compositi FRCC con rete in fibra di carbonio (C-FRCC) applicati su substrati murari. Nell'ambito della ricerca citata, si considerano nel seguito le prove di aderenza eseguite presso l'Università di Bologna, l'Università Roma Tre e il Politecnico di Milano. I pannelli in muratura sono stati costruiti usando mattoni in laterizio, delle dimensioni di $250 \times 120 \times 55 \text{ mm}^3$, e malta idraulica naturale a base di calce. A seguito della maturazione, ogni pannello murario, costituito da 5 corsi, è stato rinforzato tramite l'applicazione del composito FRCC su una delle due facce per una lunghezza di aderenza pari a 260 mm. Prima dell'applicazione del composito, alcuni pannelli, in relazione alla larghezza di aderenza adottata, dipendente dal sistema di rinforzo scelto, sono stati tagliati in due parti in modo da ottenere due campioni per ogni elemento, delle dimensioni di $125 \times 120 \times 315 \text{ mm}^3$.

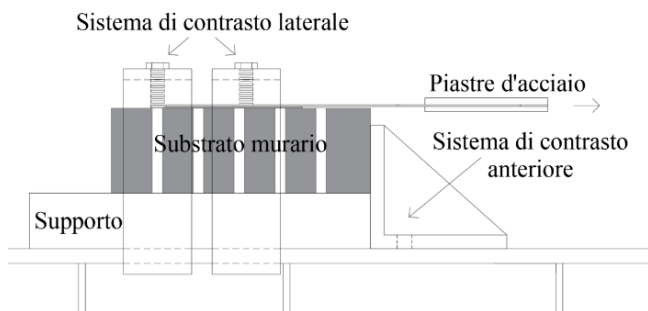


Figura 1. Prova di aderenza: setup sperimentale.

Il setup di prova utilizzato per le prove di aderenza svolte presso l'Università di Bologna (Figura 1), qui descritto a titolo rappresentativo, è

composto da un telaio rigido orizzontale in acciaio con sistemi di contrasto anteriore e laterale per impedire spostamenti orizzontali e verticali dei campioni. Per l'applicazione del carico, l'estremità libera del composito FRCC viene impregnata con resina epossidica e serrata tra due piastre d'acciaio. La forza di trazione è applicata al campione per mezzo di un attuatore elettromeccanico, che, grazie alla presenza di una cerniera, permette rotazioni attorno all'asse verticale. Le prove sono eseguite in controllo di spostamento, con riferimento allo spostamento dell'estremità libera del composito FRCC, ad una velocità di 0.15 mm/min . Un cella di carico avente capacità di 100 kN è stata utilizzata per registrare la forza di trazione applicata al campione. Durante la prova, gli spostamenti sono misurati per mezzo di 3 LVDT, aventi una corsa pari a 10 mm , posizionati in modo da monitorare sia lo spostamento della testa della macchina che lo spostamento relativo (slip) tra il composito FRCC e il substrato murario.

Tra le possibili modalità di rottura per compositi FRCC applicati su substrati murari (Ascione et al. 2015) riscontrabili in una prova di aderenza (Figura 2), nella campagna sperimentale sono state osservate, principalmente, le seguenti modalità di rottura: (i) delaminazione all'interfaccia tra fibre e matrice (Figura 2c), (ii) scorrimento della fibra all'interno della matrice con fessurazione dello strato esterno di quest'ultima (Figura 2e), (iii) rottura a trazione della fibra fuori dalla lunghezza di aderenza (Figura 2f). Tali osservazioni troveranno corrispondenza nelle scelte fatte riguardo alla modellazione numerica, illustrate nei successivi paragrafi.

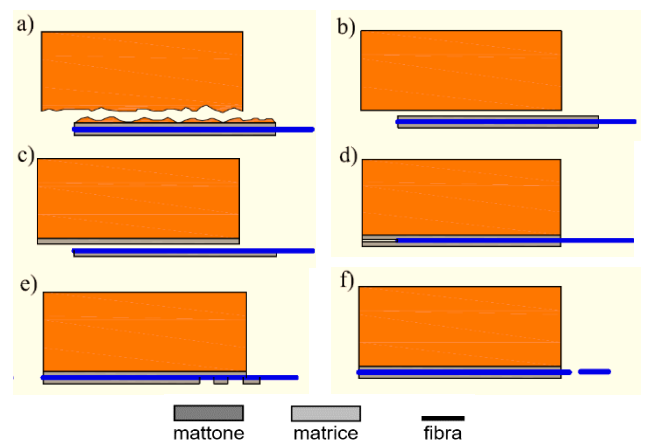


Figura 2. Possibili modalità di rottura per compositi FRCC applicati su substrati murari.

