

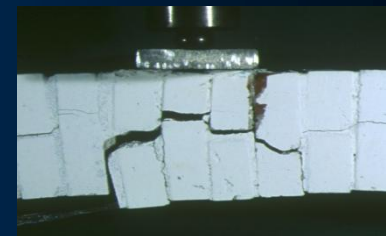
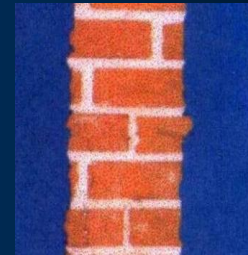
INTERVENTI DI RINFORZO CON COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO DI VETRO E TELA DI IUTA

Silvia Briccoli Bati

Dipartimento di Costruzioni e Restauro
Università degli Studi di Firenze

Considerazioni

- L'uso di materiali compositi per il rinforzo di edifici storici richiede che siano soddisfatti particolari requisiti
- I compositi in CFRP hanno mostrato alcuni inconvenienti se applicati nel rinforzo di strutture in muratura
 - delaminazione con significativa perdita di materiale in corrispondenza della superficie di placcaggio
 - meccanismi di collasso che mostrano una alterazione del comportamento originario della struttura in muratura
 - **rottura a compressione (schiacciamento) di archi**
 - **rottura fragile per tensioni tangenziali alle imposte**
- E' sembrato dunque non privo di senso indagare l'opportunità di utilizzare compositi a matrice cementizia per il rinforzo di edifici storici
 - perché molto più compatibili con le caratteristiche intrinseche degli edifici in muratura



MATERIALI COMPOSITI INNOVATIVI

- Tecnica di rinforzo:
PLACCAGGIO
- Materiali:
 - CFRP (carbon fiber reinforced polymer)
 - GFRCM (glass fiber reinforced cement matrix)
 - Terra e tela di iuta

IL RINFORZO

- Cerchiatura di pilastri
- Intradosso e estradosso di strutture voltate
- Pannelli sollecitati fuori piano
- Cerchiatura di scatole murarie con pareti non ben collegate

I MATERIALI

- CFRP
 - elevata resistenza alla trazione
 - alto modulo elastico
 - basso peso specifico
 - eccellente resistenza alla corrosione
 - anisotropia
- GFRCM
 - buona resistenza a trazione
 - elevato modulo elastico
 - anisotropia

INDAGINE SPERIMENTALE

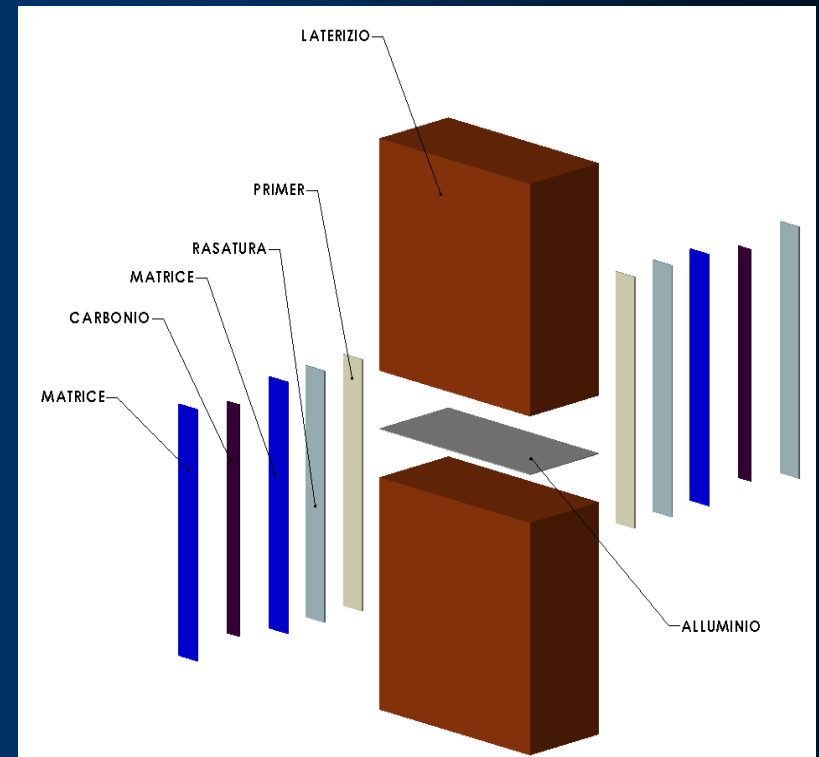
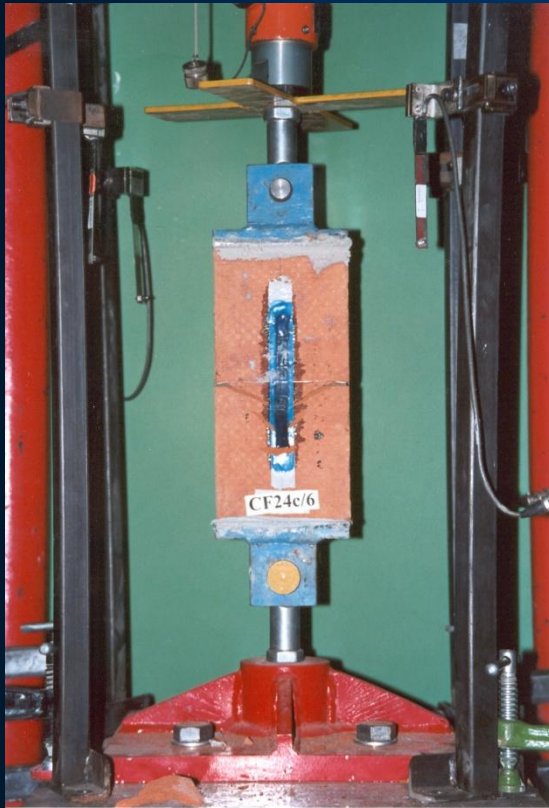
- Prove di adesione
- Prove di durabilità
- Prove su elementi strutturali:
 - travi
 - piattabande
 - pannelli in muratura di mattoni
 - pannelli in terra cruda
 - archi in muratura di mattoni ed in terra (pisé)
 - volta a crociera
 - scatola muraria

PROVE DI ADESIONE

- Supporto: Laterizio
 - Peso specifico = 1800 kg/m^3
 - Modulo di elasticità = 1750 MPa
 - Tensione a rottura di compressione = 17.4 MPa
 - Tensione a rottura di trazione = 1.7 MPa

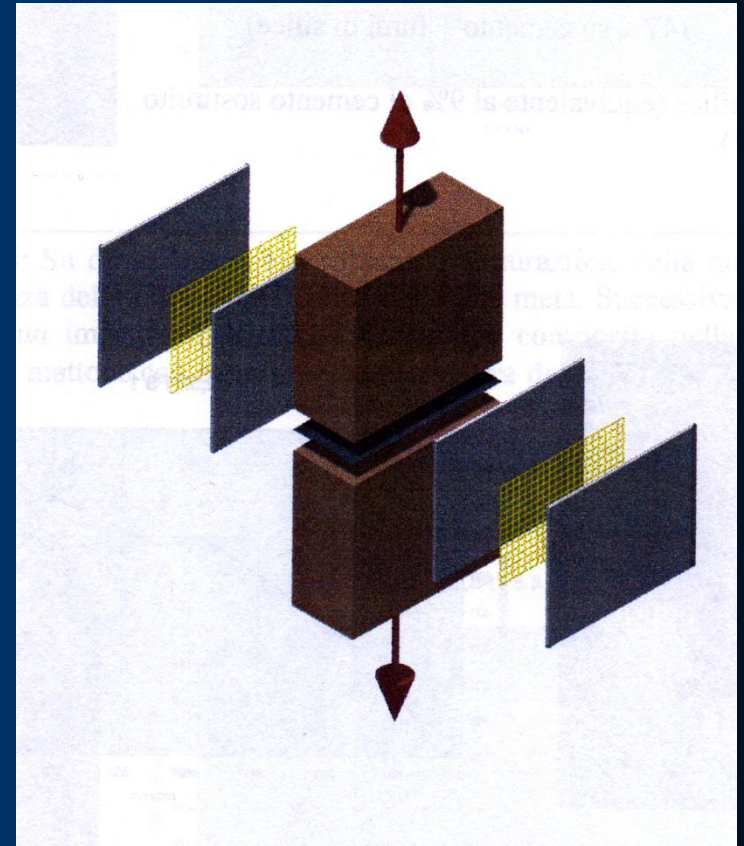
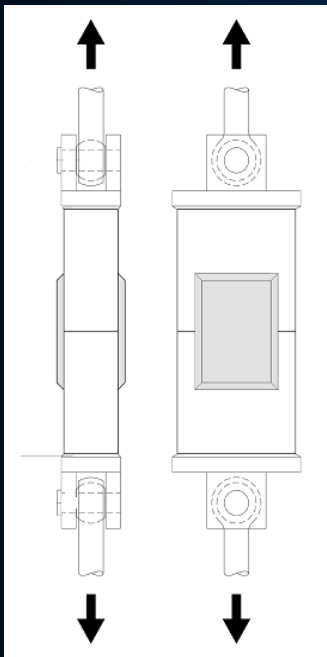
PROVE DI ADESIONE - CFRP

	γ (kg/m ³)	E_t (MPa)	E_f (MPa)	σ_t (MPa)	σ_f (MPa)	$\alpha 10^{-6}$ (1/°C)	ϵ (%)
FibraC1-30	1820	230000	-	5500	-	-	1.5
Primer	1067	700	580	12	24	-	3
Adesivo	1020	3000	3500	50	24	60	2.5



PROVE DI ADESIONE - GFRCM

	γ (kg/m ³)	E_t (MPa)	E_f (MPa)	σ_t (MPa)	σ_f (MPa)	$\alpha 10^{-6}$ (1/°C)	ε (%)
Fibra di vetro	2490	87000	-	3500	-	5	5.5
Malta cementizia	2000	25000	-	3.3	6	6	0.01



Malta cementizia

Composizione messa a punto dai tecnici del Laboratorio annesso al Dipartimento di Costruzioni:

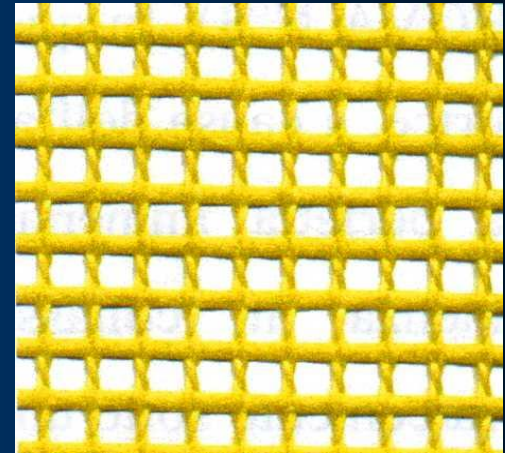
- cemento Portland 425 e sabbia di Massaciuccoli (rapporto 1:3)
- additivi: Mapeplast SF (fumi di silice) e Mapefluid PZ 500 (fluidificante)
- acqua-cemento rapporto 3:5



	Resistenza a trazione per flessione (MPa)	Resistenza a trazione diretta (MPa)	Modulo elastico (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)
14 days	5.5	3.1		35
28 days	6.0	3.3	25000	38

Rete in fibre di vetro

- Rete in fibre di vetro costituita da una maglia ortogonale di 5x5,9 mm
 - ricoperta con appretto antialcalino



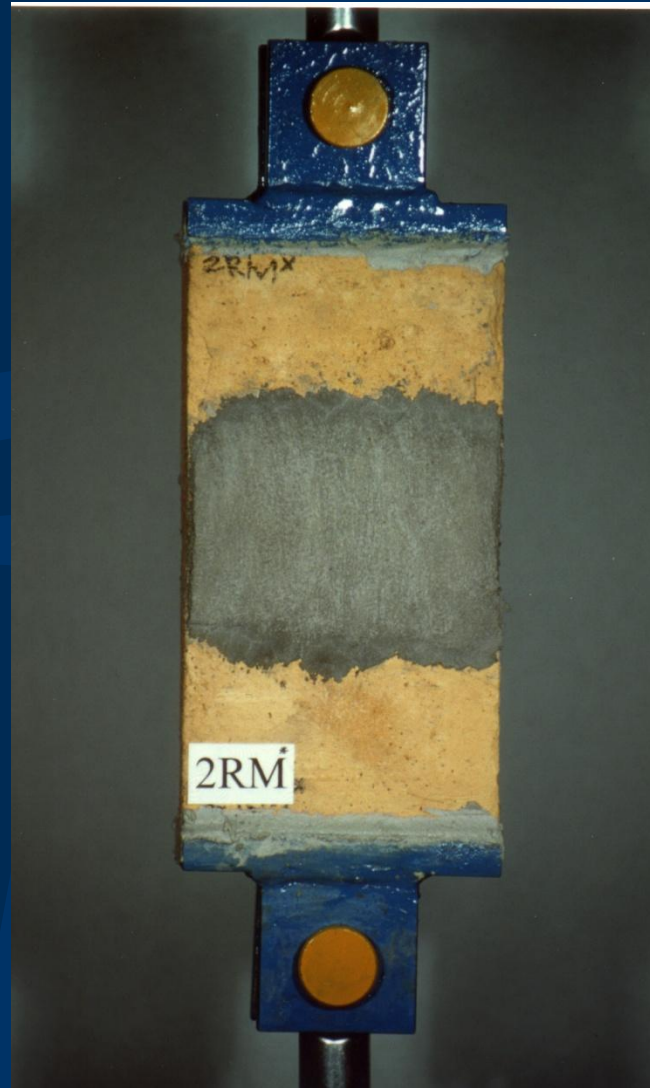
Modulo elastico (MPa)	Allungamento a rottura (%)	peso (g/m ²)	Resistenza per unità di larghezza (daN/cm)	coefficiente di dilatazione termica 10 ⁻⁶ (1/°C)
87000	5.5	368	90	5

Programma sperimentale

- Prova a trazione diretta
 - Provini costituiti da due mezzi mattoni accostati di testa e collegati da una coppia di nastri in composito applicati sulle superfici maggiori
 - diverse dimensioni di placcaggio
 - 8, 10, 12 cm di larghezza; 20 cm di lunghezza
 - diverso periodo di stagionatura
 - 14 e 28 giorni

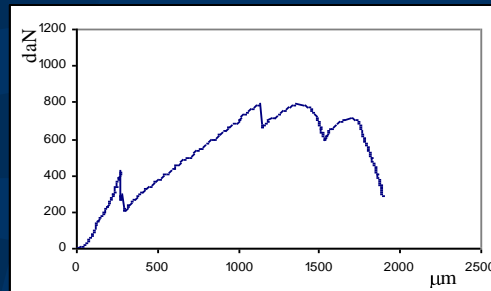


PROVA DI ADESIONE CON GFRMC



Prova di trazione diretta su placcaggio in GFRCM: modi di collasso

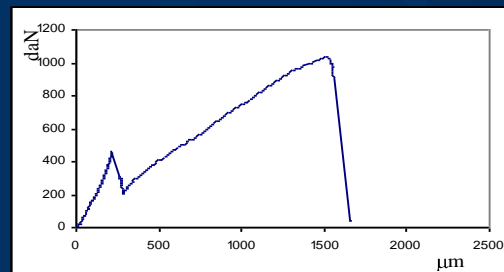
- A. espulsione dello strato superiore di matrice cementizia (tipica per una stagionatura di 14 giorni)
- B. rottura delle fibre in vetro (tipica per una stagionatura di 28 giorni e oltre)



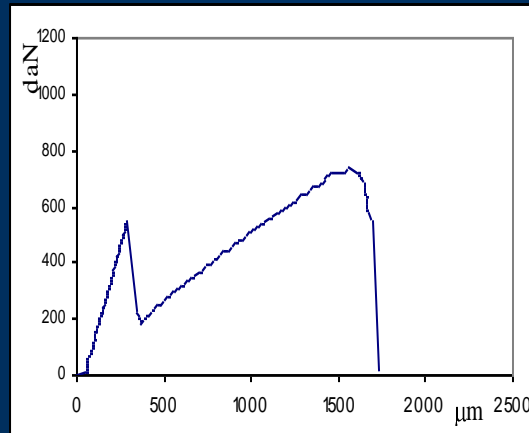
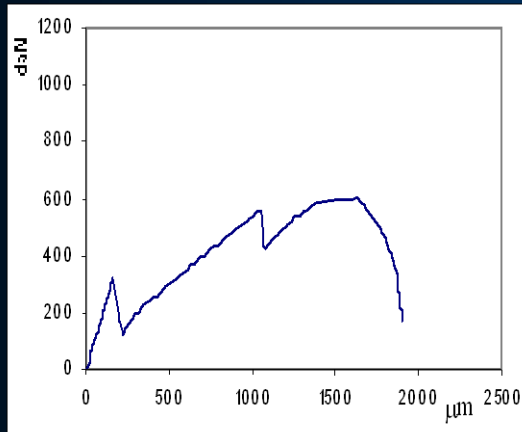
A.



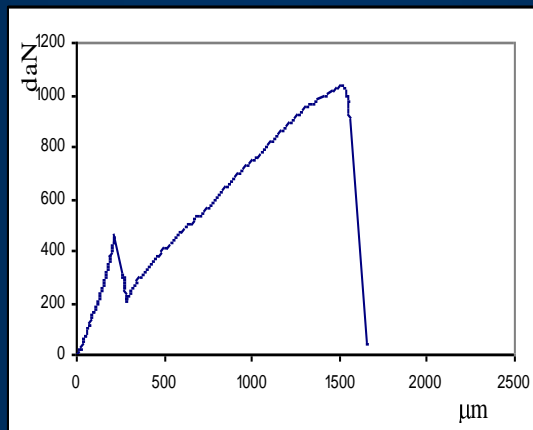
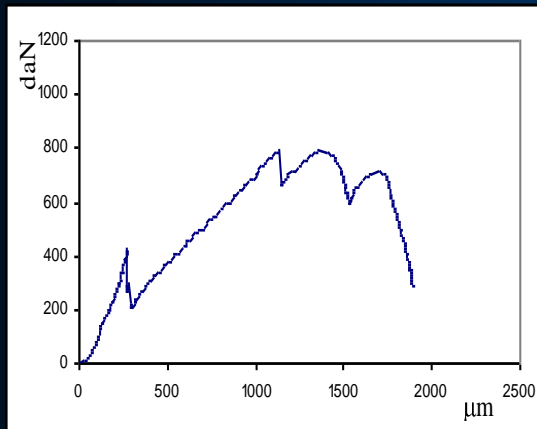
B.



