CONSIGLIO NAZIONALE DEGLI INGEGNERI

fondazione INARCASSA

CNAPPC CONSIGLIO NAZIONALE DEGLI ARCHITETTI PIANIFICATORI PAESAGGISTI E CONSERVATORI

OTTAVA EDIZIONE DELLA GIORNATA NAZIONALE DELLA PREVENZIONE SISMICA

- EVENTI FORMATIVI SULLA PREVENZIONE SISMICA -

MODULO 2 : MATERIALI E TECNOLOGIE INNOVATIVE PER IL RETROFIT ANTISISMICO

Interventi di rinforzo su strutture esistenti con materiali compositi
2 - Applicazioni sperimentali

Prof. Ing. Lidia La Mendola

Professore Ordinario di Tecnica delle Costruzioni presso l'Università di Palermo

Dipartimento Casa Italia
Presidenza del Consiglio dei Ministri

CON IL PATROCINIO DI: ISI Ingegneria Sismica Italiana, reluis, ENEA, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici

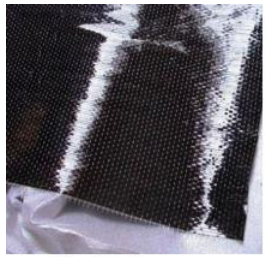
Sperimentazione condotta su elementi in muratura di calcarenite rinforzati con materiali compositi

- **La muratura è un materiale NRT e quasi fragile, con comportamento costitutivo in compressione con softening. Il fenomeno di interfaccia supporto/rinforzo ha <u>caratteristiche simili al caso di supporto in calcestruzzo</u>**

- **Le sperimentazioni presentate sono per lo più su muratura di calcarenite, molto diffusa nelle aree del Mediterraneo. La calcarenite è una roccia sedimentaria composta da frammenti calcarei e silicei, cementati da calcite**

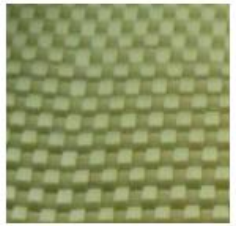
- **Rinforzo utilizzato: con materiali innovativi - materiali compositi**
  - **FRP (tessuto + resina) – (spessore dell'ordine di 1 mm)**
  - **FRCM (rete in fibra + malta) – (spessore dell'ordine di 1 cm)**
  - **CRM (rete preformata in FRP + malta) – (spessore dell'ordine di 4-5 cm)**

Rinforzo con Fiber Reinforced Polymer (FRP)


Carbonio

FIBRE di rinforzo più usate nell'Ingegneria Civile

Vetro


Kevlar

Basalto

Acciaio

Tessuti ibridi

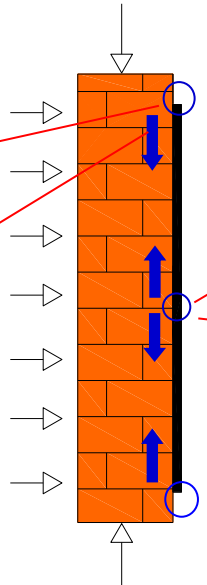
MATRICI

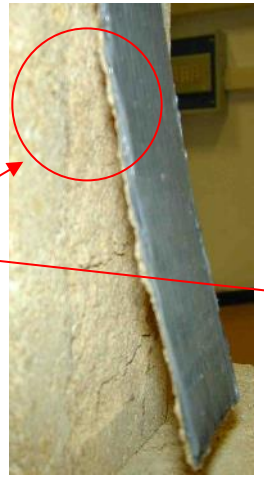
Matrici organiche, polimeriche a base di resine termoindurenti come **le resine epossidiche**.

Materiale di base: muratura di calcarenite. Rinforzo: Tessuto di carbonio con resina epossidica applicato con tecnica wet-ly-up

ADERENZA AL SUPPORTO: MECCANISMI DI CRISI LOCALE

PLATE END DEBONDING





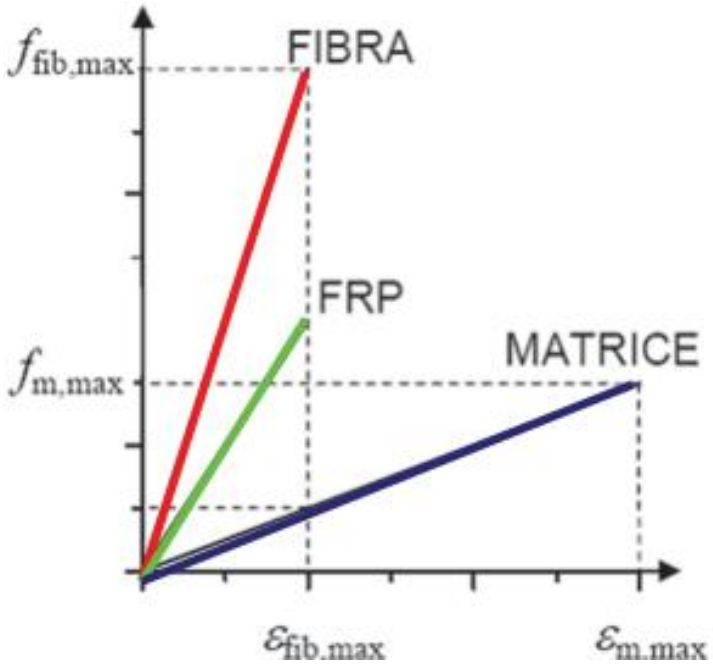
INTERMEDIATE CRACK DEBONDING

La rottura è di tipo coesivo

Prove di trazione su coupon in FRP

Kalavagunta et al. 2014. «Axially loaded columns strengthened with CFRP», Jordan Journal of Civil Engineering 8(1):59-69

Le caratteristiche del composito sono differenti da quelle dei costituenti



Regola delle miscele

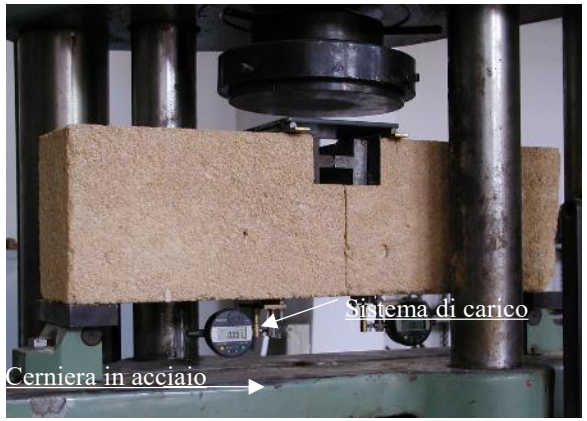
$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

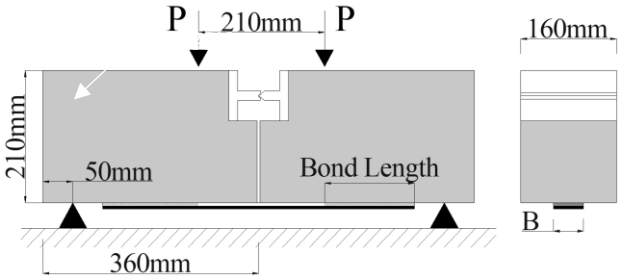
$$f_c = f_f V_f + f_m (1 - V_f)$$

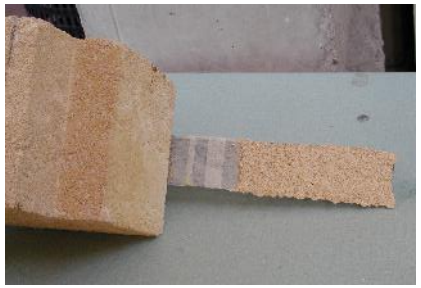
La deformazione massima è la minore tra le due

Beam Test

Prova di trazione indiretta

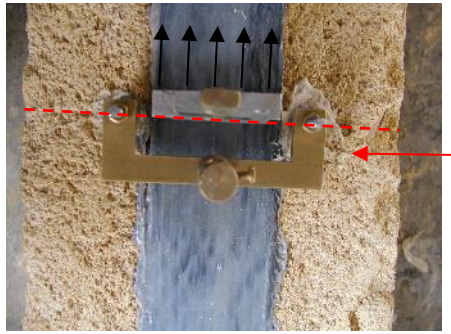


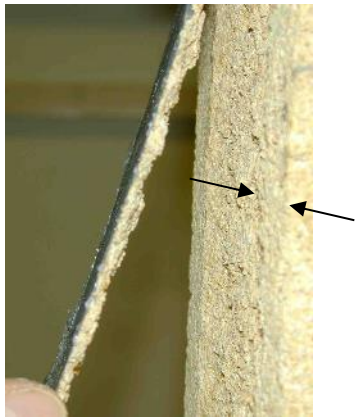


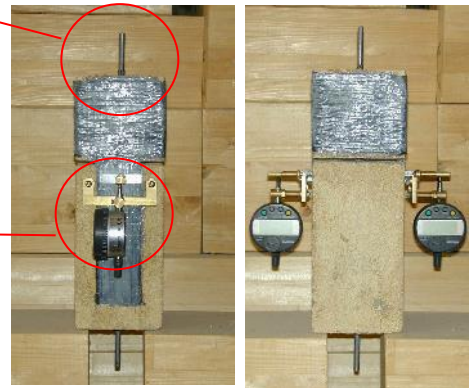


Double Shear Pulling Test

- **Prova di trazione diretta**
- **Il campione è sottoposto a trazione**
- **Lo sforzo di trazione si traduce in tensioni tangenziali all'interfaccia**

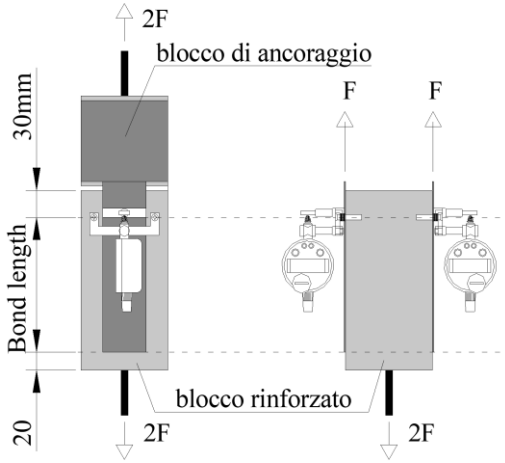




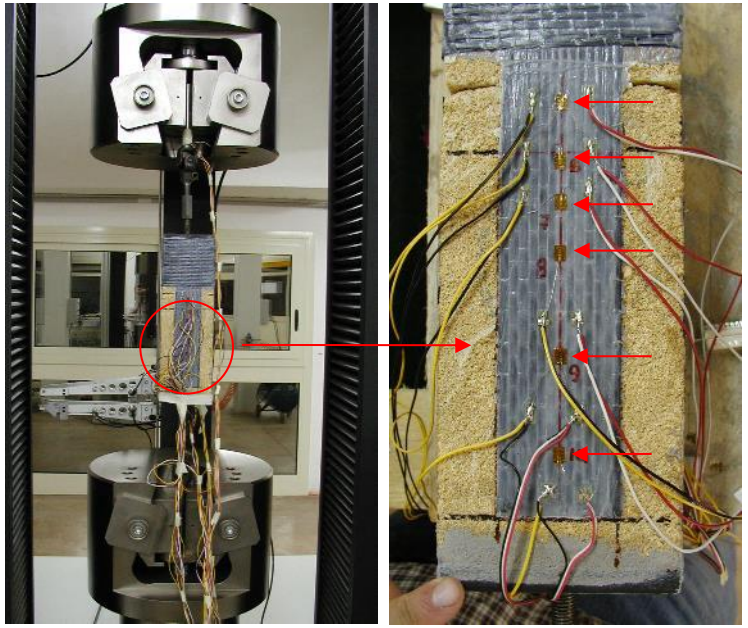


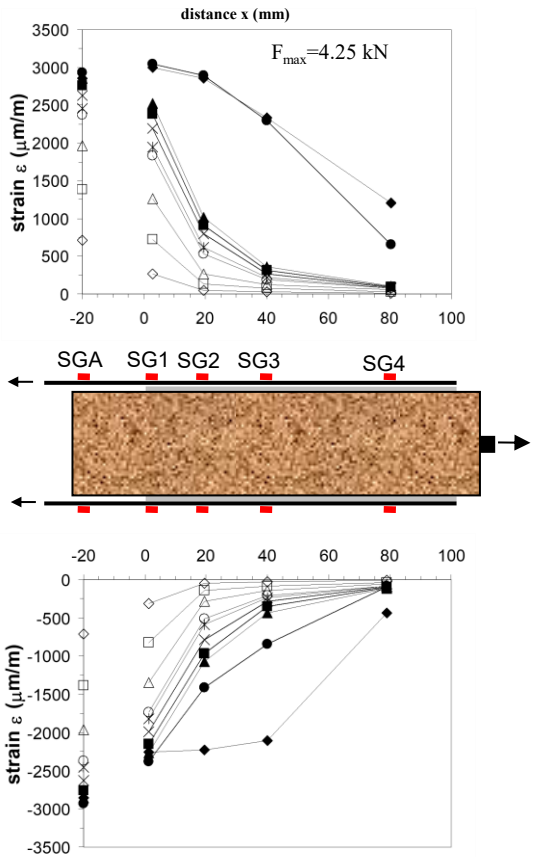
CNR-DT 200 (2004), *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati* e successive revisioni

Matteo Accardi, Tesi di Dottorato in Ingegneria delle Strutture – XVI Ciclo Università di Palermo, *Strengthening of structural masonry elements subjected to out-of-plane loads using CFRP reinforcement* (2004)