3 MODELLAZIONE NUMERICA

La modellazione numerica di un rinforzo FRM può essere svolta considerando due differenti approcci: macro-modellazione e micro-modellazione (Wang et al. 2017, Basili et al. 2016, Bertolesi et al. 2016, Garofano et al. 2016). Nel seguito, si considererà quest'ultimo approccio, che consiste nel modellare singolarmente le fibre immerse nella matrice inorganica. È possibile introdurre opportuni legami di interfaccia tra fibra e matrice, che permettano lo scorrimento relativo tra i due componenti del sistema di rinforzo, come verrà descritto nel seguito.

3.1 Strategia di modellazione

Dalle osservazioni in merito alle principali modalità di rottura osservate nelle prove sperimentali in oggetto (Carozzi et al. 2017), nelle quali il substrato murario non risulta coinvolto nel meccanismo di crisi, si è scelto, ai fini della modellazione numerica delle prove di aderenza, di considerare un singolo mattone, avente dimensioni totali pari alle dimensioni dei campioni utilizzati sperimentalmente. I componenti del rinforzo FRM (matrice e fibre) vengono modellati separatamente e applicati sulla superficie del mattone.

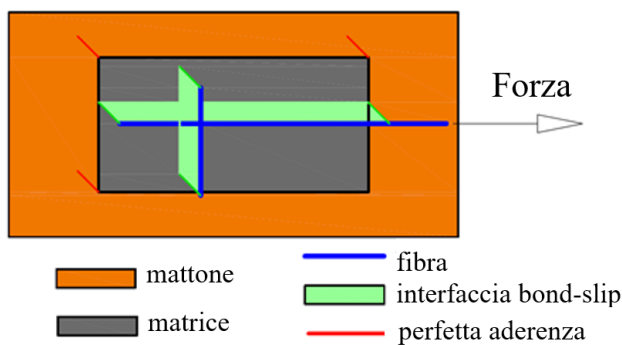


Figura 3. Prova di aderenza: strategia di modellazione.

Per le simulazioni numeriche delle prove di aderenza si sceglie di utilizzare un modello 2D (Figura 3), in cui sia il mattone che la matrice di malta vengono modellati utilizzando elementi "shell" a 8 nodi. Per entrambi i materiali, si assume un comportamento elastico lineare. Si considera, inoltre, una perfetta aderenza tra mattone e matrice di malta, ipotesi che risulta coerente con le modalità di crisi osservate sperimentalmente. Allo strato di matrice viene assegnato lo spessore totale del pacchetto di rinforzo. Le fibre, invece, sono modellate singolarmente utilizzando elementi "truss" a due nodi, collegati alla matrice per mezzo

di elementi di interfaccia. All'interfaccia tra fibra e matrice, infatti, si ipotizzano concentrati i fenomeni di delaminazione e di scorrimento. Nei punti di intersezione delle fibre ordite nelle due direzioni ortogonali, si considera una perfetta aderenza per ridurre l'onere computazionale delle analisi.

Per descrivere adeguatamente il possibile scorrimento delle singole fibre rispetto alla matrice, si fa uso di elementi di interfaccia a zero spessore con 6 nodi. Questi elementi connettono fra loro elementi 1D (truss) con elementi 2D (shell) per cui è necessario definire separatamente due leggi di interfaccia per la direzione longitudinale (Equazione 1) e per quella ortogonale all'andamento delle fibre (Equazione 2), secondo le seguenti relazioni:

$$t_n = k_n \Delta u, \quad (1)$$

$$t_t = f_t(\Delta s), \quad (2)$$

dove t_n e t_t sono le tensioni normali e tangenziali di interfaccia, rispettivamente, k_n è la rigidezza normale all'interfaccia, Δu è lo spostamento relativo normale all'interfaccia, $f_t(\Delta s)$ è un'opportuna legge di bond-slip, che descrive l'andamento della tensione tangenziale di interfaccia in funzione dello spostamento tangenziale relativo (slip) Δs . Come si evince dall'Equazione 1, nella direzione ortogonale all'andamento delle fibre si considera una relazione lineare tra la tensione normale e lo spostamento relativo normale all'interfaccia, caratterizzata dal parametro di rigidezza k_n . L'elevata deformabilità delle fibre in direzione ortogonale al loro allineamento e lo scorrimento relativo che può avvenire tra i filamenti ortogonali, suggerisce di utilizzare un valore piuttosto basso di tale parametro, considerato qui inferiore all'unità, come confermato anche da alcune analisi parametriche preliminari eseguite. In direzione longitudinale, invece, si definisce una funzione $f_t(\Delta s)$ tra la tensione tangenziale e lo scorrimento di tipo bilineare, scelta comune nell'ambito della modellazione di sistemi FRM (Bertolesi et al. 2016), dettata da ragioni legate a una maggior facilità di calibrazione di tale relazione. Questa scelta risulta appropriata anche nell'ottica di utilizzare il legame bond-slip calibrato per la modellazione di rinforzi in FRM a livello strutturale.

3.2 Calibrazione del legame bond – slip

Per la calibrazione del legame bond-slip, sono state eseguite diverse simulazioni numeriche di prove di aderenza, considerando 3 diversi tipi di tessuti FRCM con rete in fibra di carbonio, identificati nel seguito tramite le sigle C1, C2 e C3. Le proprietà geometriche e meccaniche dei materiali utilizzate nel modello a elementi finiti, scelte sulla base delle prove sperimentali descritte al paragrafo 2, sono riportate in Tabella 1. La geometria e la mesh del modello utilizzato nelle simulazioni numeriche sono rappresentate in Figura 4.

Le analisi non lineari sono condotte tramite il software Diana FEA (versione 10.1) applicando uno spostamento, in maniera monotona, all'estremità libera delle singole fibre, impedendo, allo stesso tempo, i movimenti del substrato sottostante.

Tabella 1. Proprietà geometriche e meccaniche usate nella modellazione.

Proprietà	C1	C2	C3
Dimensioni supporto (mm ³)	125x120x315		250x120x315
Spessore matrice (mm)	12	10	9
Lunghezza aderenza (mm)	260	260	260
Larghezza rinforzo (mm)	54	50	100
Sezione filamento (mm ²)	0.47	0.47	0.47
Perimetro filamento (mm)	4	8	8
Modulo elastico supporto (GPa)	14	14	14
Modulo elastico matrice (GPa)	8	7	7
Modulo elastico fibra (GPa)	240	197	203

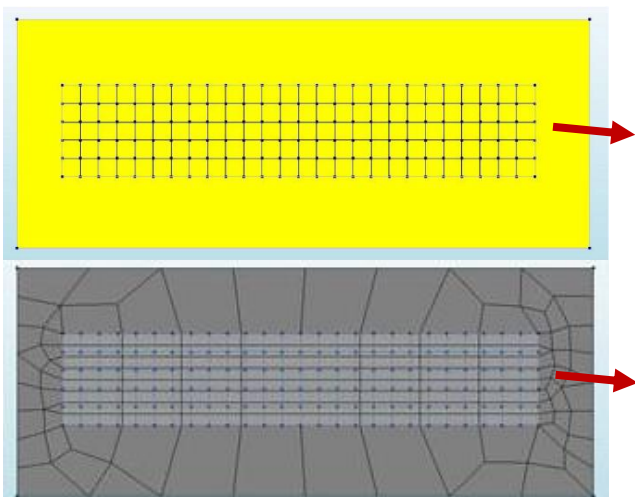


Figura 4. Prova di aderenza: geometria del modello e mesh.

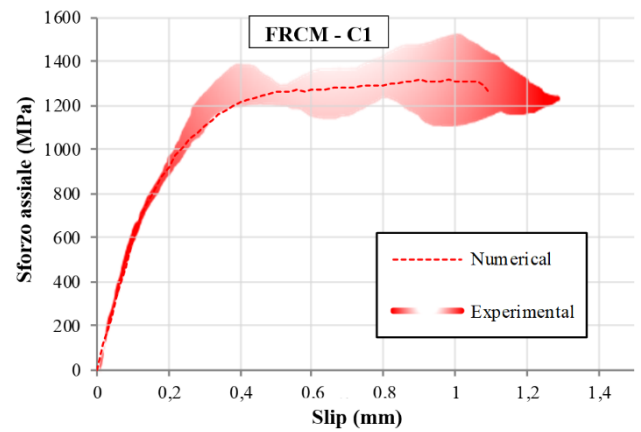


Figura 5. Confronto tra risultati numerici e sperimentali per il sistema di rinforzo FRCM C1.