Prova di trazione diretta su placcaggio in GFRCM: diagrammi carico-spostamento



10 cm di larghezza
(rete con 13 maglie)



12 cm di larghezza
(rete con 17 maglie)

Caratteristiche dei diagrammi

- primo tratto lineare (tensione di primo picco costante) seguito da una brusca caduta di carico
- secondo tratto pressoché lineare ascendente con ripresa del carico
- fase finale di collasso

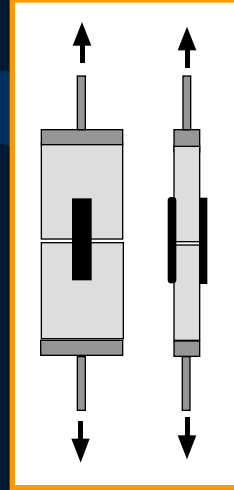
PROVE DI ADESIONE: RISULTATI

- CFRP

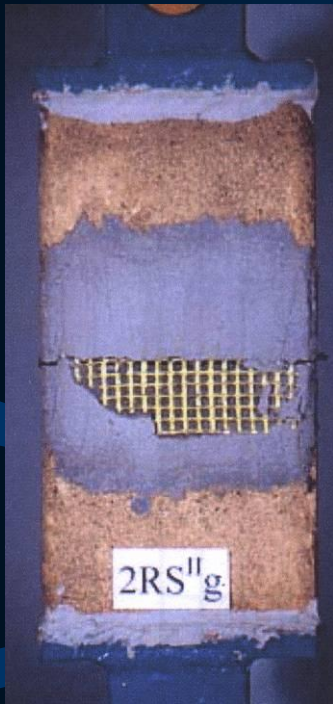
- GFRCM

Composito	Carico di I ^a fessurazione (kg)	Carico di picco (kg)	Rigidezza (kg/ μ m)	Tensione di adesione τ_m (kg/cm ²)	Duttilità Cinematica
CFRP	n.r.	814	1.71	17	1.06
GFRCM	280	865	2.17	6	1.74

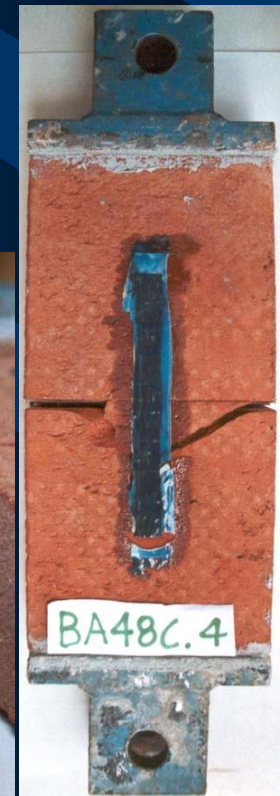
Prova di trazione



- nel composito GFRCM , la rete di fibre di vetro si distacca dalla matrice cementizia



- Il rinforzo in CFRP si distacca dal supporto in muratura portandosi dietro uno strato di muratura



PROVE DI DURABILITÀ

Bagnato-Asciutto

- Ciclo di degrado
 - 20' di immersione in acqua
 - 24h di esposizione all'aria

PROVE DI DURABILITÀ

Freddo-Caldo

- Ciclo di degrado
 - 6 h a -8°C
 - 6 h a $+50^{\circ}\text{C}$

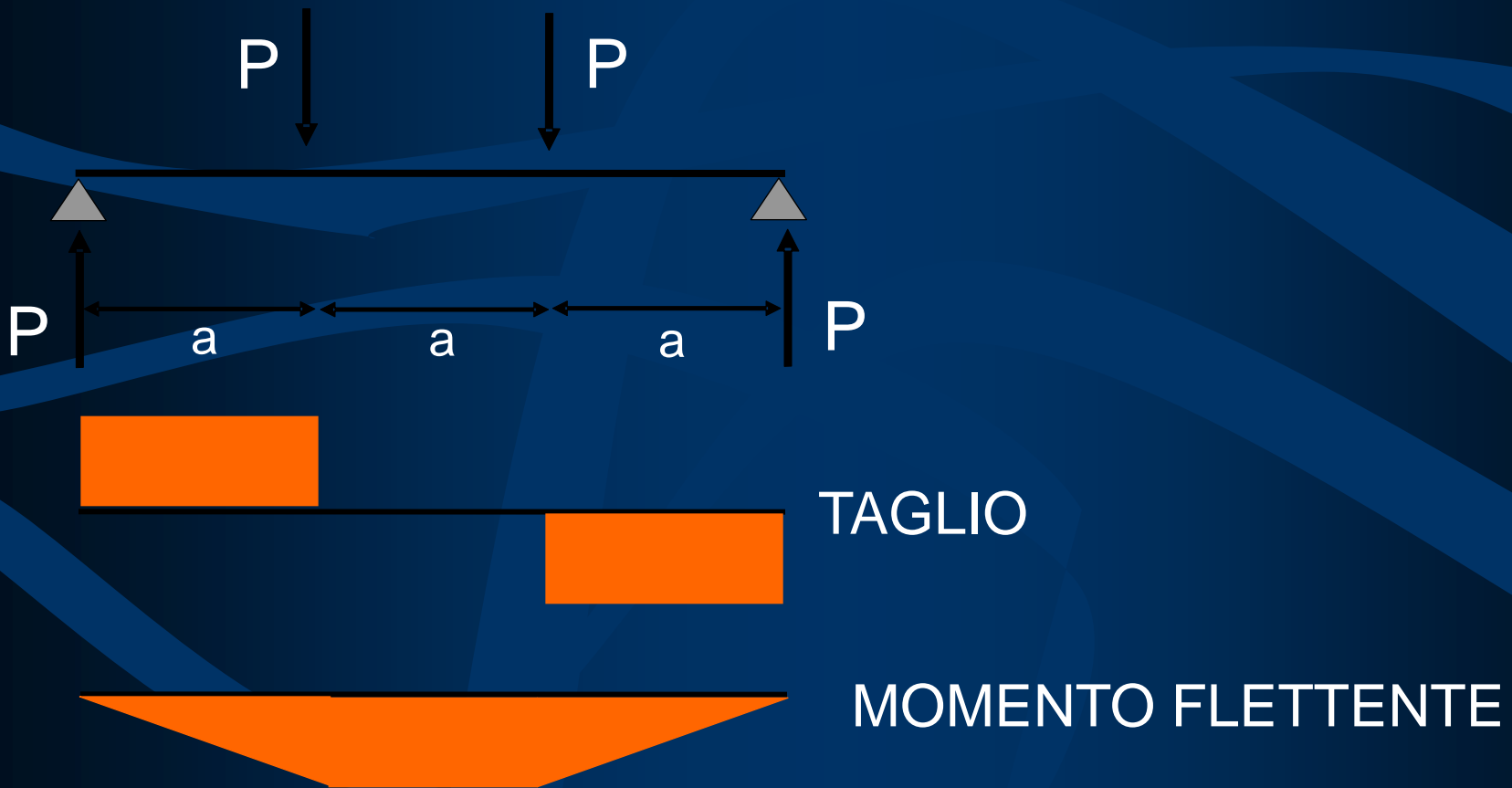
PROVE DI DURABILITÀ Freddo-Caldo

CFRP larghezza=8 cm



trave in muratura

- Elemento strutturale improbabile

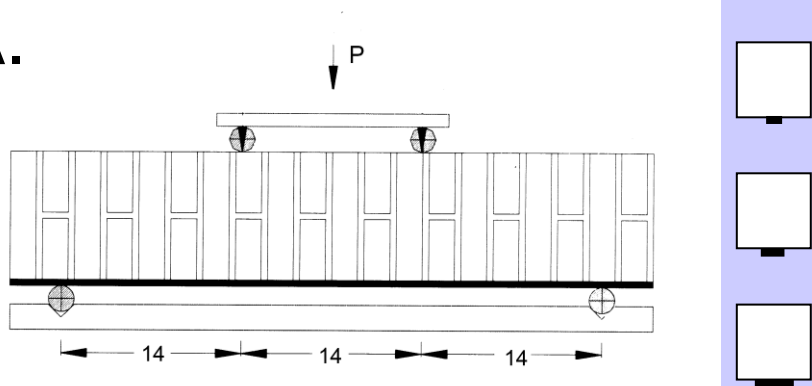


Prova di flessione su quattro punti su travi in muratura rinforzate

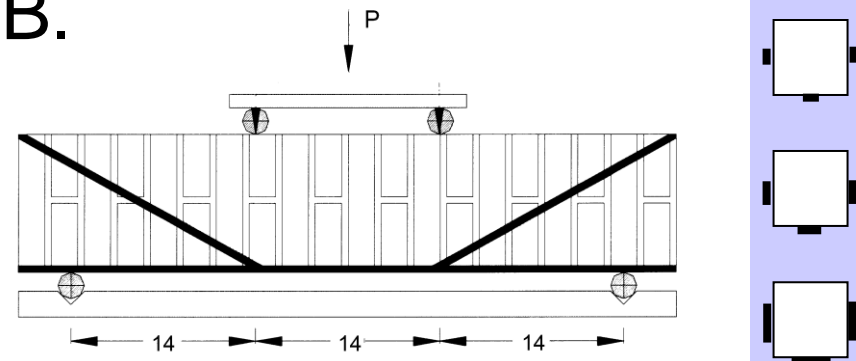
- **Due tipi di rinforzo**
 - A. Rinforzo all'intradosso di diverso spessore
 - B. Rinforzo all'intradosso e sulle superfici laterali di diverso spessore

- **Due tipi di materiali compositi**
 - Fibre di carbonio e matrice polimerica (CFRP)
 - Fibre di vetro e matrice cementizia (GFRCM)

A.

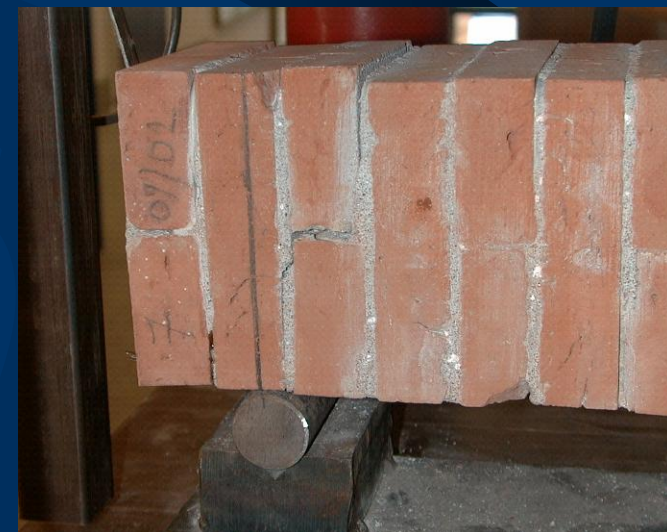
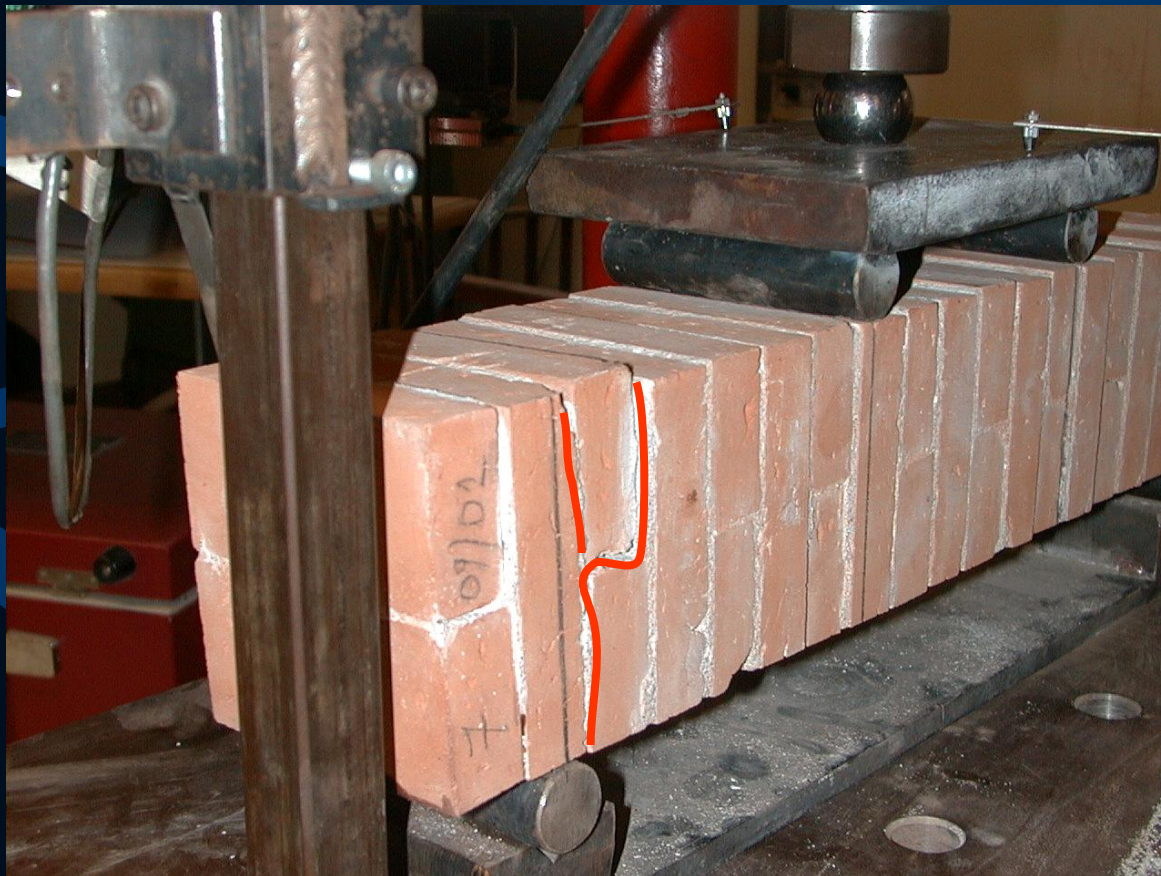
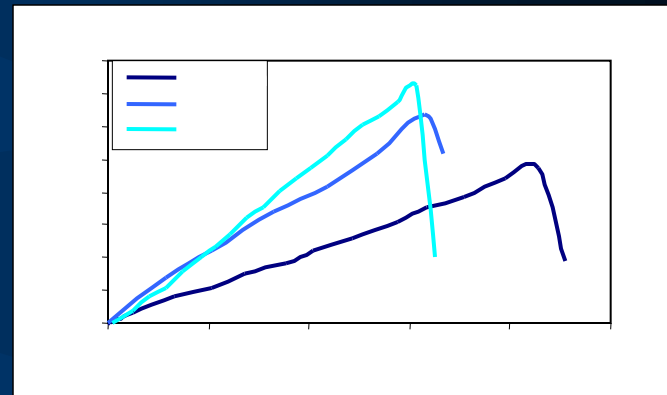
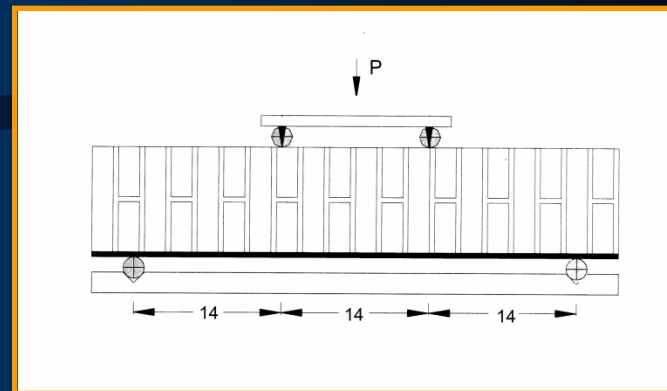


B.