Nuova proposta di set-up di prova di aderenza





$$F_u = b_f \sqrt{2 E_f t_f G_f}$$

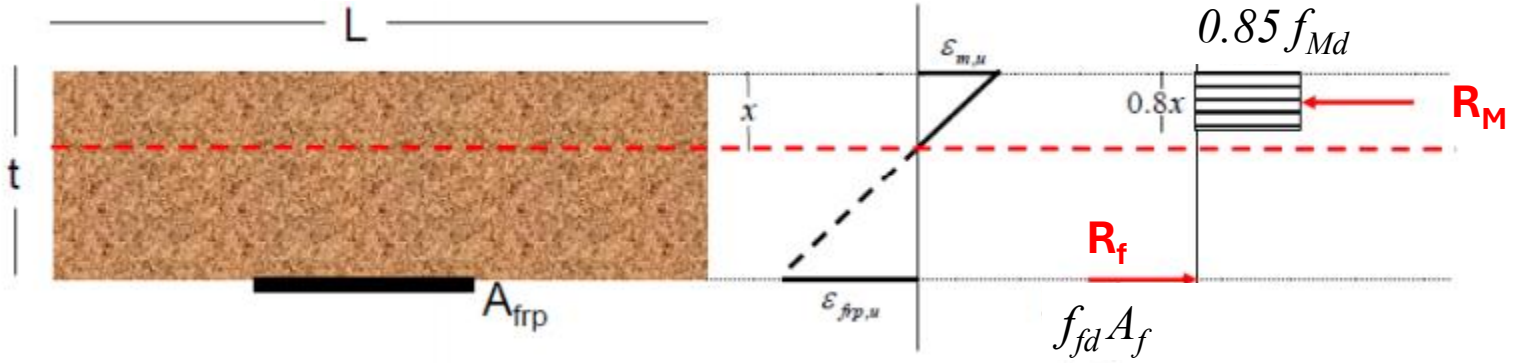
$$G_f = k_b k_G \sqrt{f_{cm} f_{ctm}}$$

Espressioni di interesse progettuale

$$\varepsilon_{fdd} = \frac{F_d}{b_f t_f E_f} = \frac{\alpha}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2 \frac{k_b k_G}{FC} \sqrt{f_{cm} f_{ctm}}}{E_f t_f}}$$

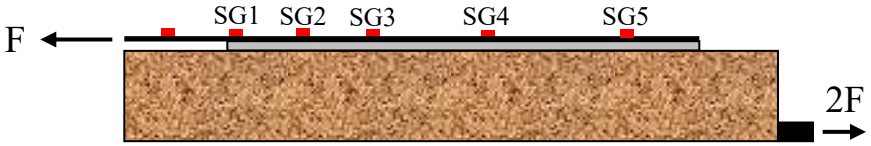
$$L_{anc,d} = \frac{1}{\gamma_{Rd} f_{bd}} \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot G_{fd}}{2}} \geq 150mm$$

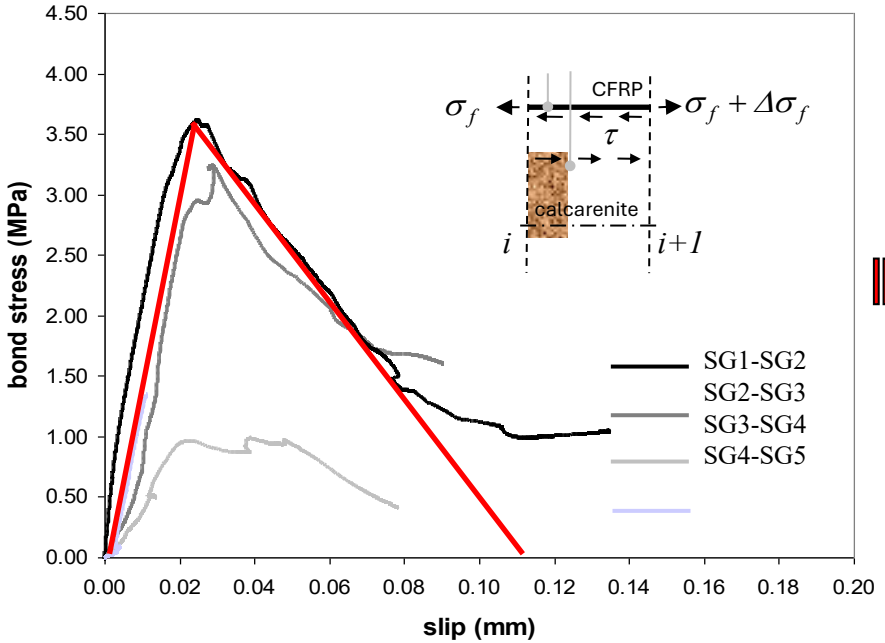
- **Double shear pulling tests**
- **Simmetria della prova**
- **Meccanismo di rottura per debonding**
- **Lunghezza di trasferimento 40÷80mm**
- **Lunghezza efficace 80÷120mm**

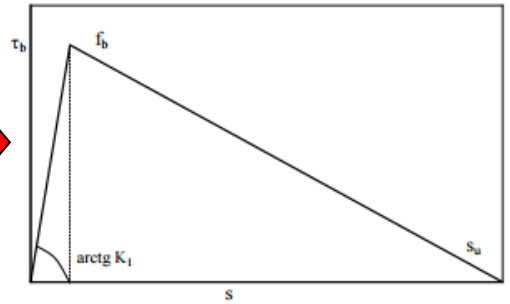


$$\tau_{i,av} = \frac{A_f \cdot E_f \left(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i\right)}{b_f \left(x_{i+1} - x_i\right)}$$

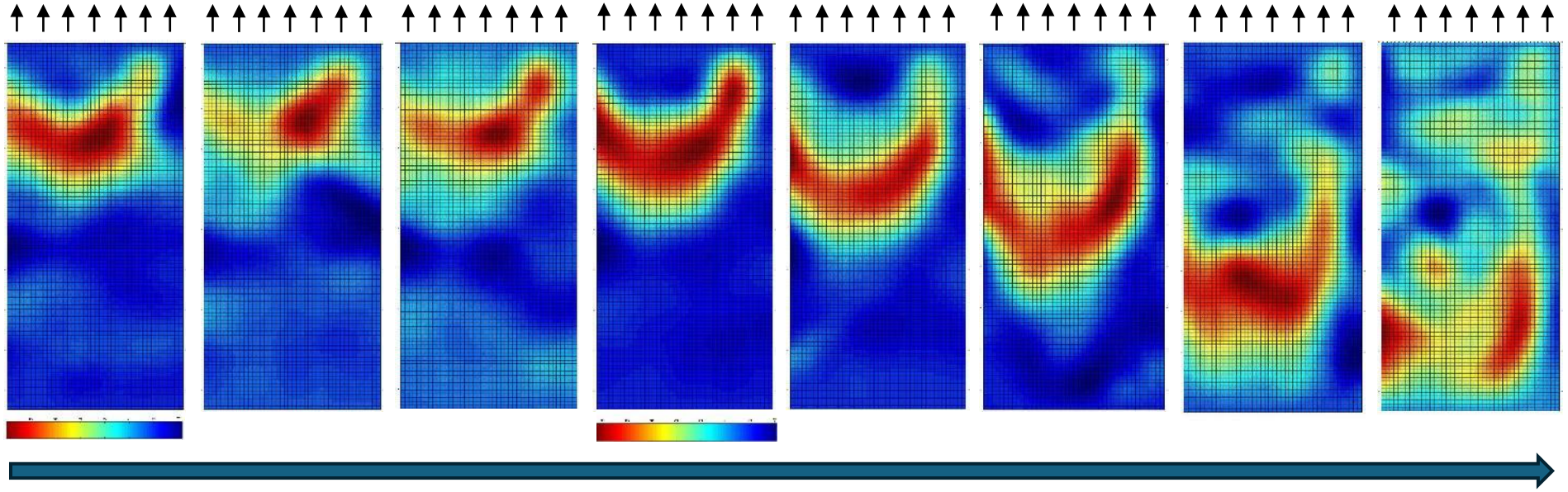
$$s(x) = s(x_i) + \frac{1}{2}\left(x_{i+1} - x_i\right)\left[\frac{\left(\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i\right)}{4} + \varepsilon_i\right]$$





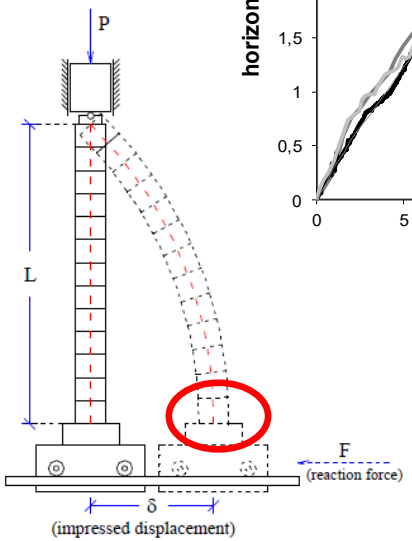


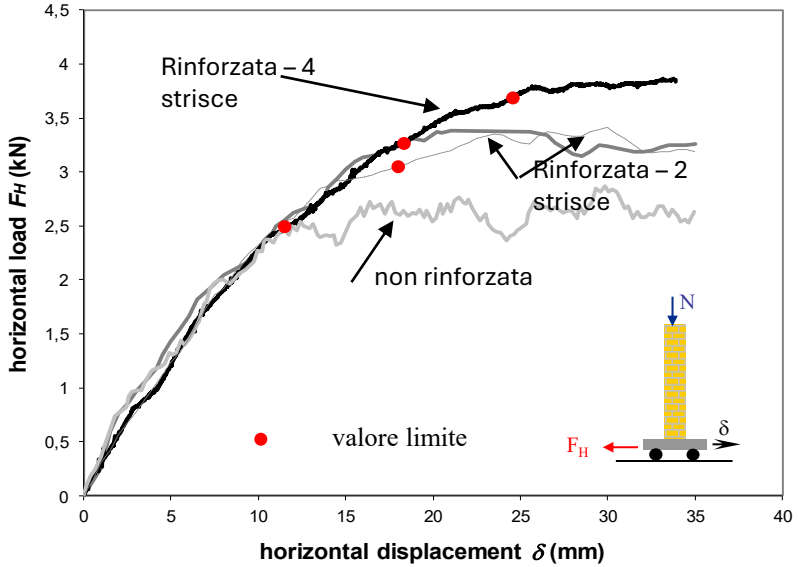
Digital Image Correlation (DIC)

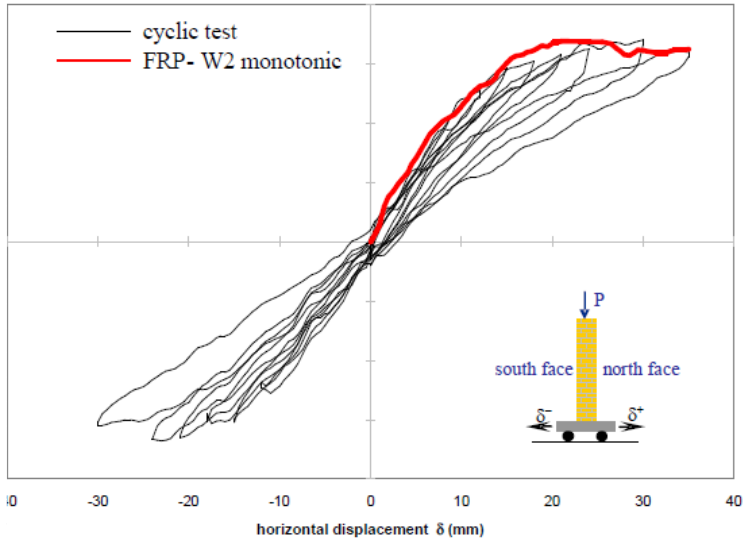


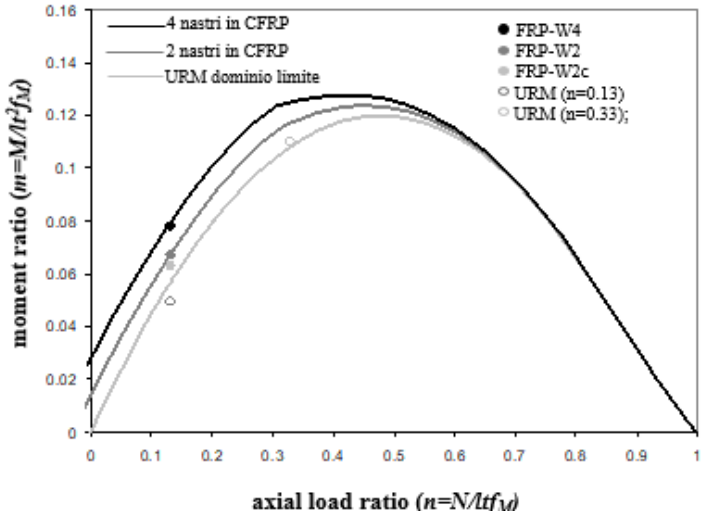
evidenza del degrado al crescere del tiro