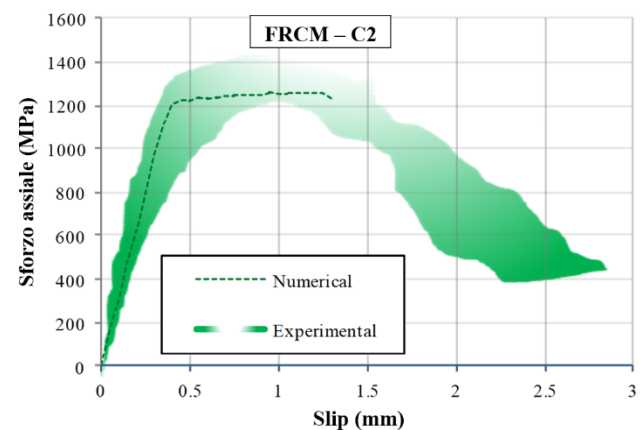


Figura 6. Confronto tra risultati numerici e sperimentali per il sistema di rinforzo FRCM C2.

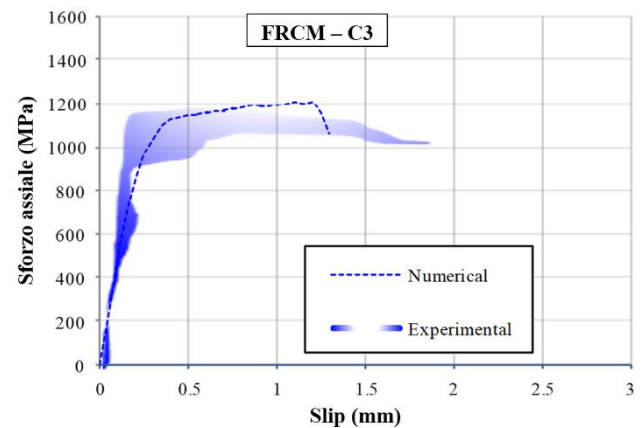


Figura 7. Confronto tra risultati numerici e sperimentali per il sistema di rinforzo FRCM C3.

Ai fini della calibrazione del legame bond-slip per i rinforzi analizzati, sono stati considerati i risultati ottenuti nella campagna sperimentale descritta in precedenza (Carozzi et al. 2016). In Figura 5, Figura 6 e Figura 7 vengono mostrati i confronti tra i risultati delle analisi non lineari e i risultati sperimentali, rispettivamente per i sistemi FRCM C1, C2 e C3. Tali confronti sono riportati in termini di sforzo assiale delle fibre σ vs slip. Lo sforzo assiale è calcolato considerando la forza orizzontale applicata al campione divisa per l'area

totale della fibra secca. Le aree colorate rappresentano gli involucri sperimentali.

Si può notare un buon accordo tra le curve numeriche e sperimentali per tutti i rinforzi considerati, sia in termini di rigidezza iniziale, in corrispondenza del primo ramo delle curve, che in termini di resistenza di picco. I parametri che descrivono le leggi di bond-slip così calibrate, mostrate in Figura 8, sono riportati in Tabella 2. A livello rappresentativo, in Figura 9 sono riportate le tensioni tangenziali all'interfaccia tra fibra e matrice, ottenute dalla simulazione numerica della prova di aderenza riferita al rinforzo C1.

Tabella 2. Parametri del legame bond-slip bilineare.

Parametro	C1	C2	C3
τ_{max} (MPa)	1.60	1.10	0.90
s_{picco} (mm)	0.03	0.17	0.04
s_u (mm)	0.25	0.25	0.25

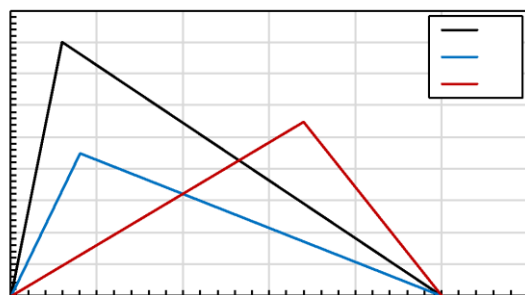


Figura 8. Legami bond-slip per i rinforzi FRCM analizzati.

