



Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6/13  
OTTOBRE  
2024

#settimanadiPC

# SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**I MATERIALI COMPOSITI A MATRICE INORGANICA (IMC-INORGANIC  
MATRIX COMPOSITES) PER GLI INTERVENTI SU STRUTTURE  
ESISTENTI**

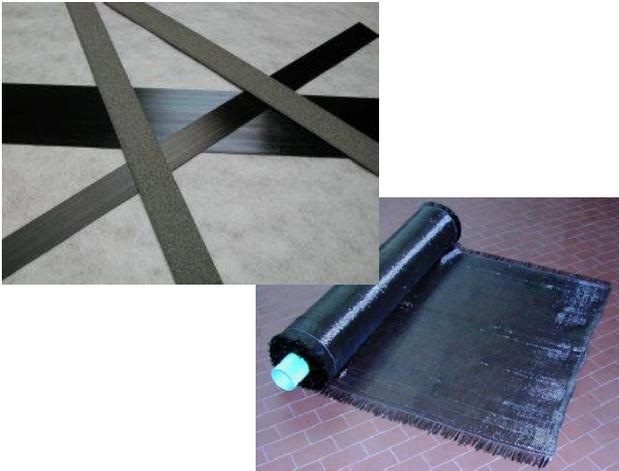
**Maria Antonietta Aiello**

**Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento**

## Sistemi di rinforzo strutturale esterno EBR (Externally Bonded Reinforcement)

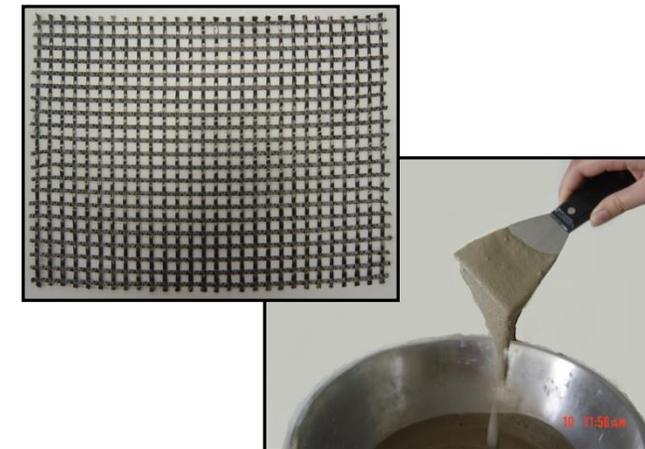
FRP

Fibre Reinforced  
Polymer



FRCM/CRM

Fabric Reinforced Cementitious  
Mortar/Composite Reinforced Mortar





- **Buona resistenza a temperature elevate**
- **Applicabilità in condizioni di umidità e temperatura usuali**
- **Ottima compatibilità con substrato**
- **Traspirabilità**
- **Tecniche applicative più simili a quelle tradizionali**
- **Rimovibilità**

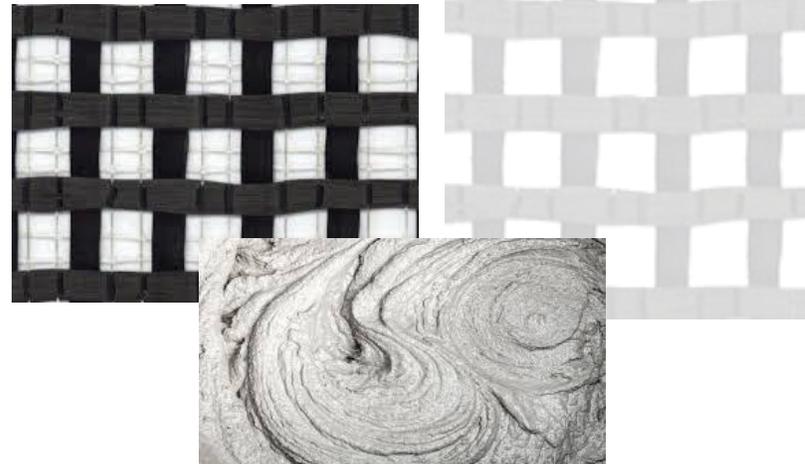
## Sistemi IMC (Inorganic Matrix Composite)

Sistema di rinforzo applicato esternamente

### FRCM

*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*

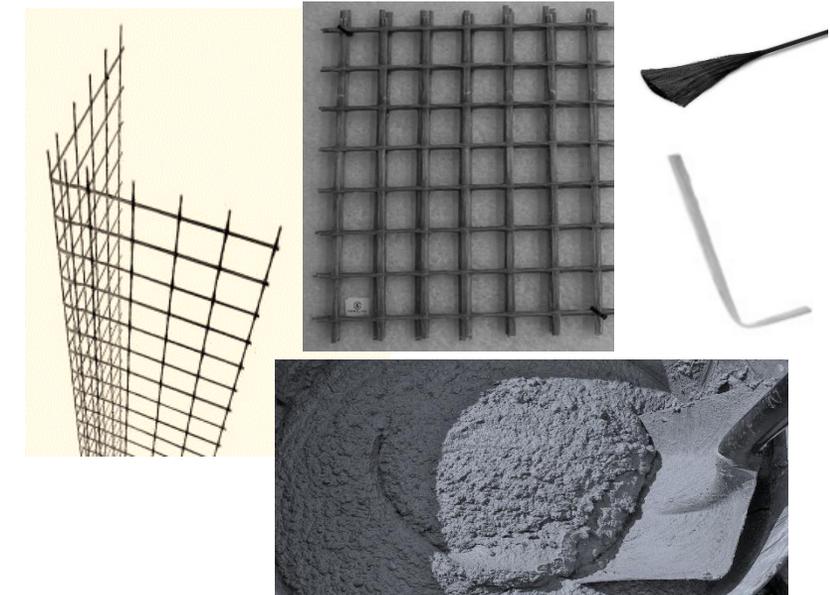
Materiale composito costituito da una **rete di fibre continue di varia natura** e da una **malta (a base di cemento o di calce)**, che funge da matrice.



### CRM

*Composite Reinforced Mortar*

Intonaco armato costituito da **reti di rinforzo preformate in FRP** (Fiber Reinforced Polymer) inserite all'interno di una **malta (a base di cemento o di calce)**.



Altri acronimi per FRCM:

**TRC**, Textile Reinforced Concrete

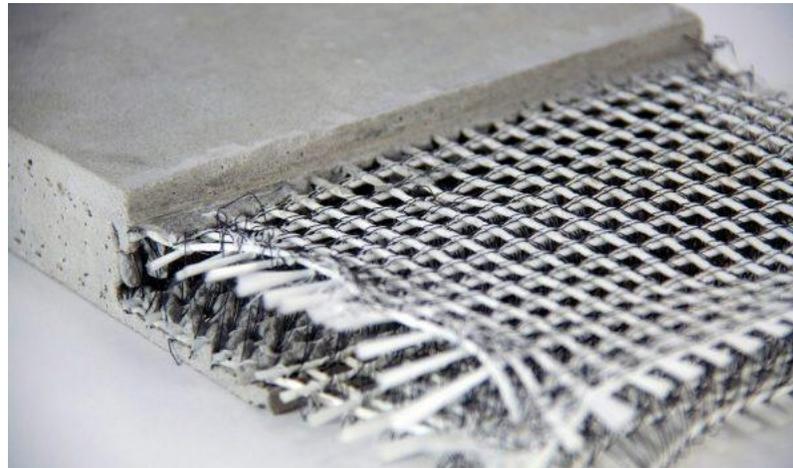
**TRM**, Textile Reinforced Mortars

**IMG**, Inorganic Matrix Grid composite

## FRCM

### *Fabric Reinforced Cementitious Matrix*

- I compositi FRCM sono utilizzabili per realizzare **sistemi di rinforzo** di strutture esistenti.
- Lo spessore del rinforzo è compreso, nel caso di una singola rete, **tra 5 e 15 mm**, al netto del livellamento del supporto.
- La **distanza netta** tra il contorno dei **fili** o trefoli che compongono il tessuto secco **non** può essere **superiore a 2 volte lo spessore della malta** e comunque **non** può essere **maggiore di 30 mm**

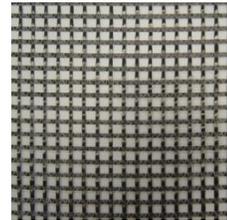
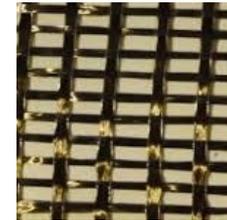
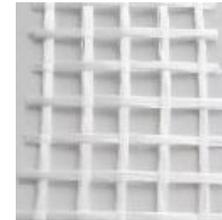


#### 1- Malta inorganica

Cementizia, di calce, ...

#### 2- Reti o tessuti secchi:

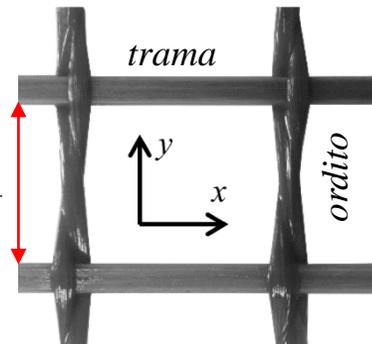
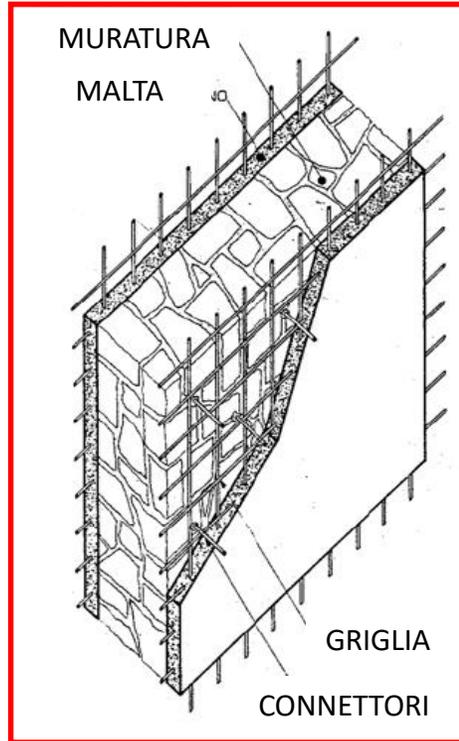
acciaio, aramide, basalto,  
carbonio, PBO, vetro AR  
**fibre naturali (canapa, lino,  
bamboo..)**



## CRM

### Composite Reinforced Mortar

- **Sistemi di rinforzo** da applicare sulle superfici degli elementi strutturali in muratura per il consolidamento degli stessi mediante la tecnica dell'**intonaco armato**.
- Lo spessore dei sistemi di rinforzo è compreso, di norma, **tra 30 mm e 50 mm**, al netto del livellamento del supporto.
- La **distanza** netta tra i **trefoli** che formano la rete preformata **non può essere superiore 4 volte lo spessore della malta** e comunque **non può essere minore di 30 mm**

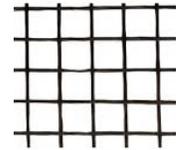


#### 1- Malta inorganica

Cementizia, di calce, ...

#### 2- Reti preformate:

carbonio, aramide, basalto, vetro AR



#### 3- Connettori preformati:

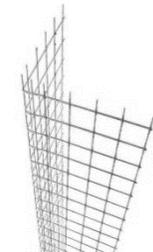
vetro, carbonio, basalto, aramide



#### 4- Ancorante chimico

#### 5- Angolare preformato:

Carbonio, aramide, basalto, vetro AR



## ALCUNI INTERVENTI STRUTTURALI



## QUALE TIPO DI INTERVENTO?

### 8.4. CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI

Si individuano le seguenti categorie di intervento:

- *interventi di riparazione o locali*: interventi che interessino singoli elementi strutturali e che, comunque, non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti;
- *interventi di miglioramento*: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza fissati al § 8.4.3;
- *interventi di adeguamento*: interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, conseguendo i livelli di sicurezza fissati al paragrafo 8.4.3.

ADEGUAMENTO

MIGLIORAMENTO

RIPARAZIONE/LOCALI

## MATERIALI INNOVATIVI – NTC 2018

### CAPITOLO 12.

Per quanto non diversamente specificato nella presente norma, si intendono coerenti con i principi alla base della stessa, le indicazioni riportate nei seguenti documenti:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali;
- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;
- Norme per prove su materiali e prodotti pubblicate da UNI.

Inoltre, a integrazione delle presenti norme e per quanto con esse non in contrasto, possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sul documento stesso;
- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.).

Per quanto non trattato nella presente norma o nei documenti di comprovata validità sopra elencati, possono essere utilizzati anche altri codici internazionali; è responsabilità del progettista garantire espressamente livelli di sicurezza coerenti con quelli delle presenti Norme tecniche.

Il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, per il tramite del Servizio Tecnico Centrale, predispone e pubblica, sentiti il Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.) e l'Ente Italiano di Normazione (UNI), l'elenco dei documenti che costituiscono riferimento tecnico per le Norme tecniche per le costruzioni ai sensi del presente capitolo. Con analoga procedura sono anche predisposti e pubblicati gli aggiornamenti periodici a tale elenco, nonché gli aggiornamenti degli elenchi delle specifiche tecniche volontarie UNI, EN ed ISO richiamate nella presente norma.



## MATERIALI INNOVATIVI – NTC 2018

### CAPITOLO 11.

## MATERIALI E PRODOTTI PER USO STRUTTURALE

I materiali ed i prodotti per uso strutturale devono rispondere ai requisiti indicati nel seguito.

I materiali e prodotti per uso strutturale devono essere:

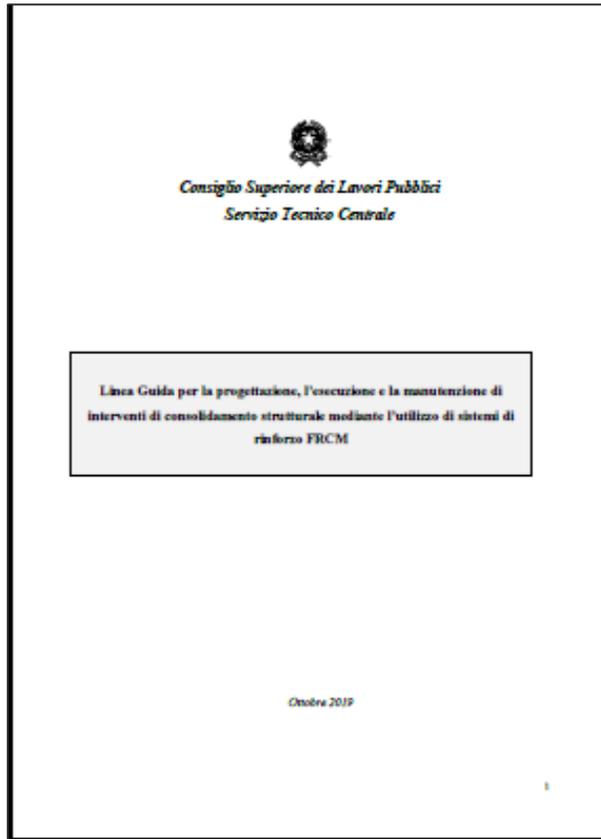
- *identificati* univocamente a cura del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate;
- *qualificati* sotto la responsabilità del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate;
- *accettati* dal Direttore dei lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di identificazione e qualificazione, nonché mediante eventuali prove di accettazione.

- ➔ C) materiali e prodotti per uso strutturale non ricadenti in una delle tipologie A) o B. In tali casi il fabbricante dovrà pervenire alla Marcatura CE sulla base della pertinente “Valutazione Tecnica Europea” (ETA), oppure dovrà ottenere un “Certificato di Valutazione Tecnica” rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, previa istruttoria del Servizio Tecnico Centrale, anche sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ove disponibili; con decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, su conforme parere della competente Sezione, sono approvate Linee Guida relative alle specifiche procedure per il rilascio del “Certificato di Valutazione Tecnica”.

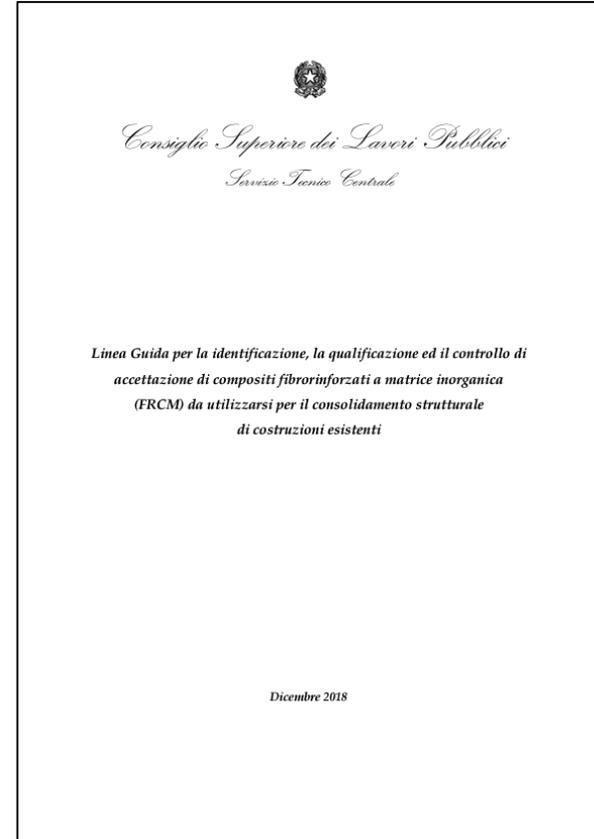


## MATERIALI INNOVATIVI – NTC 2018

### Linee guida di progettazione



### Linee guida di qualificazione





Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale

Progetto DPC-ReLUIS

## WP 14 - Contributi normativi relativi a Materiali Strutturali Innovativi per la Sostenibilità delle Costruzioni

### TASK 14.1: MATERIALI COMPOSITI A MATRICE INORGANICA PER INTERVENTI SU COSTRUZIONI ESISTENTI

Interventi mediante compositi di tipo FRCM

Interventi mediante sistemi CRM

Interventi mediante compositi di tipo HPFRC

Interventi mediante compositi a matrice inorganica (FRCM, CRM, HPFRC) per il rinforzo strutturale e l'efficientamento energetico

### Task 14.2: IMPIEGO DI ARMATURE NON METALLICHE NELLE STRUTTURE IN C.A.

### TASK 14.3: CALCESTRUZZI GREEN E AD ELEVATA DURABILITA'

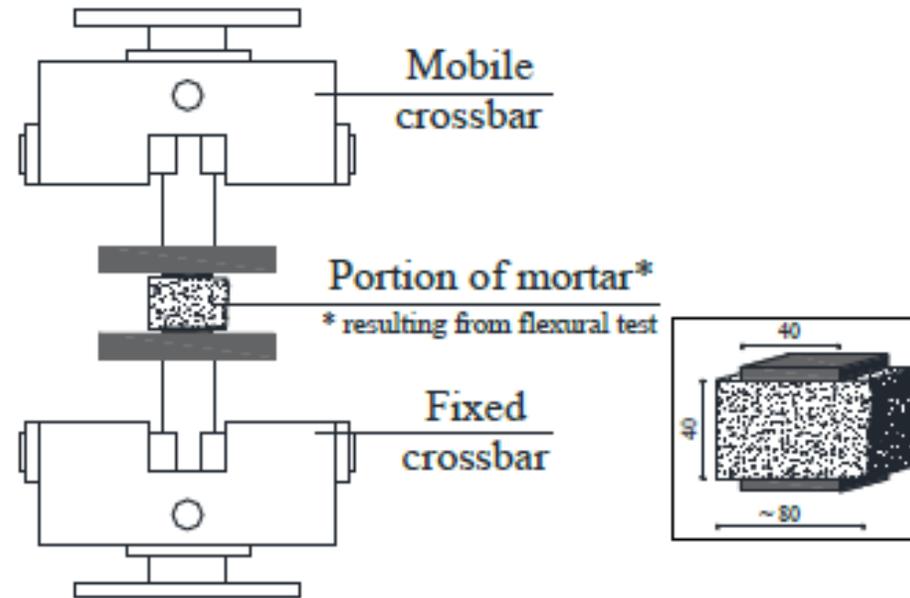
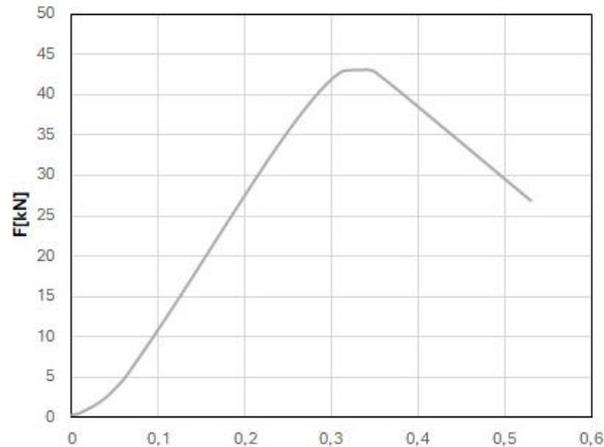
Impiego di materiali da riciclo nelle strutture in c.a.