Rinforzo all' intradosso larghezza 1.25cm, 2,5cm e 5cm

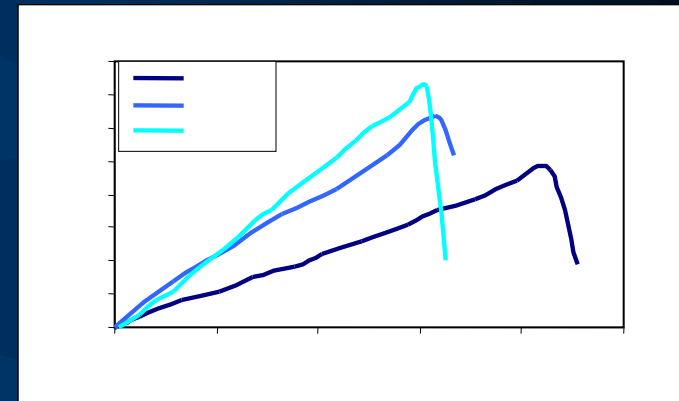
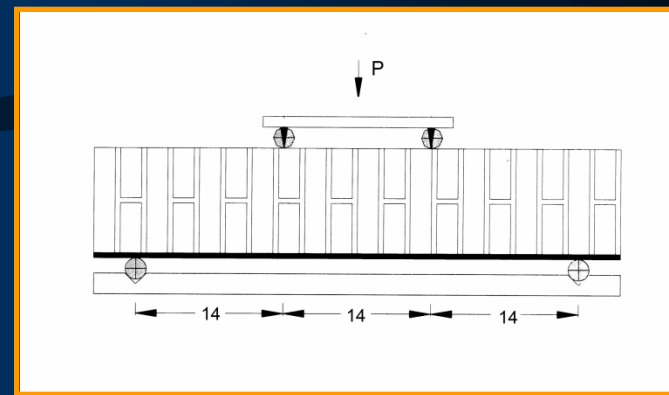
- Meccanismi di collasso:
scorrimento lungo i giunti verticali di malta
in corrispondenza degli appoggi



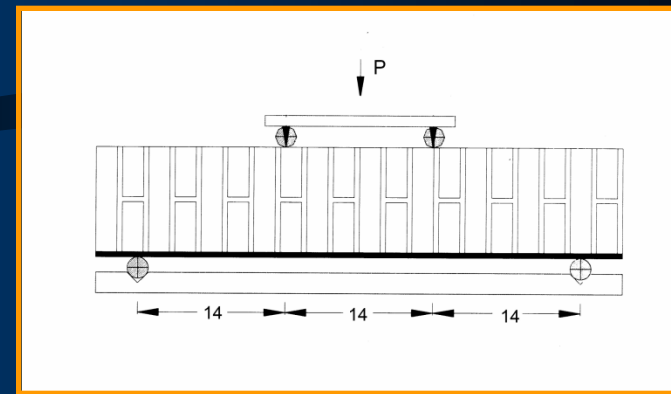
Rinforzo all'intradosso

con placcaggi di 1.25cm, 2.5cm e 5cm in CFRP

- Il diagramma carico-spostamento mostra le stesse caratteristiche
- Il comportamento della struttura rinforzata è in tutti i casi fragile
- Il carico di collasso cresce con la larghezza del placcaggio (differenza minore tra i placcaggi di 2.5cm e 5cm in CFRP)



Carichi di collasso

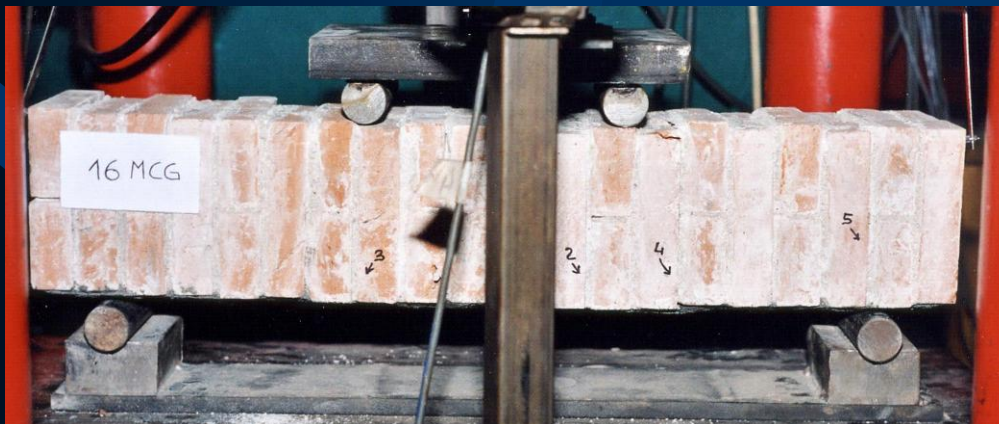
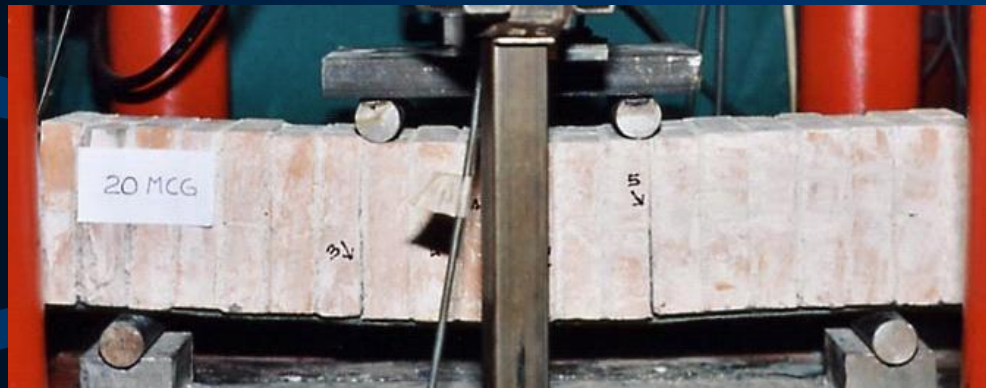
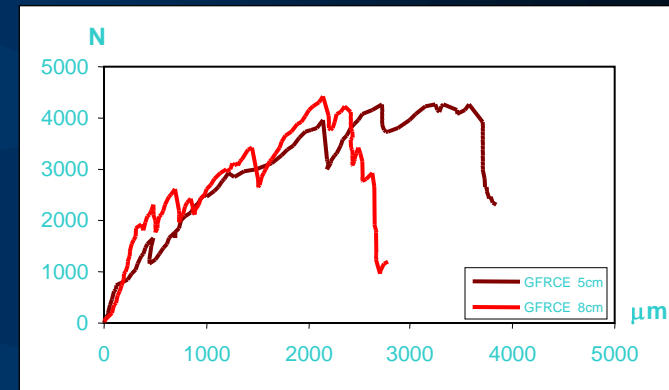
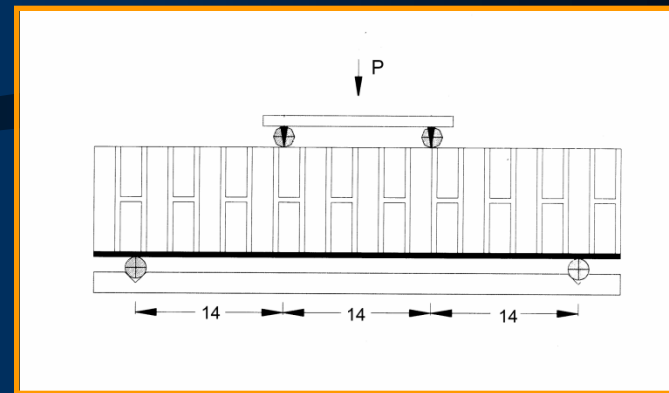


	Experimental collapse loads (N)	Masonry crushing (N)	Detachment of sheet (N)	Sliding along joint (N)
CFRP 1.25x50cm intradosso	2360	10770	7380	2280 (-3%)
CFRP 2.5x50cm intradosso	3190	14500	14440	2420 (-24%)
CFRP 5x50cm intradosso	3620	19140	28170	3270 (-4%)

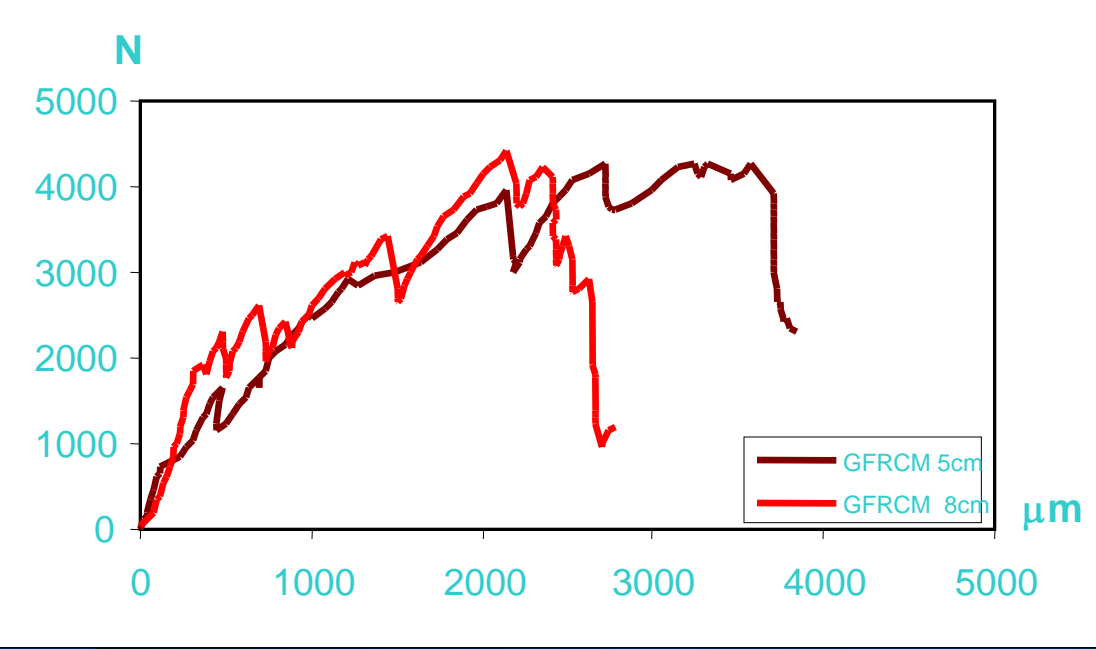
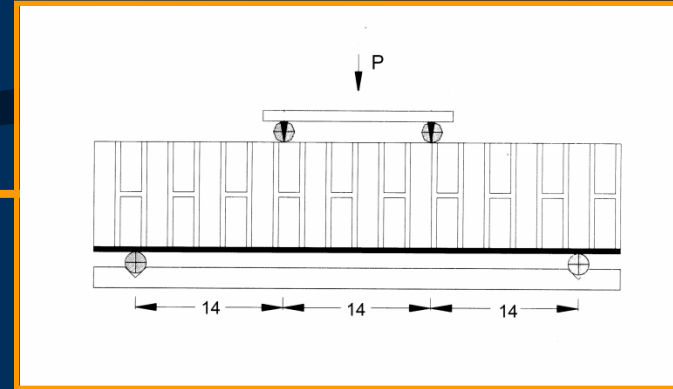
Rinforzo all'intradosso

Rinforzo di 8cm e 5cm in GFRCM

- Il collasso è caratterizzato dal distacco della fibra di vetro anticipato dalla frattura dei giunti verticali in corrispondenza dell'applicazione dei carichi



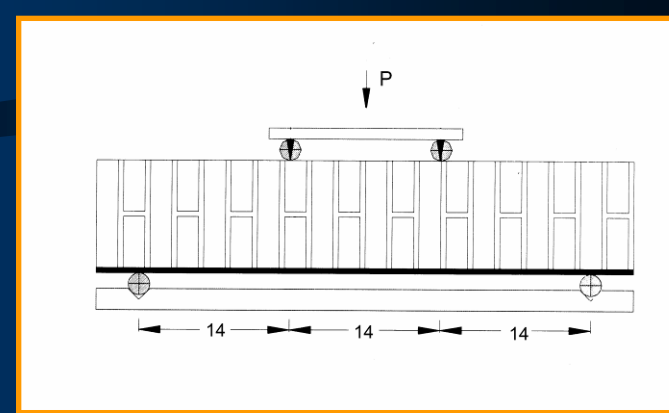
Rinforzo all'intradosso di 8cm e 5cm in GFRCM



- La striscia di 5cm esibisce maggiore duttilità

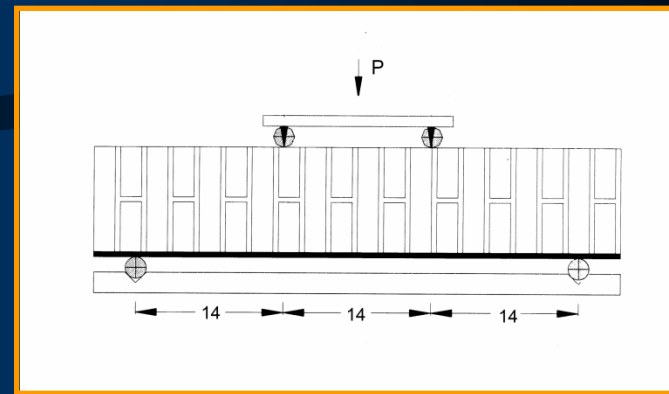
	Carico di picco (N)	Rigidezza (N/mm)	Duttilità
GFRCM 5x50cm intradosso	4487	6.4	8.1
GFRCM 8x50cm intradosso	4623	6.9	4.5

Carichi di collasso

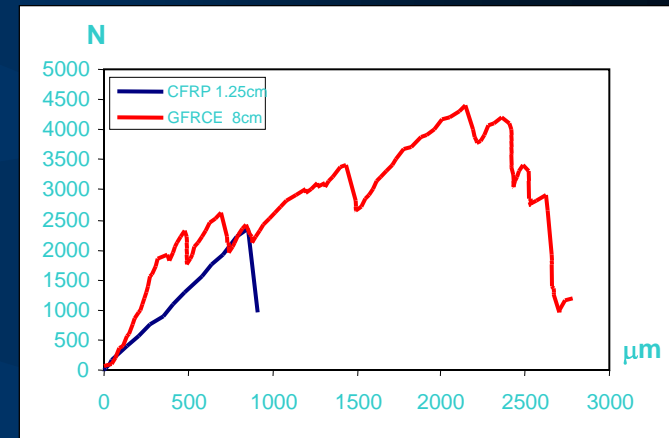


	Carico di collasso sperimentale (N)	Rottura muratura (N)	Distacco del rinforzo (N)	Sl scorrimento dei giunti (N)
GFRCM 5x50cm intradosso	4480	35430		6600 (+43%)
GFRCM 8x50cm intradosso	4620	39410		7570 (+69%)

Confronto tra rinforzi all'intradosso

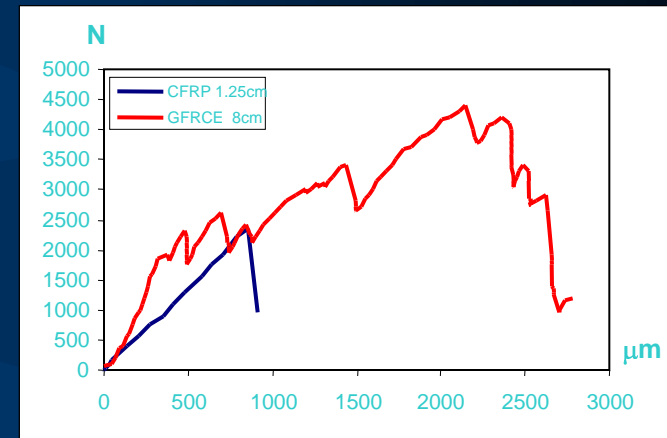
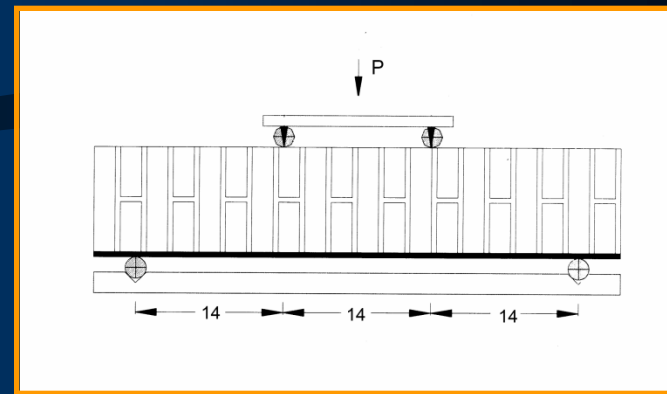


- **GFRCM**
 - Esibisce comportamento duttile
 - Dopo il collasso il supporto resta sostanzialmente intatto (important for historical monuments)
- **CFRP**
 - Esibisce comportamento fragile
 - Il distacco del rinforzo determina il danneggiamento del supporto



Confronto tra i rinforzi all'intradosso

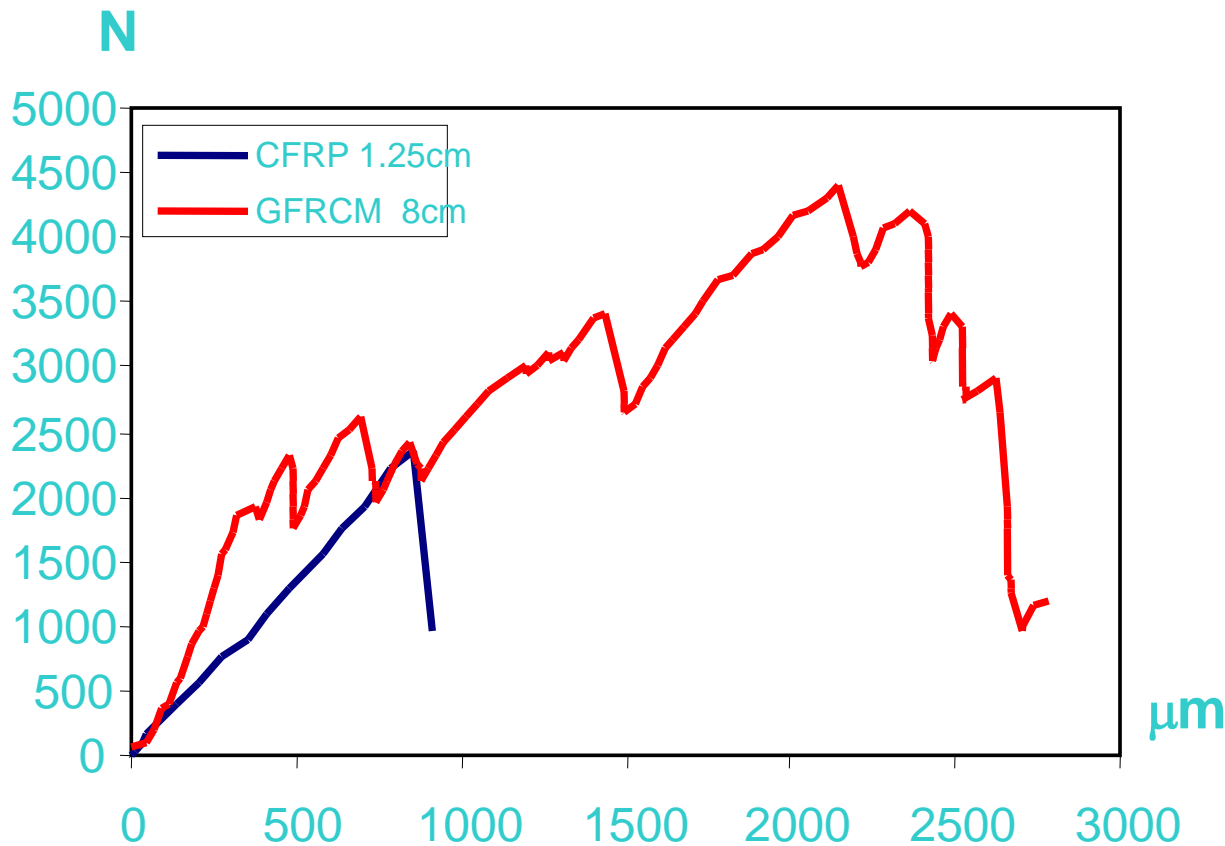
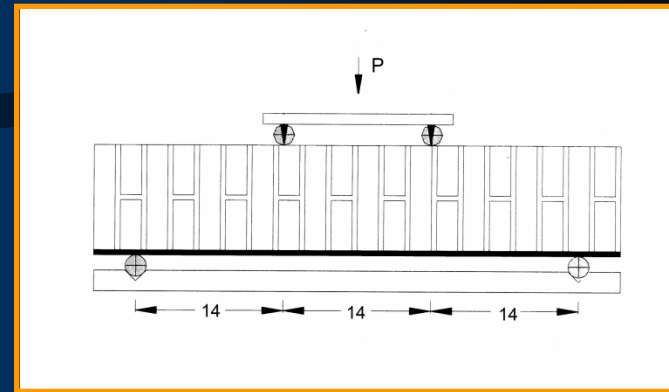
- **1.25cm CFRP** **8cm GFRCM**
 - stessa resistenza
 - Resistenza per unità di larghezza della striscia
 - $\sigma_{CFRP} = 566 \text{ Kg/cm}$
 - $\sigma_{GFRCM} = 90 \text{ Kg/cm}$
- $\sigma_{GFRCM} / \sigma_{CFRP} = 1/6$