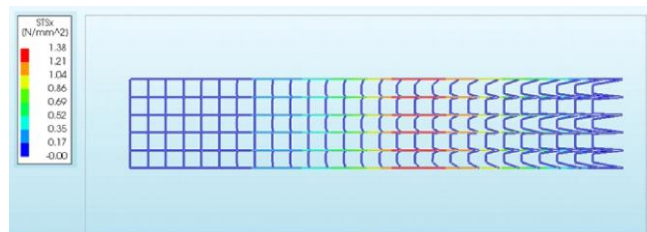


Figura 9. Andamento delle tensioni tangenziali all'interfaccia tra fibra e matrice.

3.3 Analisi dell'interazione tra fibre longitudinali e ortogonali

Con l'obiettivo di giungere a una corretta implementazione dei compositi FRCM nei modelli di calcolo, si ritiene importante valutare la possibile interazione tra fibre longitudinali e ortogonali. Nella pratica, infatti, le reti possono essere caratterizzate dalla presenza o meno di una termosaldatura in corrispondenza dei punti di contatto delle fibre ordite nelle due direzioni. È evidente che alle due condizioni citate corrispondono, rispettivamente, una condizione di perfetta aderenza e una condizione in cui è

consentito lo scorrimento relativo tra fibre ortogonali. Questi due casi limite sono di particolare interesse per valutare l'effetto dell'interazione tra le fibre sul comportamento uniassiale del rinforzo in una prova di aderenza.

Sono, quindi, stati considerati due modelli: (i) modello con perfetta aderenza nei punti di intersezione delle fibre, che corrisponde al modello già considerato in precedenza; (ii) modello in cui le fibre disposte lungo le due direzioni ortogonali non sono in contatto e, dunque, lo scorrimento è consentito. Le analisi non lineari sono state condotte in accordo con quanto descritto al paragrafo 3.2, considerando le leggi di bond-slip calibrate in precedenza. Queste simulazioni numeriche sono state eseguite solamente per il sistema FRCM C1.

Dal punto di vista numerico, si è notata una differenza in termini di configurazione deformata delle fibre nei due modelli, come si può notare confrontando la Figura 10 con la Figura 9, corrispondenti a simili livelli tensionali. Si può notare anche come lo sviluppo delle massime tensioni tangenziali avvenga, per il modello con scorrimento consentito, a una maggior distanza dall'estremità libera delle fibre. Tali differenze non trovano riscontro nel diagramma sforzo assiale vs slip, dove le curve relative ai due diversi modelli sostanzialmente coincidono (Figura 11). Questa apparente incongruenza può essere spiegata considerando la ridotta rigidezza d'interfaccia considerata per la direzione normale all'allineamento delle fibre (k_n) per cui le fibre ortogonali non sono in grado di opporre resistenza al meccanismo di scorrimento che si attiva tra le fibre longitudinali e la matrice, anche quando vi sia la congruenza nei nodi di intersezione. Si registrano, infatti, spostamenti comparabili all'aumentare del carico applicato nelle due simulazioni. Valori più alti del parametro k_n potrebbero portare a una sovrastima della capacità del rinforzo analizzato e non sono qui considerati.

Nella pratica, a seconda della tipologia di rete utilizzata, l'analisi dell'interazione tra fibre longitudinali e ortogonali in una prova di aderenza può rivestire un ruolo rilevante e deve essere valutata nel caso specifico. Resta inteso, comunque, che anche nel caso in cui non vi sia alcun tipo di collegamento tra fibre longitudinali e ortogonali, il fatto che le fibre siano annegate all'interno della matrice cementizia non consente, per bassi valori di carico, elevati spostamenti relativi, che invece possono essere significativi

dopo la fessurazione della malta stessa e in corrispondenza del collasso del rinforzo.

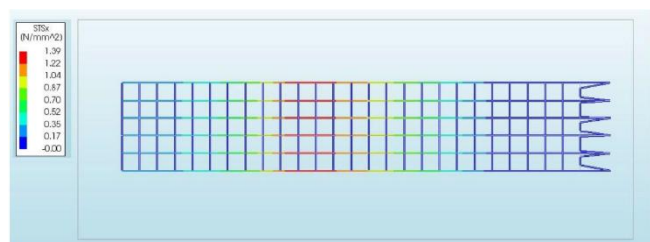


Figura 10. Andamento delle tensioni tangenziali all'interfaccia tra fibra e matrice: scorrimento consentito tra fibre tangenziali e ortogonali.