Calcestruzzi realizzati con leganti a basso impatto ambientale

Calcestruzzi durevoli ottenuti mediante l'aggiunta di nanomateriali

## Prove di compressione sulla matrice/malta

## PROPRIETA' MECCANICHE FRCM

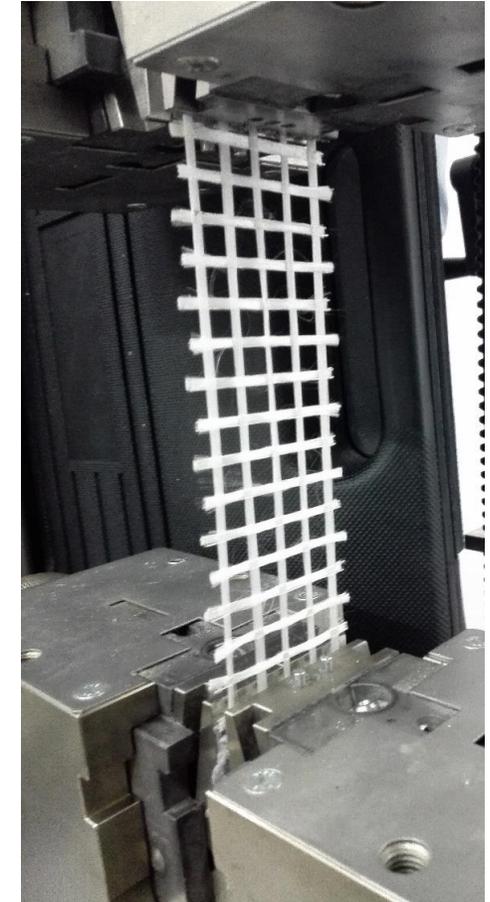
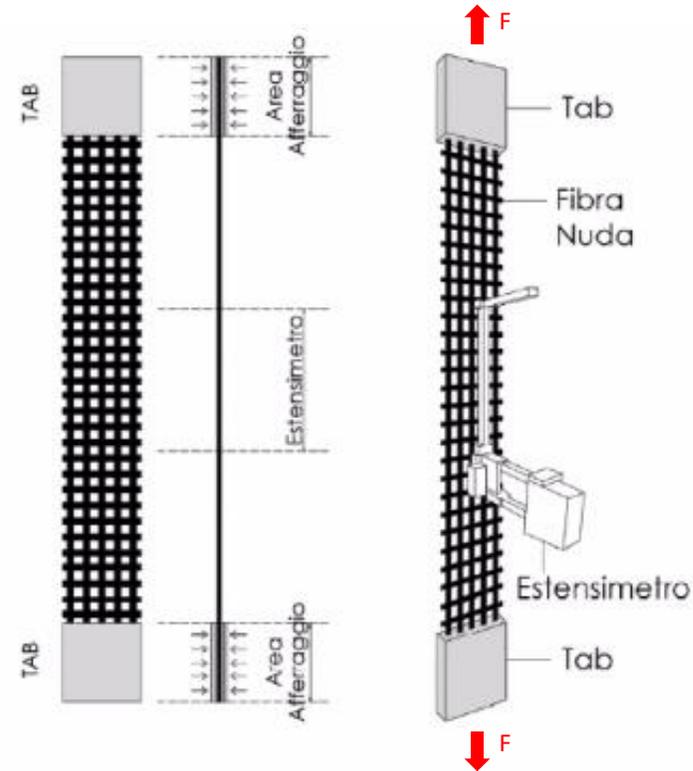


$f_{c,mat}$  resistenza a compressione della matrice/malta



## PROPRIETA' MECCANICHE FRCM

Prove di trazione sulla  
rete/tessuto



$\sigma_{uf}$

Resistenza a Trazione (Valore caratteristico)

$E_f$

Modulo Elastico (Valore medio)

$\varepsilon_{uf} = \sigma_{uf} / E_f$

Deformazione Ultima

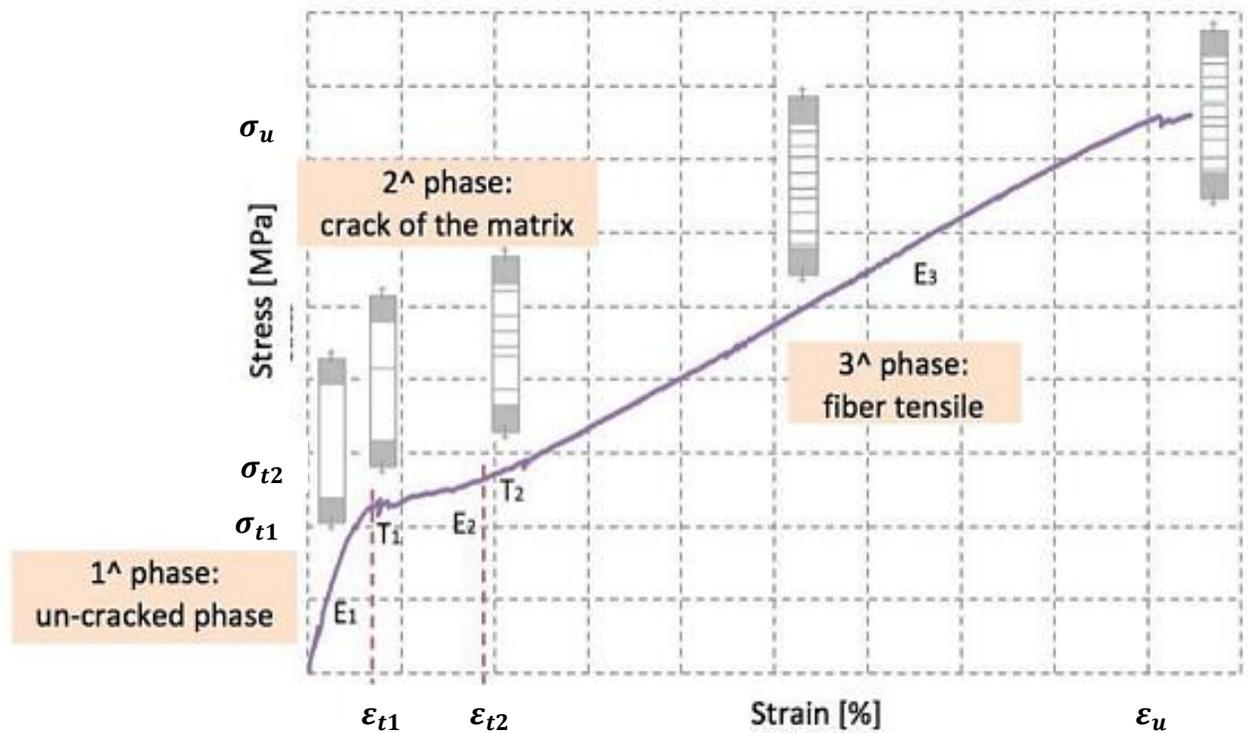
## Prove di trazione sul sistema FRCCM



## PROPRIETA' MECCANICHE FRCCM

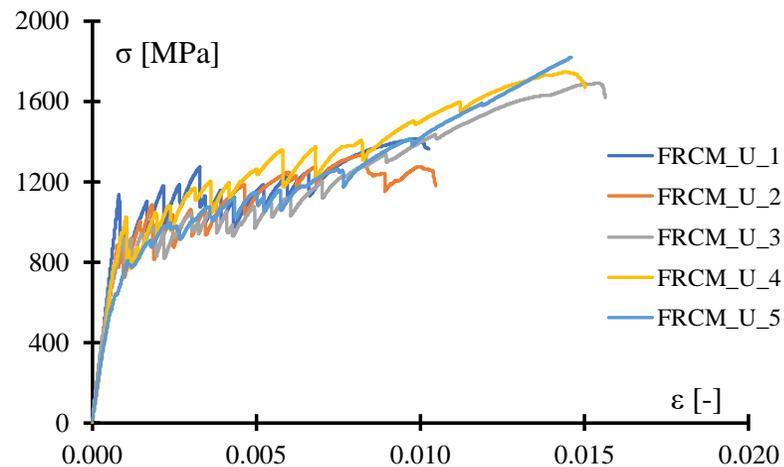
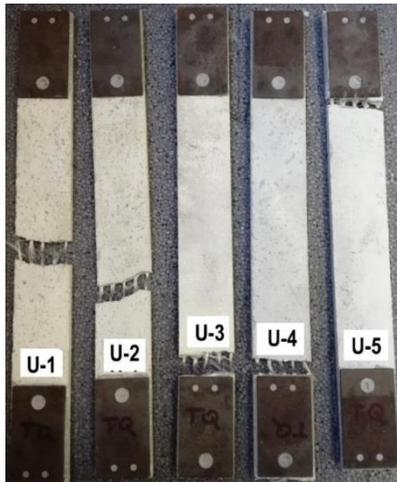


## Legame Costitutivo

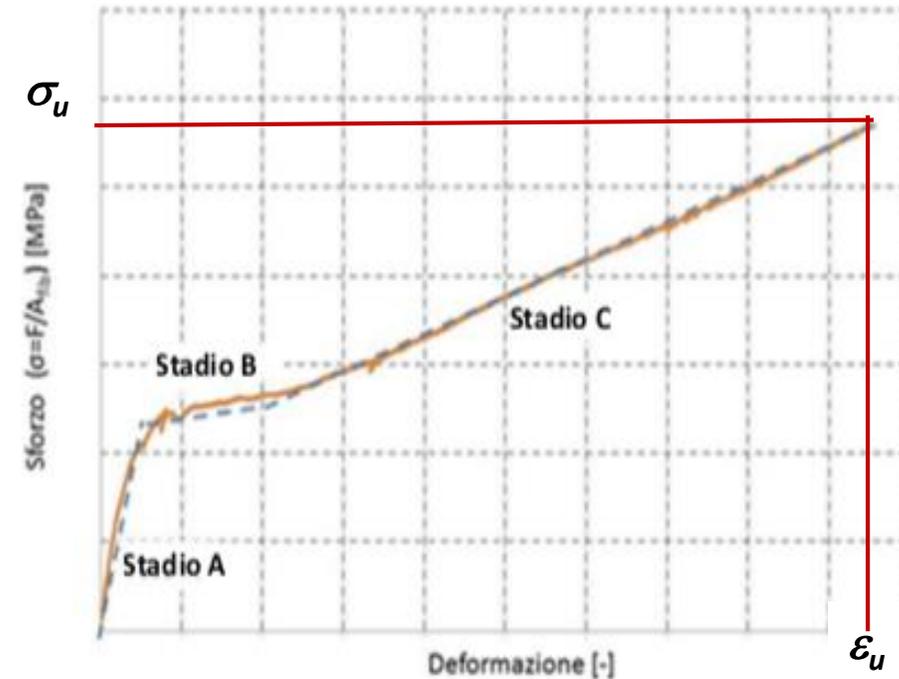


## PROPRIETA' MECCANICHE FRCCM

### Prove di trazione sul sistema FRCCM

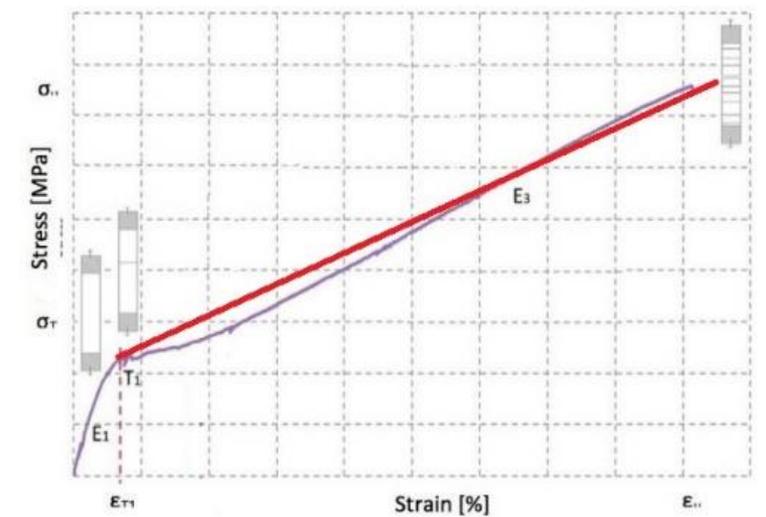
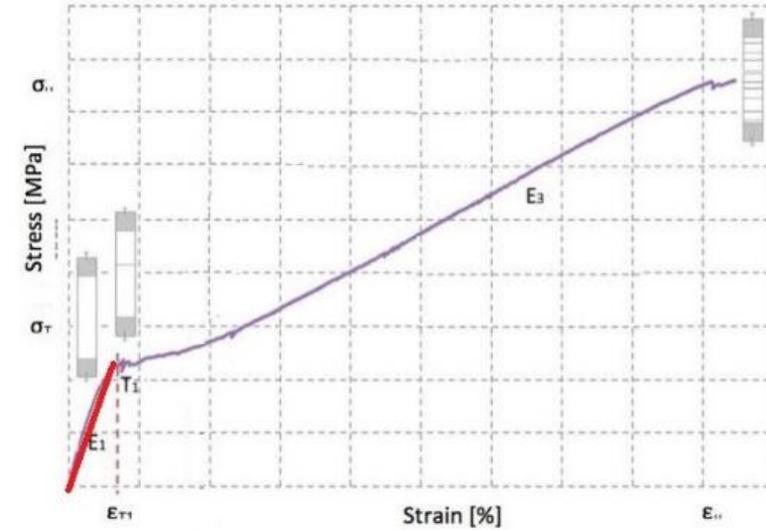
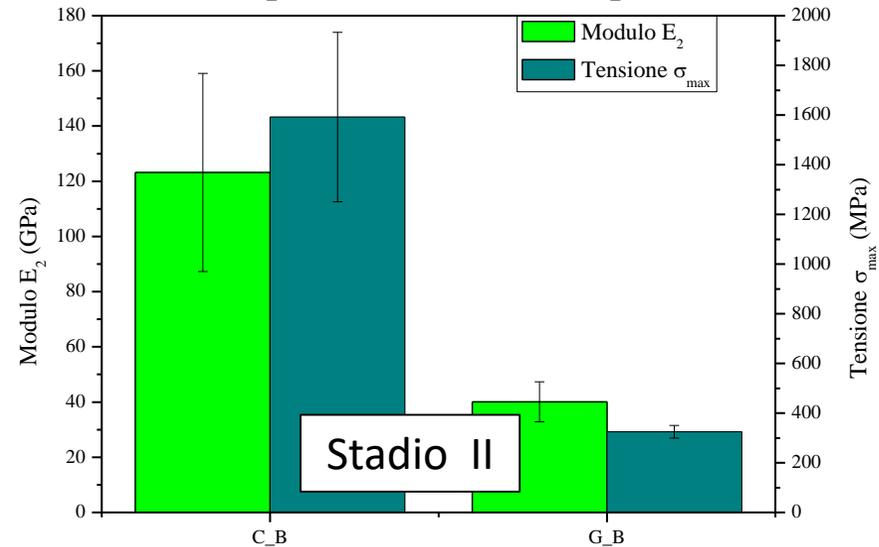
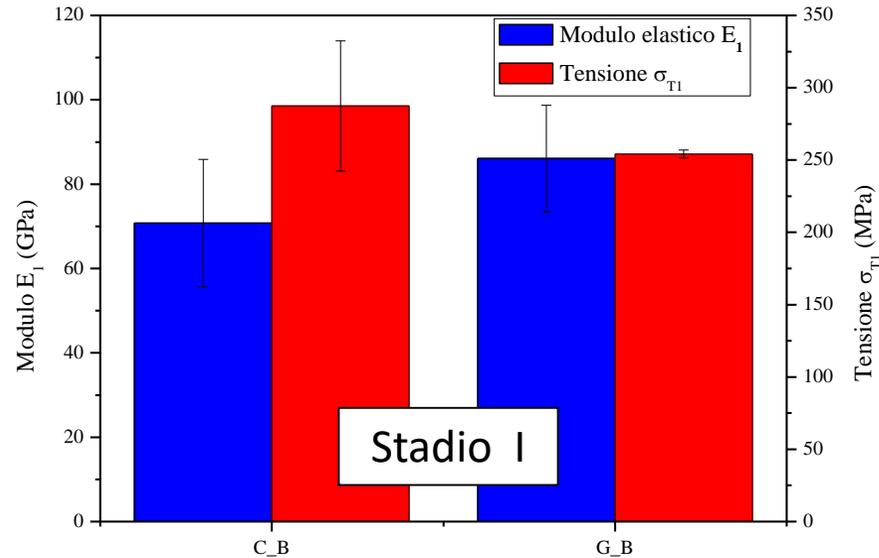


- Modulo Elastico del primo tratto (stadio A),  $E_1$  (Valore Medio)
- Tensione Ultima  $\sigma_u$  (Valore Caratteristico)
- Deformazione Ultima  $\epsilon_u$



## Prove di trazione sul sistema FRCM

## PROPRIETA' MECCANICHE FRCM



C\_B: Composito FRCM con rinforzo in Carbonio

G\_B: Composito FRCM con rinforzo in Vetro



UNIVERSITÀ DEL SALENTO

## PROBLEMA DI INTERFACCIA

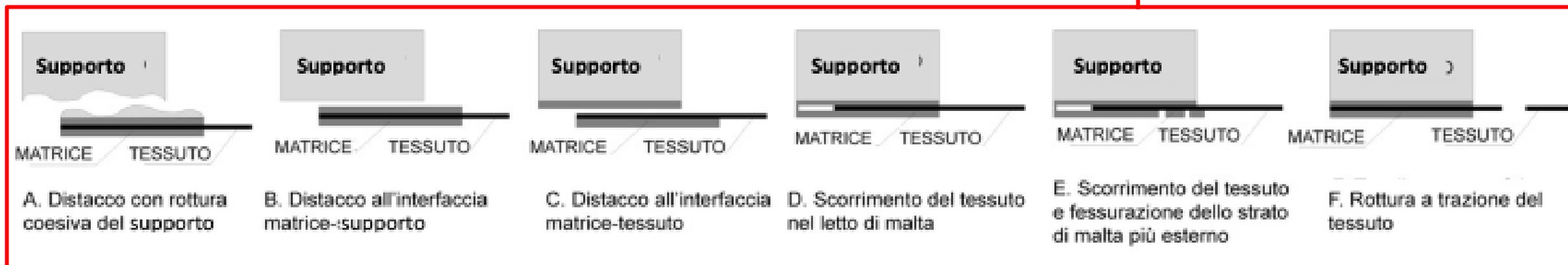
## PROPRIETA' MECCANICHE FRCCM

Per caratterizzare meccanicamente un composito FRCCM non è sufficiente il legame costitutivo ottenuto dalle prove di trazione



### INFLUENZA DELL'ADERENZA

Il comportamento dipende dai molteplici **meccanismi di crisi** che possono verificarsi **all'interfaccia substrato-FRCCM**



## PROBLEMA DI INTERFACCIA

## PROPRIETA' MECCANICHE FRCM



RILEM TC 250-CSM  
Composites for the Sustainable  
Strengthening of Masonry

Materials and Structures (2018) 51:95  
<https://doi.org/10.1617/s11527-018-1216-x>

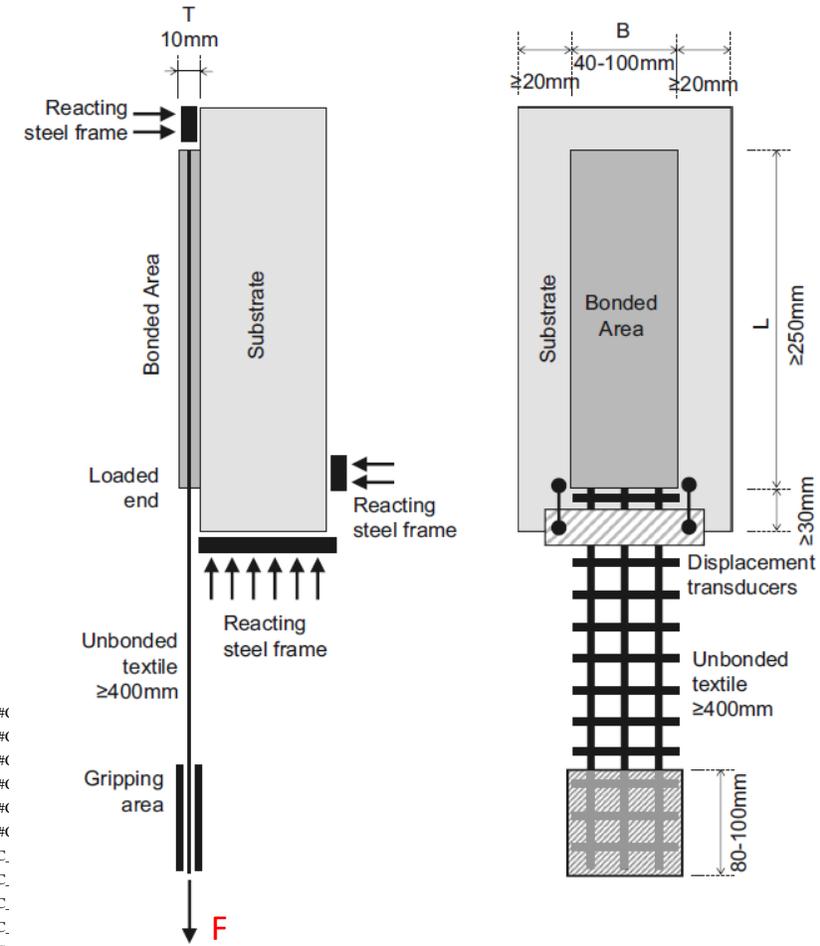
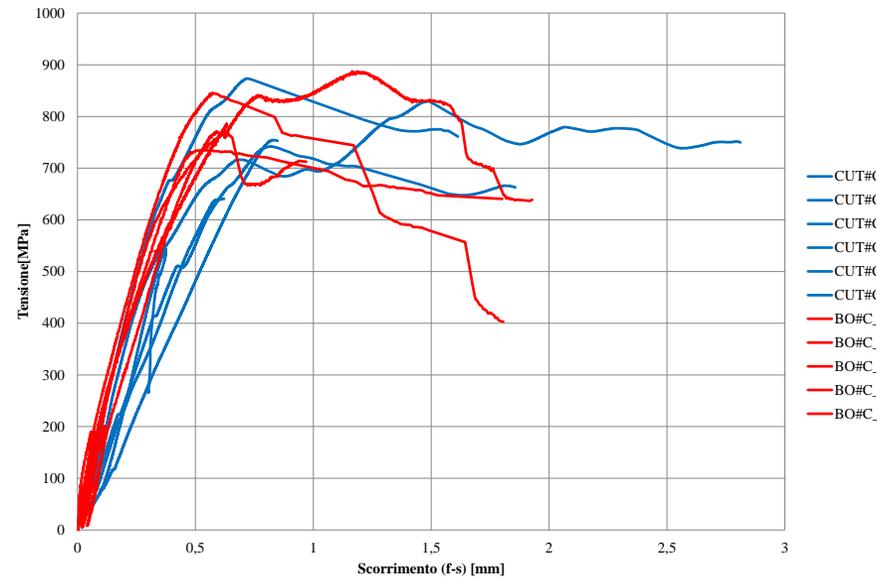


RILEM TECHNICAL COMMITTEE

### Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization

Gianmarco de Felice · Maria Antonietta Aiello · Carmelo Gaggegi · Francesca Ceroni · Stefano De Santis · Enrico Garbin · Natalino Gattesco · Lukasz Hojdis · Piotr Krajewski · Arkadiusz Kwiecień · Marianna Leone · Gian Piero Lignola · Claudio Mazzotti · Daniel Oliveira · Corina Papanicolaou · Carlo Poggi · Thanasis Triantafyllou · Maria Rosa Valluzzi · Alberto Viskovic

Received: 7 February 2018 / Accepted: 15 June 2018 / Published online: 9 July 2018  
© RILEM 2018



## PROPRIETA' MECCANICHE FRCCM

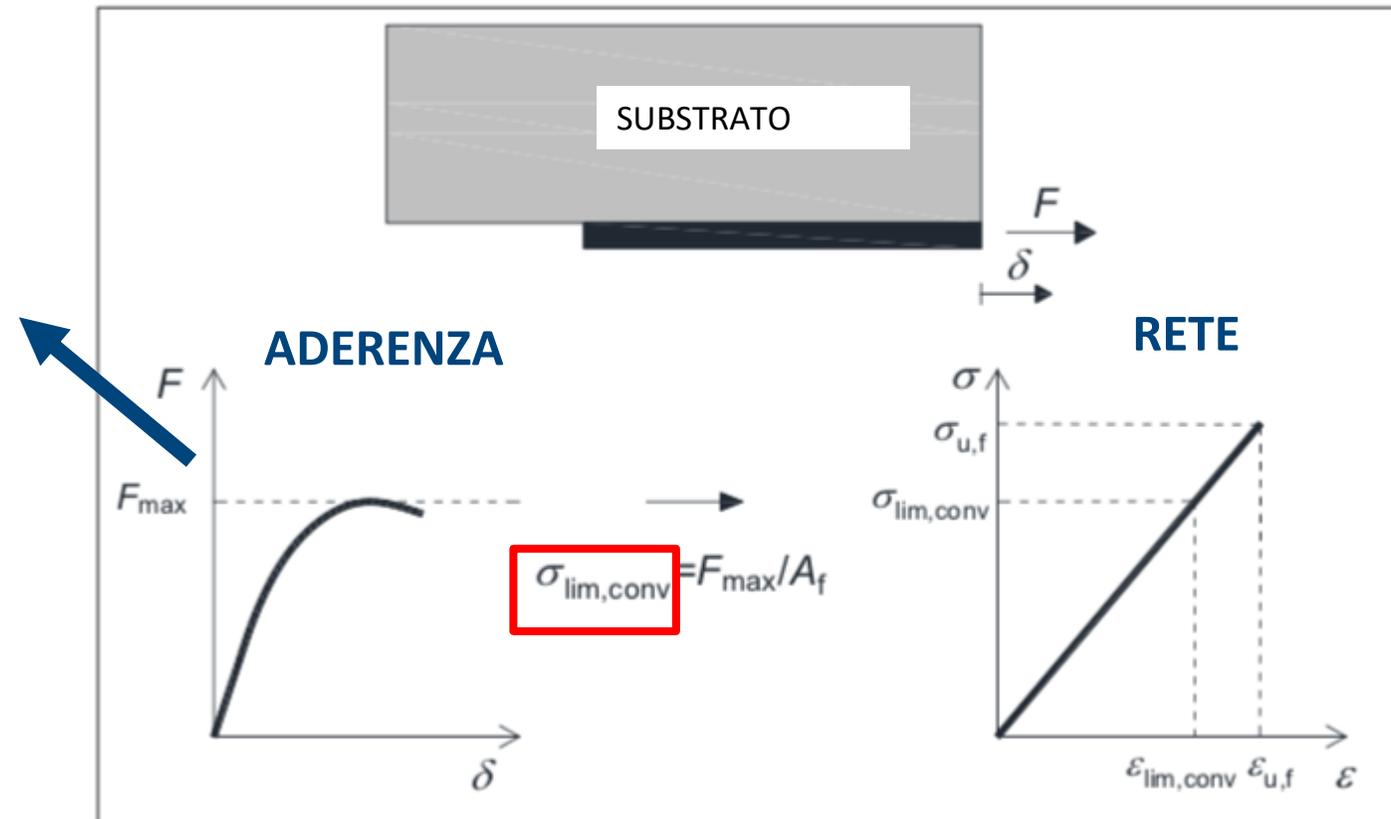
### LA TENSIONE LIMITE CONVENZIONALE

#### PROBLEMA DI INTERFACCIA

- Al fine di evitare la crisi per aderenza all'estremità saranno utilizzate le seguenti proprietà meccaniche del composito FRCCM:  $\sigma_{lim,conv}$ ,  $\varepsilon_{lim,conv}$
- Al fine di evitare la crisi di aderenza intermedia saranno utilizzate le seguenti proprietà :

$$\sigma^{(\alpha)}_{lim,conv} = \alpha \sigma_{lim,conv}$$

dove  $\alpha=1.0-1.5$



## PROPRIETA' MECCANICHE FRCCM

**OBIETTIVO:** valutazione delle prestazioni a trazione di compositi FRCCM multi-strato.

Parametri analizzati:

- Numero di strati di rete (1, 2 e 3)
- Distanza tra gli strati di rete (3, 5 e 10 mm)

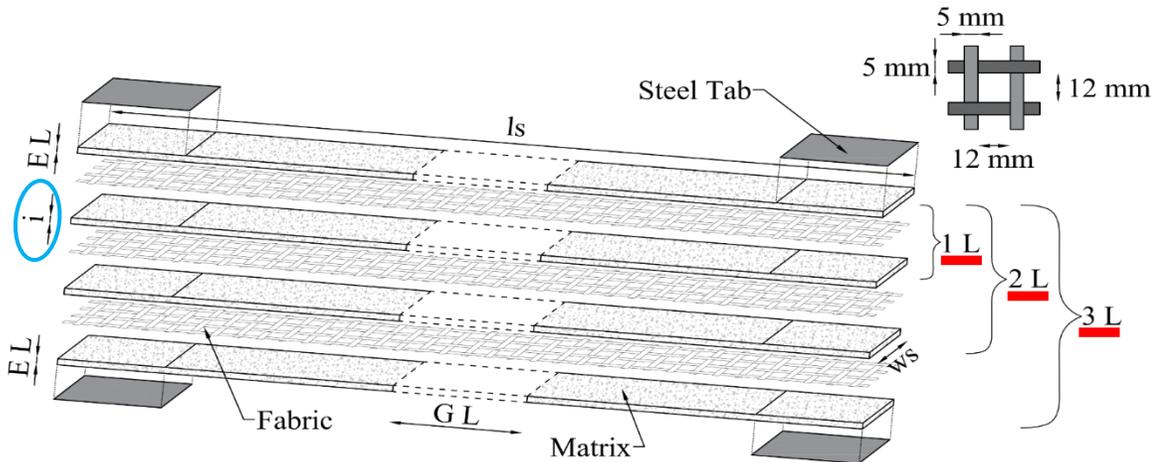


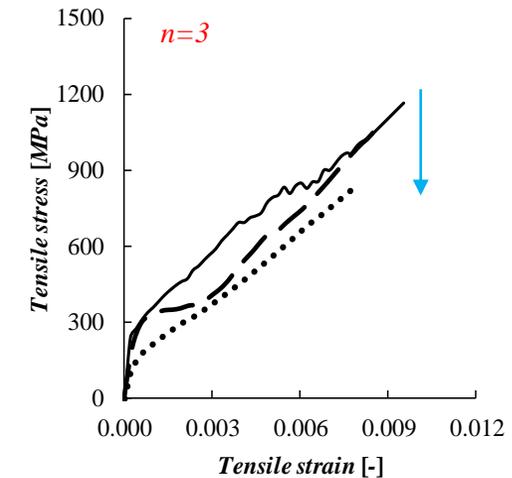
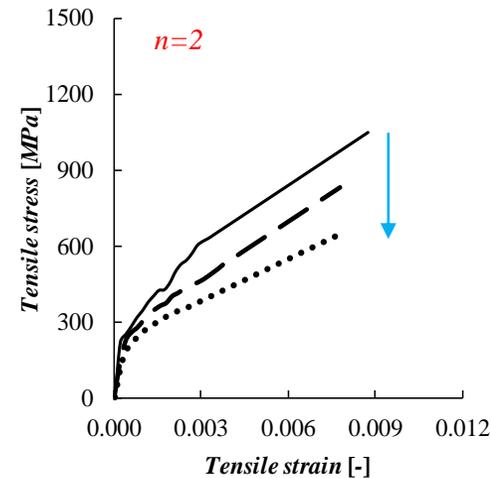
Table 1. Specimens layout.

Label	#	$w_s$ [mm]	$l_s$ [mm]	$n$	$EL$ [mm]	$i$ [mm]	$GL$ [mm]
FRCCM-1				1	5	-	
FRCCM-2-3				2	3	3	
FRCCM-3-3				3	3	3	
FRCCM-2-5	9	60	600	2	5	5	100
FRCCM-3-5				3	5	5	
FRCCM-2-10				2	10	10	
FRCCM-3-10				3	10	10	

Prove di trazione su compositi FRCCM realizzati con rete di vetro

## PROPRIETA' MECCANICHE FRCM

### Effetto del inter-rete ( $i$ )



a)

b)

- .....  $i = 3\text{mm}$
- $i = 5\text{mm}$
- $i = 10\text{mm}$

Parametri analizzati :

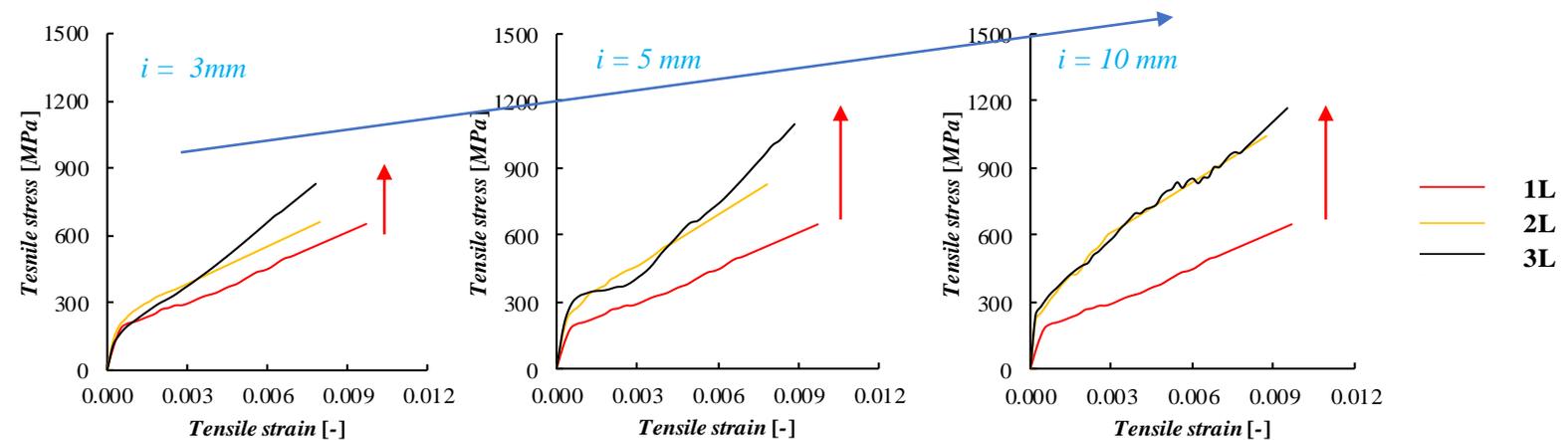
$n$  = Numero di strati di rete (1, 2 e 3)

$i$  = Distanza tra gli strati di rete (3, 5 e 10 mm)

Quando la **spaziatura dei tessuti diminuisce**, anche la **resistenza a trazione dell'FRCM diminuisce** sia nel caso di configurazione a **2** che a **3 strati**, anche se **con proporzioni diverse**.

## PROPRIETA' MECCANICHE FRCM

### Effetto del del numero di strati



Parametri analizzati :

$n$  = Numero di strati di rete (1, 2 e 3)

$i$  = Distanza tra gli strati di rete (3, 5 e 10 mm)

- all'aumentare del numero di strati ( $n$ ) si ha una maggiore resistenza a trazione;
- il divario tra la resistenza a trazione nel caso di 2 e 3 strati si riduce quando la distanza tra gli strati di rete ( $i$ ) aumenta.

## PROBLEMA DI INTERFACCIA



**OBIETTIVO:** definizioni di **relazioni di progetto**

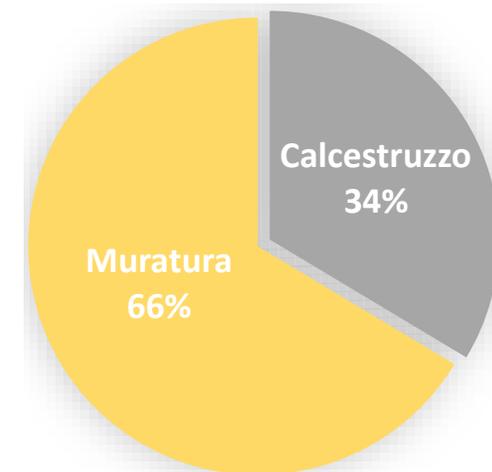
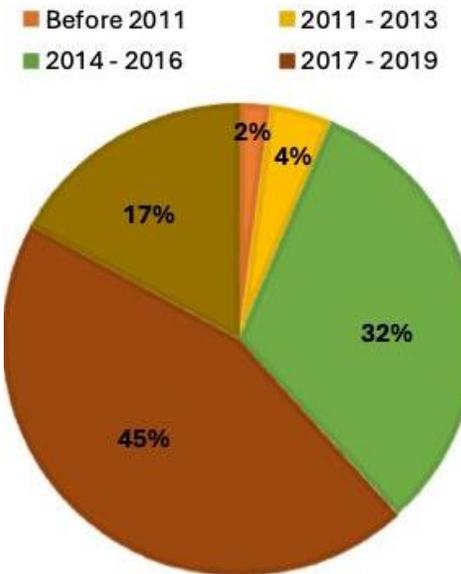


Parametri analizzati :

- **caratteristiche meccaniche e geometriche del substrato e del rinforzo**
- **tipo di test**

**Database di prove sperimentali.**

**1276 risultati**



**#429 Calcestruzzo**

**#847 Muratura**

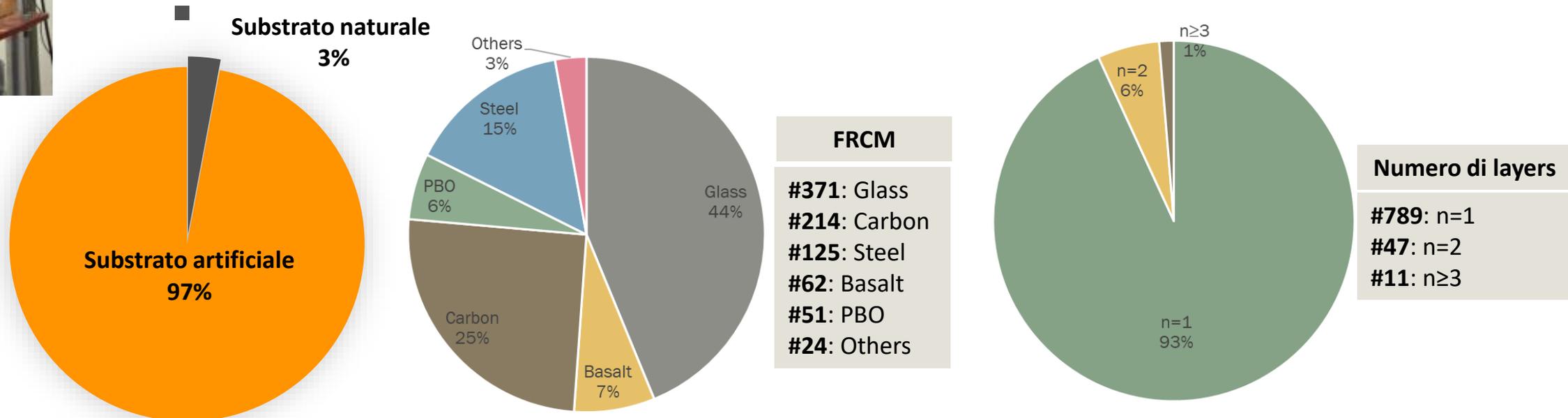
## PROBLEMA DI INTERFACCIA



**OBIETTIVO:** definizioni di **relazioni di progetto**



### Database di prove sperimentali

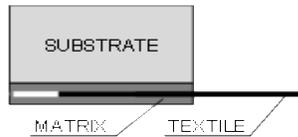




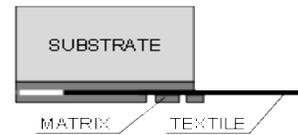
## PROBLEMA DI INTERFACCIA

**OBIETTIVO:** definizioni di **relazioni di progetto**

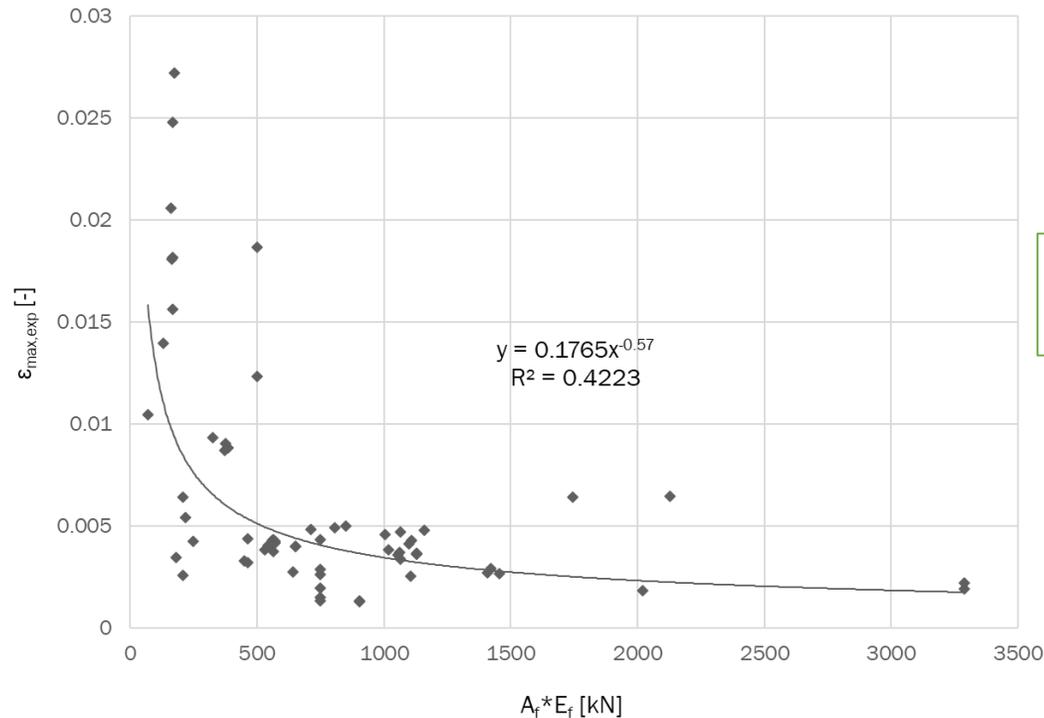
Analisi del Database – Suddivisione per modalità di crisi:  
Crisi per Scorrimento



D. Textile slippage within the mortar matrix



E. Textile slippage within the matrix with cracking of the outer layer of mortar

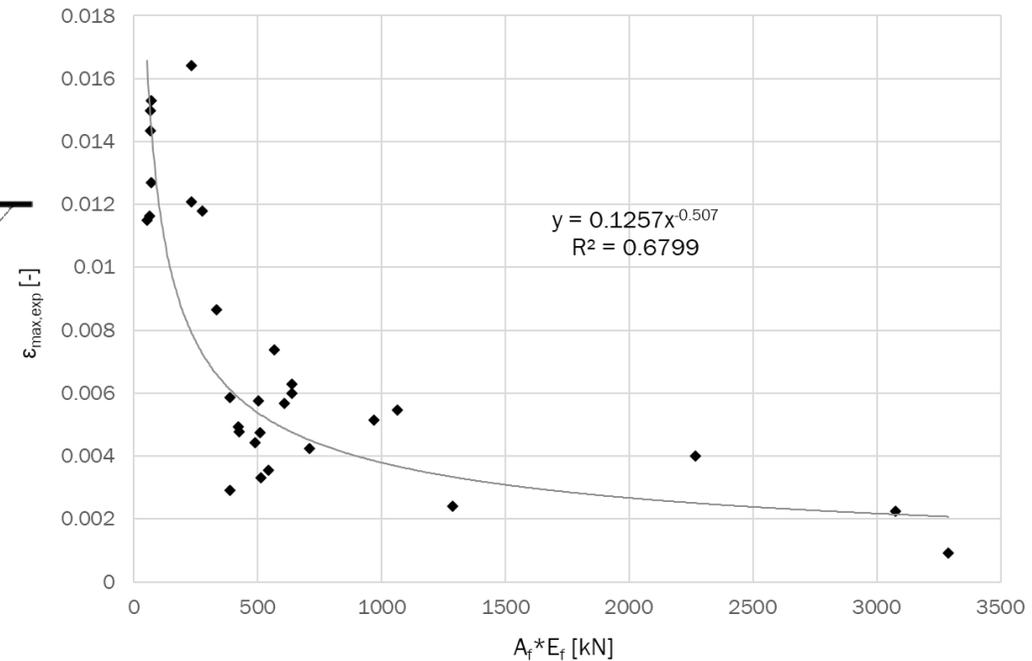
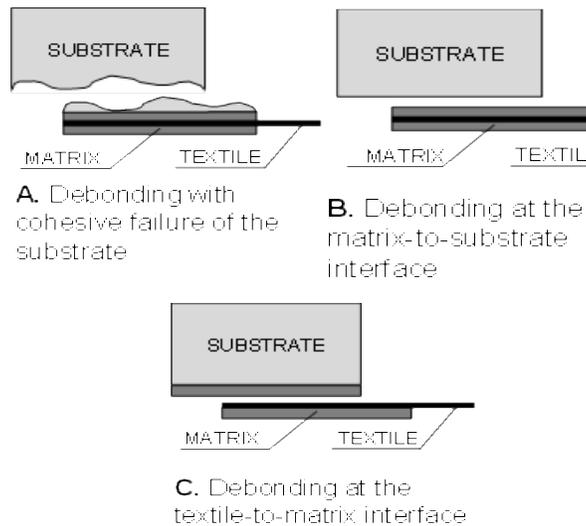


Andamento parabolico  
con  $R^2=0,42$



**OBIETTIVO:** definizioni di **relazioni di progetto**

## Analisi del Database – Suddivisione per modalità di crisi: Crisi per Debonding



Andamento parabolico  
con  $R^2=0,68$

## PROBLEMA DI INTERFACCIA



**OBIETTIVO:** definizioni di **relazioni di progetto**



Composites Part B 143 (2018) 230–242



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Composites Part B

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/compositesb](http://www.elsevier.com/locate/compositesb)



Deformazione massima funzione della **Rigidità assiale** e  
della **Resistenza a Trazione del substrato**

$$\epsilon_{max,th} = \alpha \cdot (E_f * A_f)^\beta \cdot f_{t,s}^\gamma$$

Funzione della resistenza a  
compressione del substrato

Design provisions for FRCC systems bonded to concrete and masonry  
elements

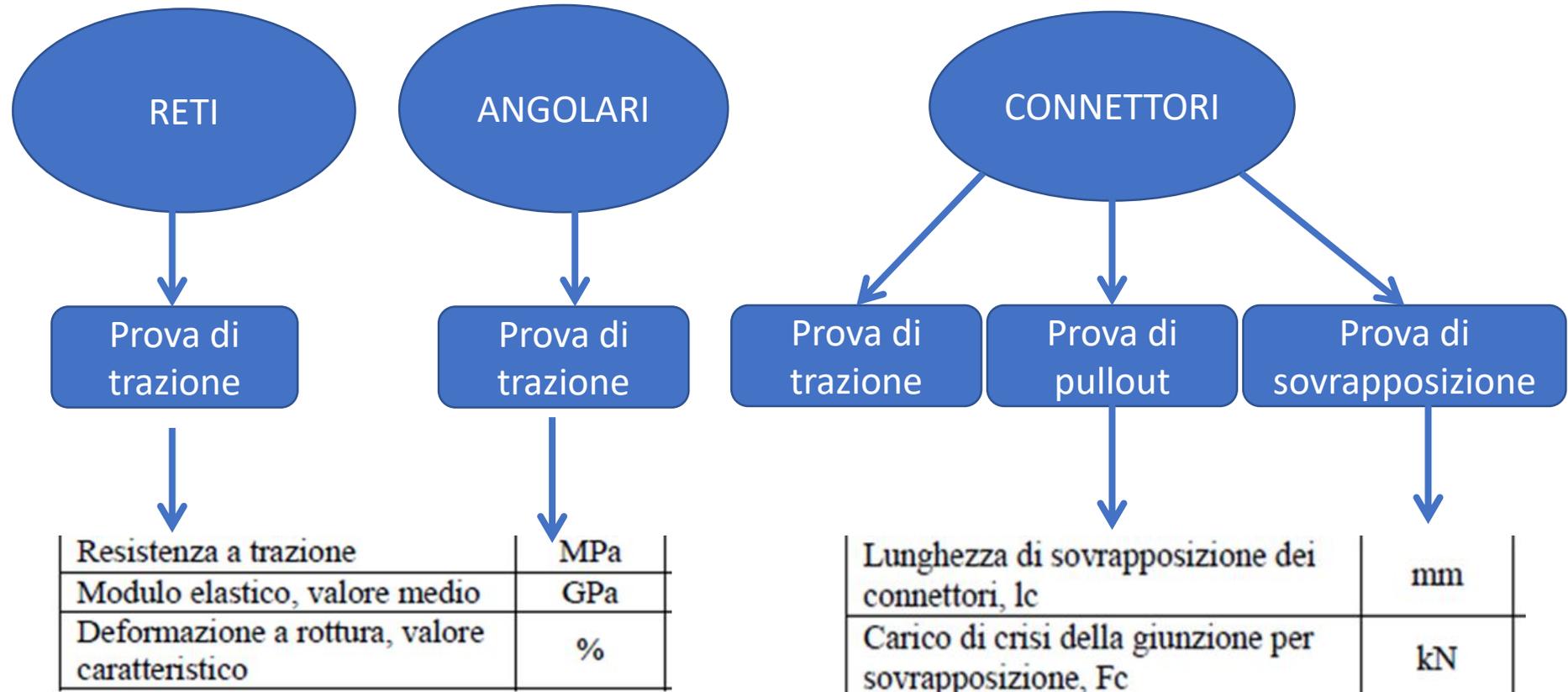
F. Ceroni\*, P. Salzano

Department of Engineering, University of Naples "Parthenope", Naples, Italy



## PROPRIETÀ MECCANICHE CRM

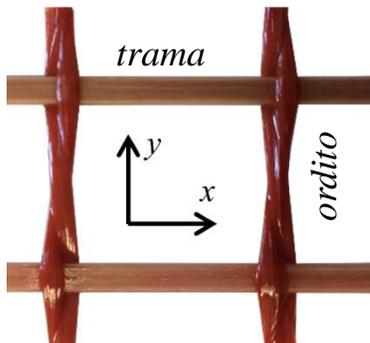
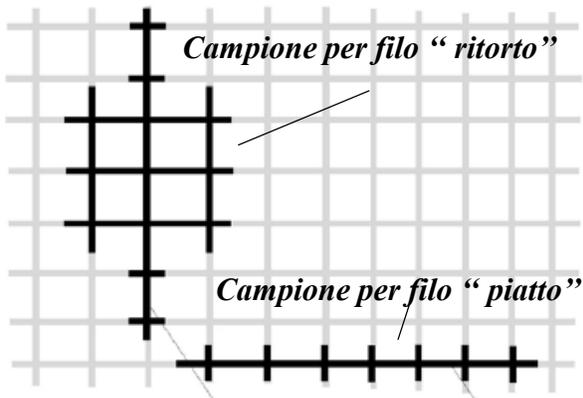
### COMPONENTI IN FRP