	Carico di picco (N)	Rigidezza (N/mm)	Duttilita
GFRCM 8x50cm intradosso	4623	6.9	4.5
CFRP 1.25x50cm intradosso	2360	2.7	1

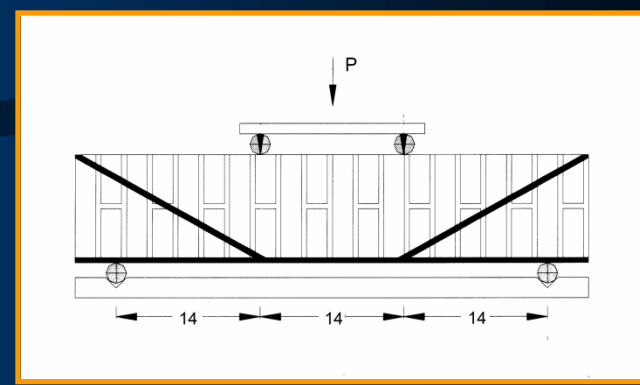
Confronto tra i rinforzi in intradosso

- **1.25cm CFRP** **8cm GFRCM**
 - **Stessa capacità portante delle fibre**



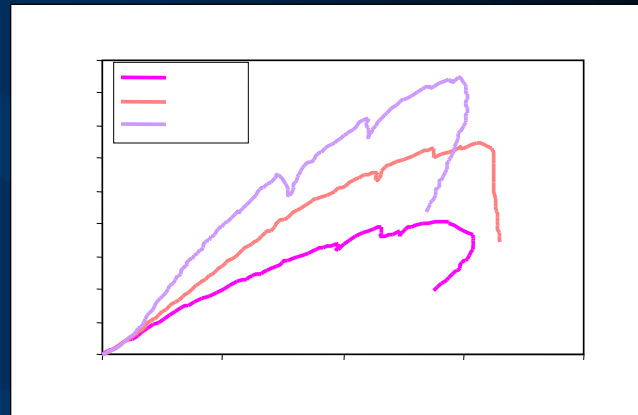
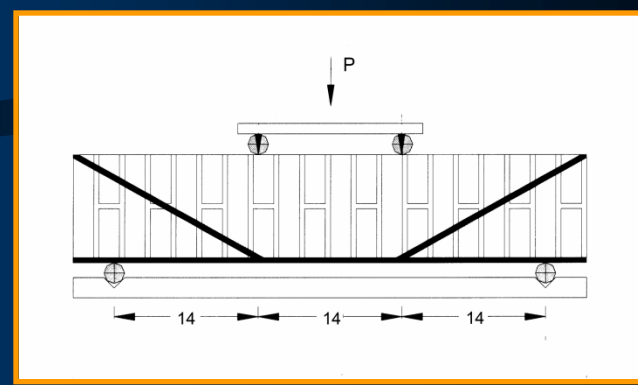
Rinforzo all'intradosso e sulla superficie laterale

- il diagramma carico-spostamento mostra le stesse caratteristiche
- si osservano diversi meccanismi di collasso

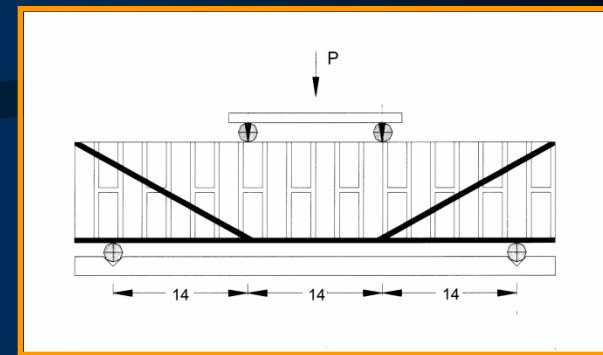


Rinforzo all'intradosso e laterale con strisce di 1.25cm, 2.5cm e 5cm in CFRP

- Con rinforzi di 1.25 e 2.5 cm il collasso è avvenuto per scorrimento lungo i giunti verticali in prossimità del punto di applicazione dei carichi con distacco del rinforzo all'intradosso
 - Il rinforzo in FRP porta con se uno strato di mattone dello spessore di circa 0,5-1cm

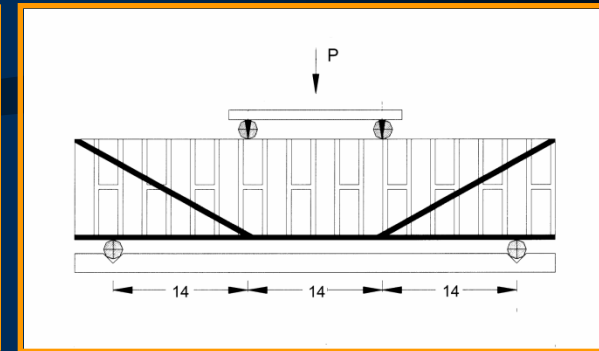
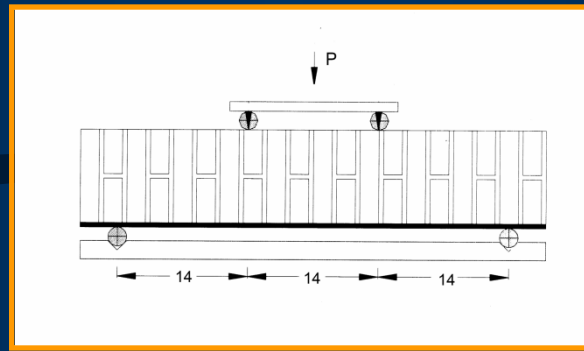
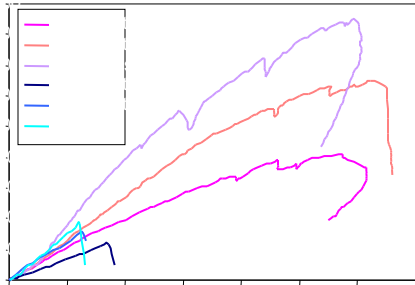


Carichi di collasso



	Experimental Collapse loads (N)	Masonry crushing (N)	Detachment of sheet (N)	Sliding along joint (N)
CFRP 1.25x50cm Intradosso e laterale	8640	10770	7380 (-15%)	8260 (-4%)
CFRP 2.5x50cm Intradosso e laterale	12000	14500	14440 (+20%)	13400 (+12%)
CFRP 5x50cm intradosso e laterale	17050	19140	28170	22710 (+33%)

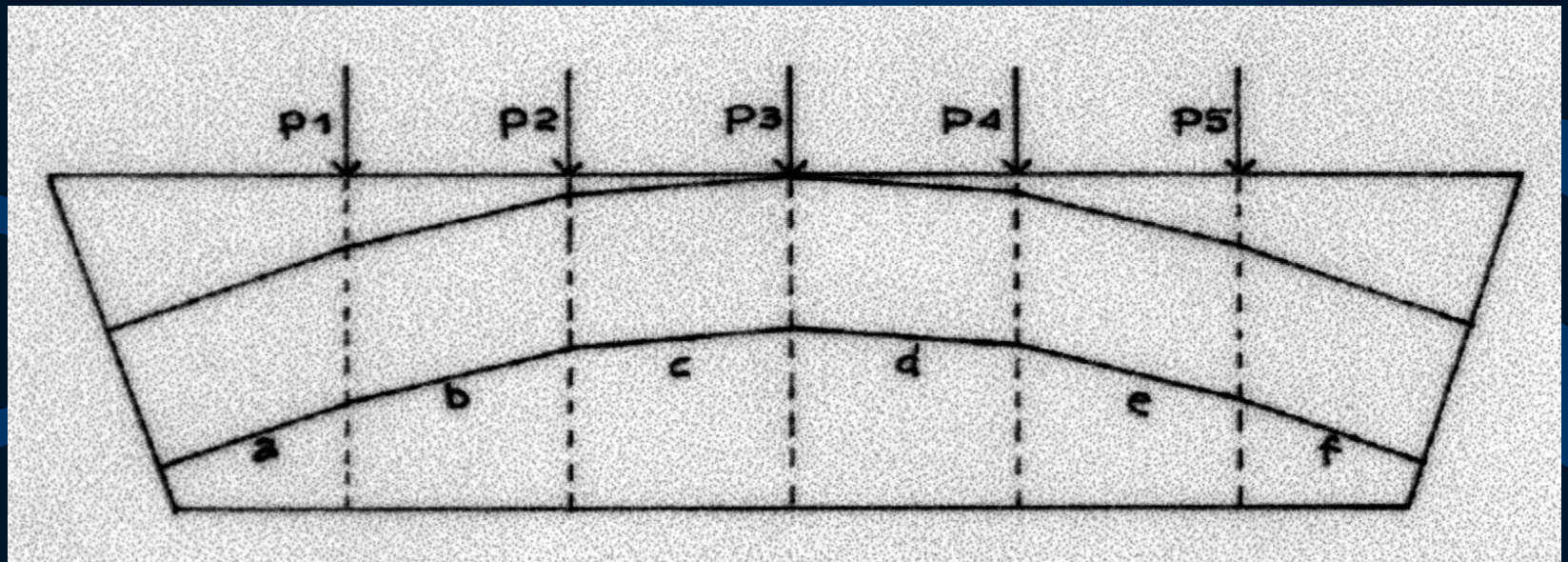
Confronto tra i rinforzi in CFRP



- Il carico di collasso della trave con rinforzo anche laterale è circa 4 volte più alto di quello che compete alla trave con rinforzo solo sull'intradosso

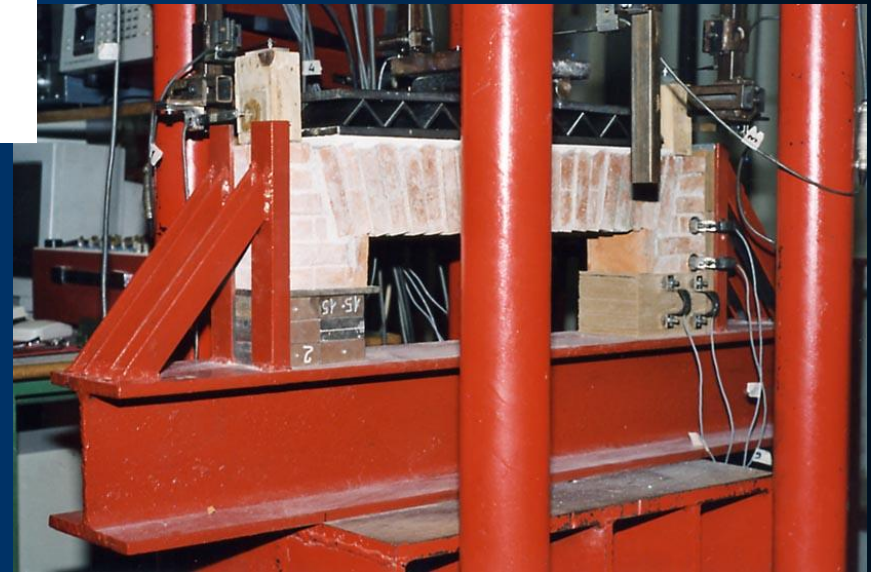
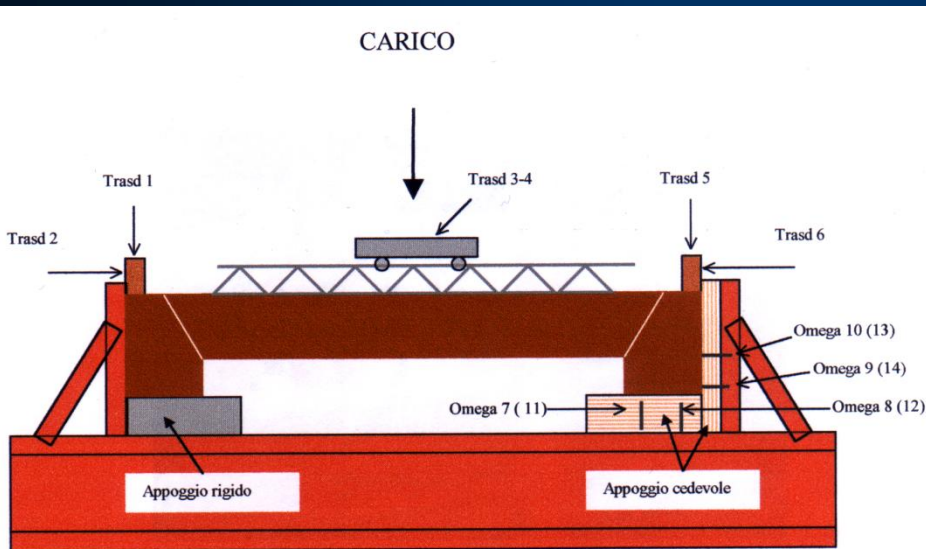
	Carico di picco (N)	Rigidezza (N/mm)	Duttilità
RP 1.25x50cm intradosso	2360	2.7	1
RP 2.5x50cm intradosso	3190	4.8	1
RP 5x50cm intradosso	3620	6	1
RP 1.25x50cm intradosso and sides	8645	4.7	1.6
RP 2.5x50cm intradosso e laterale	12065	5.5	1.5
RP 5x50cm intradosso e laterale	17050	6.2	1.4

PIATTABANDE



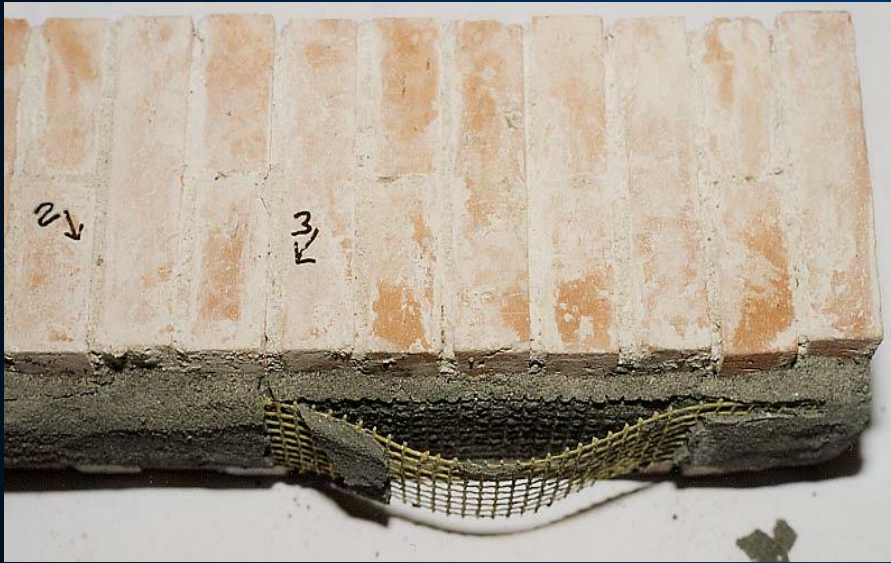
Prove su elementi strutturali PIATTABANDE