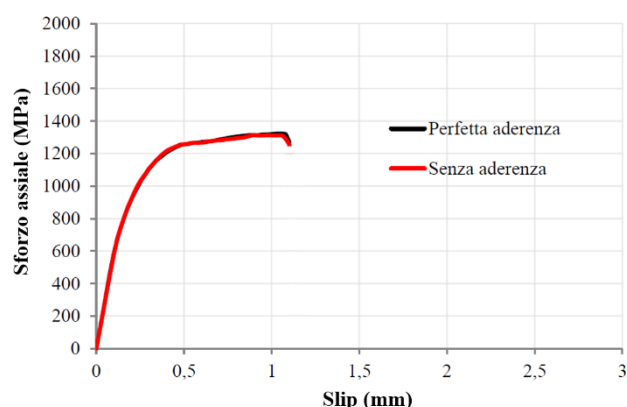


Figura 11. Confronto tra modello con perfetta aderenza e modello con scorrimento consentito tra le fibre ortogonali per il sistema di rinforzo FRCM C1.

4 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro, sono state eseguite simulazioni numeriche di prove di aderenza su campioni in muratura rinforzati per mezzo di compositi FRCM con reti in fibra di carbonio. In particolare, sono state analizzate 3 diverse tipologie di rinforzo, sulla base di prove sperimentali eseguite in una precedente campagna. Dal confronto tra i risultati delle analisi non lineari e delle prove sperimentali, è stato possibile calibrare opportunamente le leggi di bond-slip, di tipo bilineare, per ciascuno dei rinforzi considerati. Tali legami potranno essere efficacemente utilizzati per la modellazione di queste tipologie di sistemi FRCM nell'ambito di prove su interi elementi strutturali rinforzati con compositi.

Si è inoltre analizzata l'interazione tra fibre longitudinali e ortogonali, che riveste un ruolo di particolare importanza a seconda del collegamento effettivamente presente tra le fibre ordite nelle due direzioni. Le fibre perpendicolari al carico orizzontale applicato durante una prova di aderenza possono, infatti, rappresentare un vincolo

allo scorrimento delle fibre longitudinali, che deve essere opportunamente tenuto in conto.

5 RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Dipartimento di Protezione Civile (Progetto Reluis 2019 – Materiali innovativi) per il supporto finanziario alla ricerca.

REFERENCES

- Ascione, L., de Felice, G., De Santis, S., 2015. A qualification method for externally bonded Fibre Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) strengthening systems, *Composites Part B*, **78**, 497–506.
- Carozzi, F.G., Bellini, A., D'Antino, T., de Felice, G., Focacci, F., Hojdys, L., Laghi, L., Lanoye, E., Micelli, F., Panizza, M., Poggi, C., 2017. Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements, *Composites Part B*, **128**, 100-119.
- Ceroni, F., de Felice, G., Grande, E., Malena, M., Mazzotti, C., Murgio, F., Sacco, E., Valluzzi, M.R., 2014. Analytical and numerical modeling of composite-to-brick bond, *Materials and Structures*, **47**(12), 1987-2003.
- Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2018. Linee guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.
- Basili, M., Marcari, G., Vestroni, F., 2016. Nonlinear analysis of masonry panels strengthened with textile reinforced mortar, *Engineering Structures*, **113**, 245-258.
- Bertolesi, E., Milani, G., Poggi, C., 2016. Simple numerical homogenization model for the non-linear static analysis of in-plane masonry walls strengthened with FRCM composites, *Composite Structures*, **158**, 291-307.
- Ferretti, F., Incerti, A., Ferracuti, B., Mazzotti, C., 2016. Diagonal compression tests on masonry panels strengthened by FRP and FRCM. *10th SAHC Conference*. September 13-15, Leuven, Belgium.
- Garofano, A., Ceroni, F., Pecce, M., 2016. Modelling of the in-plane behavior of masonry walls strengthened with polymeric grids embedded in cementitious mortar layers, *Composite Part B*, **85**, 243-258.
- Papanicolaou, C., Triantafillou, T., Lekka, M., 2011. Externally bonded grids as strengthening and seismic retrofitting materials of masonry panels, *Construction and Building Materials*, **25**, 504-514.
- Wang, X., Ghiassi, B., Oliveira, D.V., Lam, C.C., 2017. Modelling the nonlinear behaviour of masonry walls strengthened with textile reinforced mortars, *Engineering Structures*, **13**, 11-24.