PARETE CARICATA FUORI PIANO RINFORZATA CON CFRP



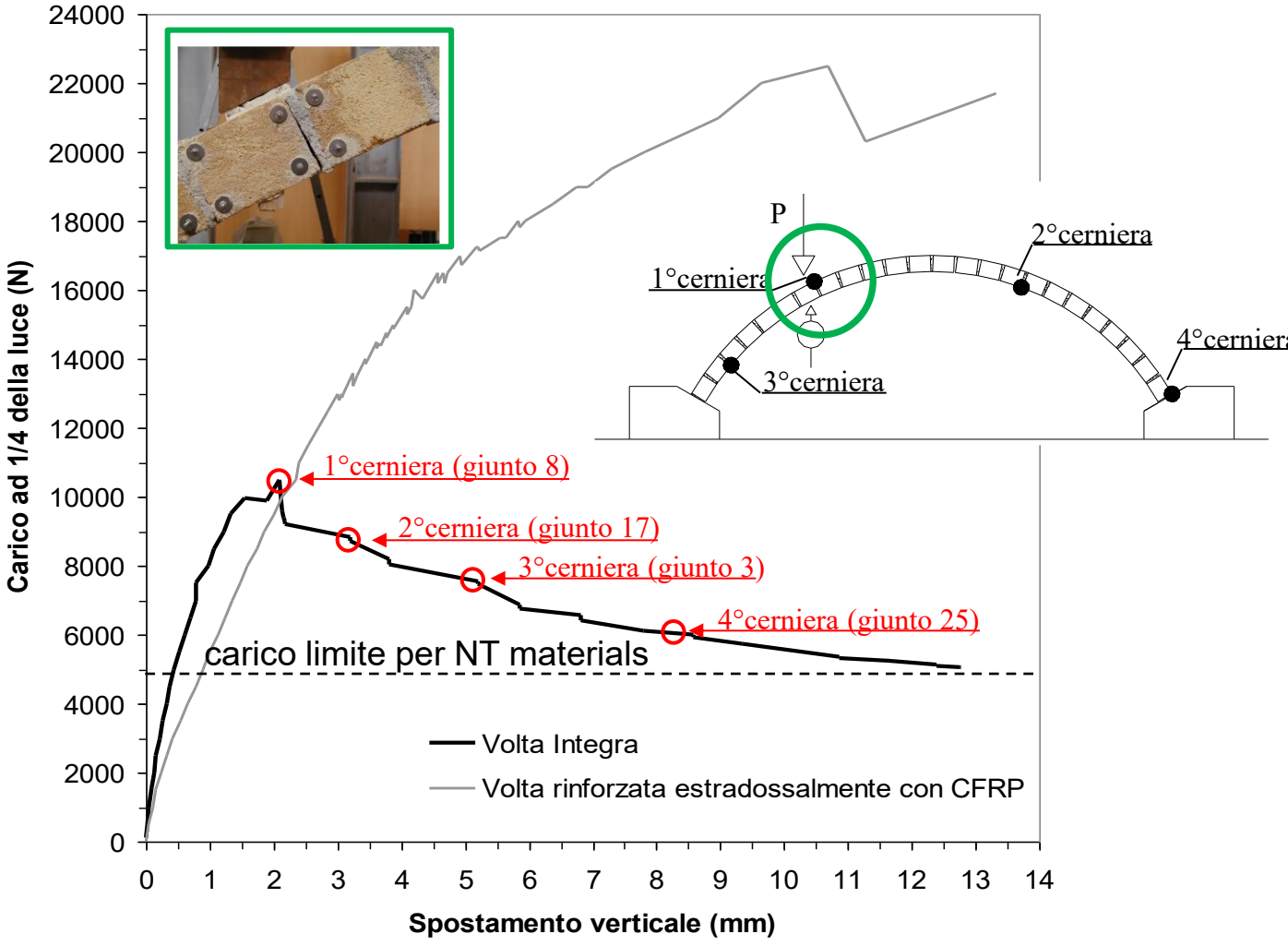




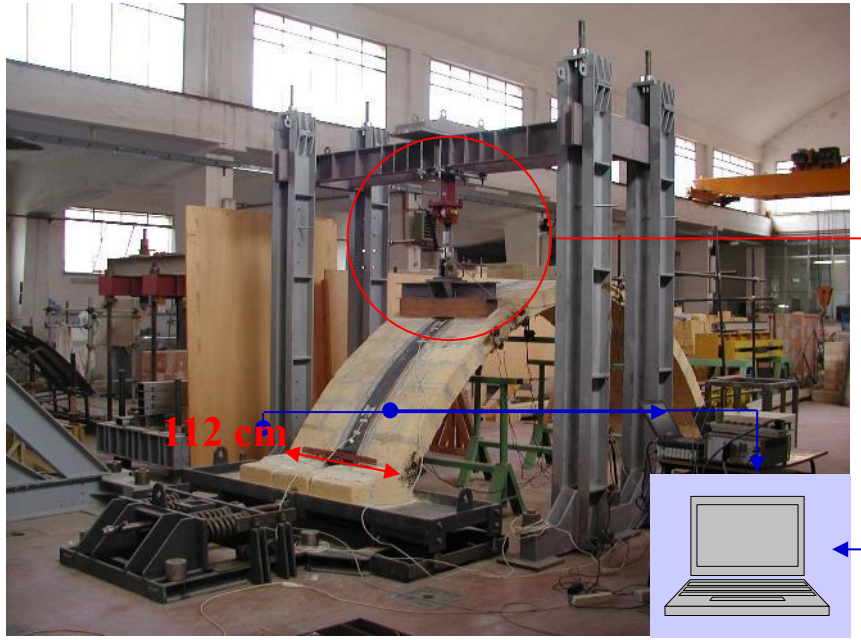


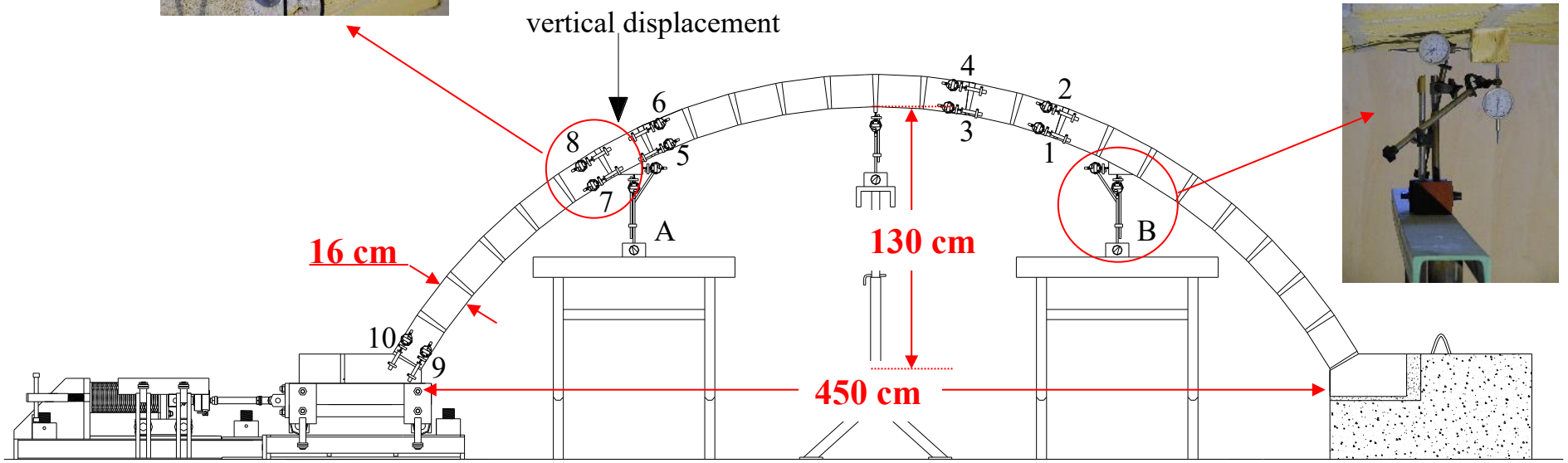
Altezza 2,1m; Larghezza 740mm; Spessore 205mm

VOLTA CILINDRICA CARICATA AD ¼ DELLA LUCE RINFORZATA ALL'ESTRADOSSO CON CFRP



Luce = 4.5m; Monta 1.3m; Spessore 160 mm; Profondità 1.12m





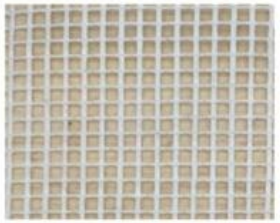
- **Prova a controllo di spostamento**
- **Sistema di misura**
- **Apparecchiatura di prova**
- **CFRP vacuum system**

Rinforzo con Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM)

I sistemi **FRCM** (Fabric Reinforced Cementious Matrix) sono una combinazione di griglie in materiale composito inserite nella matrice a base inorganica (malta).

RETE

❖ Carbonio



❖ Vetro

❖ Basalto

MATRICE INORGANICA

- Malta a base di cemento
- Malta a base di calce
- Malta geopolimerica

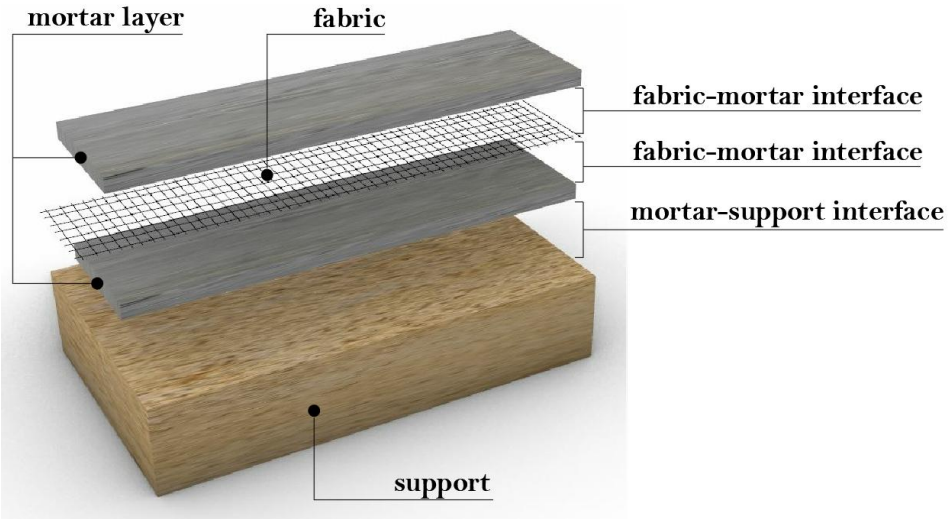
Spesso con aggiunta di fibre corte e/o **additivi polimerici**

Il ruolo dell'INTERFACCIA

Il comportamento costitutivo del FRCM è definito attraverso:

- RISPOSTA A TRAZIONE
- ADERENZA DEL RINFORZO AL MATERIALE DI BASE

Entrambi dipendenti dal complesso meccanismo di trasferimento tra malta e rete e tra FRCM e supporto, soprattutto nello stadio di post-fessurazione della malta



Maria Concetta Oddo, Tesi di Dottorato in Civil, Environmental and Materials Engineering – XXXV Ciclo (2023), Università di Palermo, *Advances in experimental characterization and modelling of FRCM composites for structural retrofitting*

CNR-DT 215/2018 (ver. 30/06/2020) "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica"

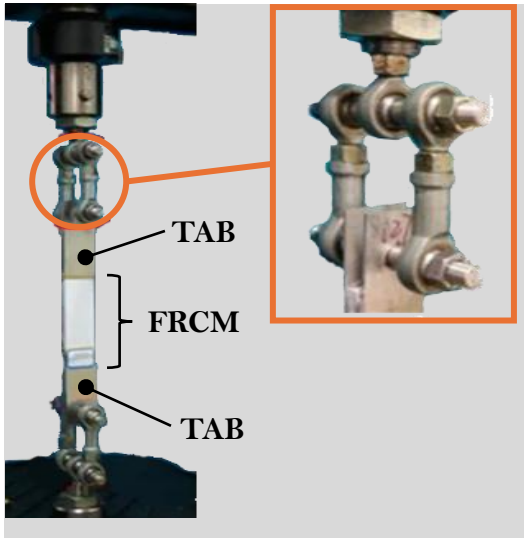
Oddo, M. C., Cavaleri, L., Papanicolaou, C., & La Mendola, L. (2024). *Experimental characterization of fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) systems applied on calcarenite stone: Adoption of non-standard setup for double-shear bond tests*. Journal of Composites Science, 8(6), 206.

Oddo, M. C., Minafò, G., & La Mendola, L. (2023). *Experimental investigation on tensile and shear bond behaviour of Basalt-FRCM composites for strengthening calcarenite masonry elements*. Procedia Structural Integrity, 44, 2294-2301.

PROVE DI TRAZIONE

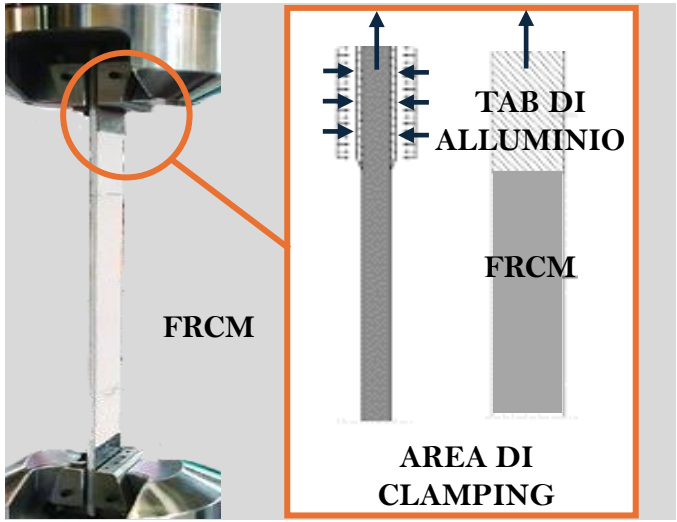
Metodo Clevis

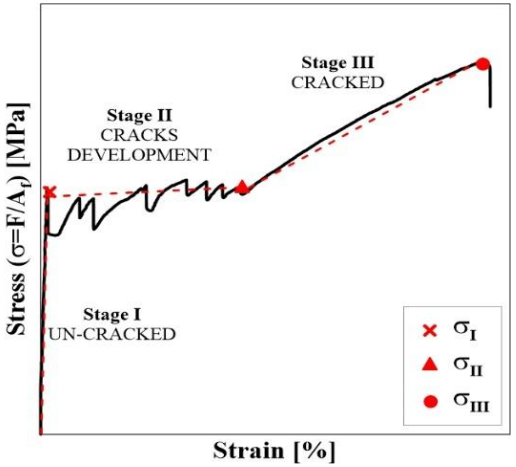
(Acceptance Criteria AC434)



Metodo Clamping

(Linee Guida Italiane)





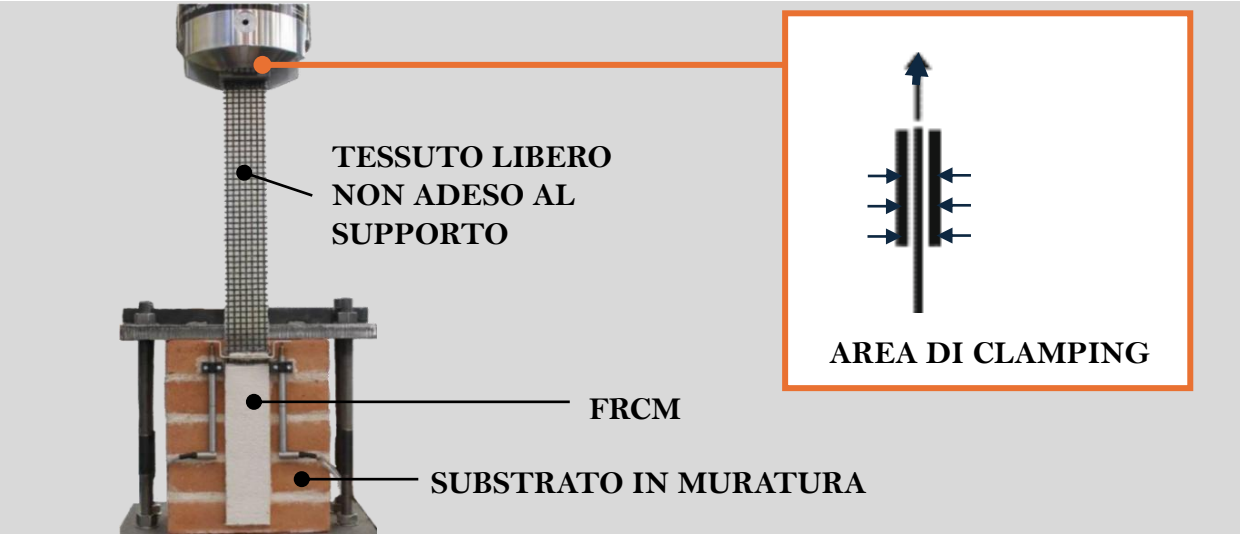
É stata osservata una **significativa variabilità dei risultati** a causa dell'elevato numero di **VARIABILI COINVOLTE NEL PROBLEMA**:

- PROPRIETÀ E GEOMETRIA DEL TESSUTO
- GRADO E COMPOSIZIONE DELLA MALTA
- NATURA DEL SUPPORTO
- SET-UP DI PROVA

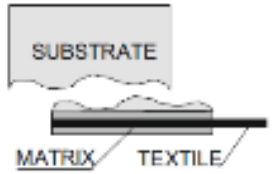
PROVE DI ADERENZA

Prova di aderenza a taglio singolo

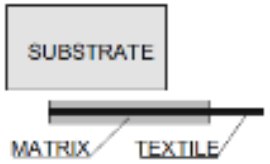
(RILEM TC 250-CSM)



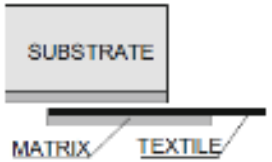
Modi di rottura



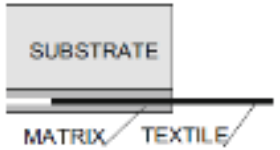
Rottura coesiva del substrato



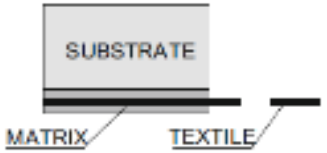
Distacco all'interfaccia matrice-substrato



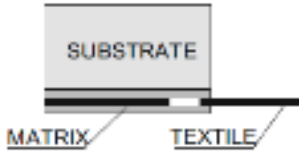
Distacco all'interfaccia tessuto-matrice



Scorrimento del tessuto all'interno della matrice



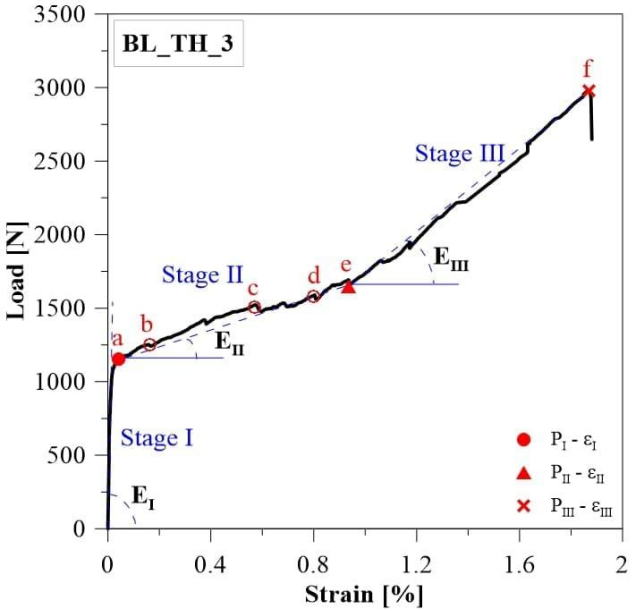
Rottura per trazione del tessuto fuori dalla matrice

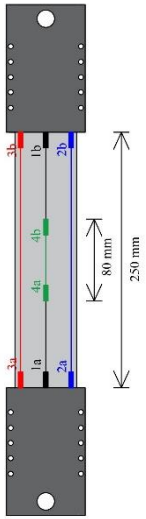


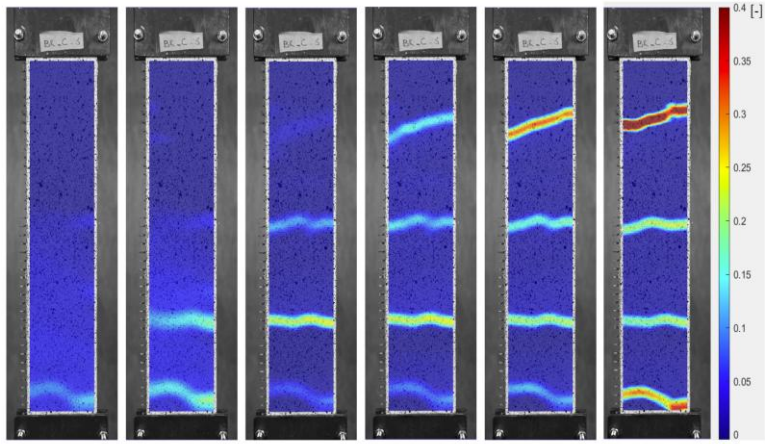
Rottura per trazione del tessuto all'interno della matrice

Risultati delle prove di trazione

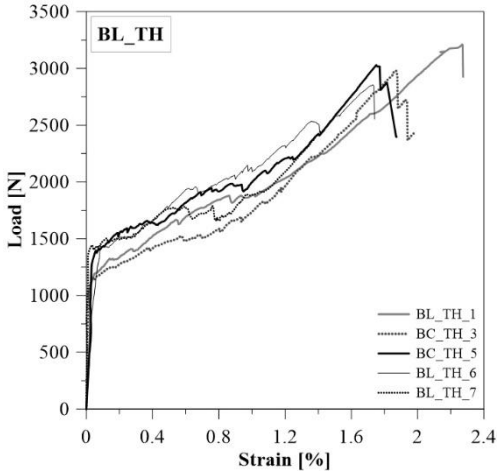
Risultati della DIC



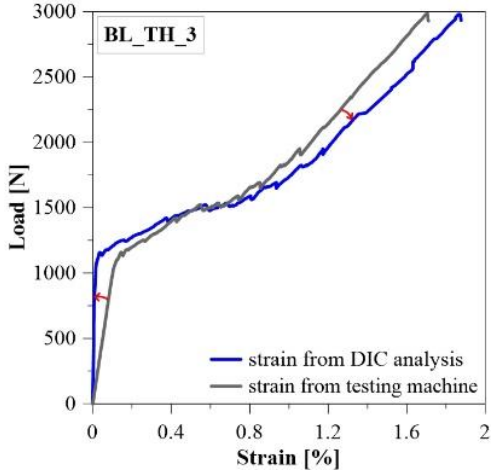




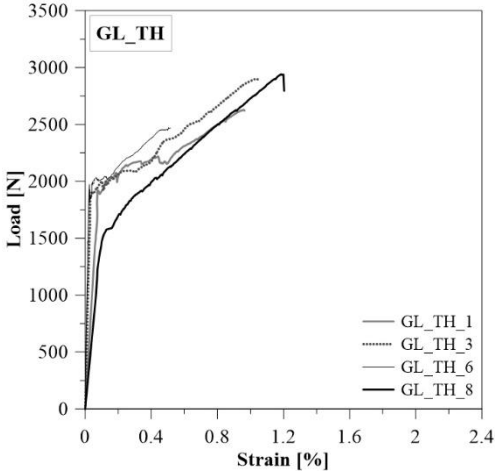
BFRCM con malta a base di CALCE



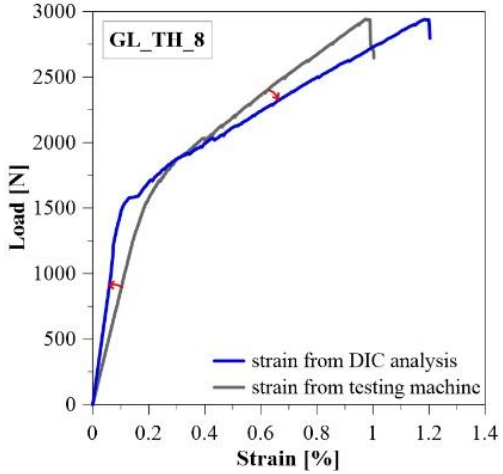
Confronto con il sistema di misura tradizionale



GFRCM con malta a base di CALCE

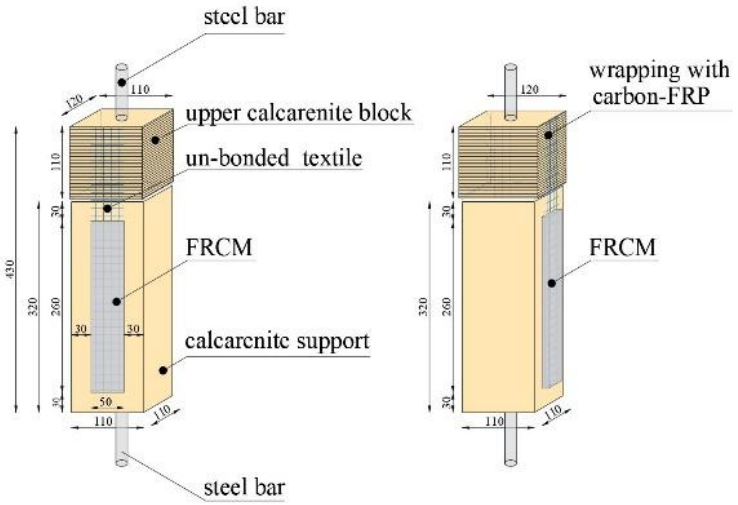


Confronto con il sistema di misura tradizionale



Prove di aderenza *double shear pulling test*

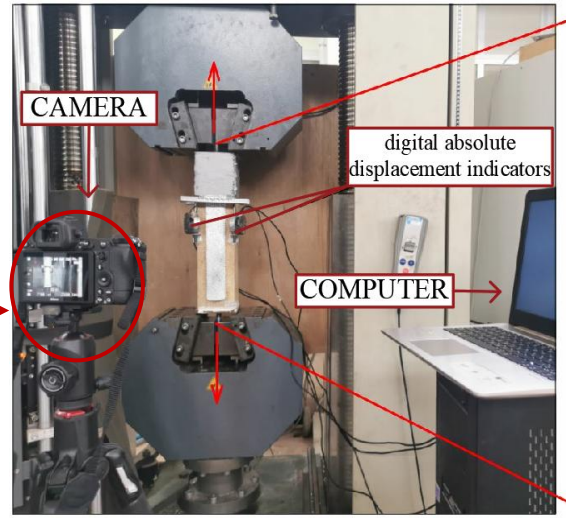
Studio dell'aderenza
(in accordo con RILEM TC 250-CSM)

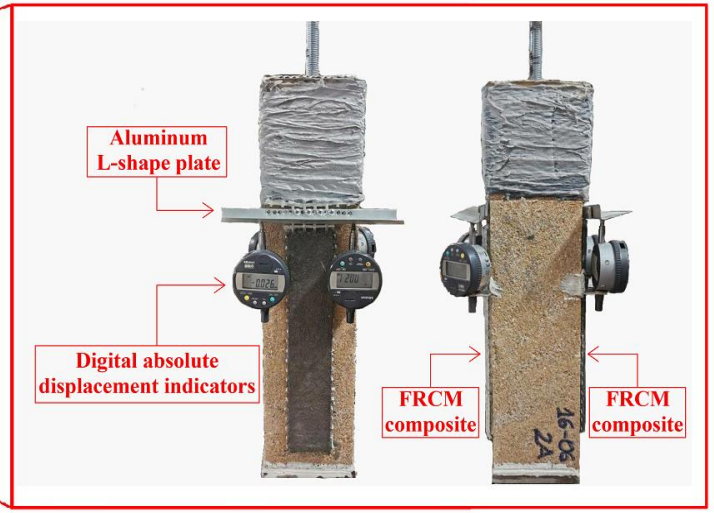


SET-UP PROPOSTO

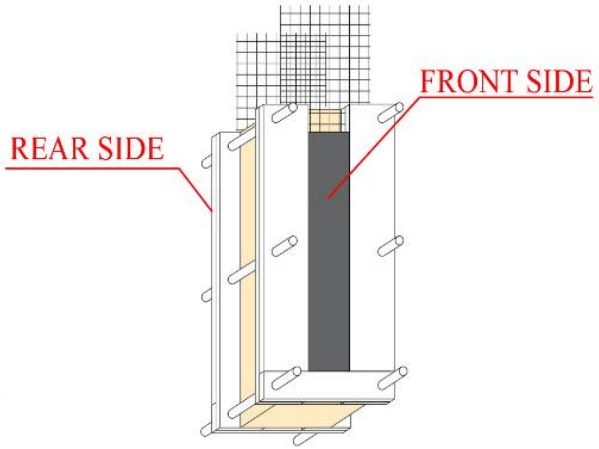
↓

TECNICA DELLA DIGITAL IMAGE CORRELATION (DIC)

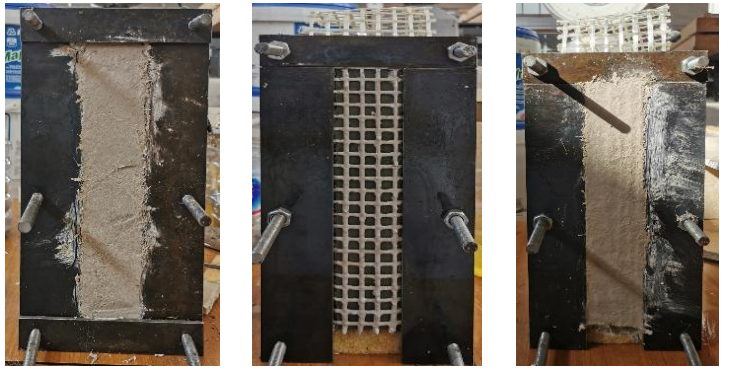




CASSAFORMA METALLICA



Procedura per la realizzazione del SISTEMA FRCM



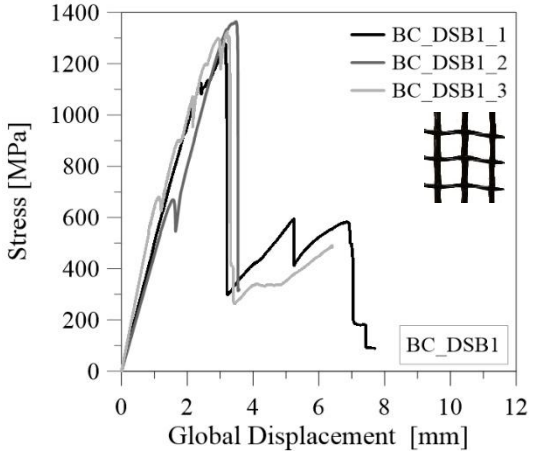
Primo strato di malta | Posizionamento della rete | Secondo strato di malta

Procedura per la realizzazione del SISTEMA DI WRAPPING

Applicazione del primer | Applicazione della malta | Avvolgimento con striscia di carbonio impregnata | Sigillatura del sistema di avvolgimento