Apparecchiatura di prova



PIATTABANDE

Modalità di distacco del rinforzo



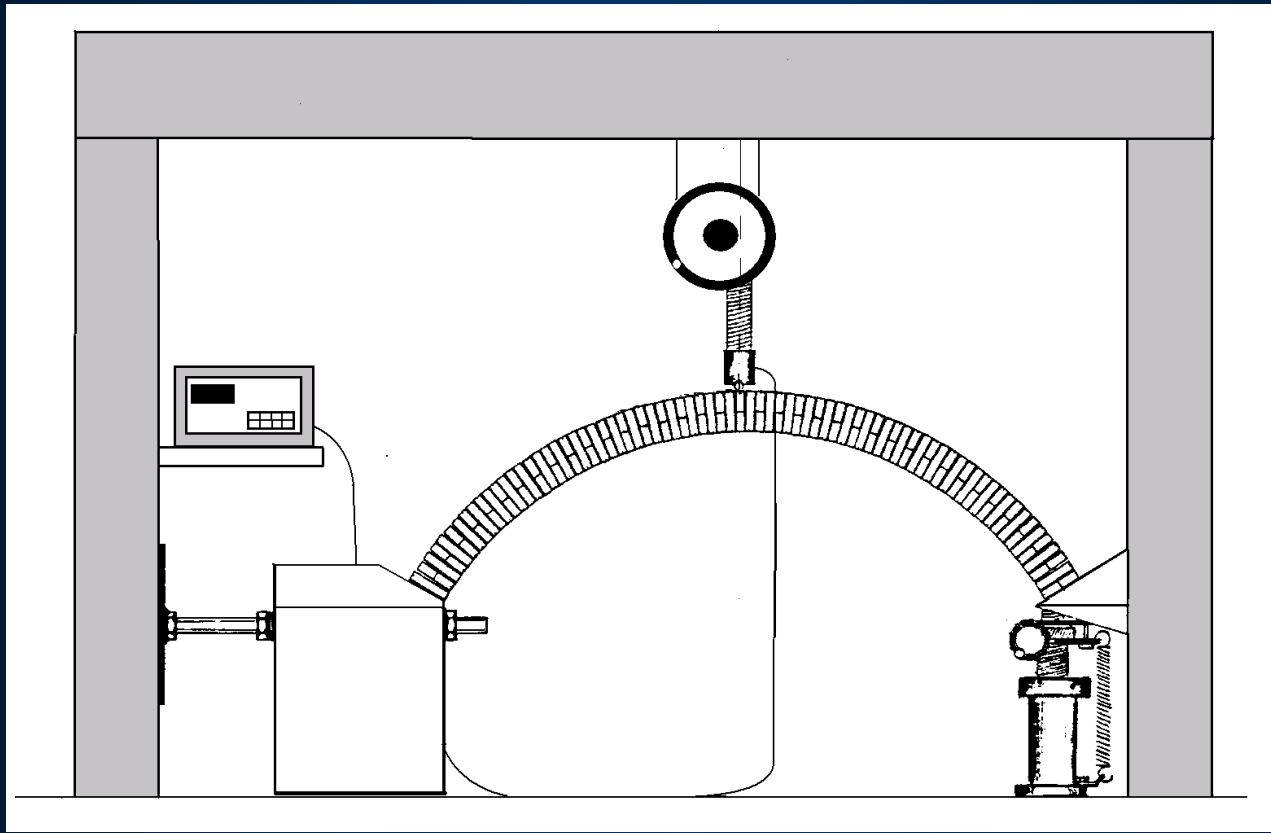
GFRCM



CFRP

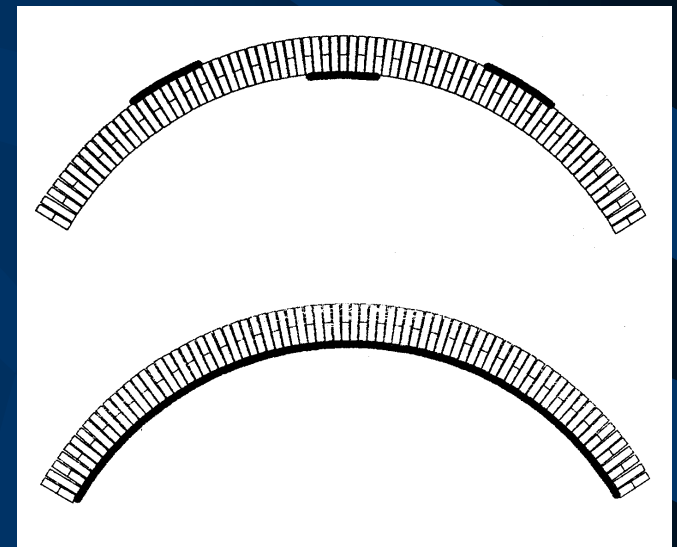
ARCHI

Apparecchiatura di prova

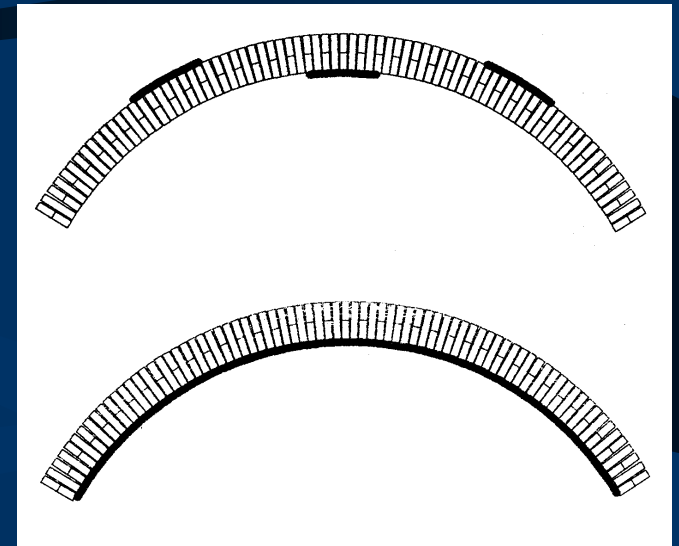


ARCHI - CFRP

- Confronto fra archi rinforzati con strisce di larghezze diverse
 - A) Non rinforzato
 - B) Rinforzo locale
 - C) Rinforzo globale (1.25 cm)
 - D) Rinforzo globale (2.50 cm)
 - E) Rinforzo globale (5.00 cm)



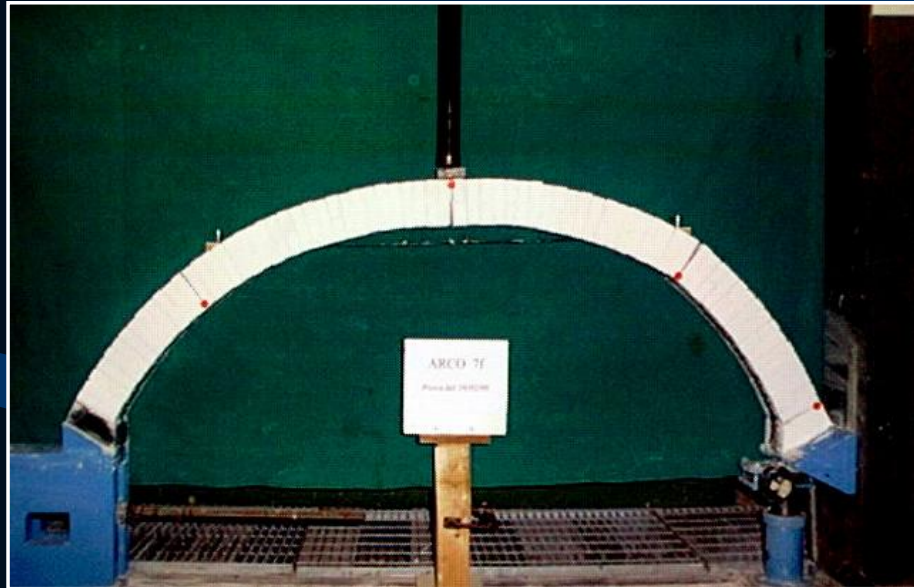
ARCHI - CFRP



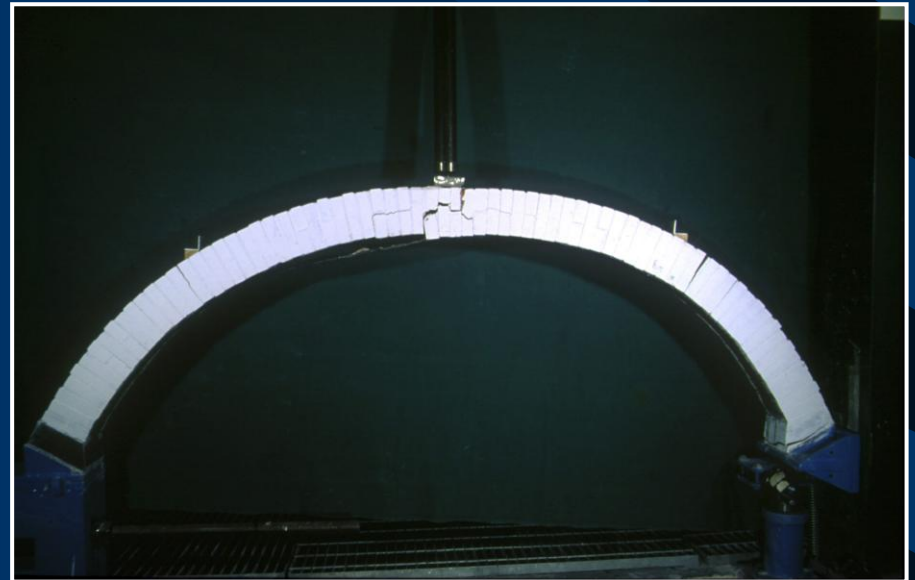
	carico di picco (N)	rigidezza		duttilità	
		Kt (N/ μ m)	Ks (N/ μ m)	μ c	μ cd
non consol	450	0.35	0.10	1.45	1.39
cons. locale	700	0.41	0.15	1.52	1.48
1.25 cm	3560	1.52	0.92	1.11	1.32
2.5 cm	4520	1.71	1.05	1.13	1.48
5 cm	6580	1.83	1.25	1.21	1.66

ARCHI - CFRP

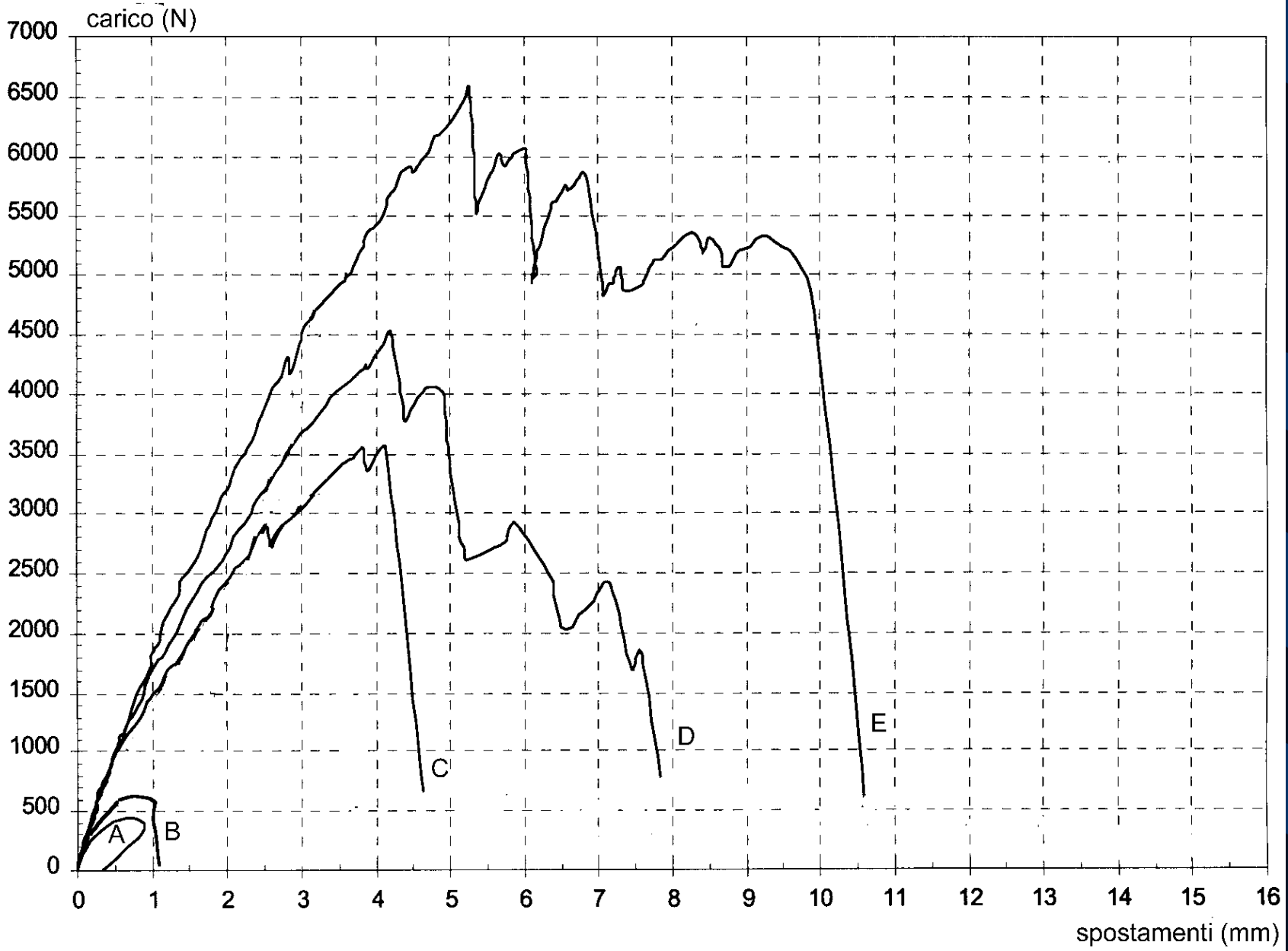
CFRP



Striscia 1.25 cm

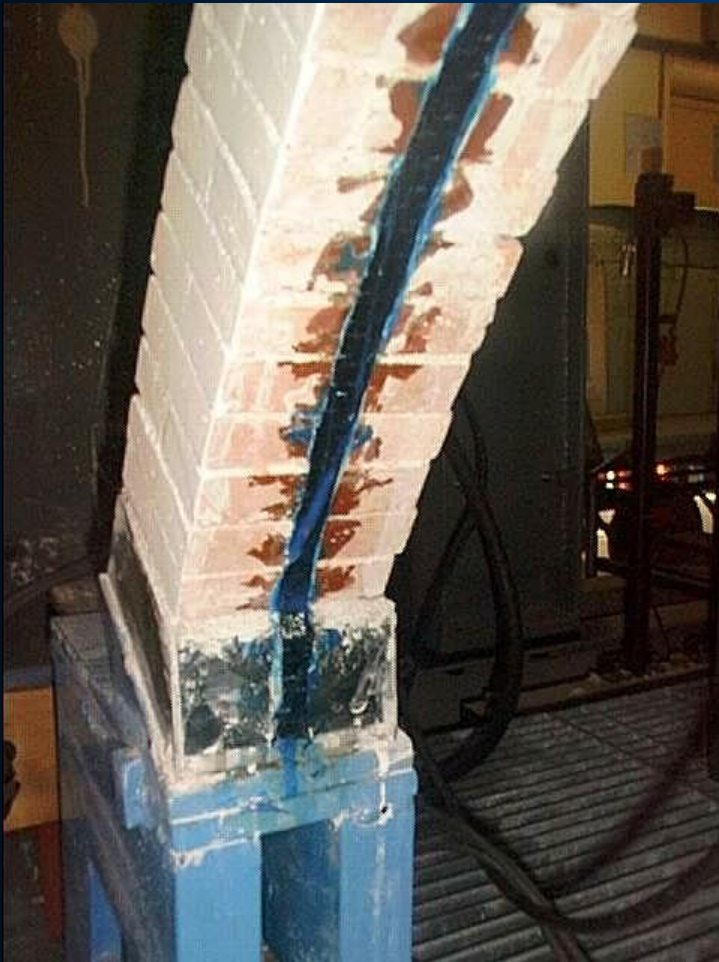


Striscia 5 cm



ARCHI - CFRP & GFRCM

- CFRP

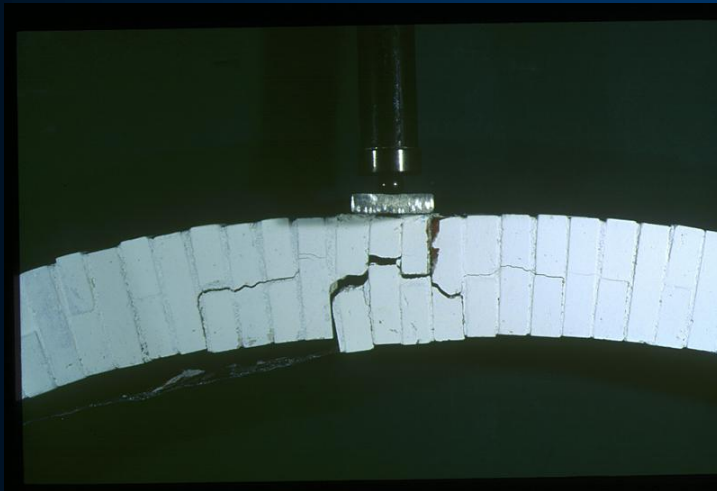


- GFRCM



ARCHI - CFRP & GFRCM

	1° crack load (kg)	peak load (kg)	stiffness (kg/ μm)	kinematic ductility	available ductility
Unreinforced	26	46	0.2	3.2	4
CFRP (2.5cm)	290	452	0.2	1.7	1.1
GFRCM (10cm)	130	431	0.6	2.3	1.1



ARCHI CFRP-GFRCM



CFRP



GFRCM

- modelli in scala 1:2 di archi con rinforzo in intradosso
 - carico verticale
 - carico orizzontale
 - appoggio destro cedevole elasticamente

Caratteristiche del rinforzo

- Per un confronto significativo dei risultati ottenibili con i due tipi di placcaggio sono state applicate strisce di diversa larghezza in modo da disporre della stessa capacità di sopportare la forza di trazione in quanto i due materiali di rinforzo utilizzati esibiscono una diversa resistenza per unità di larghezza
 - resistenza per unità di larghezza delle fibre di carbonio = 566 kg/cm
 - resistenza per unità di larghezza della rete in fibre di vetro = 90 kg/cm
- rapporto resistenza rete di vetro/fibre di carbonio 1/6