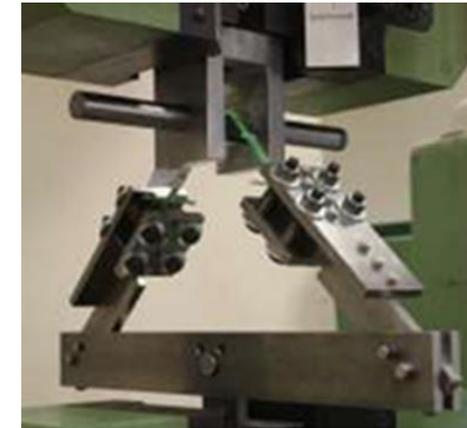
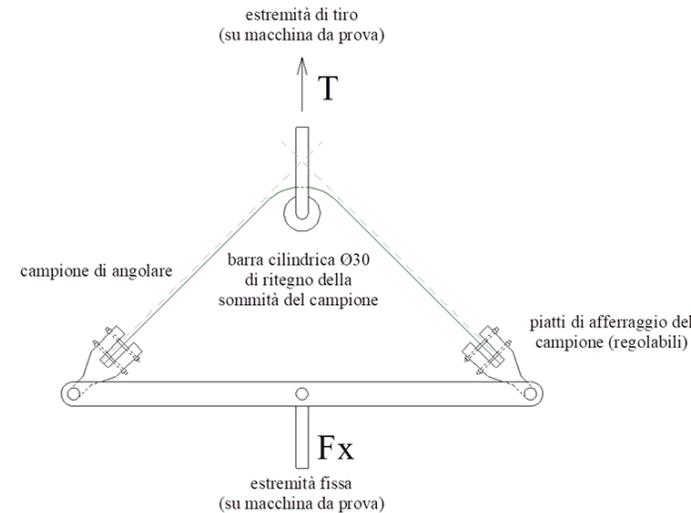
## PROPRIETÀ MECCANICHE CRM

### COMPONENTI IN FRP

#### Prove di trazione sulla rete in FRP



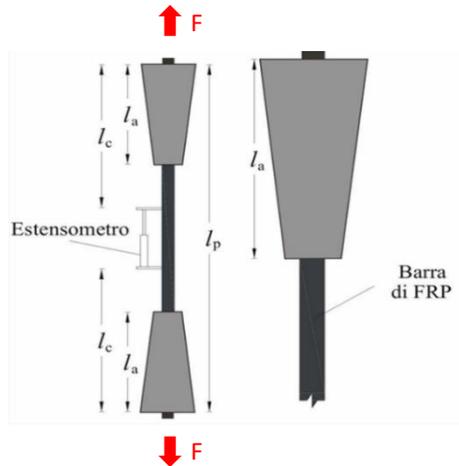
#### Prove di trazione sugli angolari



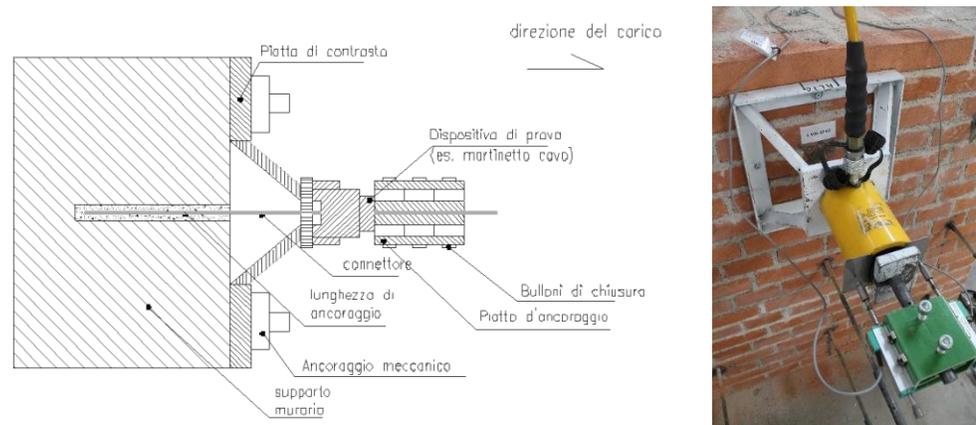
Proprietà	Unità di Misura	Valore		Metodo di prova Norma di riferimento
		Minimo valore tra le due direzioni		
		Medio	Caratteristico	
Resistenza a trazione	MPa			ISO 10406-1:2015 Questa Linea Guida
Modulo elastico, valore medio	GPa			
Deformazione a rottura, valore caratteristico	%			

## PROPRIETÀ MECCANICHE CRM

### Prove di trazione sui connettori

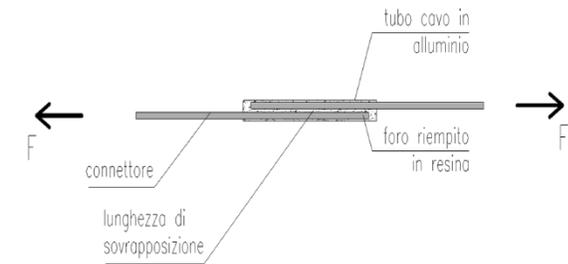


### Prove di estrazione dei connettori

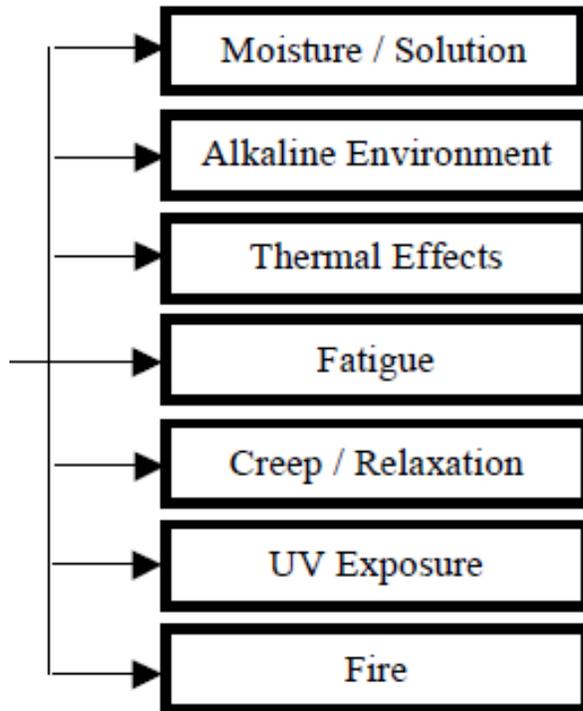


Proprietà	Unità di Misura	Valore		Metodo di prova Norma di riferimento
		Medio	Caratteristico	
Resistenza a trazione	MPa			ISO 10406-1:2015 Questa Linea Guida
Modulo elastico, valore medio	GPa			
Deformazione a rottura, valore caratteristico	%			
Lunghezza di ancoraggio, $L_{anc}$	mm			Questa Linea Guida
Forza di estrazione dei connettori (valore medio), $F_{anc}$	kN			Questa Linea Guida
Lunghezza di sovrapposizione dei connettori, $l_c$	mm			Questa Linea Guida
Carico di crisi della giunzione per sovrapposizione, $F_c$	kN			Questa Linea Guida

### Prova di giunzione per sovrapposizione dei connettori



## COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE: DURABILITÀ



**FIBRA, RESINA  
INTERFACCIA FIBRA-RESINA  
COMPOSITO  
ADERENZA COMPOSITO-SUBSTRATO  
STRUTTURA**

**PROCEDURA DI PROVA  
ACCELERATE? QUALI?**

**MODELLAZIONE  
RELAZIONI PROGETTUALI**

## COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE: DURABILITÀ

### Approccio al problema: Condizioni di Esposizione – Danneggiamento

Qualificazione - Decadimento delle proprietà meccaniche

ACCETTABILE

~~NON ACCETTABILE~~

Condizione di esposizione	Tipo di fibra	$\eta_a$
Interna	Vetro A.R./Basalto	0.90
	Arammide/PBO	0.90
	Acciaio UHTSS	0.90
	Carbonio	0.90
Esterna	Vetro A.R./Basalto	0.80
	Arammide/PBO	0.80
	Acciaio UHTSS	0.80
	Carbonio	0.80
Ambiente aggressivo	Vetro A.R./Basalto	0.70
	Arammide/PBO	0.70
	Acciaio UHTSS	0.70
	Carbonio	0.80

Tabella 3.1 – Fattori di conversione ambientale.

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m}$$



RESISTENZA/DEFORMAZIONE DI PROGETTO

## COMPORAMENTO A LUNGO TERMINE: DURABILITÀ

### ...PER LA QUALIFICAZIONE



## Trattamenti principali (per FRCCM/CRM)

«...La prova si ritiene superata se non viene rilevata alcuna alterazione superficiale ed inoltre i valori della tensione di rottura e del modulo elastico del campione assoggettato ad invecchiamento artificiale non risultano inferiori all'85% dei corrispondenti valori del campione non invecchiato per il caso di durata dell'invecchiamento di 1000 ore, ovvero all'80% nel caso di durata dell'invecchiamento di 3000 ore.»

- **Cicli di gelo e disgelo:**  
20 cicli -> (1<sup>a</sup> fase)  $T = -18^{\circ}\text{C}$  per  $t \geq 4\text{h}$ ; (2<sup>a</sup> fase)  $UR \geq 90\%$  e  $T = 38^{\circ}\text{C}$  per  $t = 12\text{h}$
- **Ambiente umido**  
 $UR \geq 90\%$ ;  $T = 38^{\circ}\text{C}$  per  $t_1 = 1000\text{h}$ ,  $t_2 = 3000\text{h}$
- **Ambiente salino**  
Immersione a  $T = 23^{\circ}\text{C}$  per  $t_1 = 1000\text{h}$ ,  $t_2 = 3000\text{h}$
- **Ambiente alcalino**  
Immersione a  $\text{pH} \geq 12.5$ ,  $T = 23^{\circ}\text{C}$ , per  $t_1 = 1000\text{h}$ ,  $t_2 = 3000\text{h}$
- **Sollecitazioni Termiche**  
Prove di trazione su FRCCM in temperatura, Temperatura di transizione vetrosa resine utilizzate

## COMPORTAMENTO A LUNGO TERMINE: DURABILITÀ

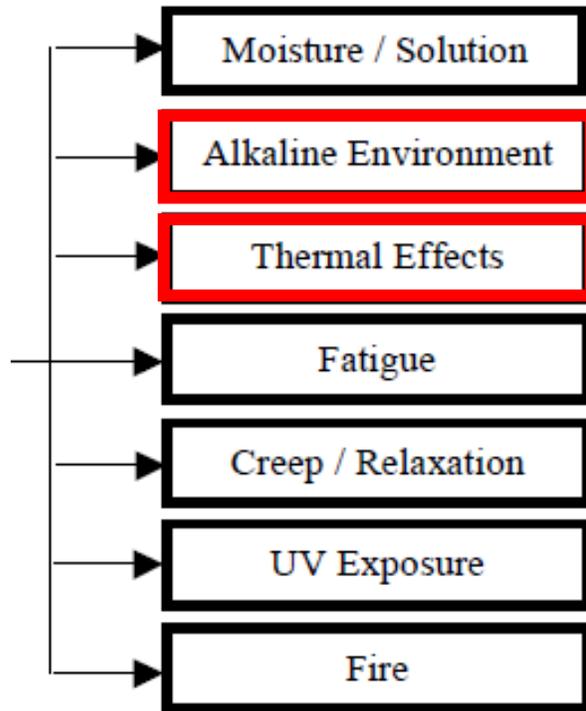


Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale

Progetto DPC-ReLUIS



PROTEZIONE CIVILE  
Presidenza del Consiglio dei Ministri  
Dipartimento della Protezione Civile



### TC 290-IMC

DURABILITY OF INORGANIC MATRIX COMPOSITES USED FOR STRENGTHENING OF MASONRY CONSTRUCTIONS

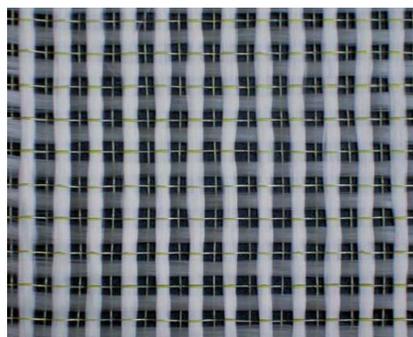


**PROTOCOLLI DI PROVA:** soluzioni adottate, livelli di temperatura, durata dell'esposizione  
**RESISTENZA/DEFORMAZIONE DI PROGETTO**  
**DURABILITA' DELL'ADERENZA**  
**DURABILITA' STRUTTURALE**

## DURABILITÀ IN AMBIENTE ALCALINO

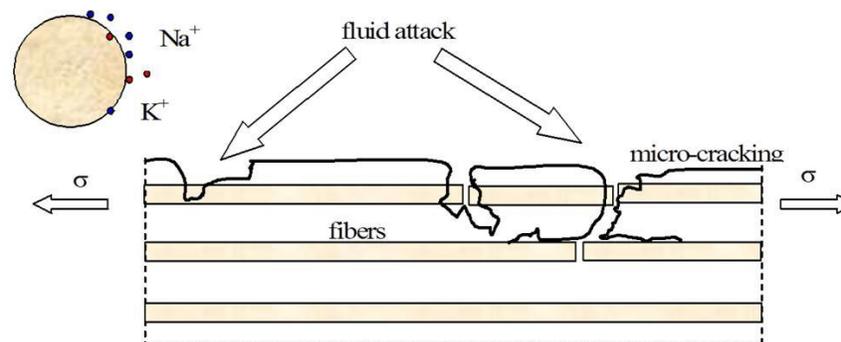
### FRCM

*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*



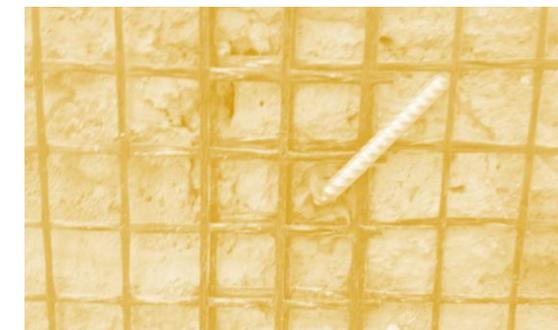
#### RETE SECCA/IMPREGNATA

Le **fibre**, nella configurazione a rete, vengono **immerse**, in situ, nella **matrice inorganica**



### CRM

*Composite Reinforced Mortar*



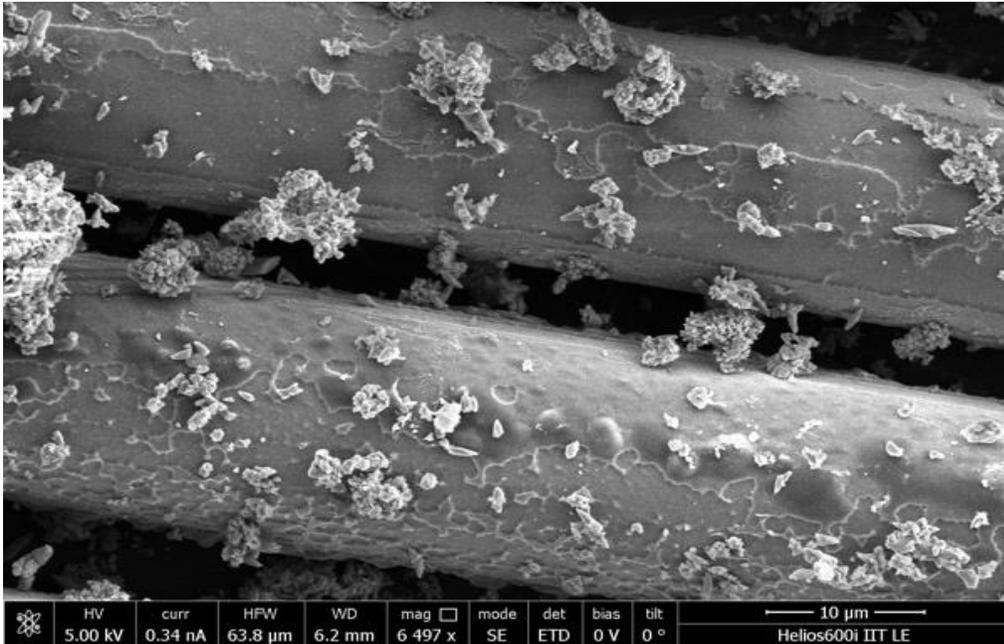
#### RETI PRE-FORMATE IN COMPOSITO

La rete in FRP viene immersa in situ in una **malta**

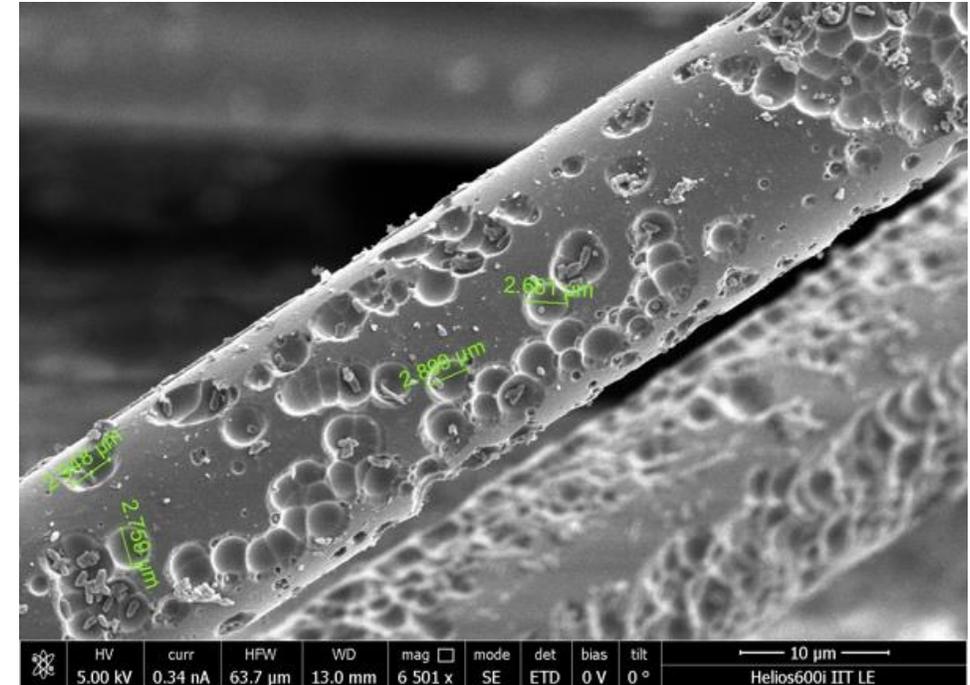
Le fibre vengono utilizzate in combinazione con una matrice che presenta un'**alcalinità elevata!**  
I valori di pH variano tipicamente da 12,0 a 13,5.

**deterioramento a lungo termine delle proprietà chimiche, fisiche e meccaniche dei costituenti**

## DURABILITÀ IN AMBIENTE ALCALINO

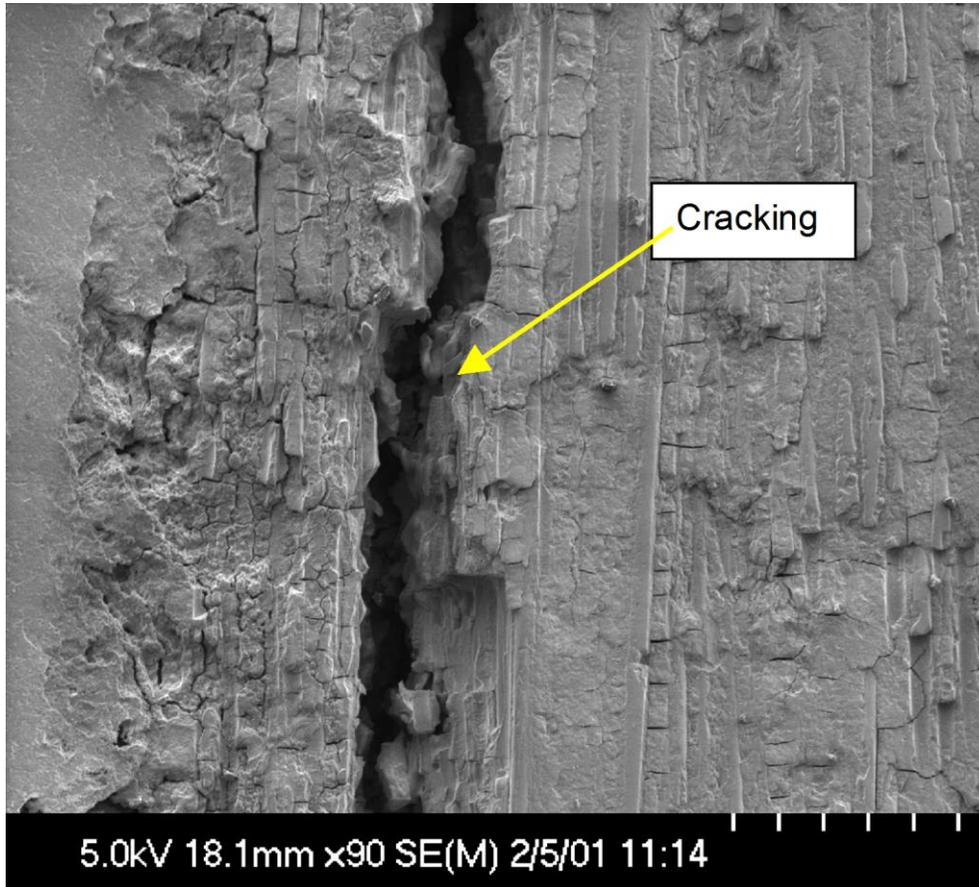


**Deposizione superficiale di ioni alcalini su fibre di vetro AR dopo esposizione ad ambiente alcalino (A=malta di calce) a 40°C dopo 3000 ore. Non c'è danneggiamento.**



**Effetto del danneggiamento superficiale per attacco in ambiente alcalino (A=malta di calce) a 40°C dopo 2000 ore su fibre di vetro E**

## DURABILITÀ IN AMBIENTE ALCALINO



La scelta della resina nelle reti di rinforzo FRP è fondamentale per la tenuta meccanica del composito.

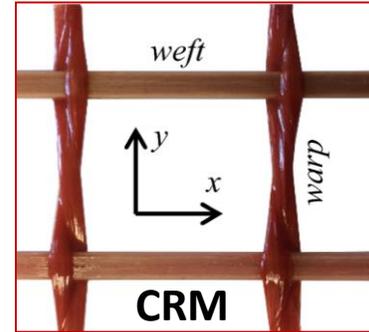
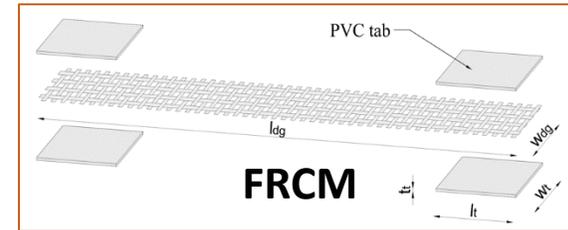
**Una resina che si danneggia risulta poco idonea a trasmettere e distribuire in forma omogenea gli sforzi alle fibre di rinforzo. Ciò causa una sensibile riduzione delle proprietà finali del composito.**

Pertanto, anche una fibra molto resistente chimicamente (ad es. carbonio) all'interno di una matrice degradata, porterebbe ad un composito di ridotte proprietà meccaniche.

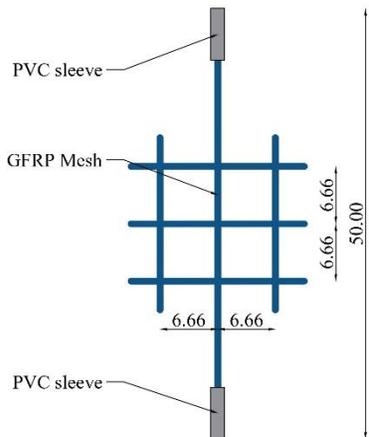
## DURABILITÀ IN AMBIENTE ALCALINO



Il comitato tecnico internazionale RILEM TC 290-IMC a partire dal 2020 ha condotto una vasta indagine sperimentale per lo studio del comportamento di rinforzi FRCM e CRM in ambienti alcalini, includendo anche sistemi realizzati con rinforzi di fibre naturali.