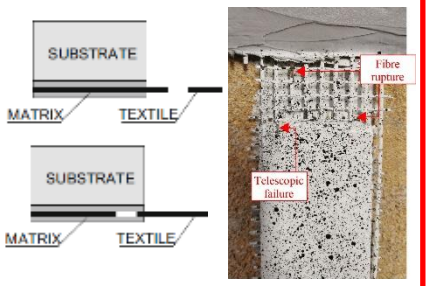
Risultati delle prove di aderenza

BFRCM con malta a base CEMENTIZIA

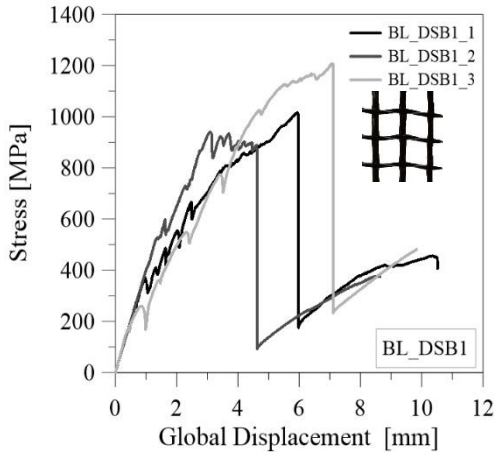


MODALITÀ DI CRISI

Rottura a trazione della fibra

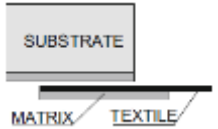


BFRCM con malta a base di CALCE

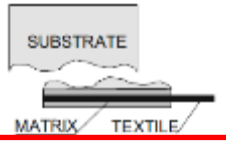


MODALITÀ DI CRISI

Distacco all'interfaccia tra tessuto e matrice

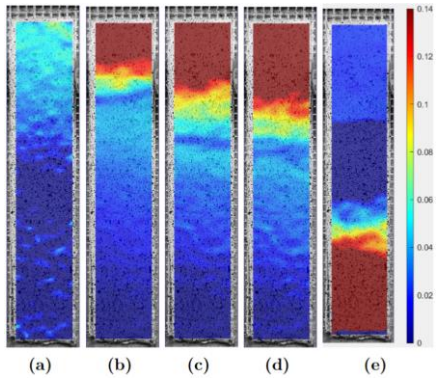


Rottura coesiva del substrato

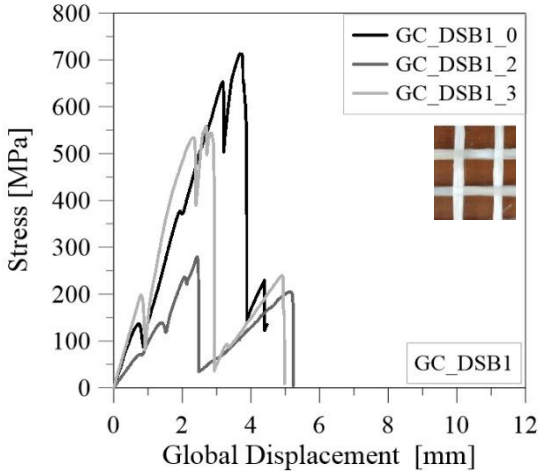


Risultati della DIC

BFRCM con malta a base CALCE - BL_DSB1_2

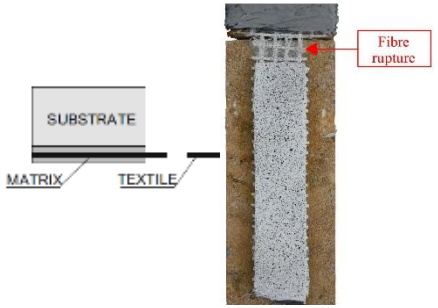


GFRCM con malta a base CEMENTIZIA

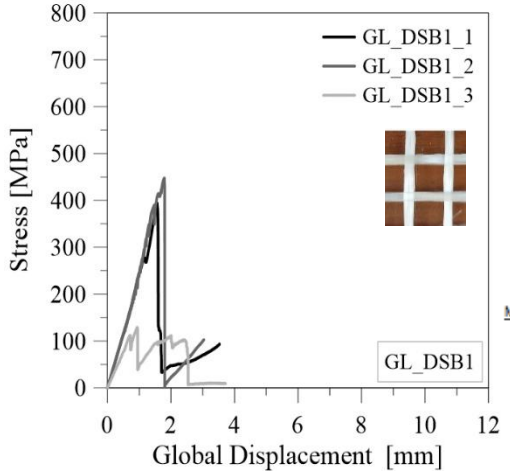


MODALITÀ DI CRISI

Rottura a trazione della fibra

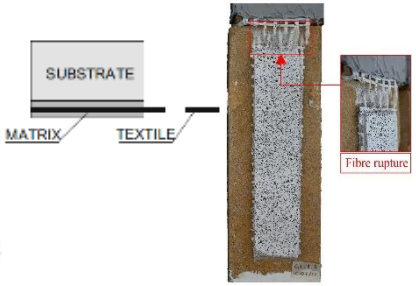


GFRCM con malta a base di CALCE

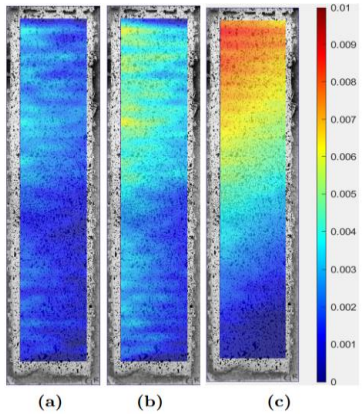


MODALITÀ DI CRISI

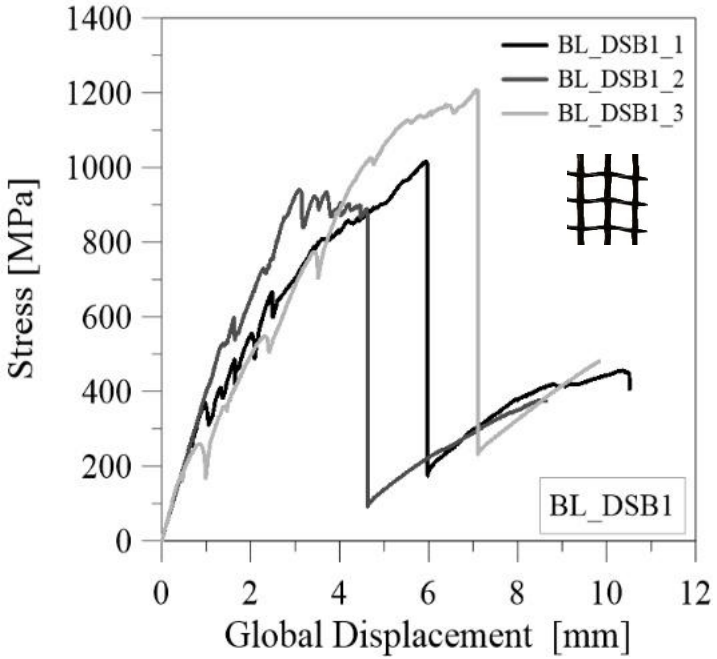
Rottura a trazione della fibra

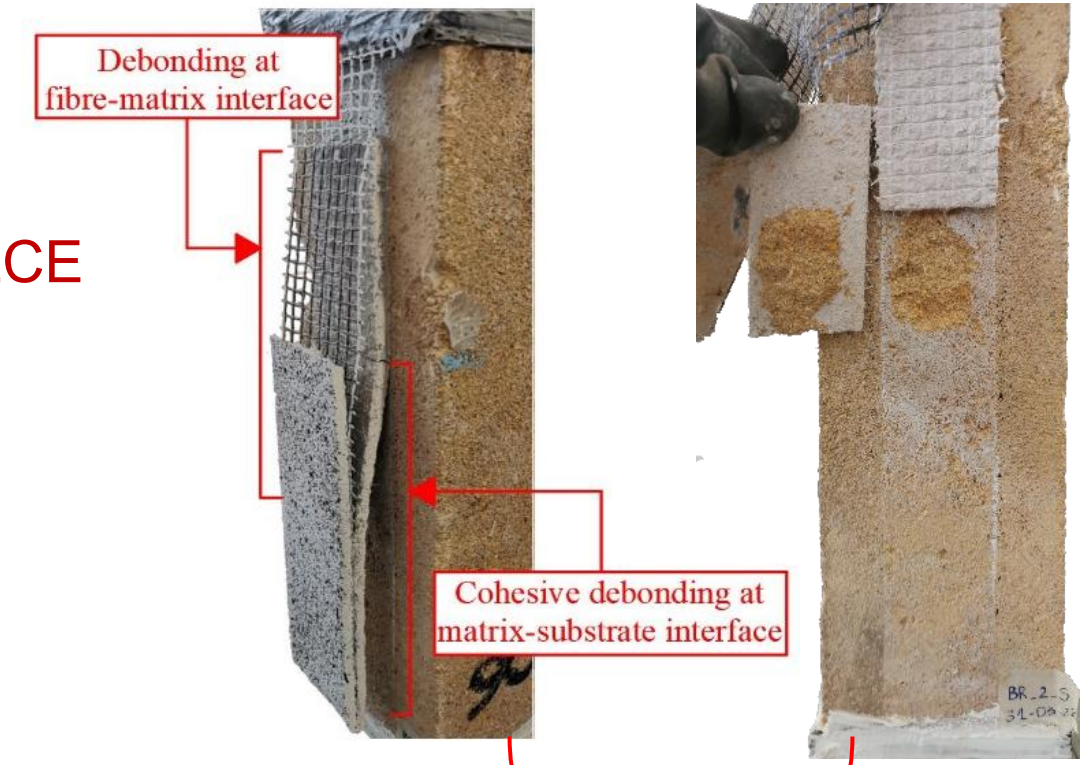


GFRCM con malta a base CALCE - GL_DSB1_2

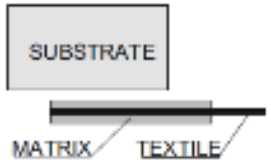


Risultati delle prove di aderenza **BFRCM** con malta a base di CALCE

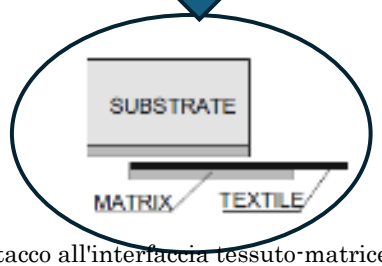




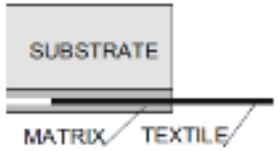
Rottura coesiva del substrato



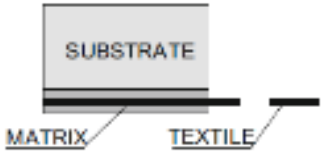
Distacco all'interfaccia matrice-substrato



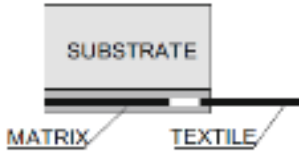
Distacco all'interfaccia tessuto-matrice



Scorrimento del tessuto all'interno della matrice



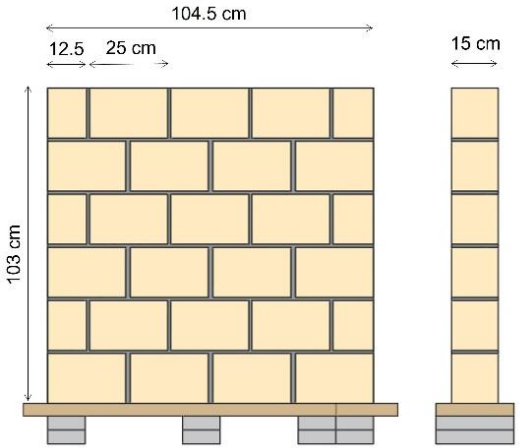
Rottura per trazione del tessuto fuori dalla matrice



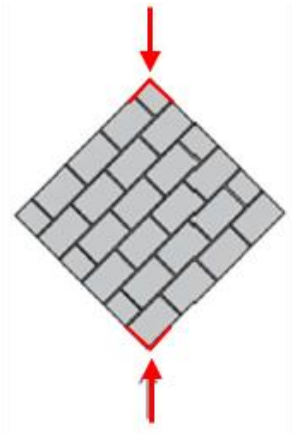
Rottura per trazione del tessuto all'interno della matrice

Prove di compressione diagonale su pannelli in muratura rinforzati con FRCM

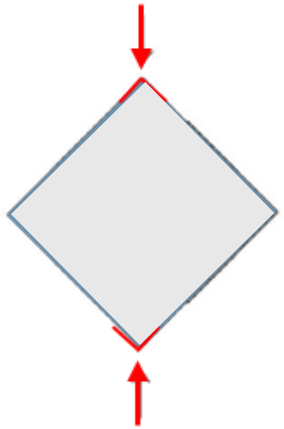
RINFORZO A TAGLIO



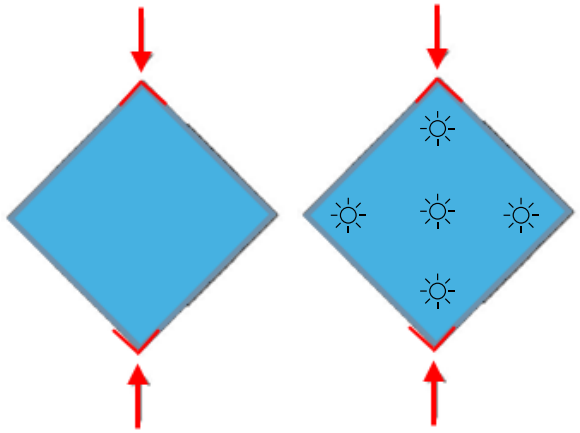
Marielisa Di Leto, Tesi di Dottorato in Advances in Modeling, Health-monitoring, Infrastructures, Geomatics, Geotechnics, Hazards, Engineering Structures, Transportation (AIM HIGHEST), XXXVIII Ciclo (2026), Università di Palermo, *FRCM and CRM retrofitting applications on masonry buildings*