Parametri meccanici del laterizio, della malta e della muratura

	modulo elastico a compressione (MPa)	resistenza a compressione (MPa)	resistenza a trazione (MPa)	resistenza a trazione per flessione (MPa)
Laterizio	1785	17.4	1.7	3.5
Malta	133	1.5	0.2	0.4
Muratura	830	8.6		

Modulo elastico del composito in CFRP (tecnica di omogeneizzazione proposta da Y. H. Zhao and G.J. Weng)

Frazione di volume Matrice epossidica E=3000MPa $\nu=0.35$	0.8	0.825	0.85	0.875	0.9
Frazione di volume Fibre di carbonio E=230000MPa $\nu=0.33$	0.2	0.175	0.15	0.125	0.1
Composito E(MPa)	48577	42899	37222	31545	25868

Modulo elastico del composito in GFRCM (tecnica di omogeneizzazione proposta da Y. H. Zhao and G.J. Weng)

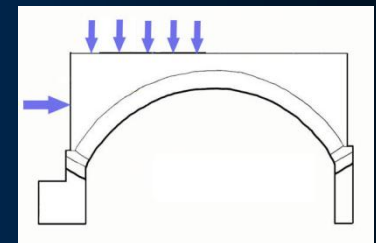
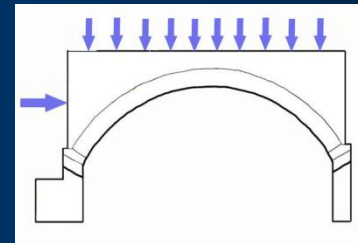
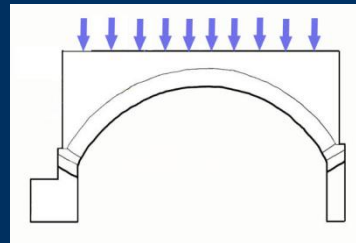
Frazione di volume Matrice cementizia E=28000 MPa $\nu=0.12$	0.875	0.9	0.95	0.975	0.99
Frazione di volume Fibre di vetro E=80000MPa $\nu=0.33$	0.125	0.1	0.05	0.025	0.1
Composito E(Mpa)	38935	37719	31383	30165	29435

Archi

- Due modelli

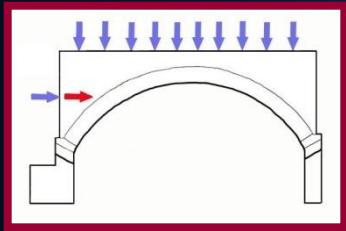


- Condizioni di carico

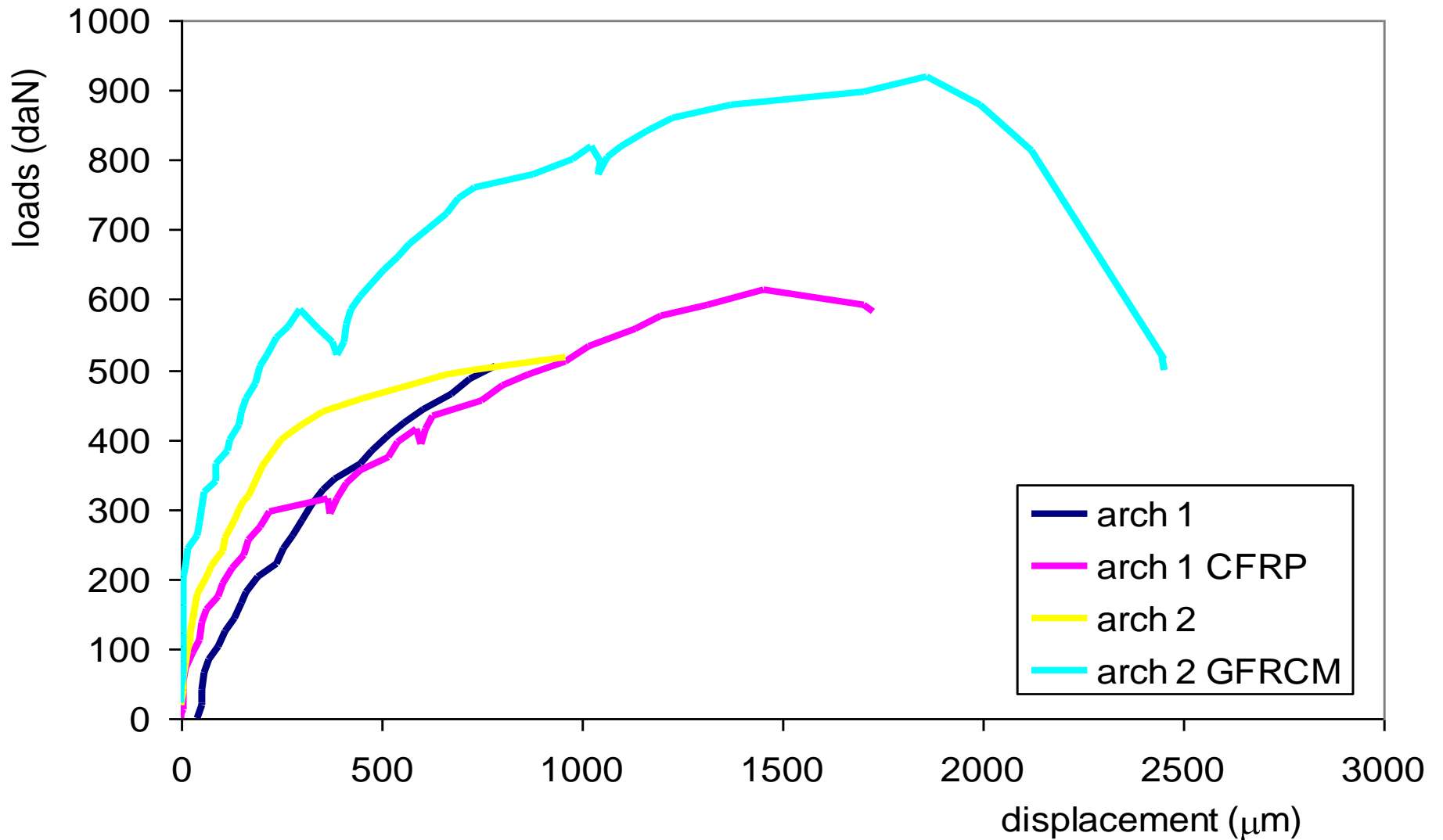


- Prove

- arco 1 senza rinforzo
- arco 1 con rinforzo in CFRP
- arco 2 senza rinforzo
- arco 2 con rinforzo in GFRCM



Diagrammi carico-spstamento



- I risultati sperimentali acquisiti sui due modelli di archi rinforzati riguardano
 - la capacità di sopportare azioni orizzontali
 - l'incremento di rigidezza
 - l'incremento di duttilità
 - il quadro fessurativo
 - il modo di collasso

- incremento della capacità di sopportare azioni orizzontali
 - CFRP 21%
 - GFRCM 78%
- incremento di rigidezza per carichi verticali
 - CFRP 16%
 - GFRCM 131%
- incremento di rigidezza per carichi orizzontali
 - CFRP 9%
 - GFRCM 38%
- incremento di duttilità
 - CFRP 80%
 - GFRCM 51%

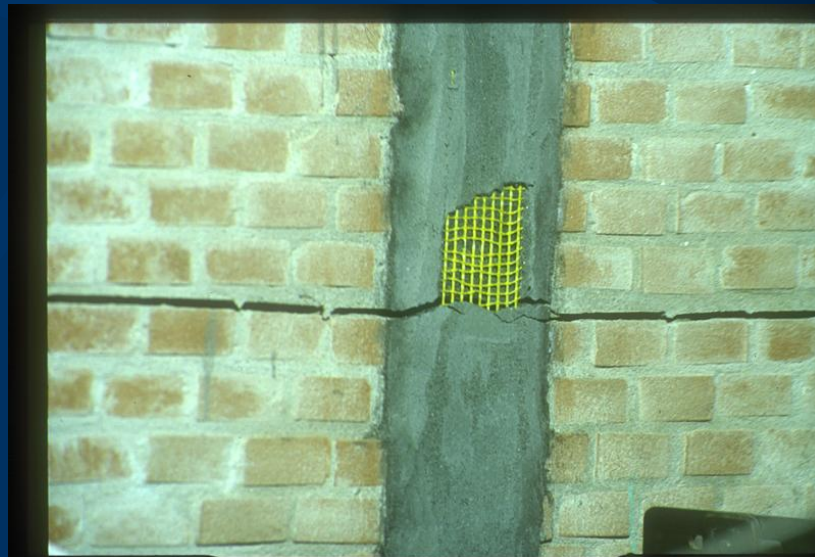
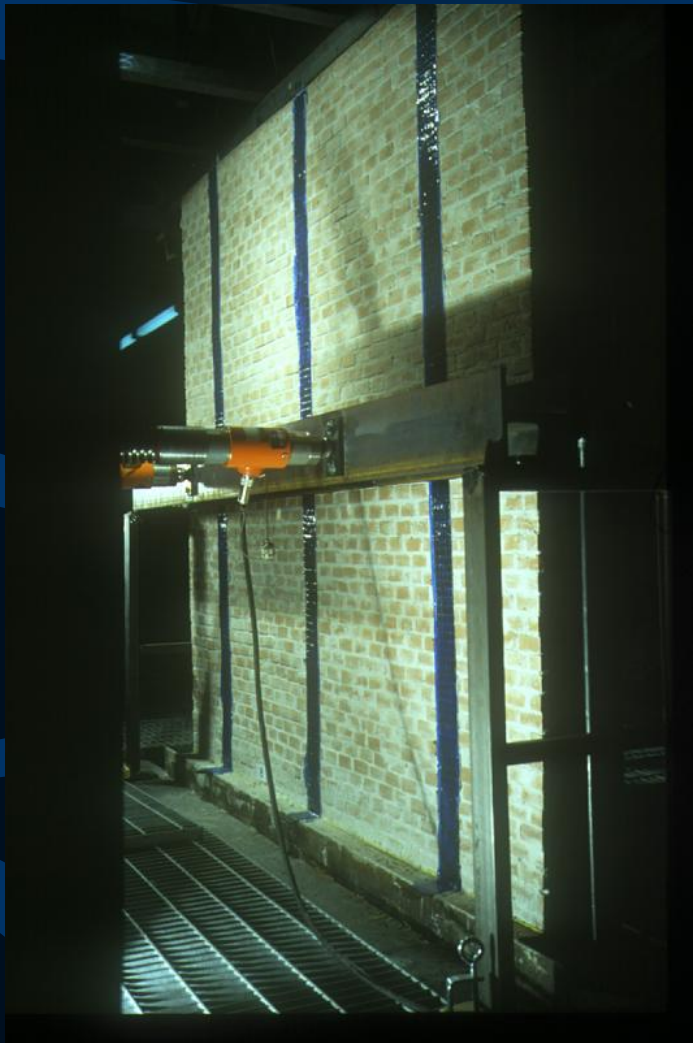
- Il rinforzo in fibre di vetro e malta cementizia offre resistenza sia a trazione sia a compressione
 - questo comportamento rende ragione della maggiore capacità di resistere alle azioni orizzontali esibita dall'arco rinforzato con GFRCM
 - questo risultato dipende ovviamente anche dall'incremento di sezione resistente prodotto dall'applicazione del composito

PANNELLI

- Pannello 150x150x12 cm

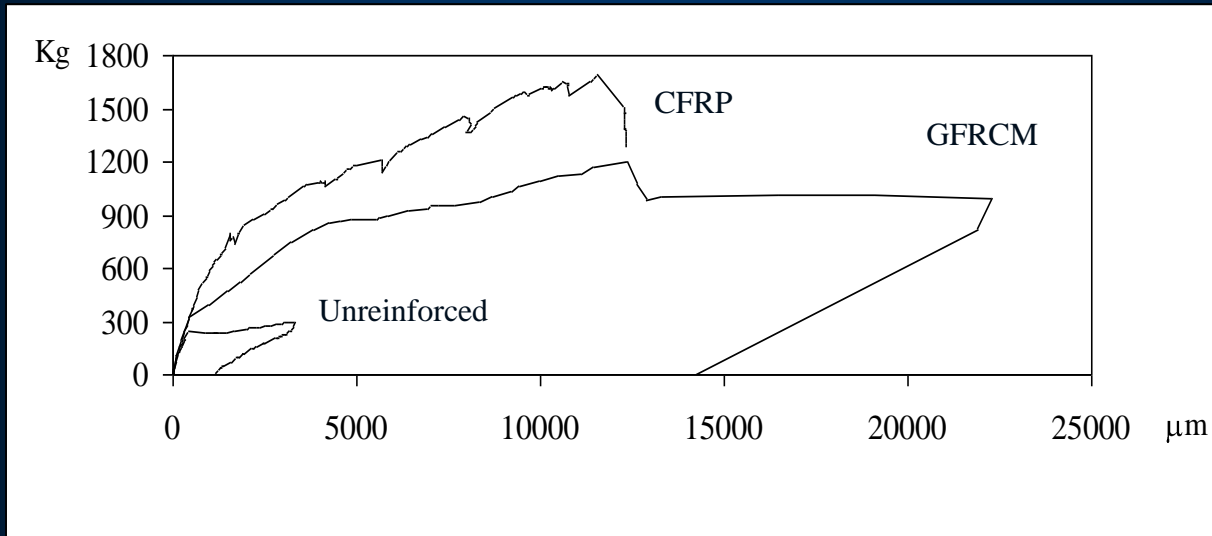


PANNELLI

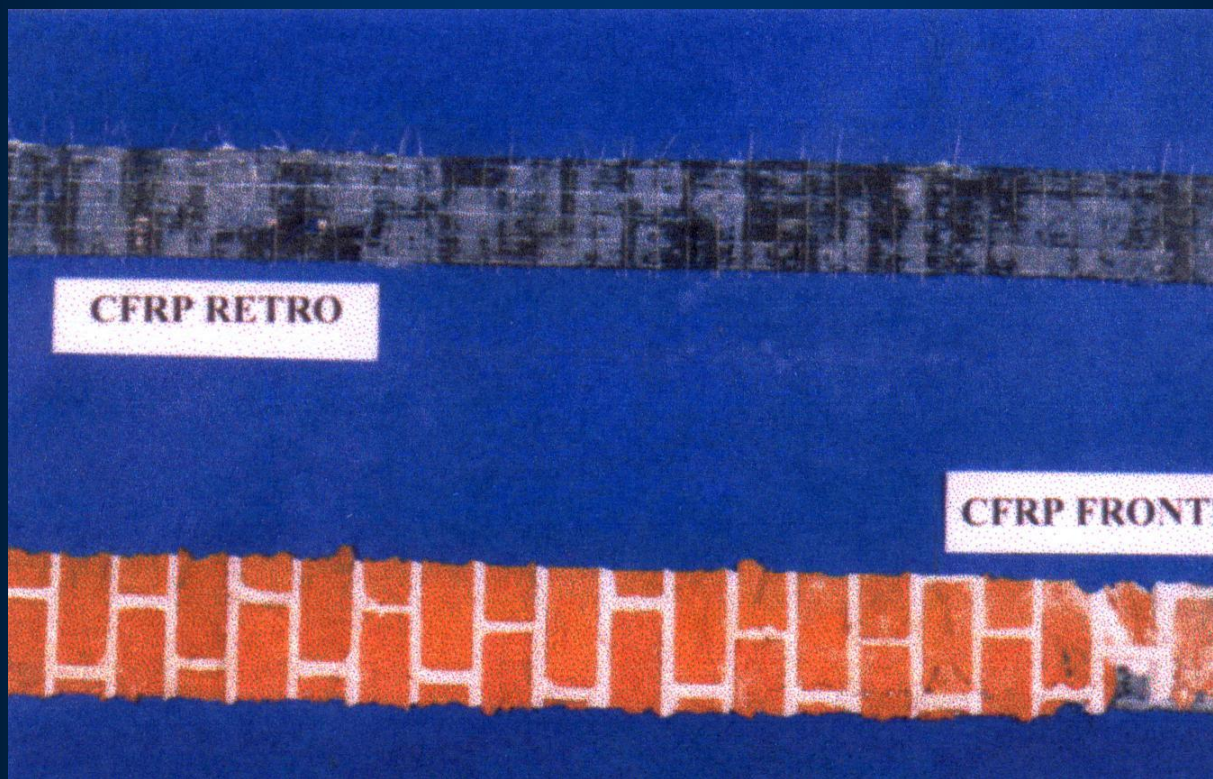


PANNELLI

Panel	1° crack load (kg)	peak load (kg)	stiffness (kg/ μm)	kinematic ductility	available ductility
Unreinforced	80	296	1.2	1.7	>7.5
CFRP (5cm)	800	1688	1.2	4.8	1.1
GFRCM (10cm)	180	1200	1.8	17	>1.8

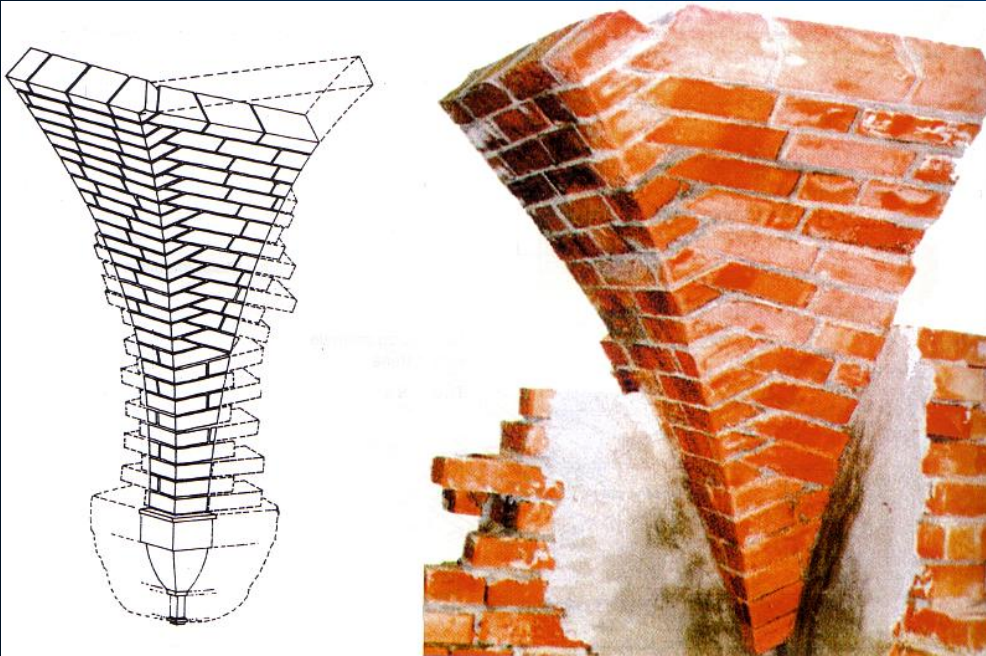


PANNELLI



- Il rinforzo in fibre di carbonio e matrice polimerica presenta una insospettata debolezza se applicato in zona compressa
 - il distacco osservato in zona compressa può limitare l'efficacia del rinforzo in caso di azione sismica che produce nelle stesse zone alternativamente tensioni di trazione e compressione