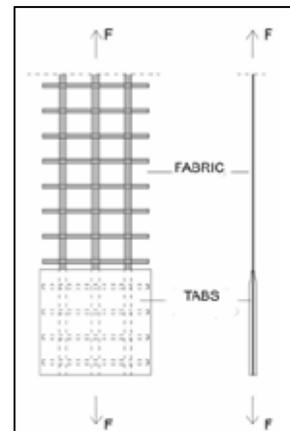


In tutto 26 istituzioni di ricerca (Università, Istituti e Centri di ricerca, produttori di materiali) hanno collaborato per la realizzazione del programma di ricerca congiunto, che include anche la stesura di un libro di stato dell'arte sulla tematica del comportamento a lungo termine dei materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica.



Prove di trazione su CRM

4 sistemi Glass CRM

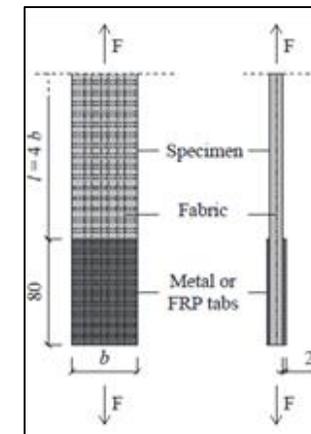


Prove di trazione su  
rete di rinforzo allo stato  
Secco

7 sistemi Glass FRCM  
6 sistemi FRCM fibre  
Naturali

1 sistema Basalt

1 sistema Carbon FRCM



Prove di trazione  
Su FRCM

7 sistemi Glass FRCM  
6 sistemi FRCM fibre  
Naturali

1 sistema Basalt

1 sistema Carbon FRCM

## DURABILITÀ IN AMBIENTE ALCALINO

I materiali sono stati sottoposti a cicli di invecchiamento utilizzando:

- Ambiente acquoso e 3 diverse soluzioni alcaline

- Environment A – simulazione malta di calce  
( $T_1 = 23^\circ\text{C}$  &  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ ), 0.16%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Environment B – simulazione cemento Portland  
( $T_1 = 23^\circ\text{C}$  &  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ ),  
0.16%  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ; 1% NaOH ; 1,4% KOH



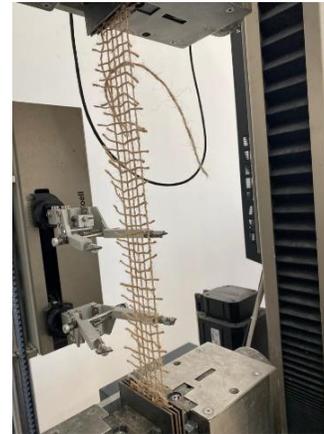
- 3 diverse temperature

$$T_1=23^\circ, T_2=40^\circ, T_3=60^\circ$$

- 3 diversi periodi di esposizione

1000 hr; 2000 hr; 3000hr

Textiles



FRCM

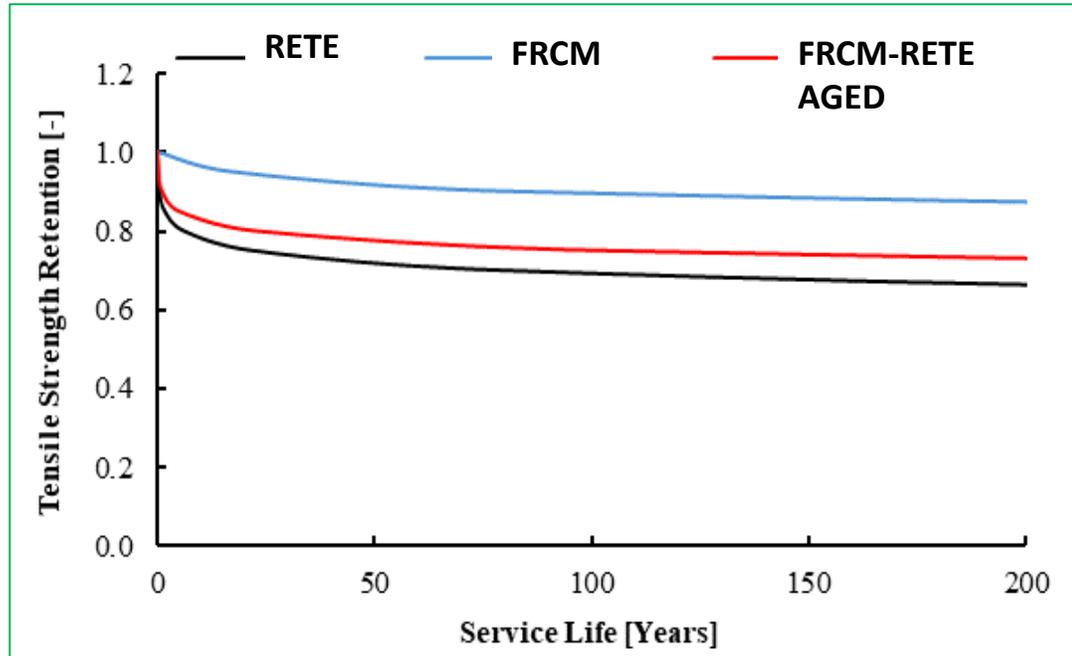


FRP Grid



- CAMPIONI FRCM CON RETE CONDIZIONATA
- CAMPIONI FRCM SOLO IMMERSI IN ACQUA a  $40^\circ\text{C}$

## DURABILITÀ IN AMBIENTE ALCALINO



*Resistenza residua in funzione del tipo di campione*

**Curva azzurra: Campioni di FRCM condizionati in ambiente alcalino A (malta di calce) alla temperatura  $T=23^{\circ}\text{C}$**

**Curva rossa: Campioni FRCM realizzati con rete di fibra già precedentemente condizionata in ambiente alcalino A (malta di calce) alla temperatura  $T=23^{\circ}\text{C}$**

**Curva nera: Campioni di fibra secca AR-glass condizionati in ambiente alcalino A (malta di calce) alla temperatura  $T=23^{\circ}\text{C}$**

## DURABILITÀ: EFFETTO DELLA TEMPERATURA

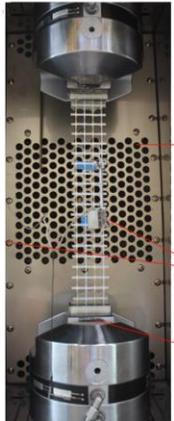


- Effetti delle variazioni di temperatura sui sistemi FRCM
- Messa a punto di metodi per prove di aderenza in temperatura, attualmente non previste dalle Linee Guida
- Leggi di degrado delle proprietà meccaniche con la temperatura

Coupon FRCM

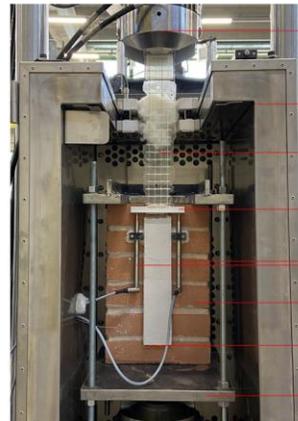


Rete

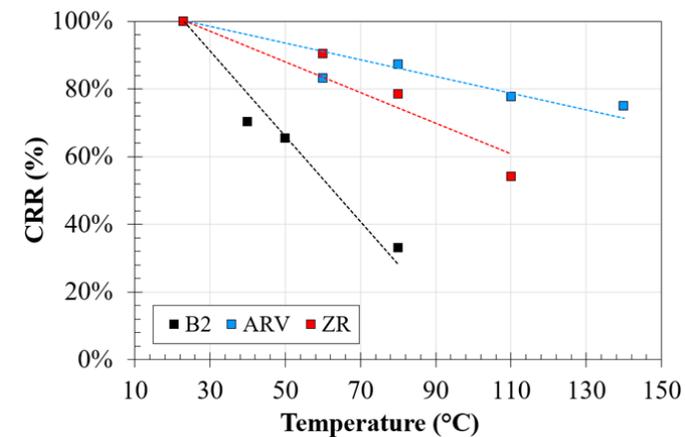
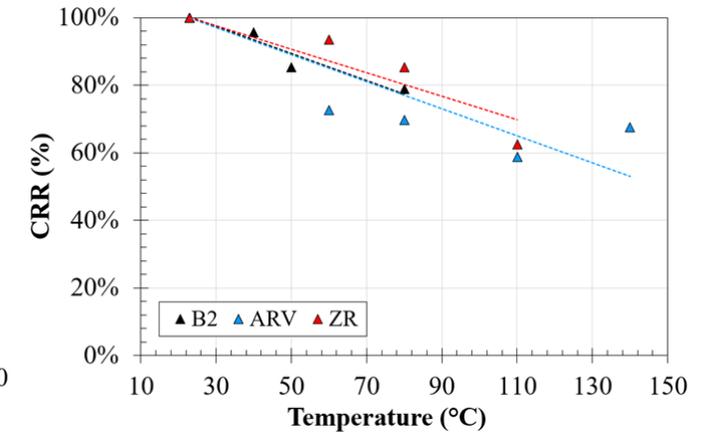
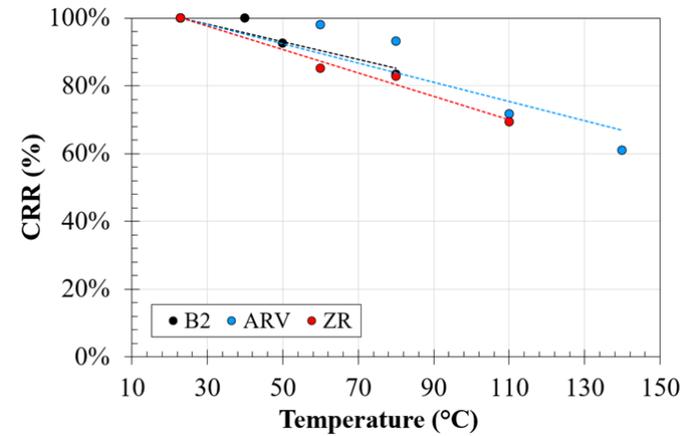


Camera ambientale  
Estensometro  
L misura = 200 o 100 mm  
Tabs di rinforzo estremità

Bond



Grip idrauliche MTS  
Camera ambientale  
Tratto libero  
(L = 400 mm)  
Piastra a "L" in  
alluminio  
LVDTs  
(L misura = 20 mm)  
Substrato  
Termocoppia  
Telaio rigido

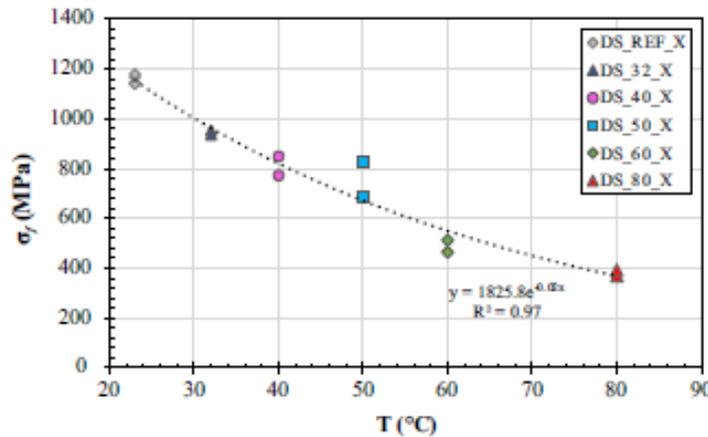


## DURABILITÀ: EFFETTO DELLA TEMPERATURA

Studio degli **effetti** delle variazioni di **temperatura** sull'**aderenza** di un **composito FRCM**, costituito da una **rete di basalto** e da una **matrice di malta a base di calce**, applicato su substrato di muratura.

**Temperatura** : 32° C, 40 ° C, 50 ° C, 60 ° C e 80 ° C.

I **campioni condizionati** hanno mostrato **riduzioni** significative della **resistenza all'aumentare della temperatura target**

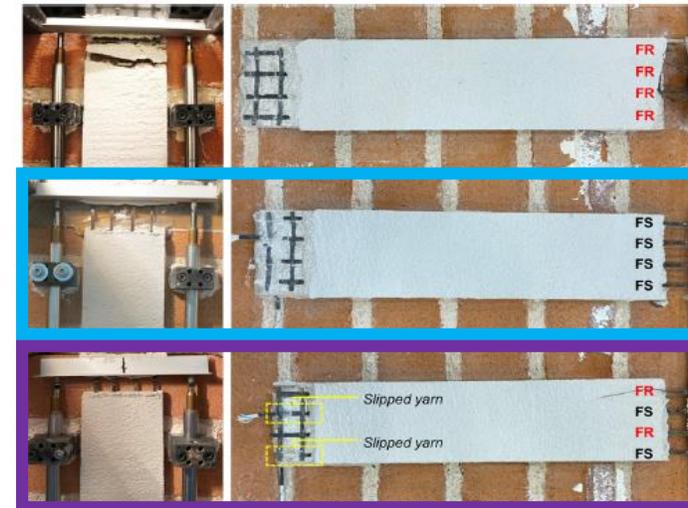


- Campioni condizionati a 80°C → Riduzione 67%
- Campioni condizionati a 60°C → Riduzione 58%
- Campioni condizionati a 50°C → Riduzione 35%
- Campioni condizionati a 40°C → Riduzione 30%
- Campioni condizionati a 32°C → Riduzione 18%

Campione di riferimento

Campione testati a temperatura target di 60 e 80°C

Campione testati a temperatura target di 32 e 50°C



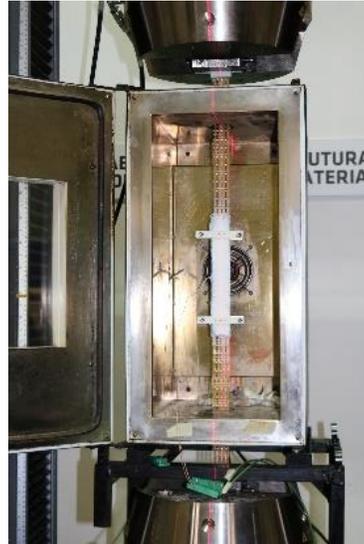
Rottura a trazione della rete appena fuori l'area di incollaggio

Crisi per scorrimento delle fibre all'interno della malta

Modalità di crisi mista: rottura di alcuni fili e scorrimento di quelli restanti

## DURABILITÀ: EFFETTO DELLA TEMPERATURA

**Attività:** Indagini sperimentali e analitiche sul **comportamento a trazione e legame di aderenza a temperatura elevata** di un sistema a **matrice cementizia** rinforzata con **tessuto in PBO** per il rinforzo di elementi in **calcestruzzo**. Le prove di trazione diretta (DT) e di aderenza (DS) sono state eseguite in condizioni stazionarie alle temperature di 20 °C, 85 °C, 150 °C, 230 °C e 300 °C.



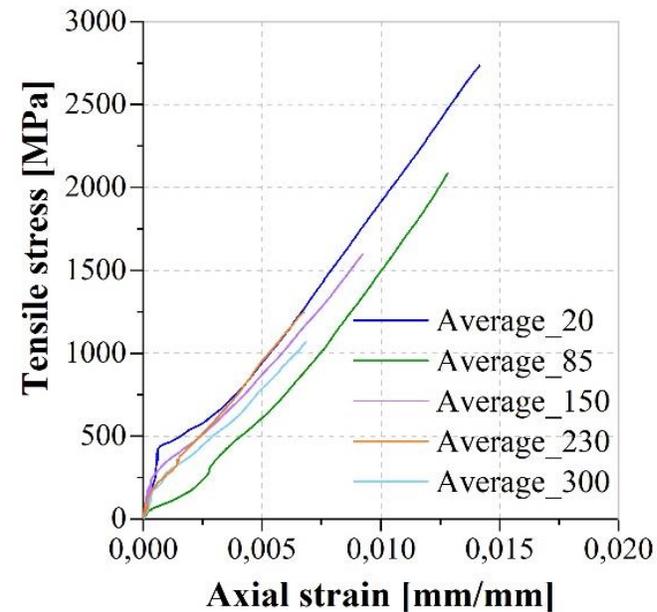
Tensile and bond properties at elevated temperatures of a PBO-FRCM composite system for strengthening concrete elements: Experimental and analytical investigations

Pietro Mazzuca<sup>a</sup>, Bruna Pisani<sup>a</sup>, Joao P. Firmo<sup>b</sup>, L. Ombres<sup>a,\*</sup>

## DURABILITÀ: EFFETTO DELLA TEMPERATURA

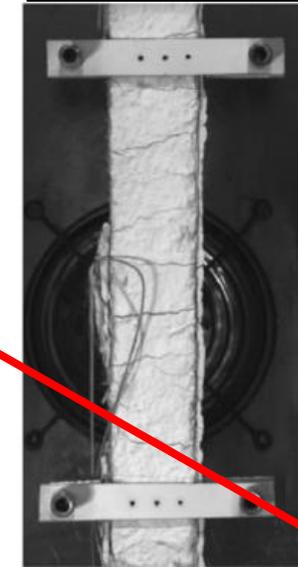
**Attività:** Analisi del **comportamento a trazione e del legame di aderenza in presenza di temperature elevate** di un sistema FRCM a **matrice cementizia e tessuto in PBO utilizzato** per il rinforzo di elementi in **calcestruzzo**. Le prove di trazione diretta (DT) e di aderenza (DS) sono state eseguite in condizioni stazionarie alle temperature di 20 °C, 85 °C, 150 °C, 230 °C e 300 °C

Prove di trazione diretta  
sul provino FRCM



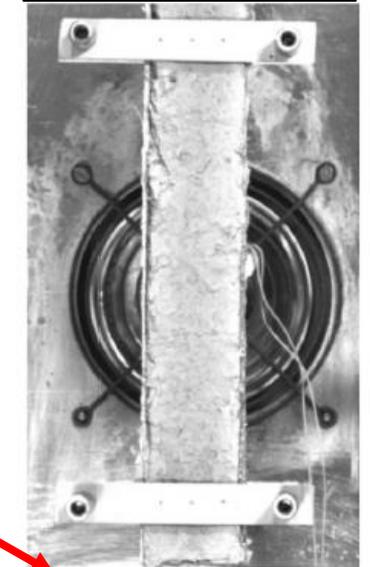
- Influenza significativa della **temperatura** su **rigidezza e resistenza**, nonché **sul legame costitutivo**
- I campioni testati a **20, 85 e 150 °C** hanno mostrato il tipico comportamento con i **tre diversi stadi**.
- La **fase II** è **meno evidente** quando la **temperatura di prova si avvicina e supera i 230 °C** - questo dovrebbe essere attribuito alla **perdita di interazione tra le fibre di PBO e la matrice inorganica**, che ha anche indotto una riduzione dei meccanismi di dissipazione dell'energia

Per temperature da 20°C a 150°C



Fessurazione diffusa

Per temperature da 230°C a 300°C

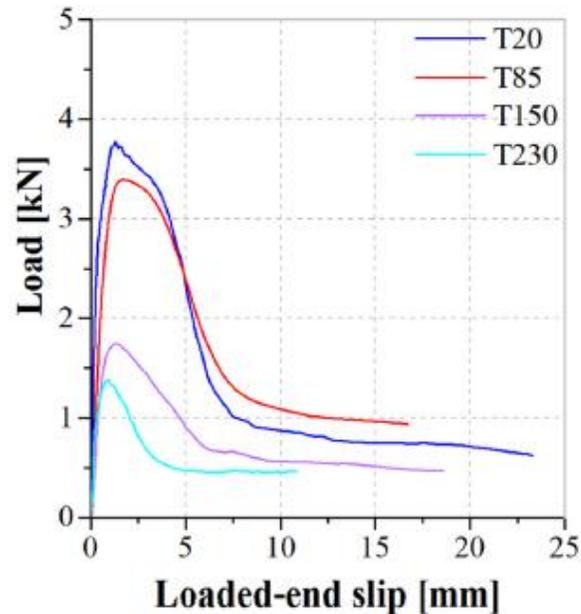


Diminuzione nr. fessure

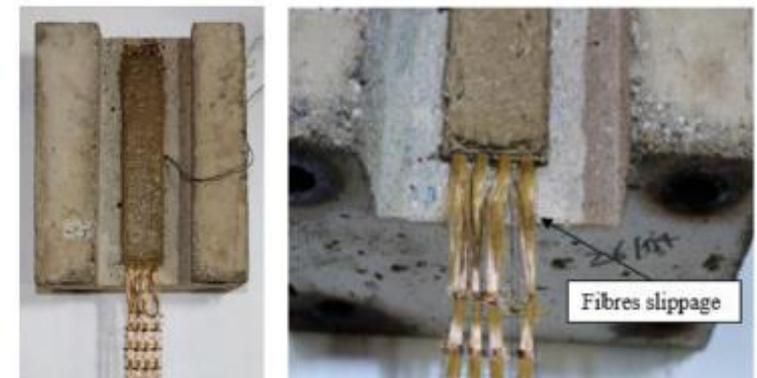
## DURABILITÀ: EFFETTO DELLA TEMPERATURA

**Attività:** Analisi del **comportamento a trazione e del legame di aderenza in presenza di temperature elevate** di un sistema FRCM a **matrice cementizia e tessuto in PBO utilizzato** per il rinforzo di elementi in **calcestruzzo**. Le prove di trazione diretta (DT) e di aderenza (DS) sono state eseguite in condizioni stazionarie alle temperature di 20 °C, 85 °C, 150 °C, 230 °C e 300 °C

### Prove di aderenza



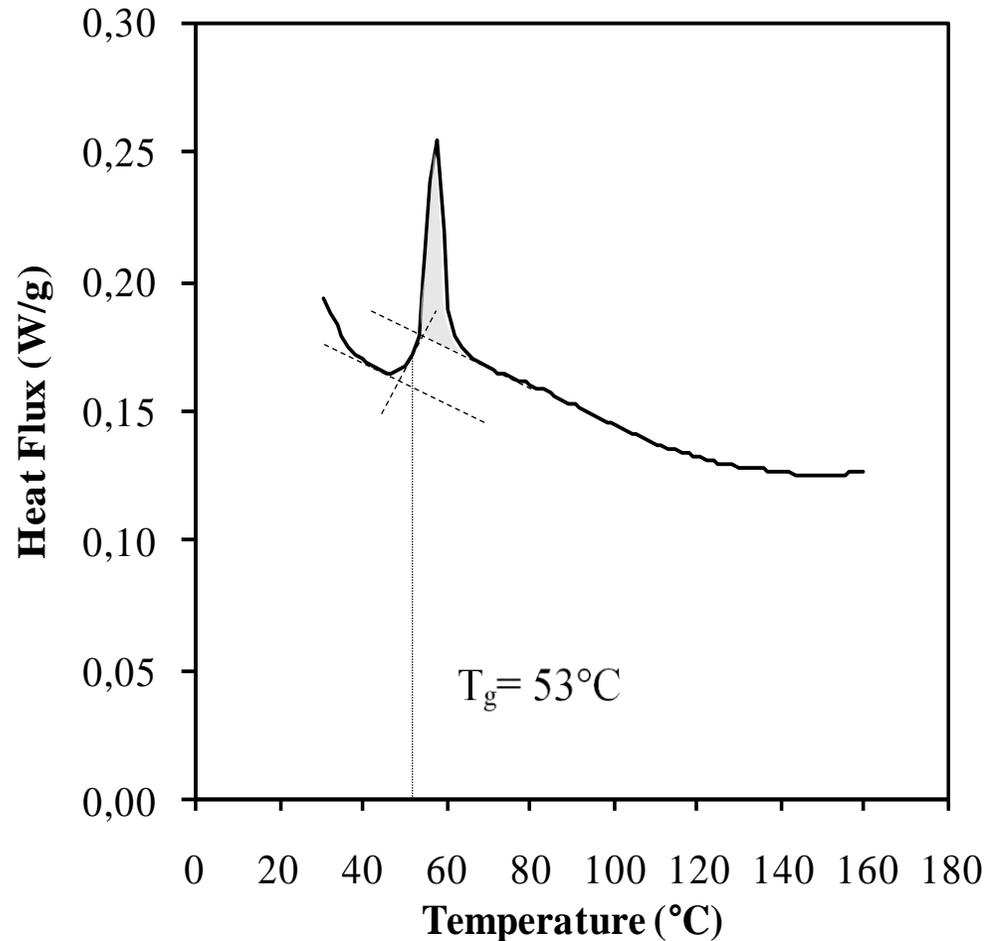
- **Tutte le curve carico-scorrimento** hanno mostrato il **tipico comportamento riportato in letteratura** per i provini FRCM caratterizzati da una **propagazione della fessura all'interfaccia matrice-fibra**
- **All'aumentare della temperature** sono state rilevate **riduzioni sia del carico di picco che della rigidezza**



**Modalità di crisi**  
Scorrimento delle fibre  
nella matrice

## DURABILITÀ: EFFETTO DELLA TEMPERATURA

### La Temperatura di Transizione Vetrosa ( $T_g$ )



Il polimero manifesta un degrado delle proprietà meccaniche rispetto a quelle a temperatura ambiente, per temperature maggiori di quella di transizione vetrosa,  $T_g$ .