URM
n.3 campioni

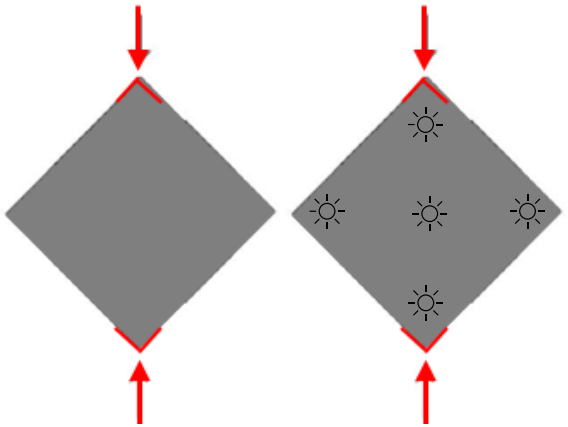


Solo malta dell'FRCM
n.1 campione



G_FRCM
n.2 campioni

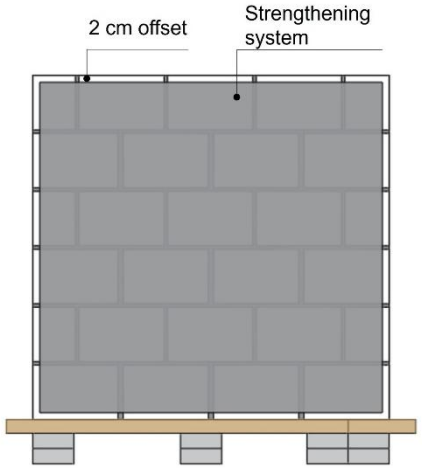
G_FRCM+connettori
n.1 campione



C_FRCM
n.2 campioni

C_FRCM+connettori
n.1 campione

Preparazione dei campioni



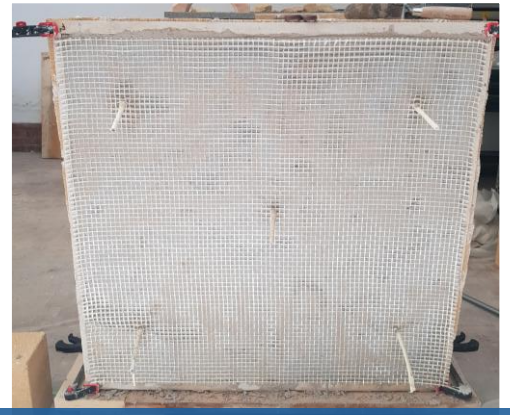
Preparazione superficie con consolidante e applicazione primo strato di malta

Stesura del promotore di adesione e applicazione tessuto in fibra

Stesura del secondo strato di promotore di adesione sul tessuto

Stesura del secondo strato di malta e finitura superficiale

Preparazione della superficie con consolidante e applicazione di 5 connettori con ancorante chimico

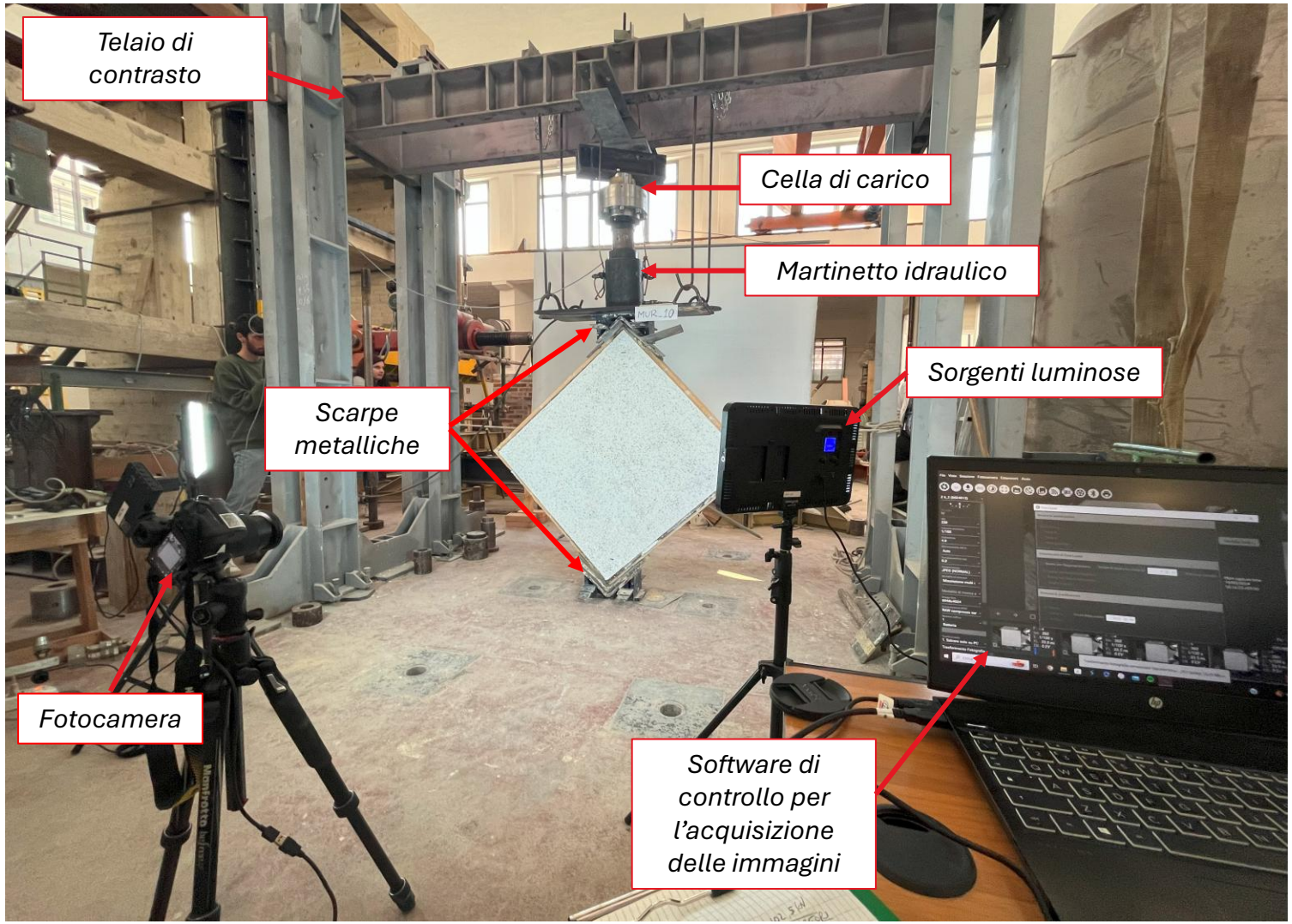


Applicazione del primo strato di malta, stesura del promotore di adesione e applicazione del tessuto

Sfioccatura dei connettori per 15 cm sulla rete e stesura del secondo strato di promotore di adesione

Stesura del secondo strato di malta e finitura superficiale

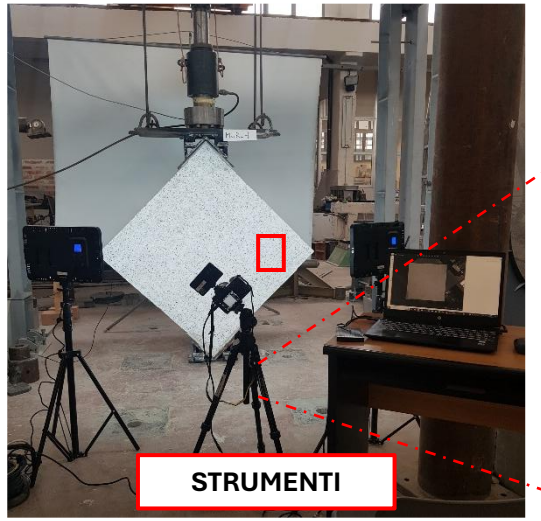
Set-up di prova



1° SISTEMA DI ACQUISIZIONE

Comparatori millesimali ancorati a dei capisaldi disposti lungo le due diagonali principali

2° SISTEMA DI ACQUISIZIONE



Tecnica della correlazione digitale delle immagini (DIC)

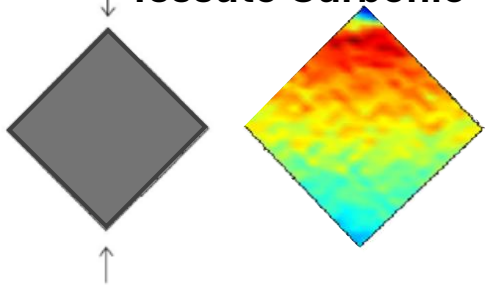
Risultati

	SAMPLE ID	P_{exp} [kN]	Incr. [%]	$P_{stimato}$ [kN]
Senza rinforzo	URM_1	108,54	-	92,3
	URM_2	130,69		
	URM_3	91,05		
Tessuto vetro	G_FRCM_1	177,11	+37,9	152,36
	G_FRCM_2	175,13		
Tessuto vetro +connettori	G_FRCM+C	182,84	+39,5	152,36
Tessuto carbonio	C_FRCM_1	158,15	+20,1	366,90
	C_FRCM_2	117,47		

Senza rinforzo

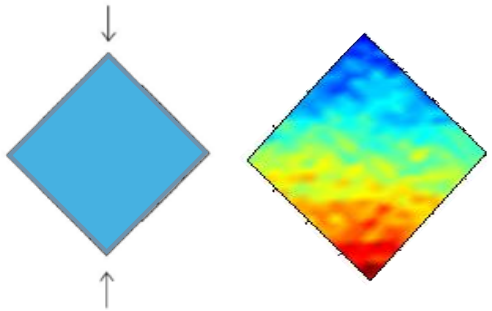
Lesioni diagonali miste, che attraversano giunti e blocchi

Tessuto Carbonio



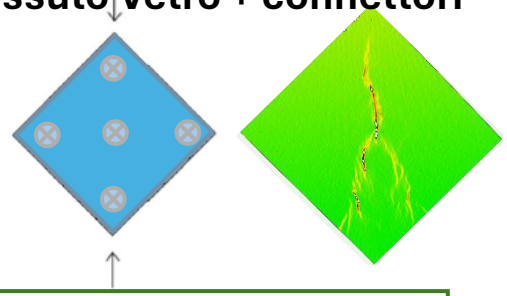
Lesioni in testa e schiacciamento al piede

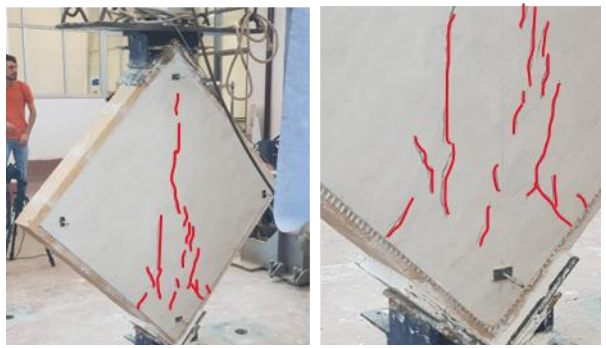
Tessuto Vetro



Lesioni al piede, lungo lo spessore del pannello

Tessuto Vetro + connettori





Fessurazione diagonale sulla matrice

CNR-DT215

$$V_{t,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot n_f \cdot t_{Vf} \cdot \ell_f \cdot \alpha_t \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f$$

CONFINAMENTO DI COLONNE MURARIE CON FRCM

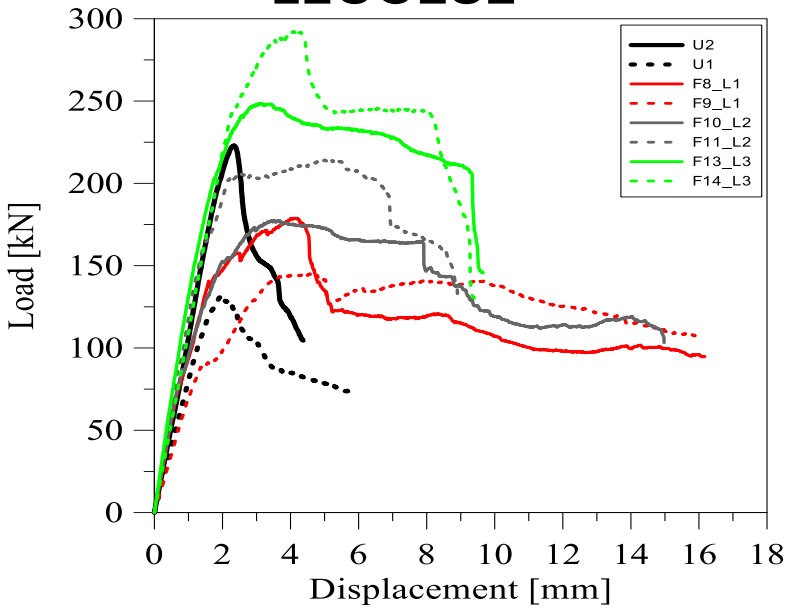
Round Robin Test

Colonne di muratura
NON CONFINATE

Colonne di muratura
CONFINATE con FRCM

U2 **non confinate**
U1
F8_L1 **confinate**
F9_L1 **con 1 strato**
F10_L2 **confinate**
F11_L2 **con 2 strati**
F13_L3 **confinate**
F14_L3 **con 3 strati**

MURATURA IN PIETRA LECCESE



MODALITÀ DI CRISI

Muratura **non confinata**

Confinata con 1 strato di G-TRM

Confinata con 2 strati di G-TRM

CRISI ALLO SPIGOLO

Confinata con 3 strati di G-TRM

Aiello, M. A., Bencardino, F., Cascardi, A., D'Antino, T., Fagone, M., Frana, I., **La Mendola, L.**, Lignola G.P., Mazzotti C., Micelli F., **Minafó G.**, Napoli A., Ombres L., **Oddo, M. C.**, Poggi C., Prota A., Ramaglia G., Ranocchiai G., Realfonzo R. and Verre, S. (2021). *Masonry columns confined with fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) systems: A round robin test.* Construction and Building Materials, 298, 123816.

$$r_c \geq 20\,mm$$

$$f_{l,eff} = k_H \cdot f_l\,, \qquad k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_m}$$

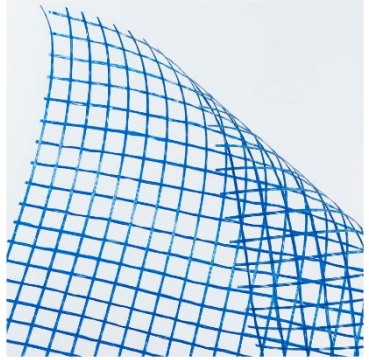
CNR-DT215

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

Rinforzo con Composite Reinforced Mortar (CRM)

I sistemi **CRM** (Composite Reinforced Mortar) sono una combinazione di griglie in materiale composito FRP inserite nella matrice a base inorganica (malta).

RETE



Rete in FRP con maglia di dimensione variabile tra 30 e 80 mm, accoppiata con connettori preformati a L

MATRICE INORGANICA

- Malta a base di cemento
- Malta a base di calce
- Malta geopolimerica

Spesso con aggiunta di fibre corte e/o **additivi polimerici**

Caratteristiche principali

- rinforzo costituito da rete preformata in FRP, generalmente in fibra di vetro, carbonio o basalto, con maglia di dimensione superiore ai 30 mm;
- applicazione con matrice di spessore superiore ad 1 cm, generalmente 3-5 cm;
- è sempre previsto l'utilizzo di connettori preformati a L, in FRP, di dimensione variabile in funzione della dimensione della maglia e dello spessore del substrato in muratura;
- il sistema contribuisce ad incrementare la rigidezza nel piano e offre un contributo di rigidezza anche per azioni fuori piano.