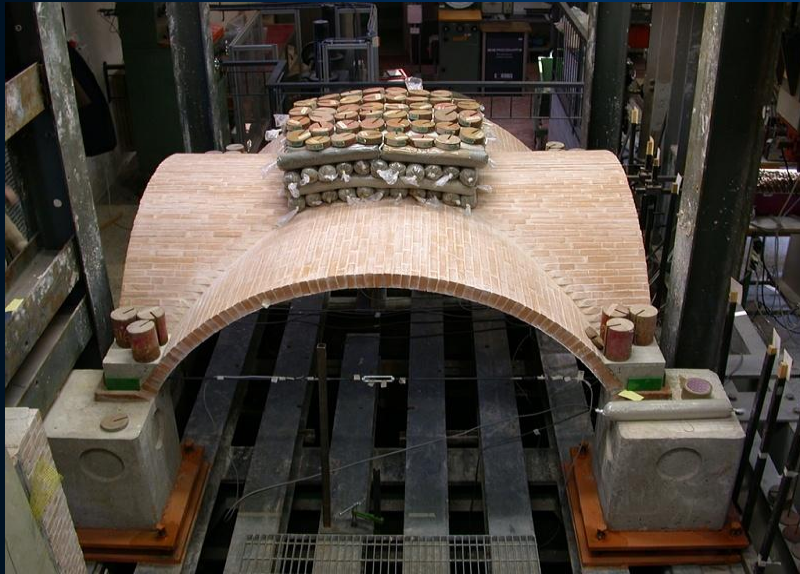
VOLTA A CROCIERA



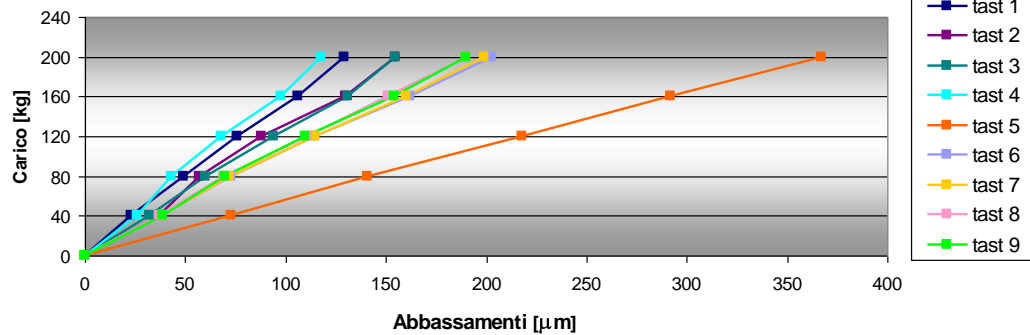
VOLTA A CROCIERA



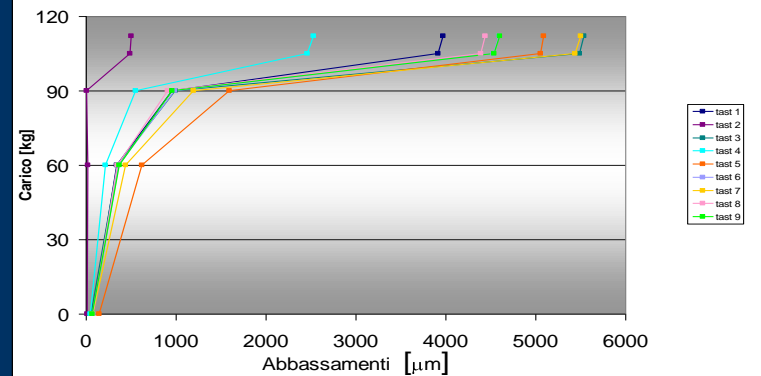
VOLTA A CROCIERA



TASTATORI (200 kg)



TASTATORI (112 kg)



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



ARCHITETTURE IN TERRA

Gli edifici di terra sono diffusi nella quasi totalità del pianeta. L'uomo ha sviluppato di volta in volta tecniche più o meno ingegnose per appropriarsi del materiale terra e piegarlo alle sue esigenze.

- Quasi tutti i paesi del mondo sono depositari di un patrimonio più o meno consistente di costruzioni in terra cruda.

Architetture in terra

- Esiste un luogo comune piuttosto diffuso che afferma che gli edifici di terra esistano solo nei paesi poveri, con clima secco e con una bassa attività tellurica, ma in realtà essi si trovano in luoghi con le più svariate caratteristiche climatiche, sismiche e socioeconomiche, talvolta anche lì dove sono disponibili altri materiali da costruzione.

Architetture in terra

- Negli ultimi anni si è manifestato, in ambito nazionale ed internazionale, un rinnovato interesse nei confronti delle architetture in terra cruda; le recenti istanze di natura eco-socio-economica che hanno indotto a mettere in discussione il modello di sviluppo moderno, fondato su elevati consumi energetici con conseguenti alti livelli di inquinamento e degrado ambientale.

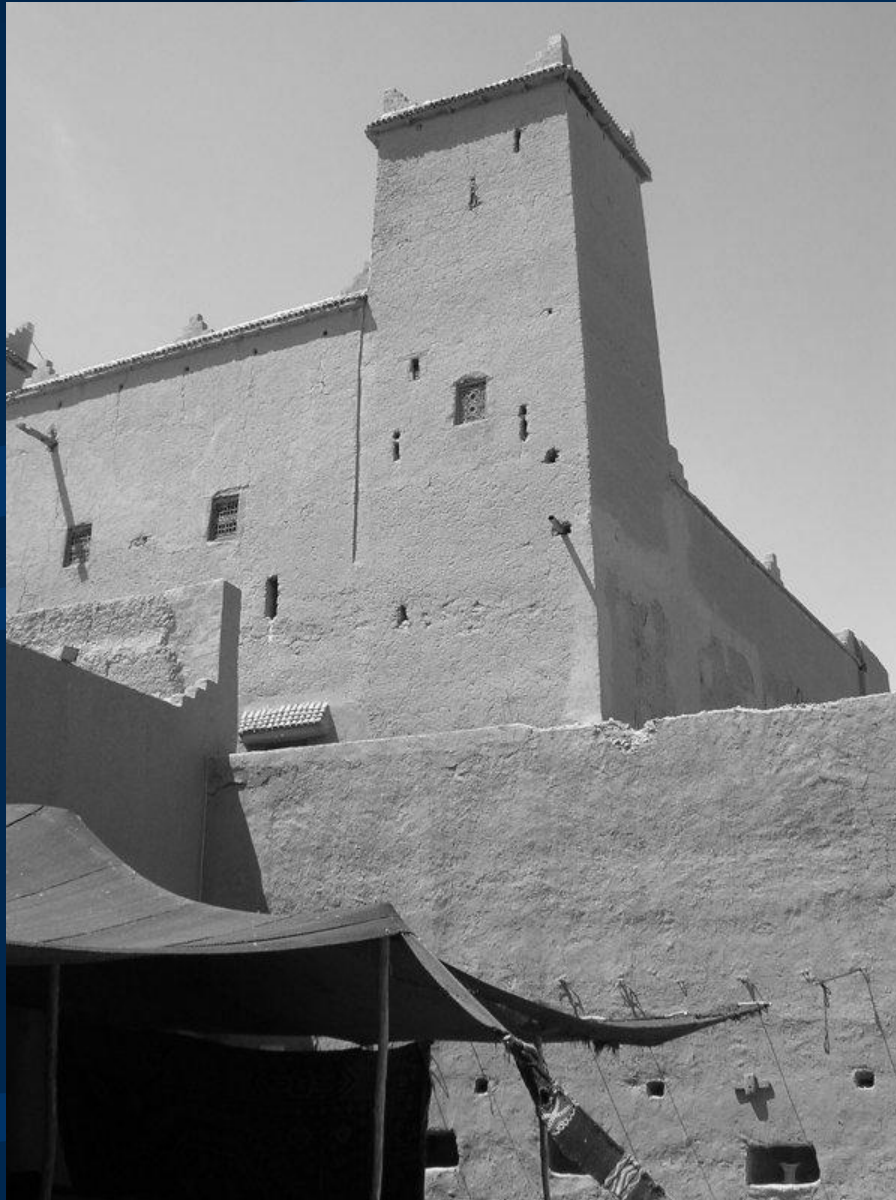
Architetture in terra

- La costruzione in terra cruda presenta un limitatissimo impatto con l'ambiente in tutte le fasi della sua esistenza: dalla costruzione alla fruizione degli edifici e alla loro demolizione.
- A differenza delle altre tecniche edilizie, la terra cruda non implica l'utilizzo di processi industriali per la produzione dei materiali da costruzione ma procedure artigianali o impianti a parziale meccanizzazione.

MAROCCO



MAROCCO



MAROCCO



YEMEN







IRAN



FUJIANG CINA



Lipsia, GERMANIA



Convent Avenue Studios, Tucson, USA



Pottery house, Santa Fè, F. L. Wright 1942. USA















CALABRIA



CALABRIA



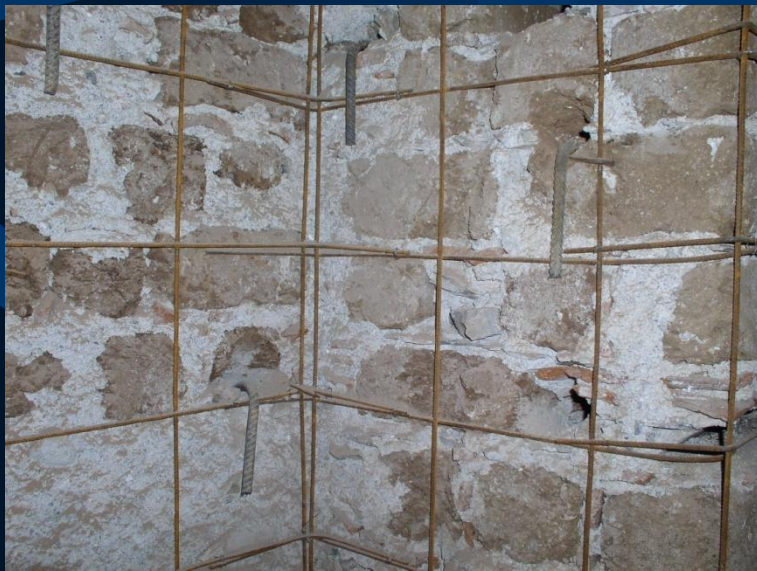
MODELLI DI PARETE IN ADOBE



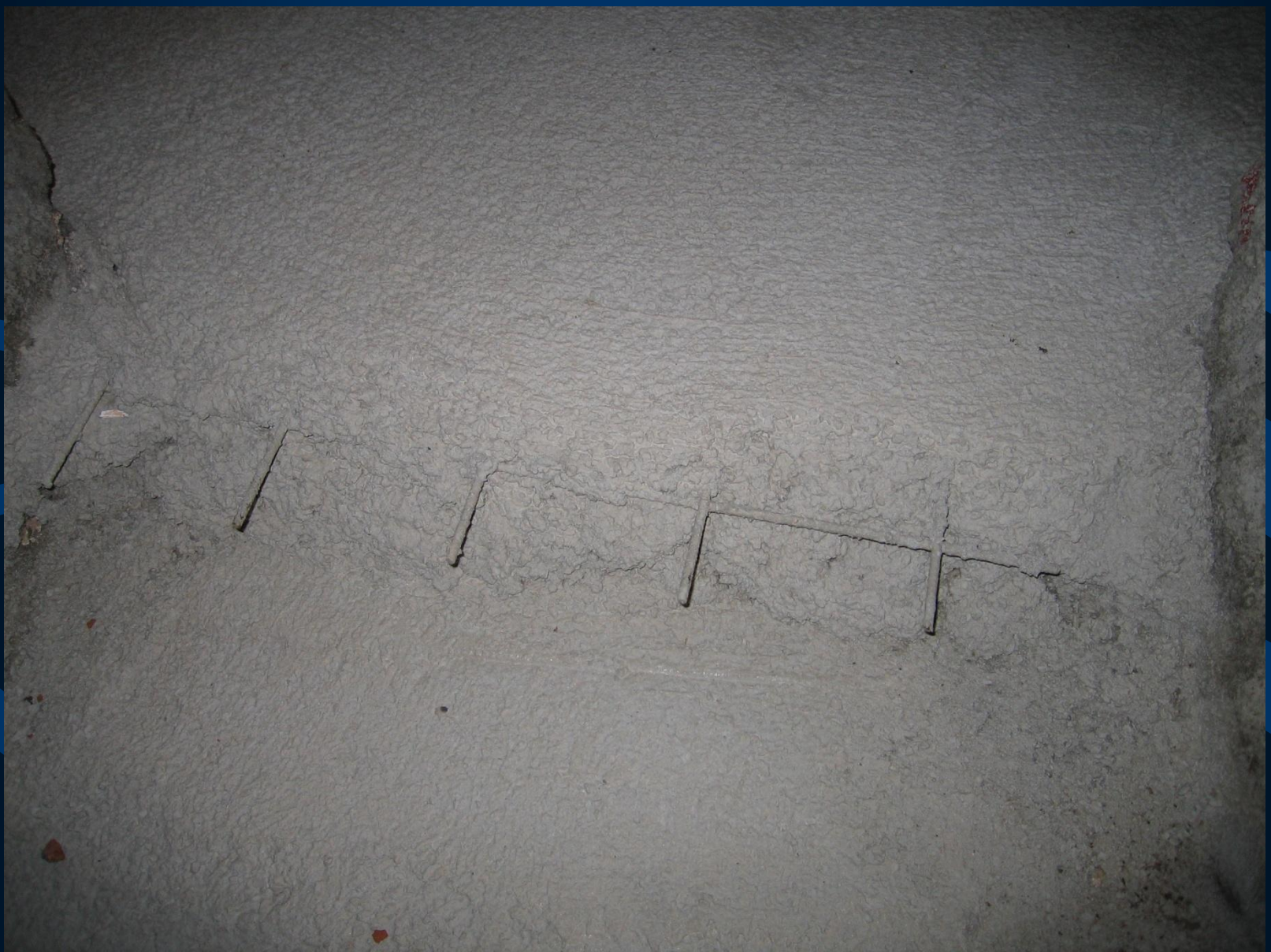
opere di consolidamento e rovina Calabria