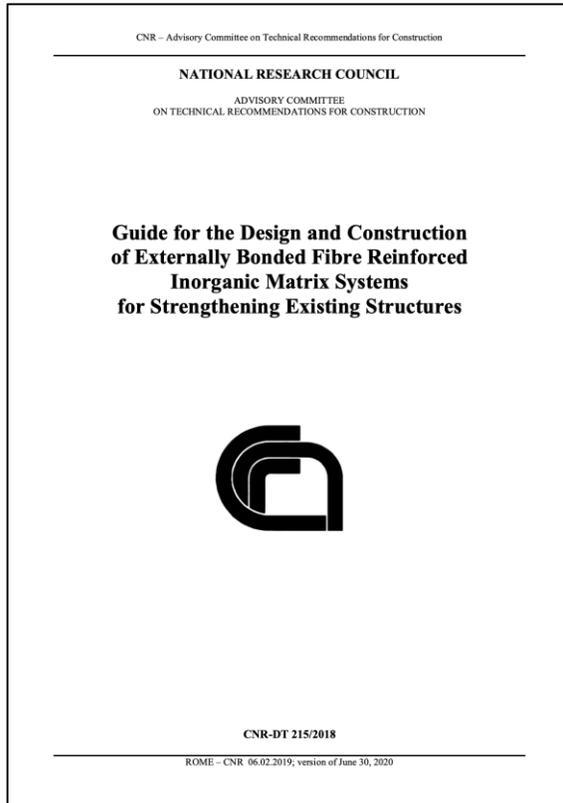
Il range di temperatura di transizione vetrosa delle resine che curano a temperatura ambiente è generalmente di 40-50°C



## RINFORZO A TAGLIO NEL PIANO



**OBIETTIVO:** Revisione della relazione per la valutazione della resistenza a taglio nel piano, tenendo conto del contributo della malta



Resistenza a taglio parete rinforzata

Contributo muratura non rinforzata

Contributo FRCM

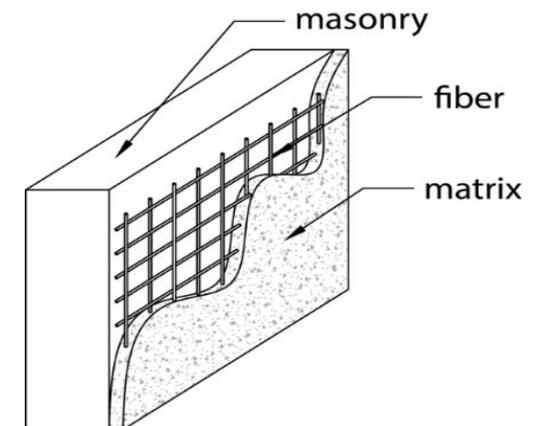
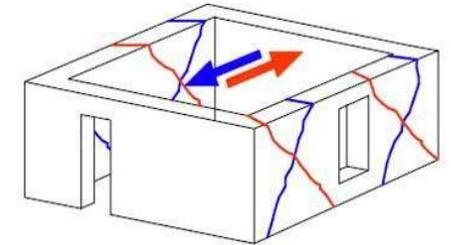
$$V_{t,R} = V_t + V_{t,f}$$

$$V_{t,f} = 0.5 n_f t_{vf} b_f \alpha_t \varepsilon_{fd} E_f$$

Area del rinforzo

Coefficiente riduttivo

Resistenza del  
rinforzo



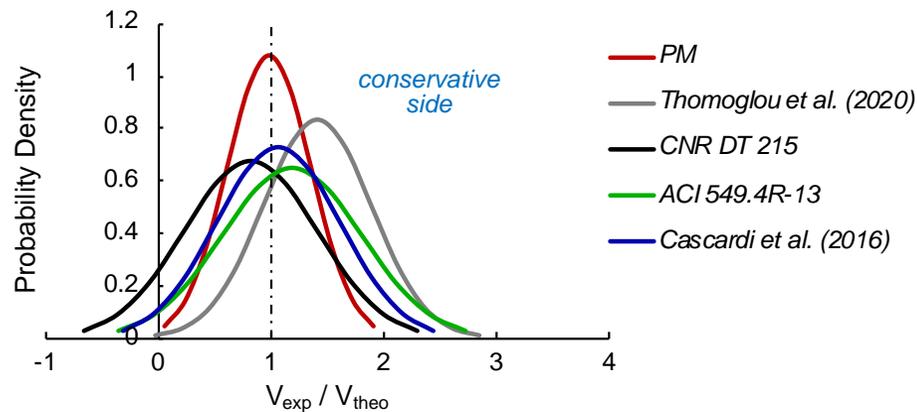
## RINFORZO A TAGLIO NEL PIANO

**OBIETTIVO:** Revisione della relazione per la valutazione della resistenza a taglio nel piano, tenendo conto del contributo della malta



### Attività

- Proposta di una nuove formule empiriche orientate alla progettazione e calibrate con un set di dati disponibili di risultati sperimentali di pareti rinforzate a taglio con sistemi IMC. La novità consiste nella **definizione del contributo della malta di rinforzo** rispetto al guadagno di resistenza a taglio della muratura.
- La validazione è stata effettuata valutando l'accuratezza delle formule previste sia rispetto ai risultati sperimentali disponibili sia rispetto ad altre previsioni teoriche fornite dai ori modelli analitici esistenti.



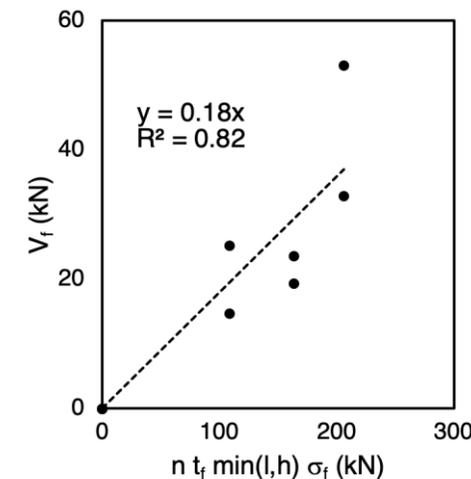
### Modello Proposto

$$V_R = V_{URM} + k_1 V_f + k_2 V_m$$

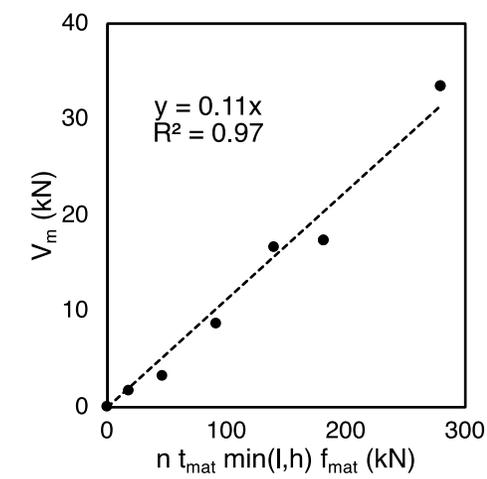
$$V_f = n t_f \min(l, h) \varepsilon_f E_f$$

$$V_m = t_{mat} \min(l, h) f_{c,mat}$$

Calibrazione di  $K_1$



Calibrazione di  $K_2$

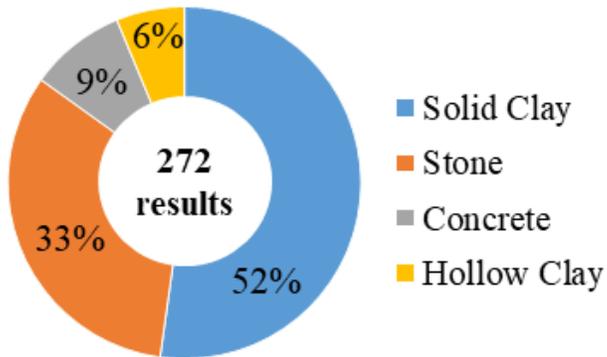


## RINFORZO A TAGLIO NEL PIANO

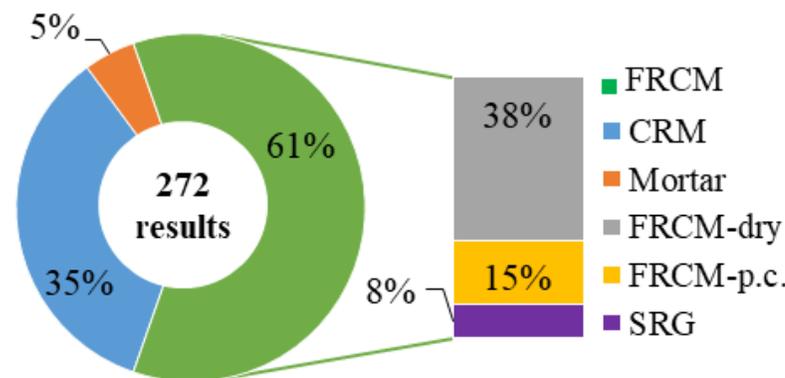
**Attività svolta:** Elaborazione Database

**Attività in corso:** Revisione formula di Resistenza a taglio per FRCM e CRM

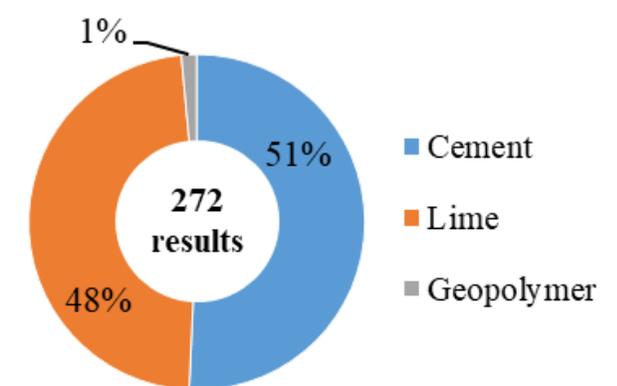
### Tipo di Substrato



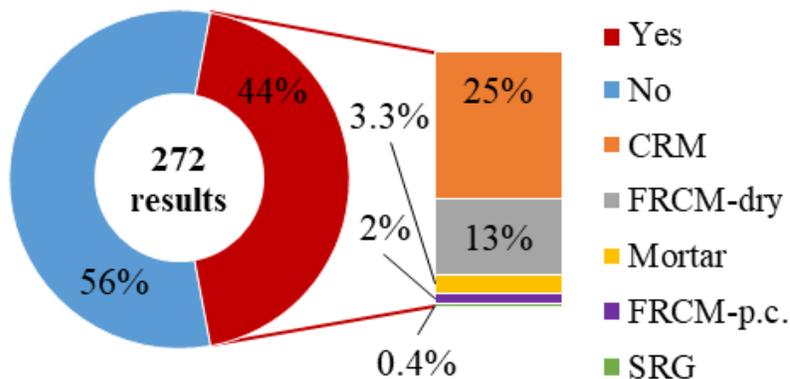
### Tipo di Sistema



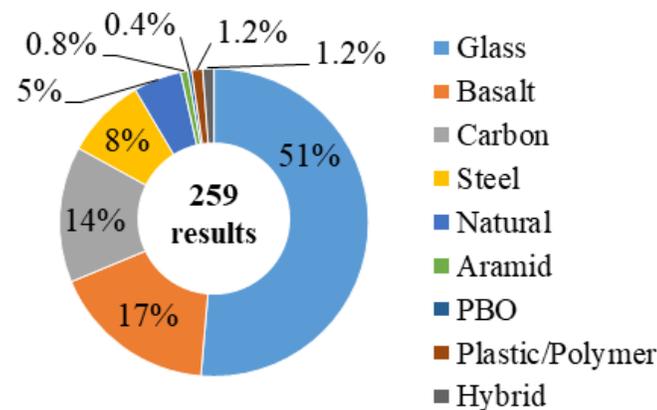
### Tipo di Matrice



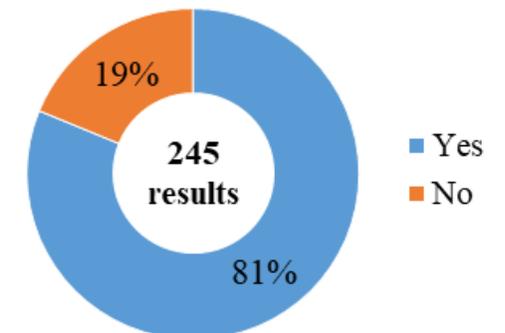
### Uso di Connettori



### Tipo di rete



### Rete Bilanciata



## RINFORZO A TAGLIO NEL PIANO

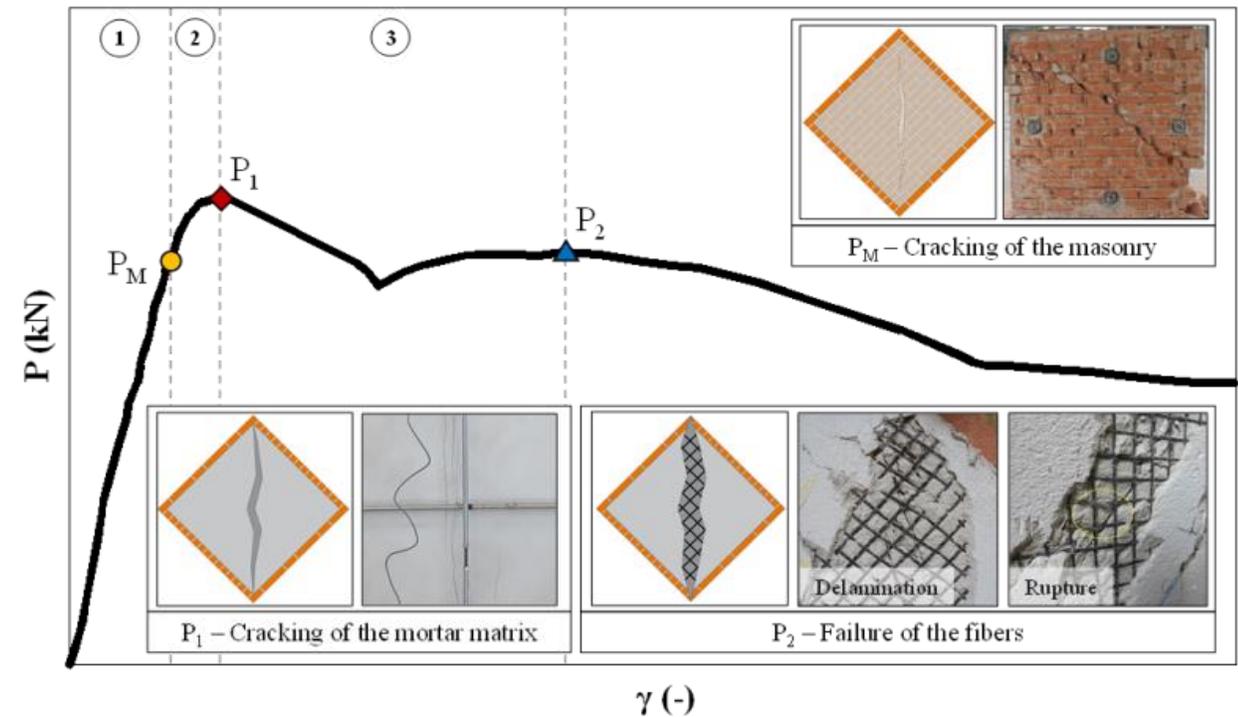
Proposta di revisione della resistenza a taglio di pannelli murari. A tal fine, è stata sviluppata una **campagna sperimentale dedicata** attraverso l'esecuzione di prove di compressione diagonale. I **risultati sperimentali evidenziano il ruolo cruciale della matrice di malta nel migliorare la capacità di taglio dei pannelli in muratura**.

### Modello Proposto

$$P_2 = \alpha_1 P_M + \alpha_2 P_{mx} + \alpha_3 P_f$$

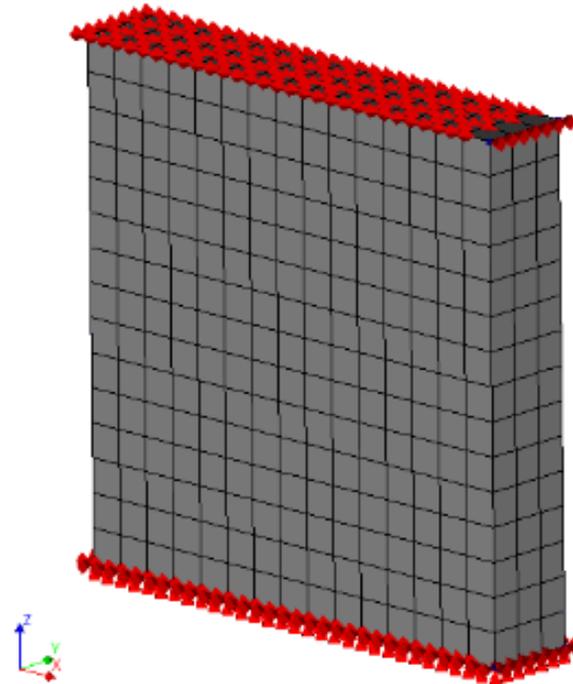
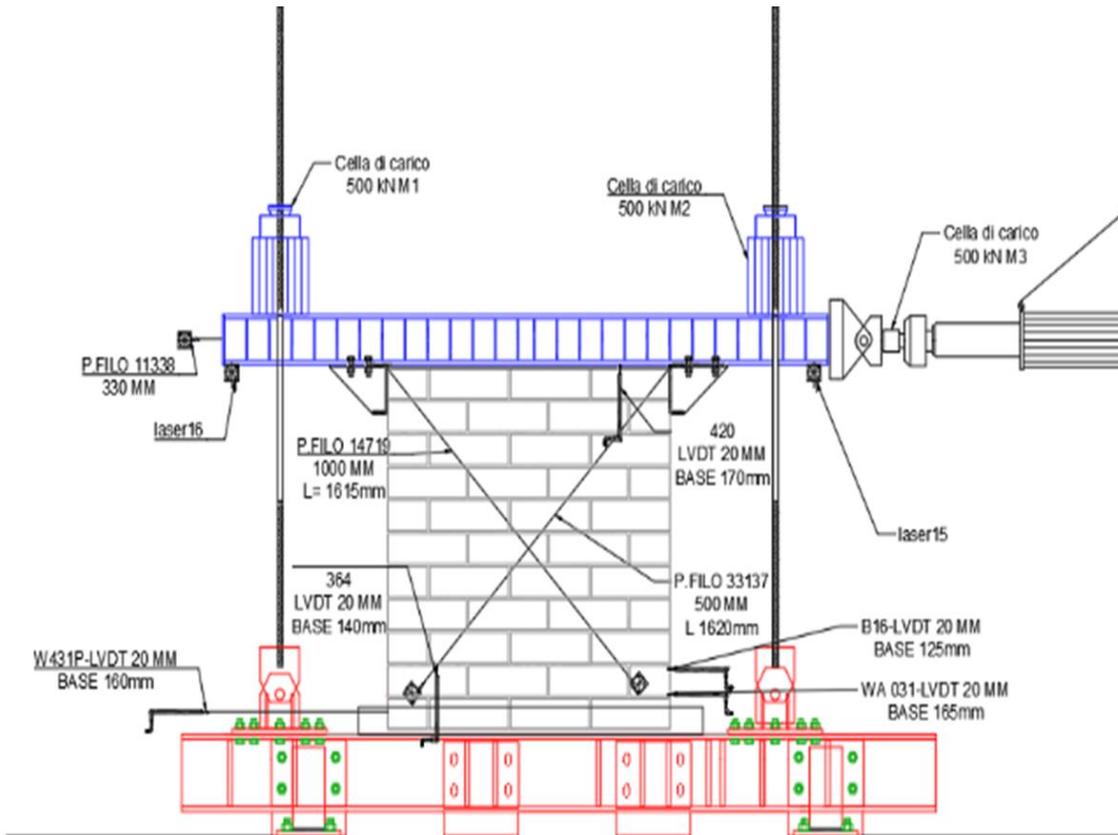
- $P_M$ ,  $P_{mx}$ ,  $P_f$ : contributi muratura, **matrice**, fibre;
- $\alpha_1$ : definito in base al ramo softening dei campioni URM
- $\alpha_2$ : assunto pari al 20% di  $\alpha_1$
- $\alpha_3$ : calibrato da analisi statistiche

Fibre	$\alpha_3$
Basalto	0.63
Carbonio	0.43
Vetro	0.73



## RINFORZO A TAGLIO NEL PIANO

Al fine di validare le nuove proposte è necessario ampliare il database di prove di Taglio-Compressione, con l'ausilio anche di analisi numeriche



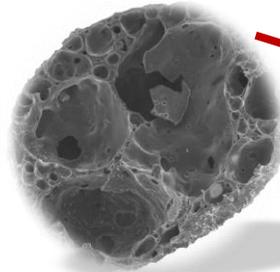
## PANNELLI MURARI - RINFORZO SISMO-ENERGETICO

### FORMULAZIONE DI UNA MALTA GEOPOLIMERICA PER SISTEMI IMC

*Expanded glass (recycled)*



Expanded Glass  
Lightweight Aggregate



*Fly ash (waste)*



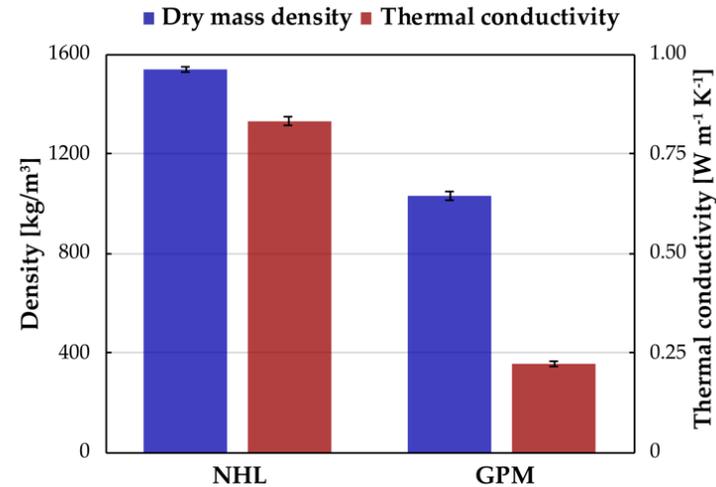
**GEOPOLYMER MATRIX**



**+ Alkali activators + metakaolin**

## PANNELLI MURARI - RINFORZO SISMO-ENERGETICO

### FORMULAZIONE DI UNA MALTA GEOPOLIMERICA PER SISTEMI IMC



Label	Dry mass density ( $\rho$ )			Thermal conductivity ( $\lambda$ )		
	Mean kg/m <sup>3</sup>	CoV <sup>1</sup> %	$\rho_{\text{GPM}}/\rho_{\text{NHL}}$ %	Mean W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	CoV <sup>1</sup> %	$\lambda_{\text{GPM}}/\lambda_{\text{NHL}}$ %
NHL	1540	0.5	66.95	0.830	1.5	26.75
GPM	1031	1.8		0.222	2.7	

<sup>1</sup> Coefficient of Variation.