Documenti di riferimento

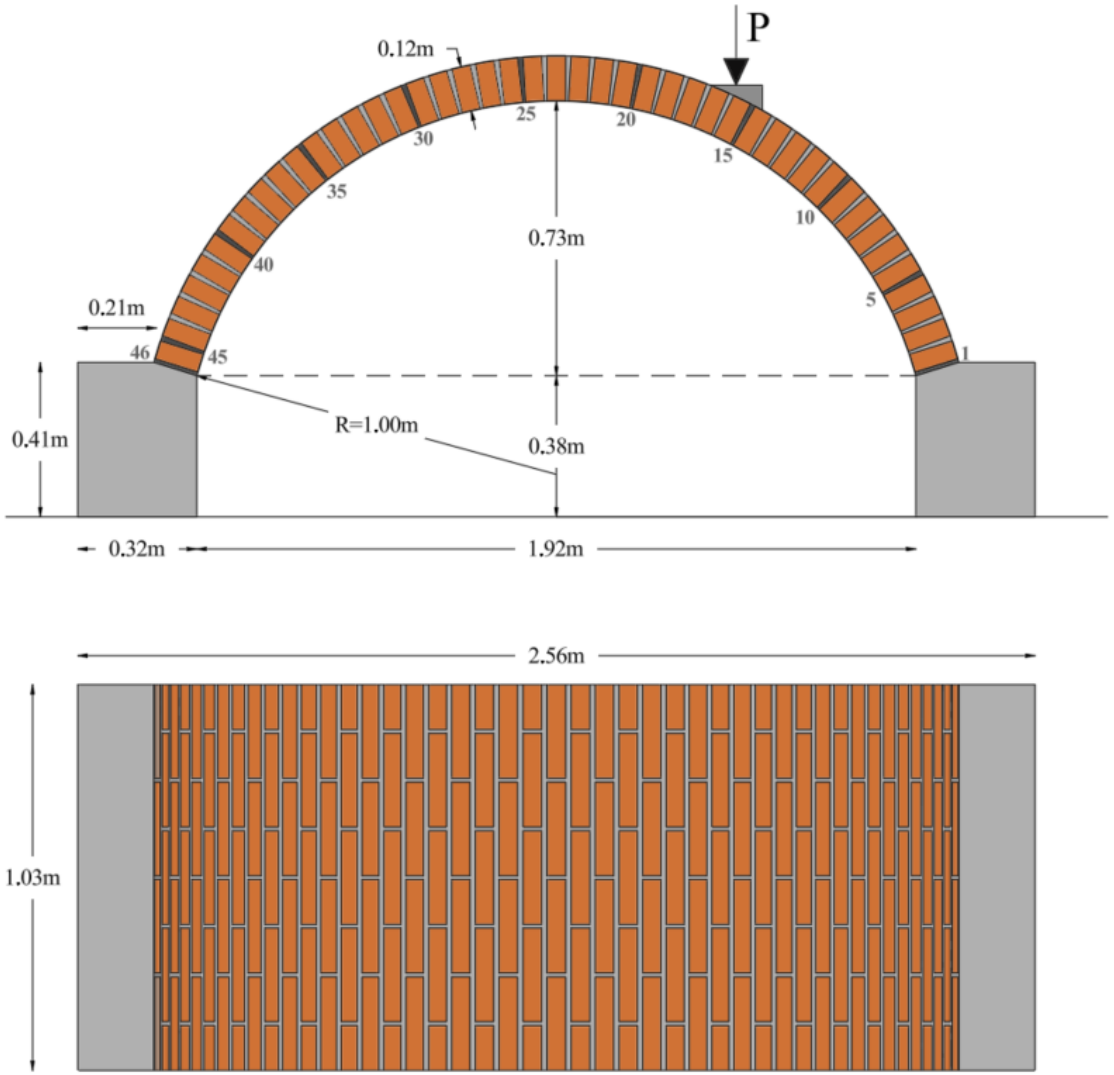
C. S. LL. PP. (2019) Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione dei sistemi a rete preformata in materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti con la tecnica dell'intonaco armato CRM (Composite Reinforced Mortar)

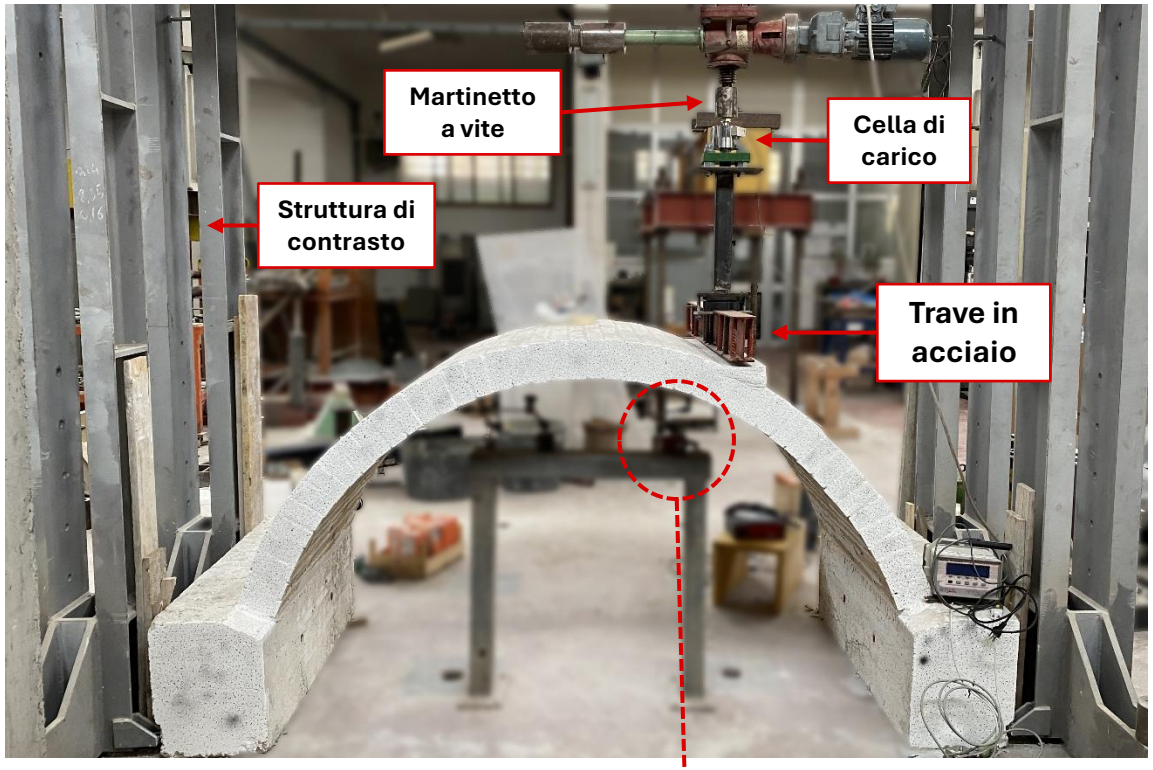
Di Leto M., Campisi F., Rusticano G., Cucchiara C., La Mendola L., Trapani D. A., (2025) *Experimental and numerical study on masonry barrel vault strengthened trough CRM system: preliminary results*, Proceeding of XX ANIDIS Conference, September 7°-11°, 2025

Campisi F., Di Leto M., Di Benedetto M., Di Trapani F., Cucchiara C., La Mendola L., *Performance of calcarenite masonry barrel vaults: experimental investigation and DIC informed refined numerical simulation*, Proceeding of 14thStructural Analysis of Monuments and Historical Constructions, Semptember 15th-17th, 2025

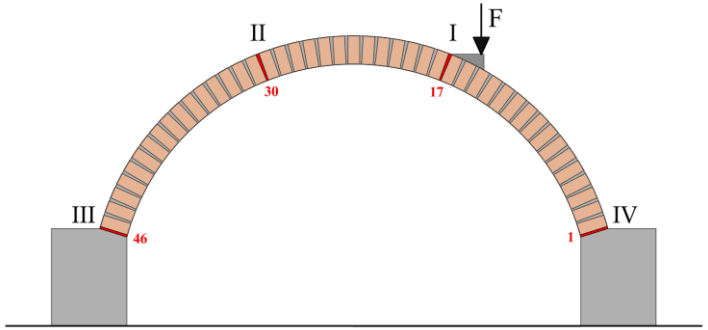
Campisi F., Di Trapani F., Di Leto M., Cucchiara C., Sberna A.P., La Mendola L., (2025) *Seismic risk reduction of masonry barrel vaults using CRM: fragility assessment using a fiber-section approach*, Proceeding of XX ANIDIS Conference, September 7°-11°, 2025

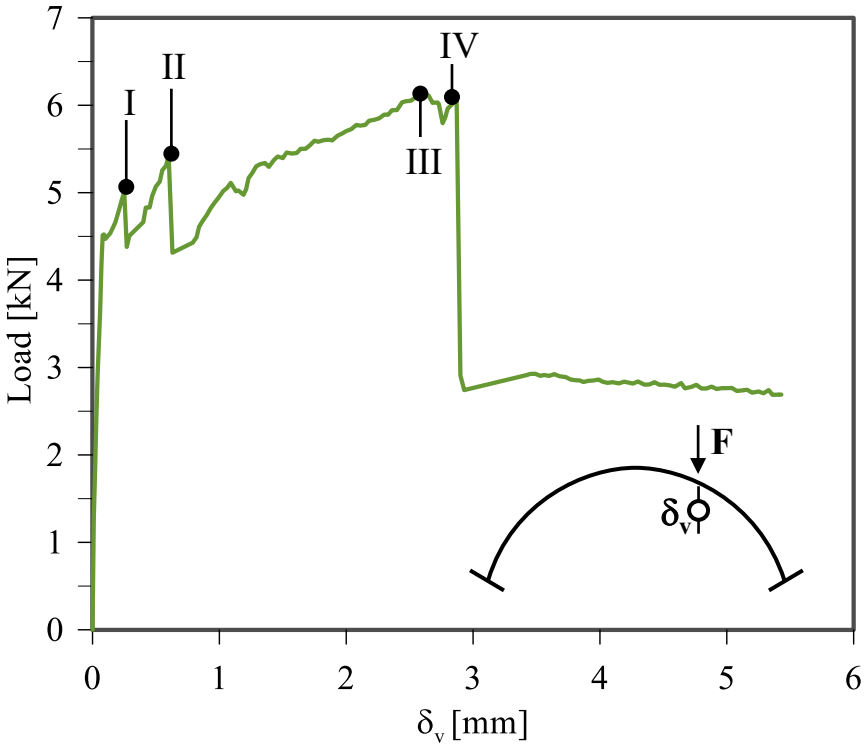
Progetto PRIN PNRR 2022 - sTructurAl and eneRGy rEnovation for susTainable buildingS - TARGETS





Prova di carico su volta non rinforzata

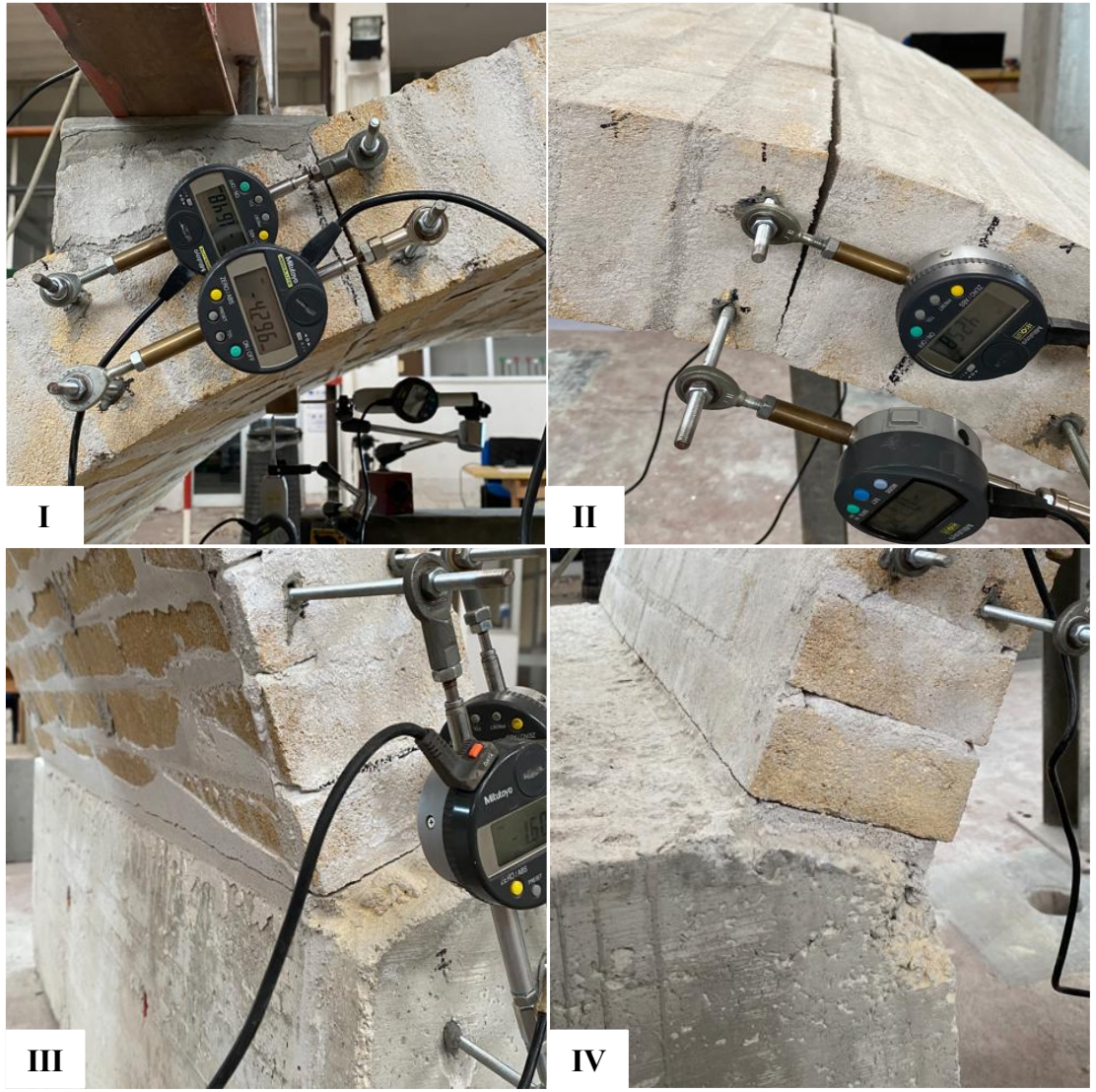




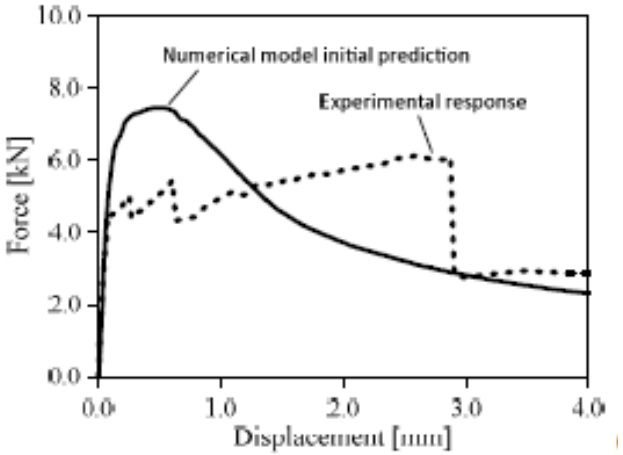
Volta n. 1 UR/V
Test n. 1

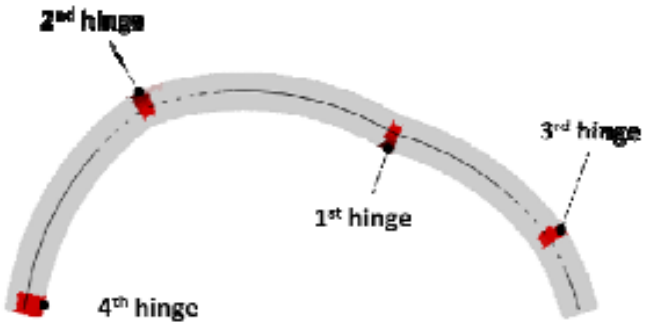
Durante la prova si è manifestata la traslazione di una delle due imposte, dovuta alla rotazione del blocco in calcestruzzo (rotazione rilevata attraverso la DIC)