**I valori di densità di massa e conducibilità termica della malta geopolimerica (GPM) sono inferiori a quelli della malta tradizionale (NHL).**

## PANNELLI MURARI - RINFORZO SISMO-ENERGETICO

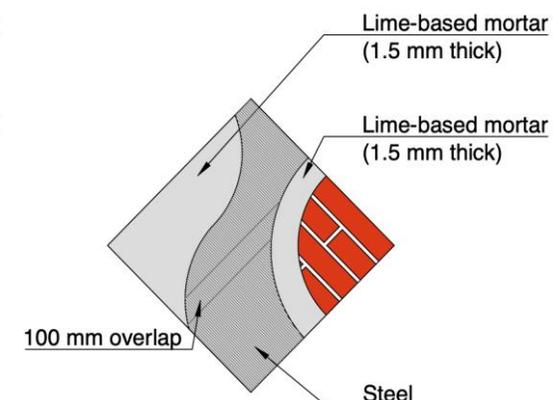
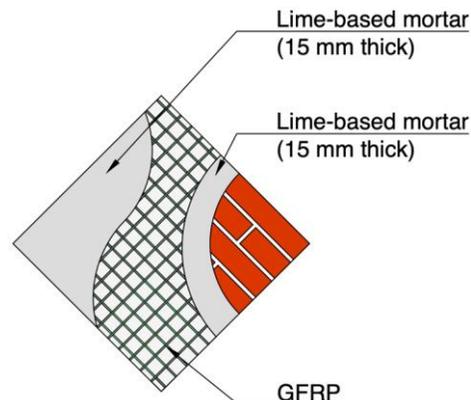
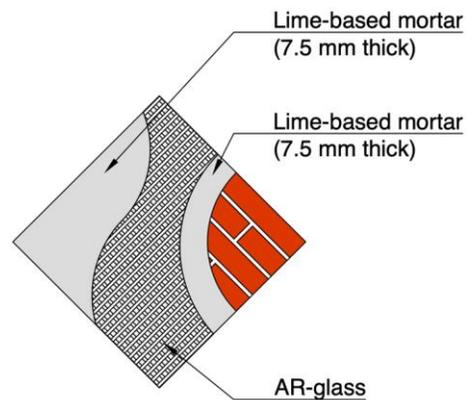
### LA SPERIMENTAZIONE

#### Pannelli rinforzati con sistemi IMC tradizionali (a base di calce)

- NHL (rinforzo costituito da sola malta a base di calce)
- FRCM (rete in vetro secca + malta a base di calce)
- CRM (griglia in vetro preformate, GFRP, + malta a base di calce)
- SRG (tessuto unidirezionale in acciaio + malta a base di calce)

#### Pannelli rinforzati con sistemi IMC innovativi (malta geopolimerica)

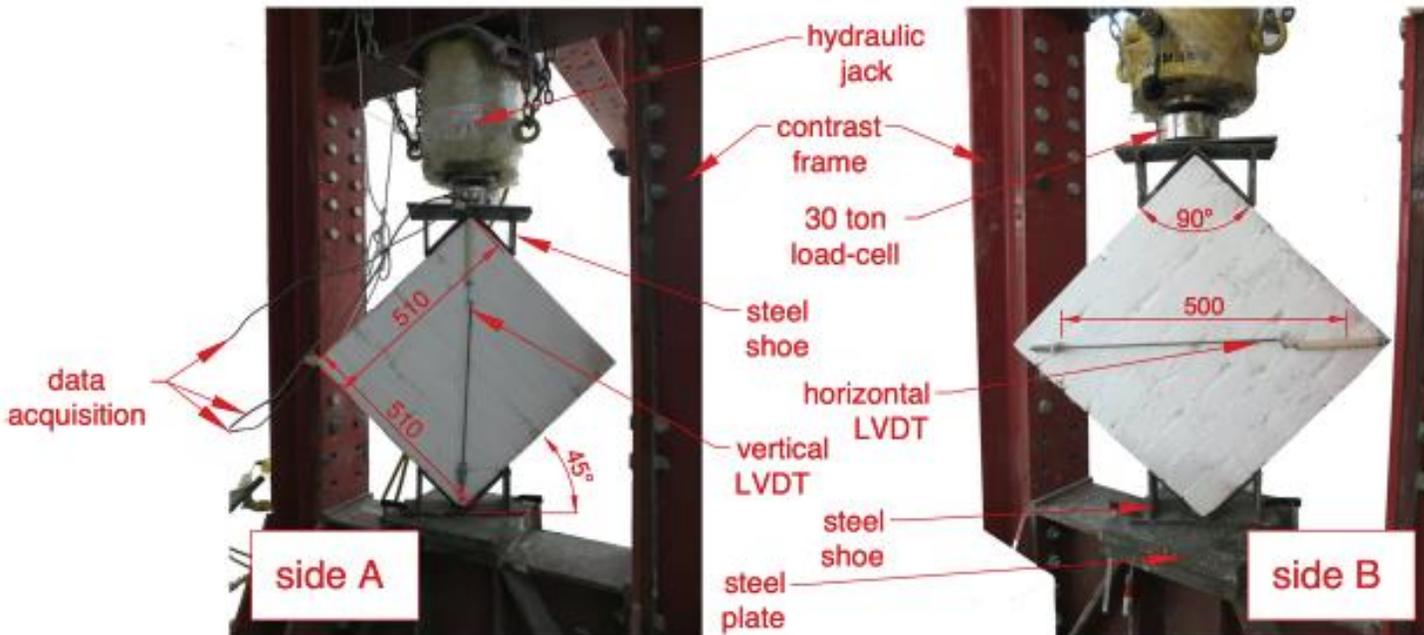
- GPM (rinforzo costituito da sola malta **geopolimerica**)
- FRGM (rete in vetro secca + malta **geopolimerica**)
- CRGM (griglia in vetro preformate, GFRP, + malta **geopolimerica**)
- SRGG (tessuto unidirezionale in acciaio + malta **geopolimerica**)



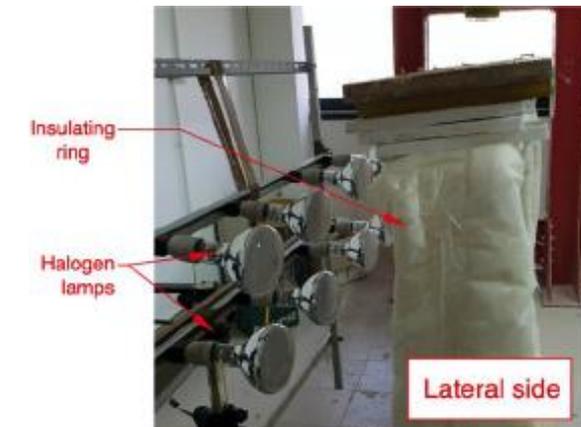
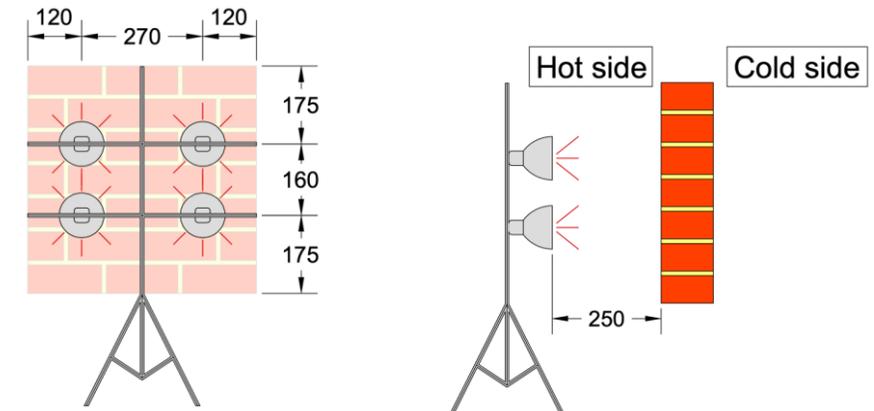
## PANNELLI MURARI - RINFORZO SISMO-ENERGETICO

### LA SPERIMENTAZIONE

#### Prove Meccaniche a compressione diagonale



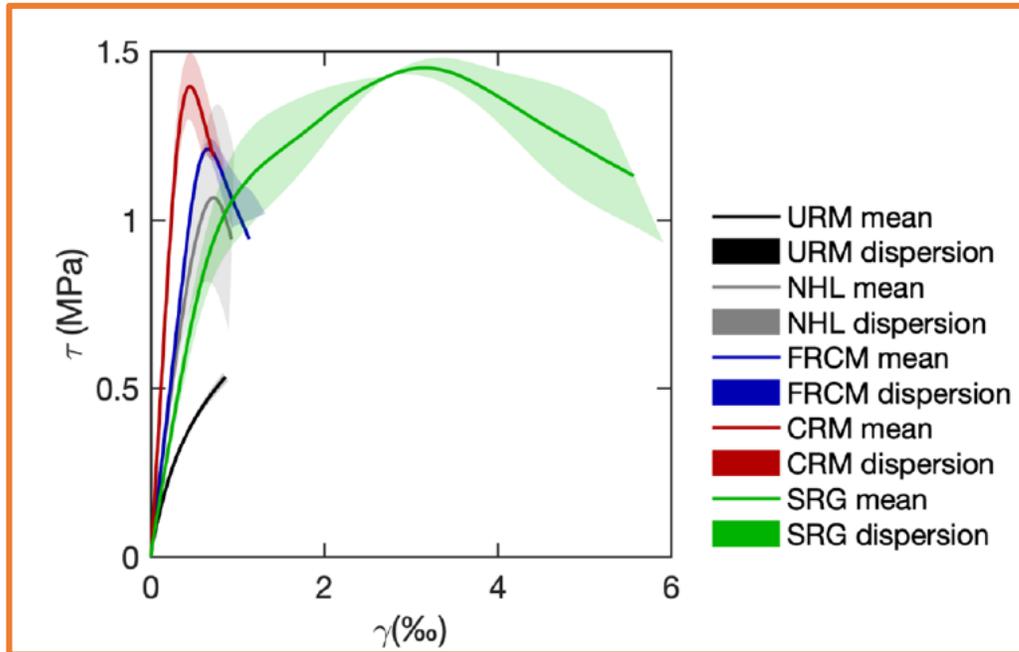
#### Prove Termiche



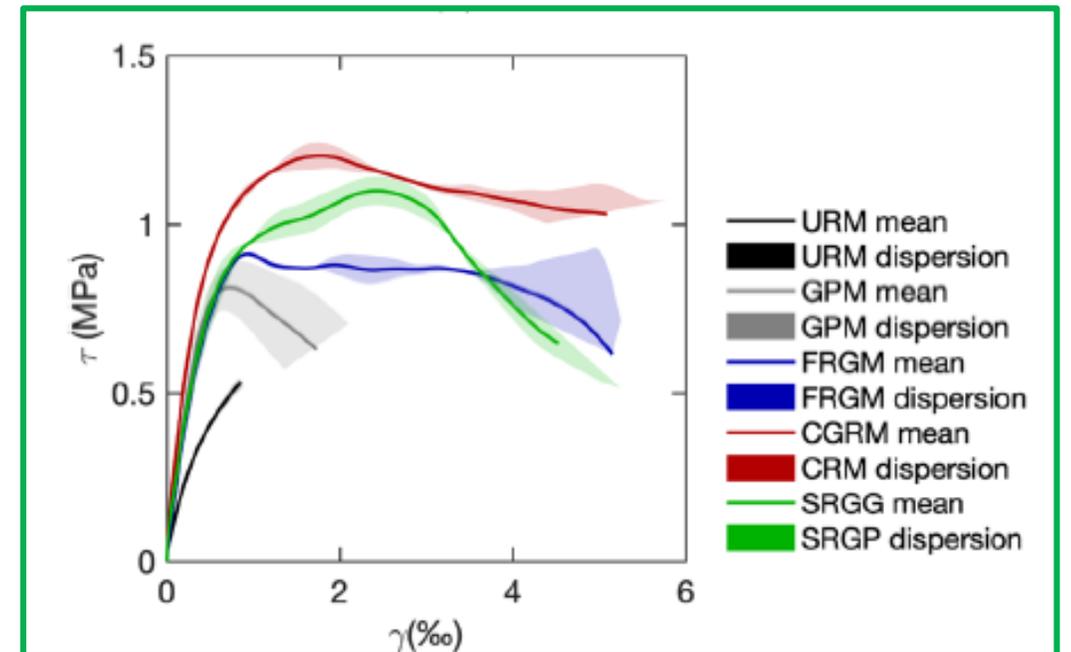
## PANNELLI MURARI - RINFORZO SISMO-ENERGETICO

### RISULTATI PROVE MECCANICHE

Pannelli rinforzati con sistemi IMC: malta di calce



Pannelli rinforzati con sistemi IMC: malta geopolimerica



Le prove meccaniche hanno evidenziato che i sistemi a base di geopolimeri hanno una buona resistenza a taglio ed una maggiore duttilità rispetto a quelli tradizionali

## PANNELLI MURARI - RINFORZO SISMO-ENERGETICO

### RISULTATI PROVE MECCANICHE

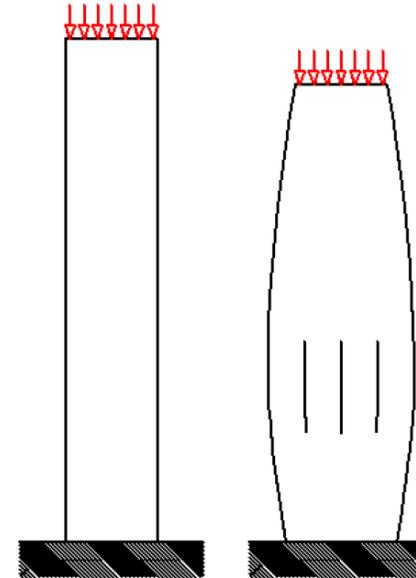
	$T_{wh}$ (°C)	$T_{wc}$ (°C)	$T_{out}$ (°C)	$R'$ (m <sup>2</sup> K W <sup>-1</sup> )	$U$ (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )	$U/U_0$ (-)
URM	56.13	32.85	19.60	0.310	2.082	1.00
NHL	56.79	30.48	20.60	0.474	1.554	0.75
GPM	55.87	27.23	20.60	0.781	1.051	0.50
FRCM	59.83	34.03	21.83	0.367	1.862	0.89
FRGM	57.13	28.85	21.83	0.718	1.126	0.54
CRM	57.83	30.65	20.71	0.473	1.555	0.75
GRM	56.17	27.47	20.76	0.771	1.063	0.51

Se si confrontano i risultati dei pannelli rinforzati con i sistemi con spessori maggiori, 3 cm, si nota che quelli realizzati con **la malta geopolimerica (GPM e CRGM)** presentano un **abbattimento della trasmittanza termica di circa il 50 % rispetto al pannello non rinforzato**; mentre quelli realizzati con la **malta a base di calce (NHL e CRM)** presentano una diminuzione di U del **25%**.

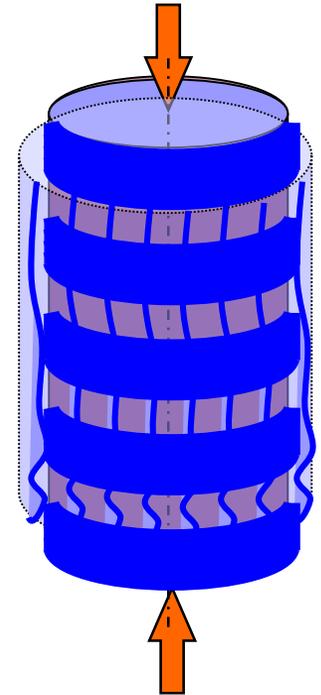
## IL CONFINAMENTO

In presenza di sforzo normale la colonna si contrae nella direzione longitudinale e si dilata nella direzione trasversale

Il fenomeno fessurativo che ne consegue può evolvere sino al collasso



Il confinamento limita la dilatazione trasversale, con conseguente incremento della capacità ultima



## IL CONFINAMENTO

**Il confinamento di elementi sottoposti a compressione centrata o in presenza di piccole eccentricità permette di aumentare la capacità portante e la duttilità.**



## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

Resistenza assiale di progetto,  $N_{RMc,d}$

$$N_{RMc,d} = A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md}$$

- dove  $A_m$  rappresenta l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato,  $f_{md}$  è la resistenza a compressione della muratura non confinata e  $f_{mcd}$  è il valore di progetto della resistenza a compressione della muratura confinata.
- La resistenza di progetto della muratura confinata,  $f_{mcd}$ , può essere valutata come segue:

$$f_{mcd} = f_{md} \cdot \left[ 1 + k' \cdot \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right]$$

essendo:

- $\alpha_1 = 0.5$
- $f_{l,eff}$  la pressione efficace di confinamento.

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

- $k'$  è un coefficiente adimensionale: 
$$k' = \alpha_2 \cdot \left( \frac{g_m}{1000} \right)^{\alpha_3}$$
- $g_m$  è la densità di massa della muratura espressa in  $\text{kg/m}^3$  ed  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  coefficienti assunti cautelativamente pari a 1.0

### Confinamento di colonne circolari

- Nel caso di colonne circolari di diametro  $D$ , confinate con  $n_f$  strati di rinforzo, aventi spessore equivalente delle fibre nella direzione ortogonale all'asse dell'elemento  $t_f$  e la cui matrice sia caratterizzata da un valore  $f_{c,mat}$  della resistenza caratteristica a compressione, la pressione efficace di confinamento,  $f_{l,eff}$ , può essere calcolata come:

$$f_{l,eff} = k_H \cdot f_l,$$

$$f_l = \frac{2 \cdot n_f \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{ud,rid}}{D}$$

- essendo  $f_l$  la pressione di confinamento,  $k_H$  il coefficiente di efficienza orizzontale, da assumersi per le colonne circolari rivestite con continuità pari a 1

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

$\varepsilon_{ud,rid}$  la deformazione di calcolo del composito FRCCM

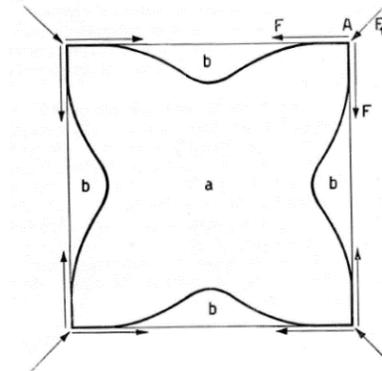
$$\varepsilon_{ud,rid} = \min \left( k_{mat} \cdot \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{uf}}{\gamma_m}; 0,004 \right)$$

$$k_{mat} = \alpha_4 \left( \rho_{mat} \cdot \frac{f_{c,mat}}{f_{md}} \right)^2 \leq 1,$$

$$\rho_{mat} = \frac{4 \cdot t_{mat}}{D},$$

- essendo  $t_{mat}$  lo spessore complessivo del rinforzo FRCCM e  $k_{mat}$  il coefficiente adimensionale di efficacia del confinamento che tiene conto della presenza della matrice inorganica.
- In mancanza di risultati sperimentali che giustificano assunzioni diverse, il coefficiente  $\alpha_4$  può essere assunto pari a 1.81

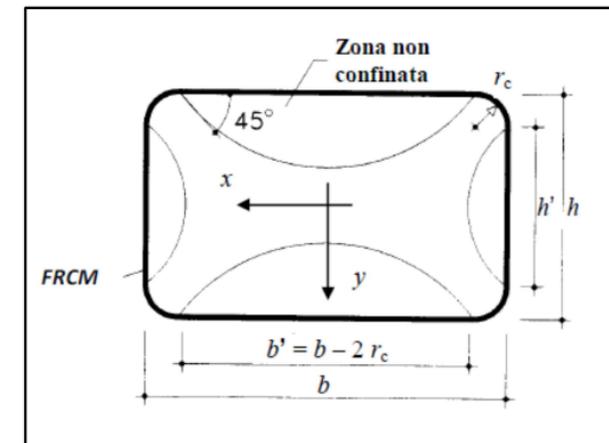
## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA



Prima dell'applicazione del sistema FRCM è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema.

In caso di colonne a sezione rettangolare/quadrata:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_c}, \quad A_c = b \cdot h$$



## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

### Studio sperimentale del confinamento di colonne in muratura con sistema FRCM

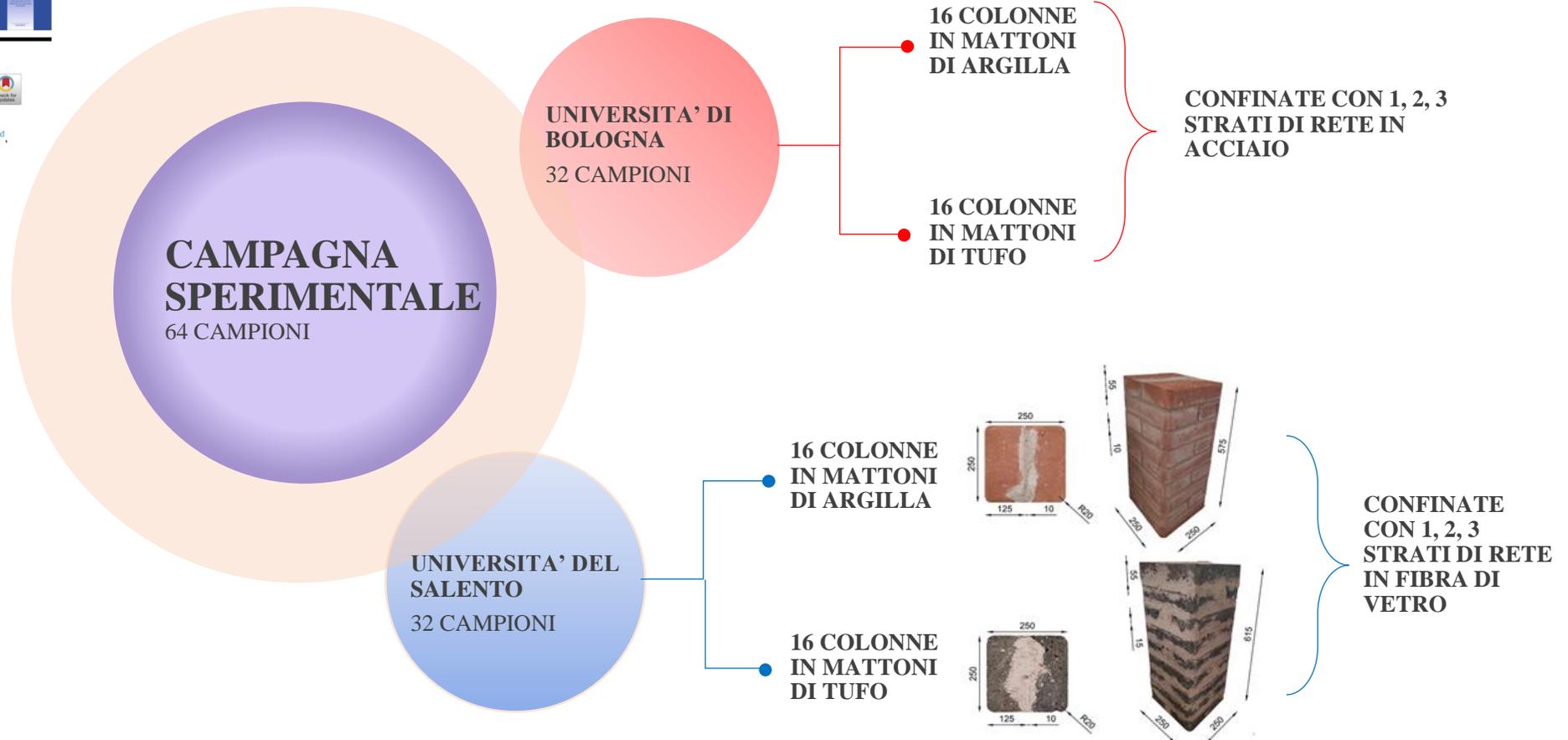


Masonry columns confined with fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems: A round robin test

M.A. Aiello<sup>a,\*</sup>, F. Bencardino<sup>b</sup>, A. Cascardi<sup>c</sup>, T. D'Antino<sup>d</sup>, M. Fagone<sup>e</sup>, I. Frana<sup>f</sup>, L. La Mendola<sup>g</sup>, G.P. Lignola<sup>h</sup>, C. Mazzotti<sup>i</sup>, F. Micelli<sup>j</sup>, G. Minafò<sup>k</sup>, A. Napoli<sup>l</sup>, L. Ombres<sup>b</sup>, M.C. Oddo<sup>g</sup>, C. Poggi<sup>d</sup>, A. Prota<sup>h</sup>, G. Ramaglia<sup>l</sup>, G. Ranocchiani<sup>c</sup>, R. Realfonzo<sup>l</sup>, S. Verre<sup>b</sup>



ReLUIS-Progetto 2018



## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

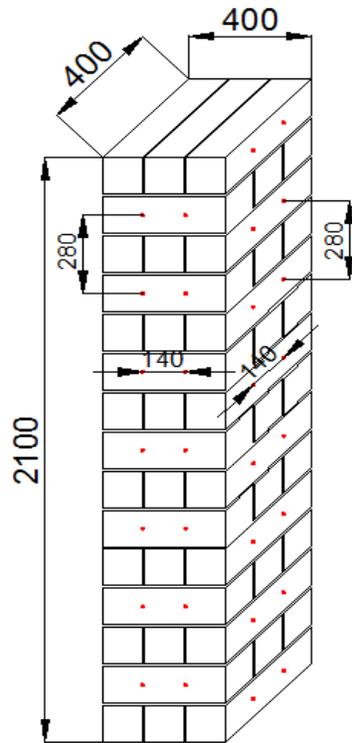


- Deformazione ultima dell'elemento confinato
- Legame costitutivo
- Eventuale revisioni per la valutazione della resistenza

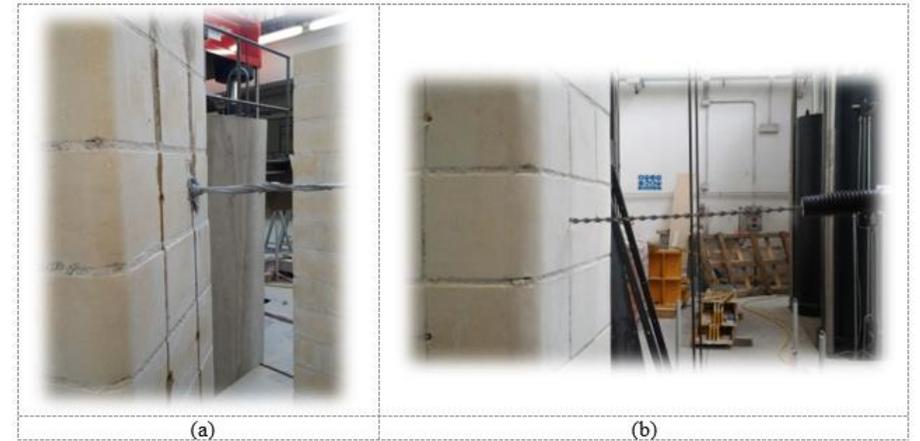
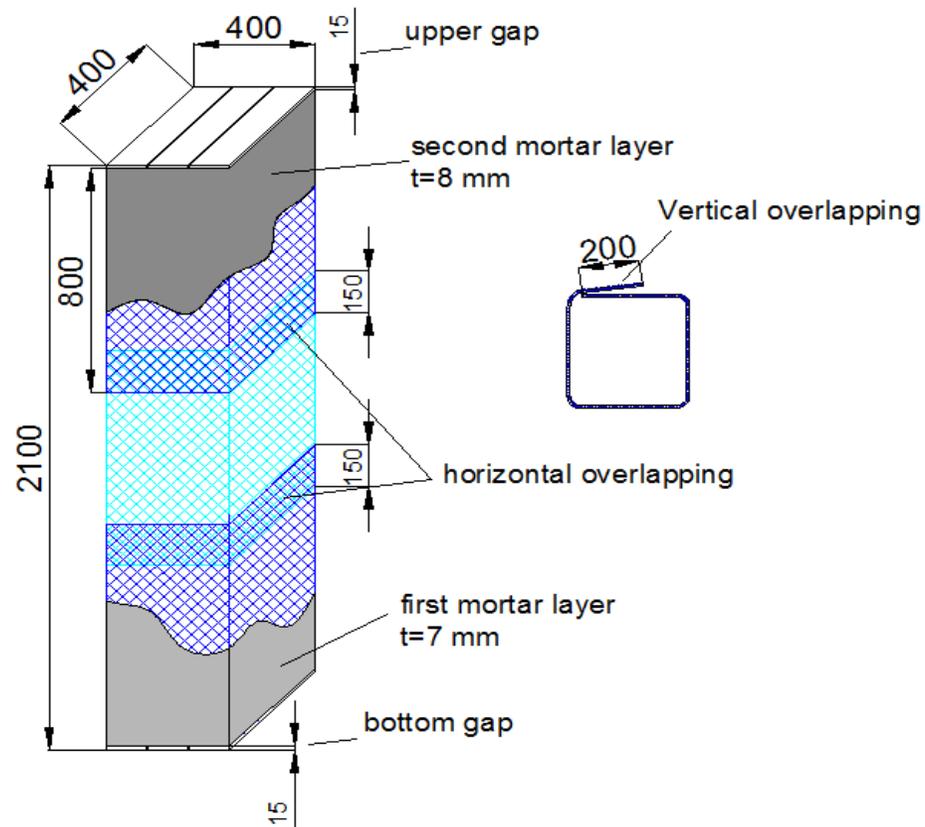
Specimen Label	Matrix	Grid	Internal reinforcement
S_R	Unreinforced		
S_Ggrid	Fiber-reinforced lime based mortar	A.R. Glass grid	-
S_Bgrid	Fiber-reinforced lime based mortar	A.R. Basalt grid	-
S_GgridGr	Fiber-reinforced lime based mortar	A.R. Glass grid	Pultruded GFRP bars $\phi 6$
S_BgridGr	Fiber-reinforced lime based mortar	A.R. Basalt grid	Pultruded GFRP bars $\phi 6$
S_GgridGr	Fiber-reinforced lime based mortar	A.R. Glass grid	Helical stainless-steel bars $\phi 8$
S_BgridGr	Fiber-reinforced lime based mortar	A.R. Basalt grid	Helical stainless-steel bars $\phi 8$

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

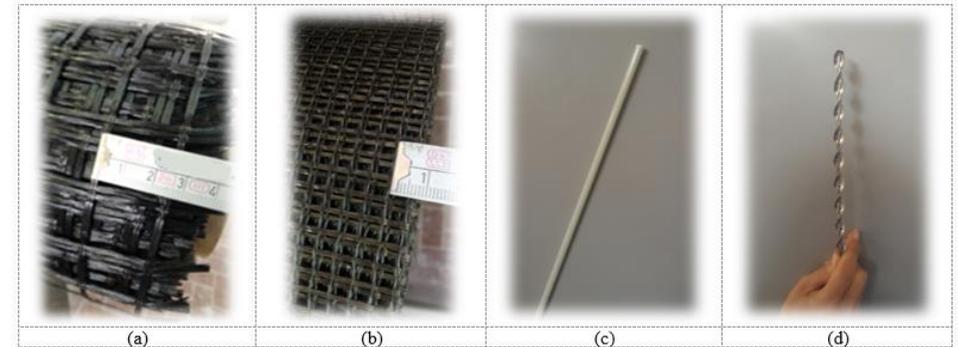
Internal reinforcement



External reinforcement

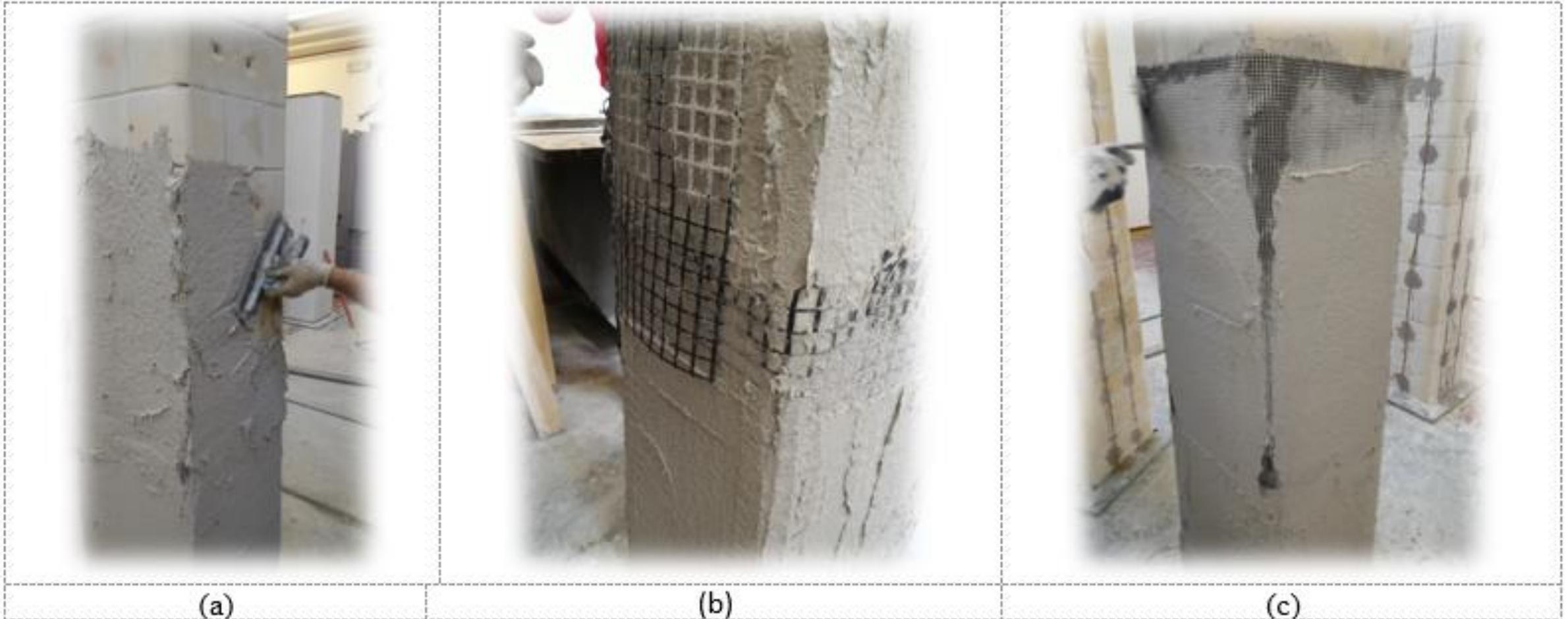


Internal confinement system: pultruded GFRP bar (a); helical stainless-steel bar (b).



Material reinforcement: GFRP grid (a); BFRP grid (b); pultruded GFRP bar (c); helical stainless-steel bar (d).

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA



**FRCM-confinement system: first layer of mortar (a); grid application (b); second layer of mortar (c).**

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

Specimen	$P_{max}$	$f_m (f_{cm})$	$f_{cm}/f_m$	$\epsilon_{max} (P_{max})$	$\epsilon_u (80\%P_{max})$
	[kN]	[MPa]	[-]	[%]	[%]
S_R	765	4.78	-	0.04%	0.05%
S_Ggrid	1145	7.15	1.50	0.17%	0.21%
S_Bgrid	1111	6,94	1,45	0,20%	0,24%
S-Ggrid_Gr	983	6.14	1.29	0.14%	0.20%
S_Bgrid_Gr	1424	8,90	1,86	0,22%	0,27%
S_Ggrid_Sr	1071	6,69	1,40	0,19%	0,23%
S_Bgrid_Sr	1114	6,96	1,46	0,20%	0,27%

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

### MODELLI PROPOSTI

Deformazione in corrispondenza  
del picco di resistenza



$$k_{mat} = \alpha_5 \left( \rho_{mat} \frac{f_{c,mat}}{f_{mu}} \right)^{\alpha_6}$$

$$\varepsilon_{ccm} = \varepsilon_{mu} + k_{mat} \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{mu}} \right)^{\alpha_7}$$

Deformazione ultima

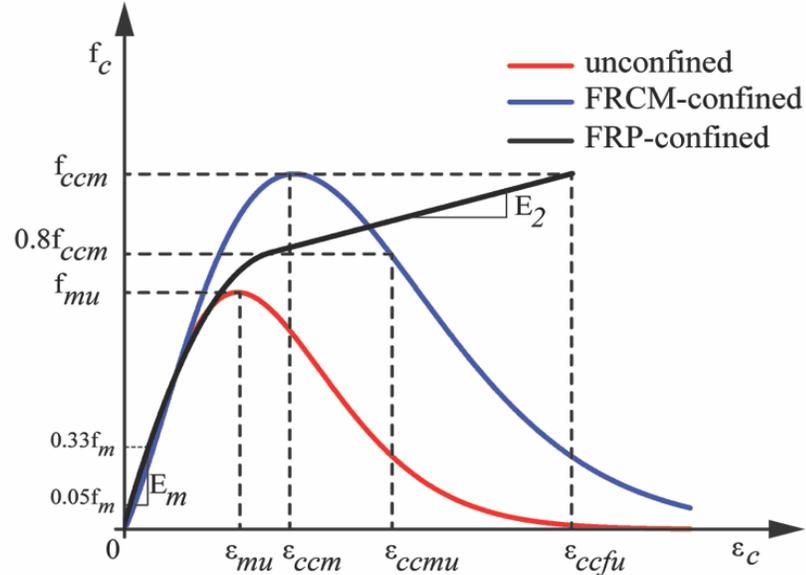


$$\varepsilon_{ccmu} = \varepsilon_{ccm} + k'' \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{mu}} \right)^2$$

$$k'' = 0.01 \left( \frac{\varepsilon_{fu}}{\varepsilon_{mu}} \right)^{\alpha_8}$$

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

### Legame Costitutivo



$$(1) \quad f_c = \begin{cases} a\varepsilon_c^3 + b\varepsilon_c^2 + E_m\varepsilon_c & 0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccm} \\ c\varepsilon_c^2 + d\varepsilon_c + e & \varepsilon_{ccm} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{ccmu} \end{cases}$$

$$(2) \quad a = \frac{E_m\varepsilon_{ccm} - 2f_{ccm}}{\varepsilon_{ccm}^3}$$

$$(3) \quad b = \frac{3f_{ccm} - 2E_m\varepsilon_{ccm}}{\varepsilon_{ccm}^2}$$

$$(4) \quad c = -\frac{0.2 f_{ccm}}{(\varepsilon_{ccm} - \varepsilon_{ccmu})^2}$$

$$(5) \quad d = -2c\varepsilon_{ccm}$$

$$e = f_{ccm} + c\varepsilon_{ccm}^2$$



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI  
DI SALERNO

## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN MURATURA

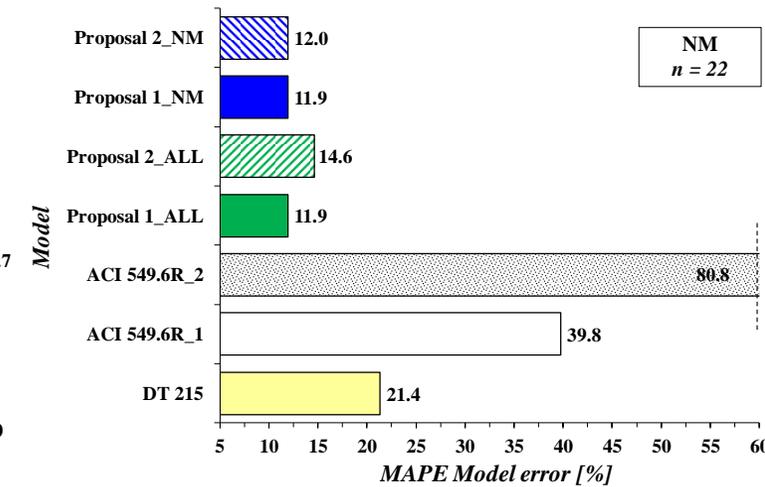
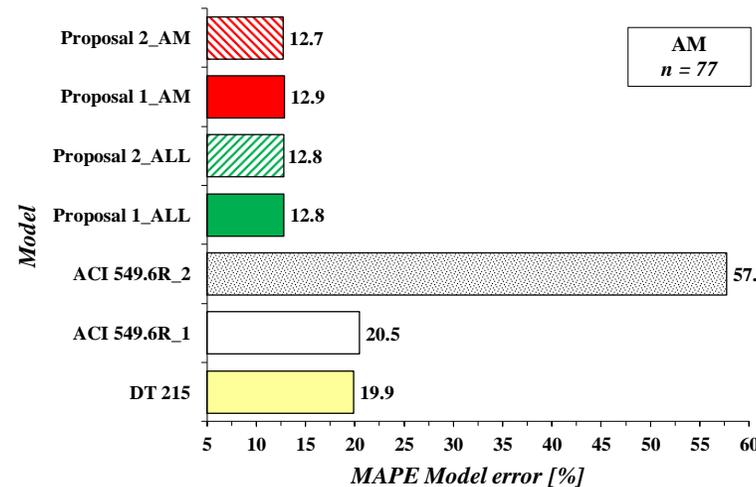
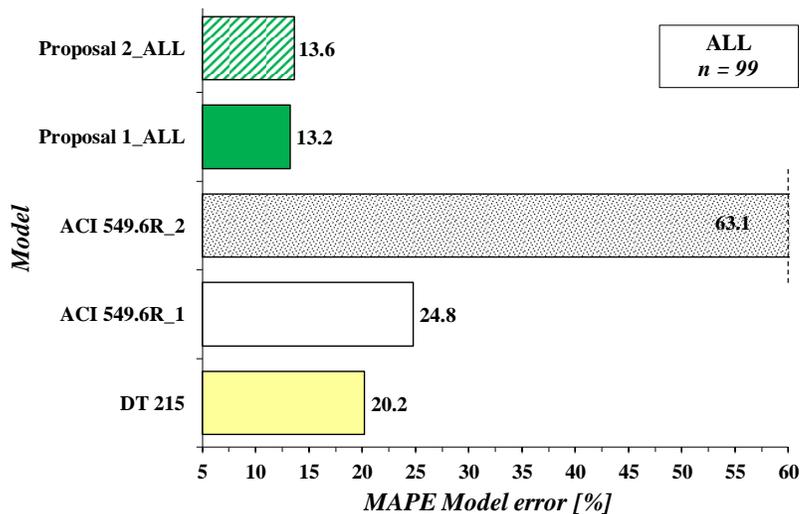
### Sviluppo di nuove proposte per la valutazione della resistenza

Proposte analitiche applicabili a qualsiasi tipo di muratura

Masonry	n	Proposal 1 Describing Equation	Proposal 2 Describing Equation
Any (ALL)	99	$\bar{f}_{mc} = 1 + 0.35 \cdot \left(\frac{g_m}{1000}\right)^{2.20} \cdot \bar{f}_{l,eff}^{0.65}$ $k_{mat} = 1.00$	$\bar{f}_{mc} = 1 + 1.05 \cdot \bar{f}_{l,eff}^{0.60}$ $k_{mat} = 0.95$

Proposte analitiche distinte per tipo di muratura

Masonry	n	Proposal 1 Describing Equation	Proposal 2 Describing Equation
Artificial Masonry (AM)	77	$\bar{f}_{mc} = 1 + 0.60 \cdot \left(\frac{g_m}{1000}\right)^{1.25} \cdot \bar{f}_{l,eff}^{0.60}$ $k_{mat} = 1.00$	$\bar{f}_{mc} = 1 + 1.10 \cdot \bar{f}_{l,eff}^{0.60}$ $k_{mat} = 1.00$
Natural Masonry (NM)	22	$\bar{f}_{mc} = 1 + 1.00 \cdot \left(\frac{g_m}{1000}\right)^{0.15} \cdot \bar{f}_{l,eff}^{0.40}$ $k_{mat} = 0.40 \cdot \left(\rho_{mat} \cdot \frac{f_{c,mat}}{f_{m0}}\right)^{1.40}$	$\bar{f}_{mc} = 1 + 1.05 \cdot \bar{f}_{l,eff}^{0.35}$ $k_{mat} = 0.40 \cdot \left(\rho_{mat} \cdot \frac{f_{c,mat}}{f_{m0}}\right)^{1.65}$



## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN C.A.

Resistenza di progetto,  $N_{Rcc,d}$

$$N_{Rcc,d} = A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}$$

Essendo  $A_c$  la sezione trasversale di calcestruzzo,  $A_s$  l'area dell'armature in acciaio,  $f_{ccd}$  la resistenza di progetto del calcestruzzo confinato,  $f_{yd}$  la resistenza allo snervamento dell'acciaio.

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left( \frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}$$

con:

- $f_{cd}$  resistenza a compressione del calcestruzzo non confinato,
- $f_{l,eff}$  la pressione efficace di confinamento

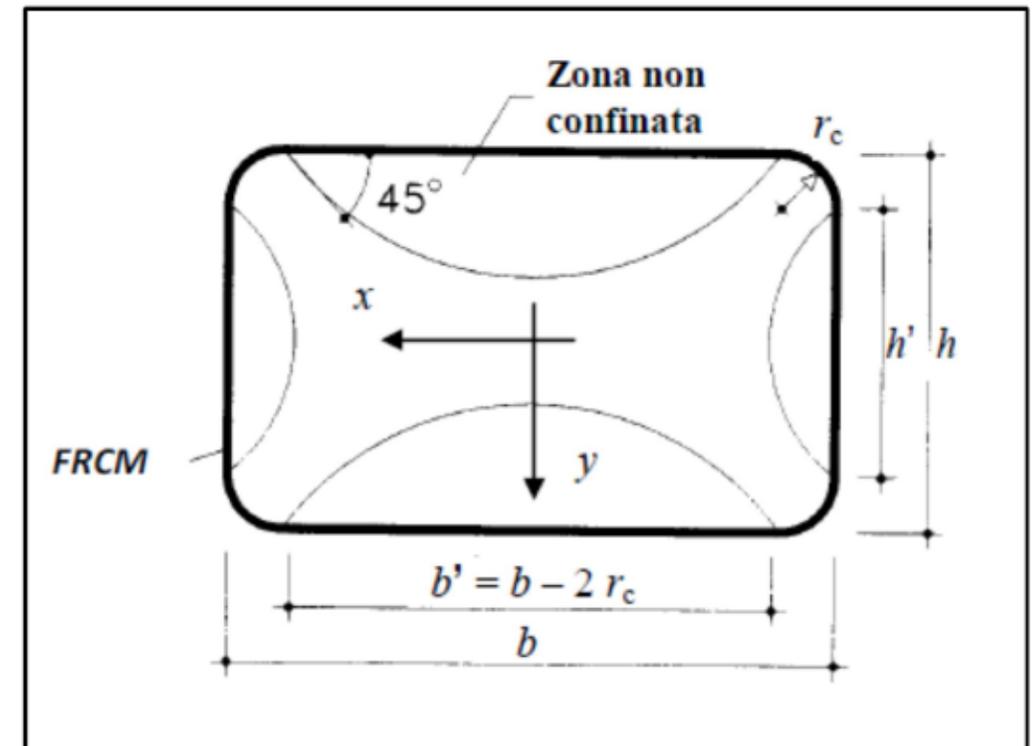
## IL CONFINAMENTO DI PILASTRI IN C.A.

$$r_c \geq 20\text{mm}$$

$$k_{\text{mat}} = 0.217 \cdot \left( \rho_{\text{mat}} \cdot \frac{f_{c,\text{mat}}}{f_{cd}} \right)^{3/2} \leq 1$$

Nel caso di pilastri rettangolari o quadrati

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_c}, \quad A_c = b \cdot h$$



## OBIETTIVI FUTURI

### • CONTRIBUTI LINEE GUIDA

- Revisione/integrazione linee guida per la progettazione e la verifica degli interventi di rinforzo nel piano e fuori dal piano di pannelli in muratura e degli interventi di confinamento **(FRCM)**
- Indicazioni progettuali in relazione all'aderenza composito FRCM con substrati esistenti e comportamento a lungo termine dei sistemi **FRCM/CRM;**
- Revisione integrazione linee guida per la progettazione di **elementi in calcestruzzo con armature non metalliche (FRP)**

### • LINEE GUIDA DI PROGETTAZIONE

- Sviluppo Linee Guida di Progettazione per il rinforzo di strutture in muratura mediante sistemi CRM;
- Completamento Linee Guida di Progettazione per interventi su strutture esistenti mediante calcestruzzi **(FRC) o malte (FRM) fibrorinforzati;**

### • CALCESTRUZZI/ MALTE GREEN E/O AD ELEVATA DURABILITÀ -Contributi pre-normativi

Stato dell'arte sulle proprietà dei materiali ed impiego strutturale di **calcestruzzi/malte green e/o ad elevata durabilità'**



Rete dei Laboratori Universitari  
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6/13  
OTTOBRE  
2024

#settimanadiPC

# SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**I MATERIALI COMPOSITI A MATRICE INORGANICA (IMC-INORGANIC  
MATRIX COMPOSITES) PER GLI INTERVENTI SU STRUTTURE  
ESISTENTI**

**Maria Antonietta Aiello**

**Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione, Università del Salento**