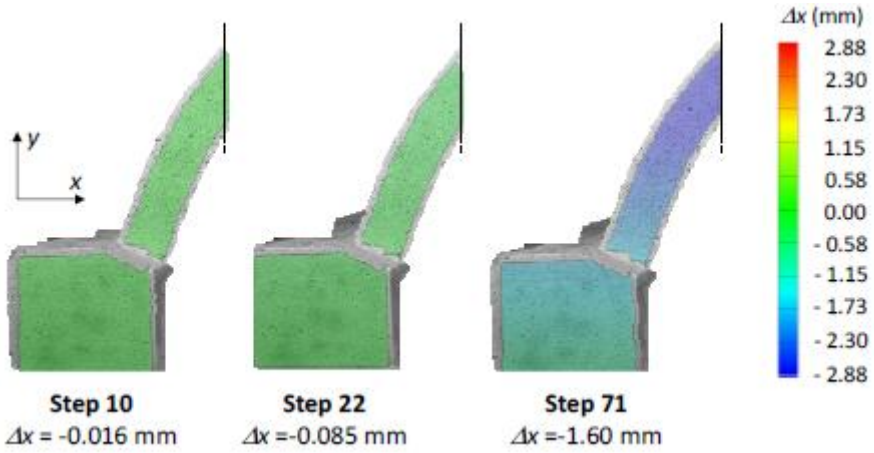
F_{max}=6.1 kN
δ_{max}=5.43 mm

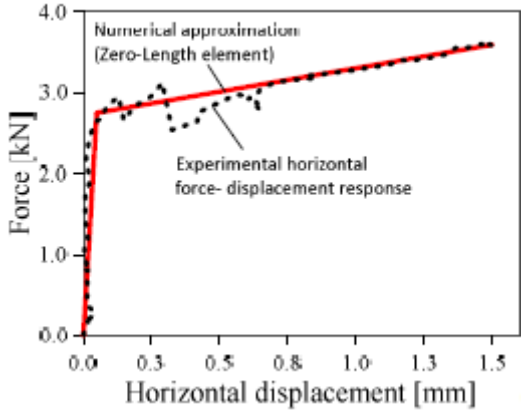


Il discostarsi della curva sperimentale dalla previsione che era stata ottenuta con un modello agli EF, ha trovato ragione nella misura, effettuata dalla DIC, della rotazione imprevista.

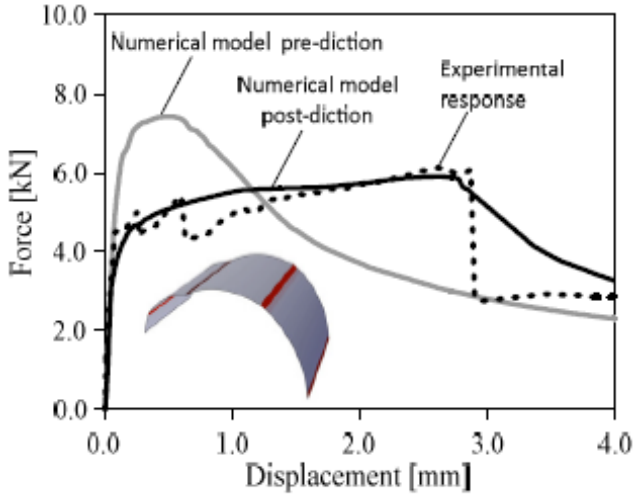








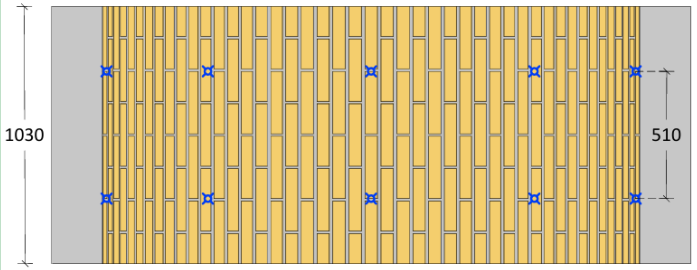
È stato possibile introdurre nel modello agli EF lo spostamento orizzontale rilevato, attraverso la legge forza-spostamento modellata in rosso. Includendo quest'ultimo nel modello si ottiene la curva continua in nero, molto prossima a quella sperimentale (tratteggiata in nero).

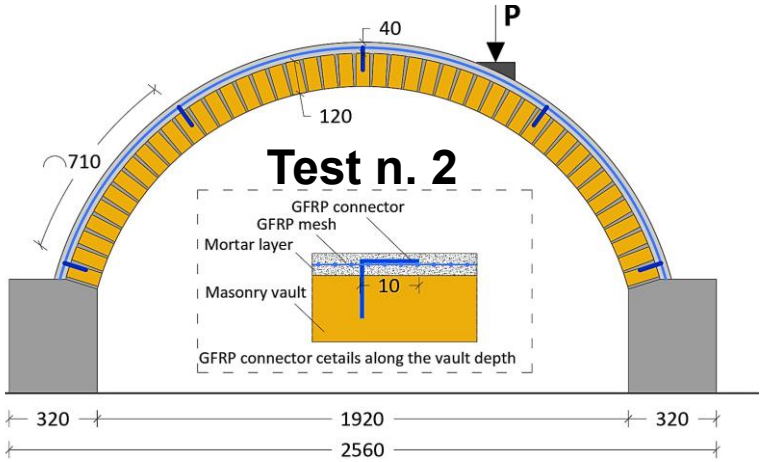


Nel campione realizzato successivamente con il rinforzo (la volta n. 2) è stata prevista una soletta alla base e delle catene nelle spalle in calcestruzzo, per assorbire adeguatamente la spinta.

Volta n. 1 rinforzata con **CRM** dopo il danneggiamento

Schema dei connettori applicati sulla Volta n.1 - **REP/V** e **REP/V+T**





Volta n.1: danneggiata e rinforzata (**REP/V**)

Test n. 2

F_{max}=15.80 kN (2.6 $F_{max,rif}$)

δ_{max}=7.12 mm (1.3 $\delta_{max,rif}$)

Test n. 3

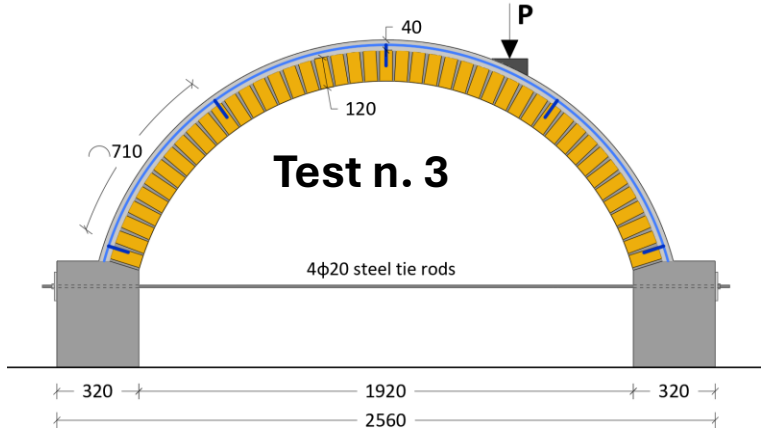
F_{max}=23.30 kN (1.5 $F_{max,t2}$)

δ_{max}=11.21 mm (1.6 $\delta_{max,t2}$)

Test n. 4

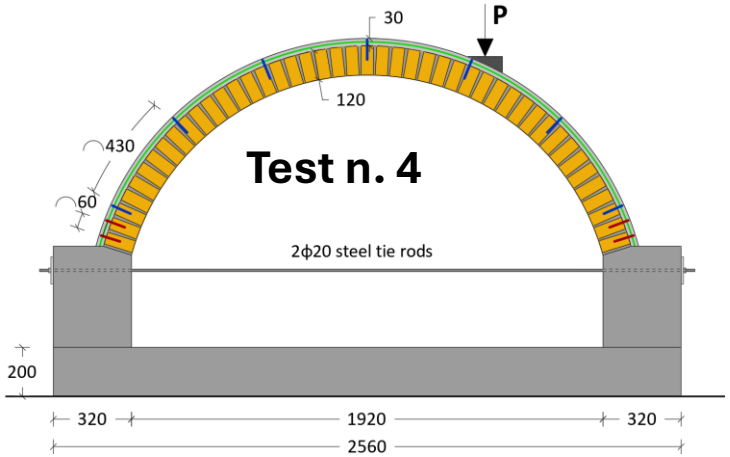
F_{max}=70.10 kN (3.0 $F_{max,t3}$)

δ_{max}=24.47 mm (2.2 $\delta_{max,t3}$)

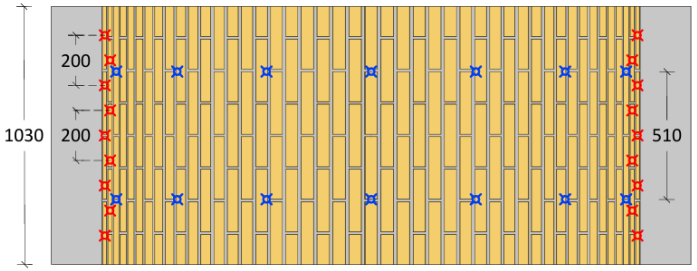


Volta n.1: danneggiata e rinforzata – catene aggiunte (**REP/V+T**)

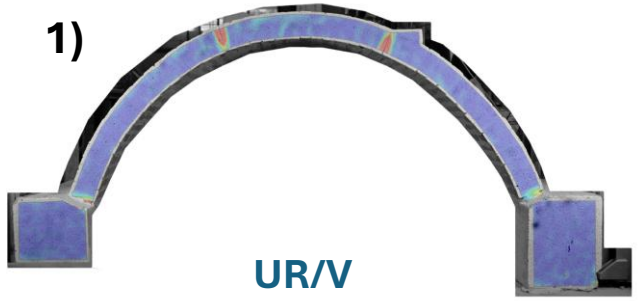
Volta n.2: realizzata su blocchi in cls connessi da soletta in cls e con aggiunta di catene - rinforzata con CRM (**RV+T**)



Schema dei connettori applicati sulla Volta n.2 - **RV+T**

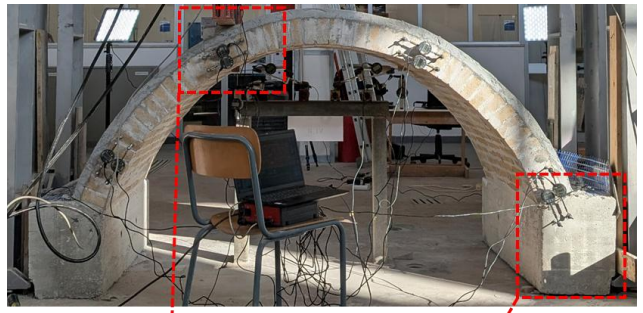


1)



UR/V

2)



REP/V

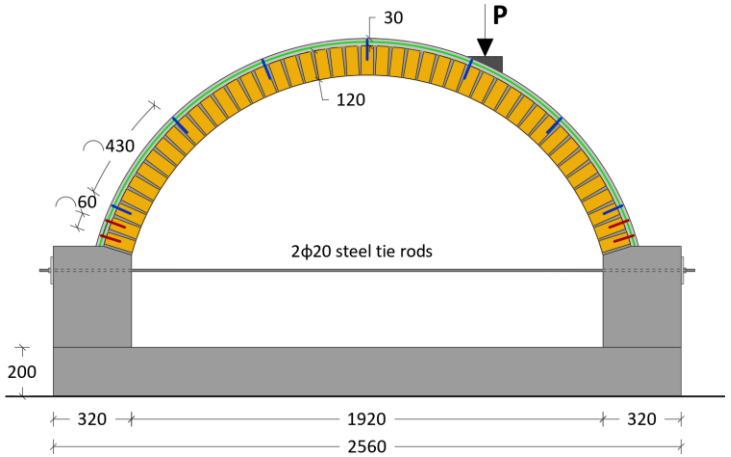
3)

REP/V+T

N° test	Campione	F_{max} [kN]	F_{incr} [%]	δ_{max} [mm]	δ_{incr} [%]	Meccanismo di rottura
1	UR/V	6.1	-	5.43	-	Formazione di 4 cerniere
2	REP/V	15.8	258	7.12	131	Formazione di 4 cerniere + CRM debonding
3	REP/V+T	23.3	381	11.21	206	Formazione di 4 cerniere + CRM debonding esteso
4	R/V+T	74.1	1210	24.47	451	Scorrimento alla base, perdita del supporto

4)

R/V+T



Volta n. 3 CRM rinforzata
realizzata con l'uso di malta geopolimerica e
non danneggiata prima

I risultati di questa prove sono ancora in corso di elaborazione.

Test n. 4

Il rinforzo con CRM si presta bene per:

- aumentare la capacità portante e aumentare la duttilità
- contenere il danneggiamento ritardando la comparsa delle lesioni
- efficientamento energetico, se si prevede una malta adeguata

Grazie per l'attenzione

lidia.lamendola@unipa.it