opere di consolidamento e rovina Calabria



opere di consolidamento e rovina Calabria

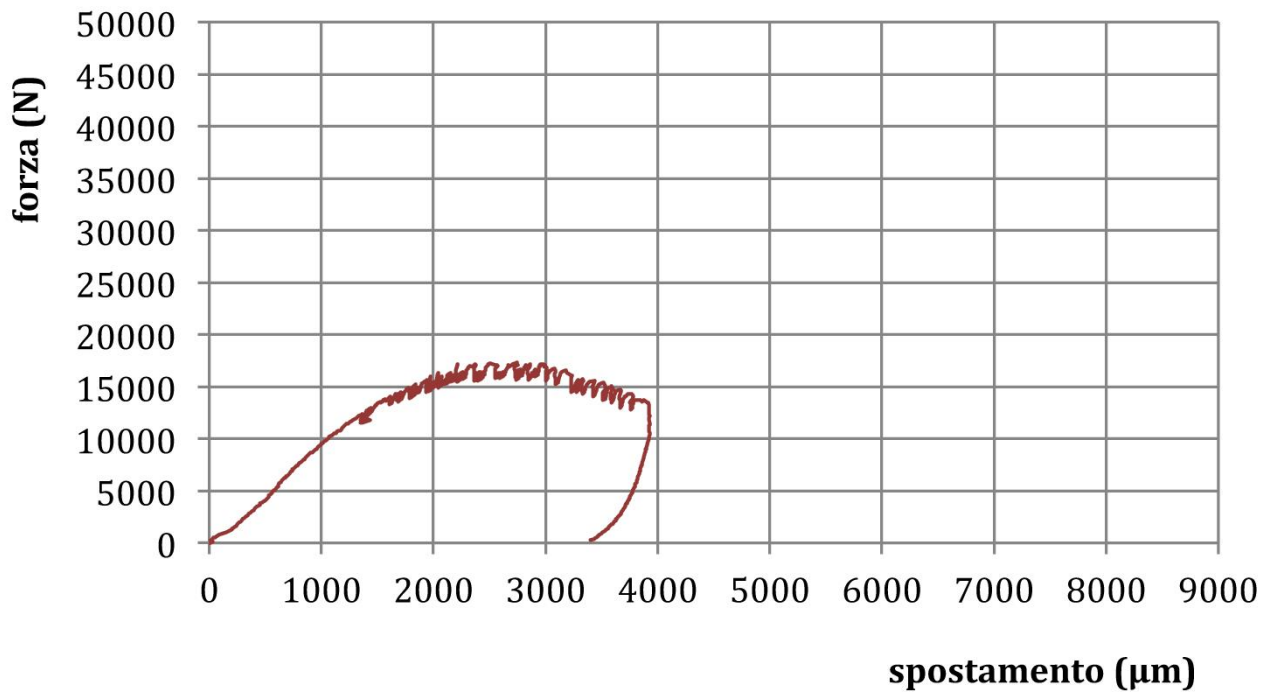


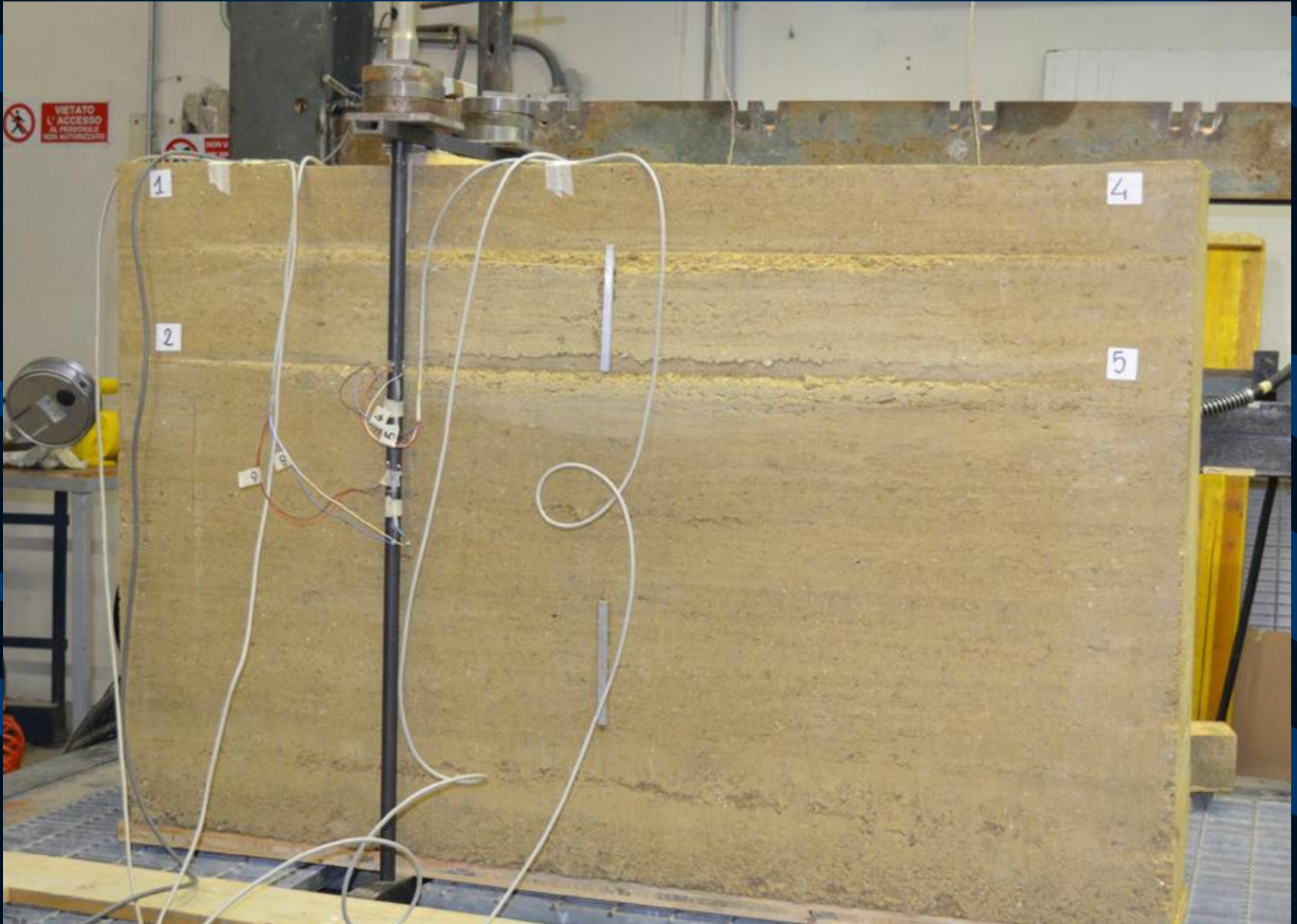
opere di consolidamento e rovina Calabria











VIETATO
L'ACCESSO
AL PERSONALE
NON AUTORIZZATO

1

4

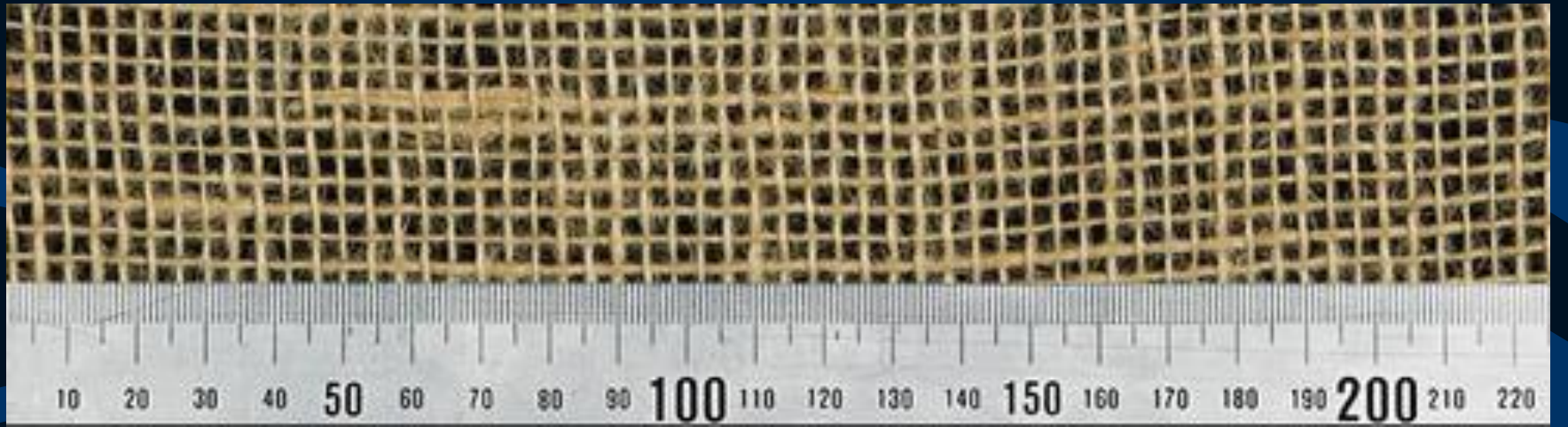
2

5

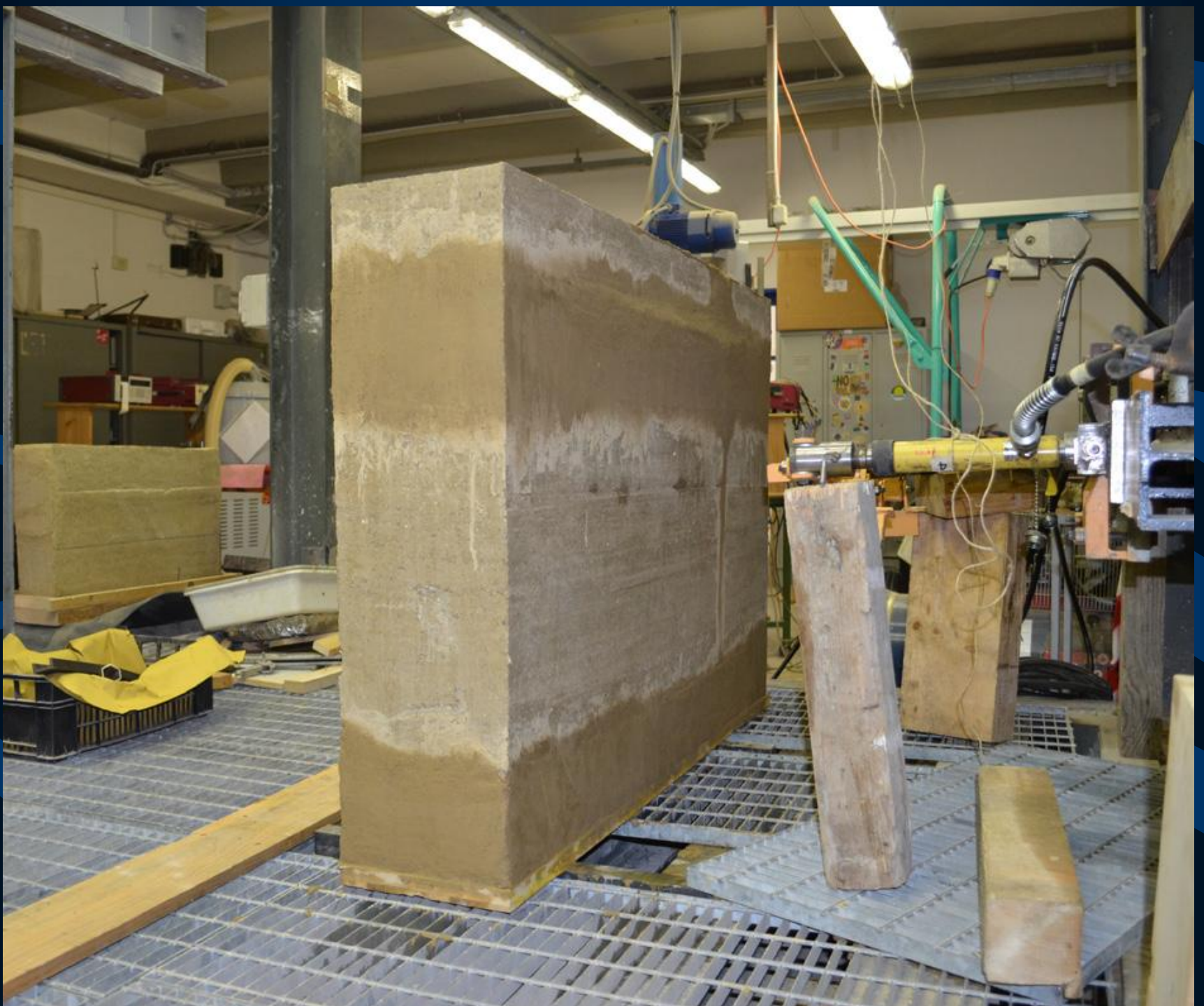
8

9

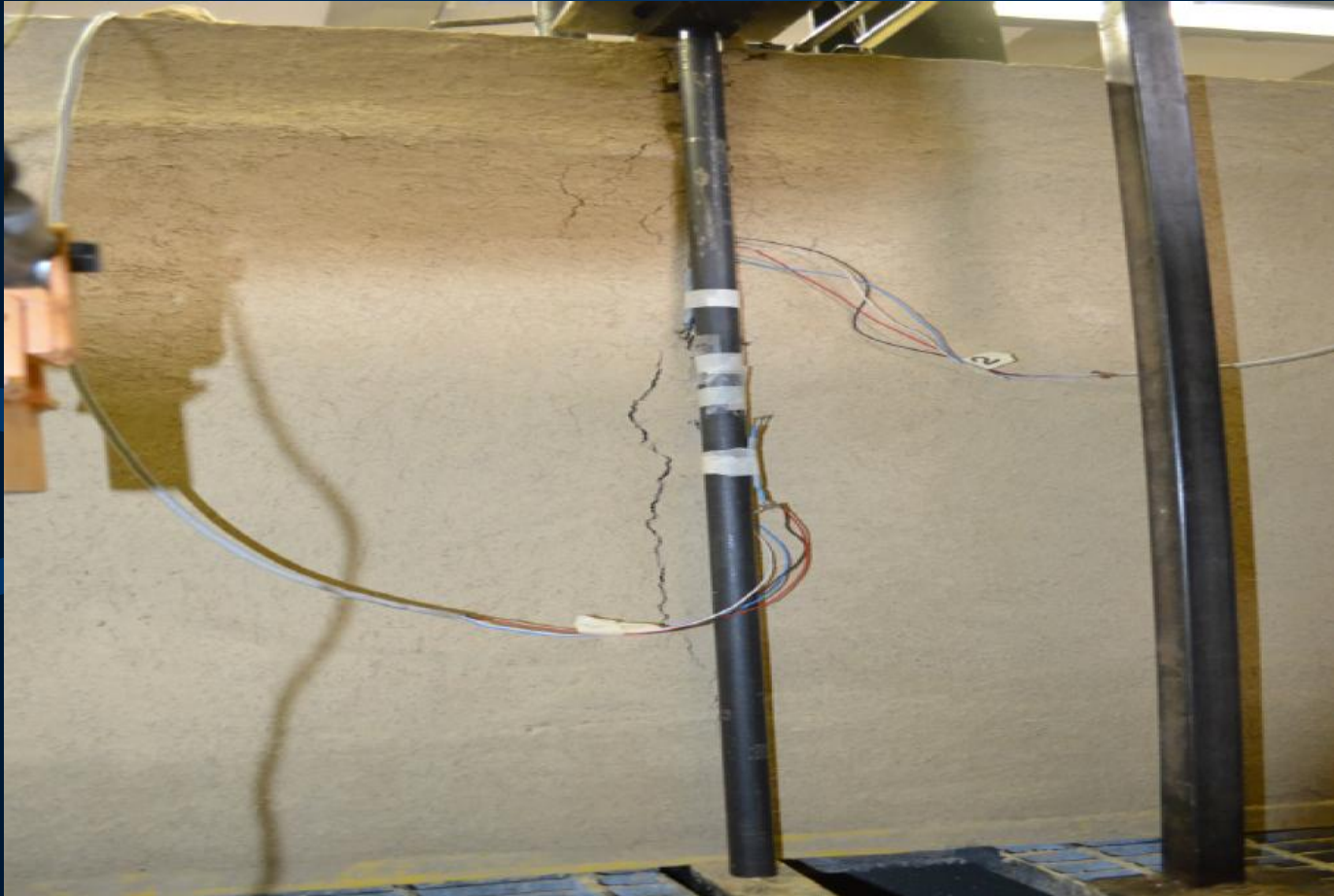




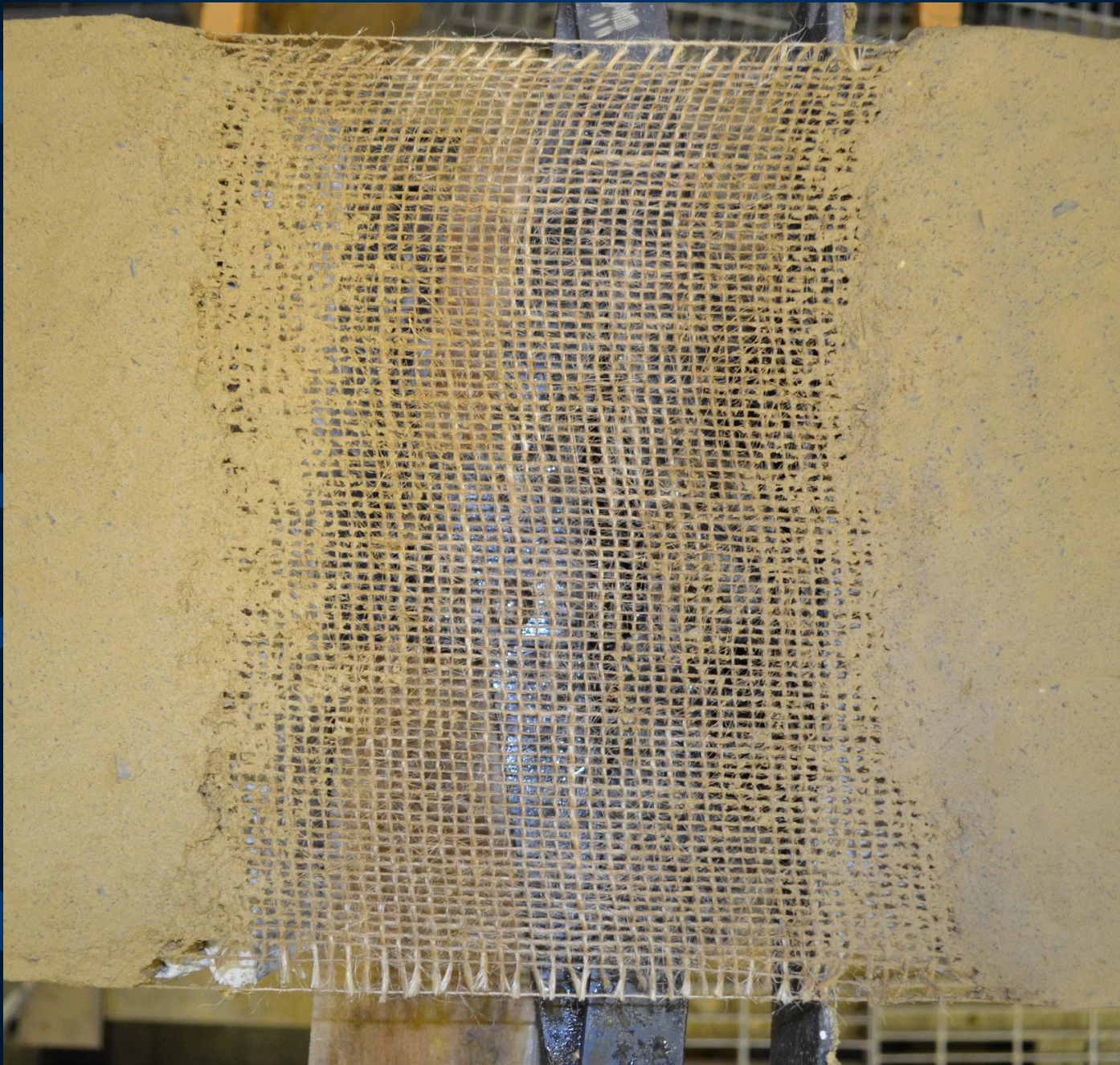








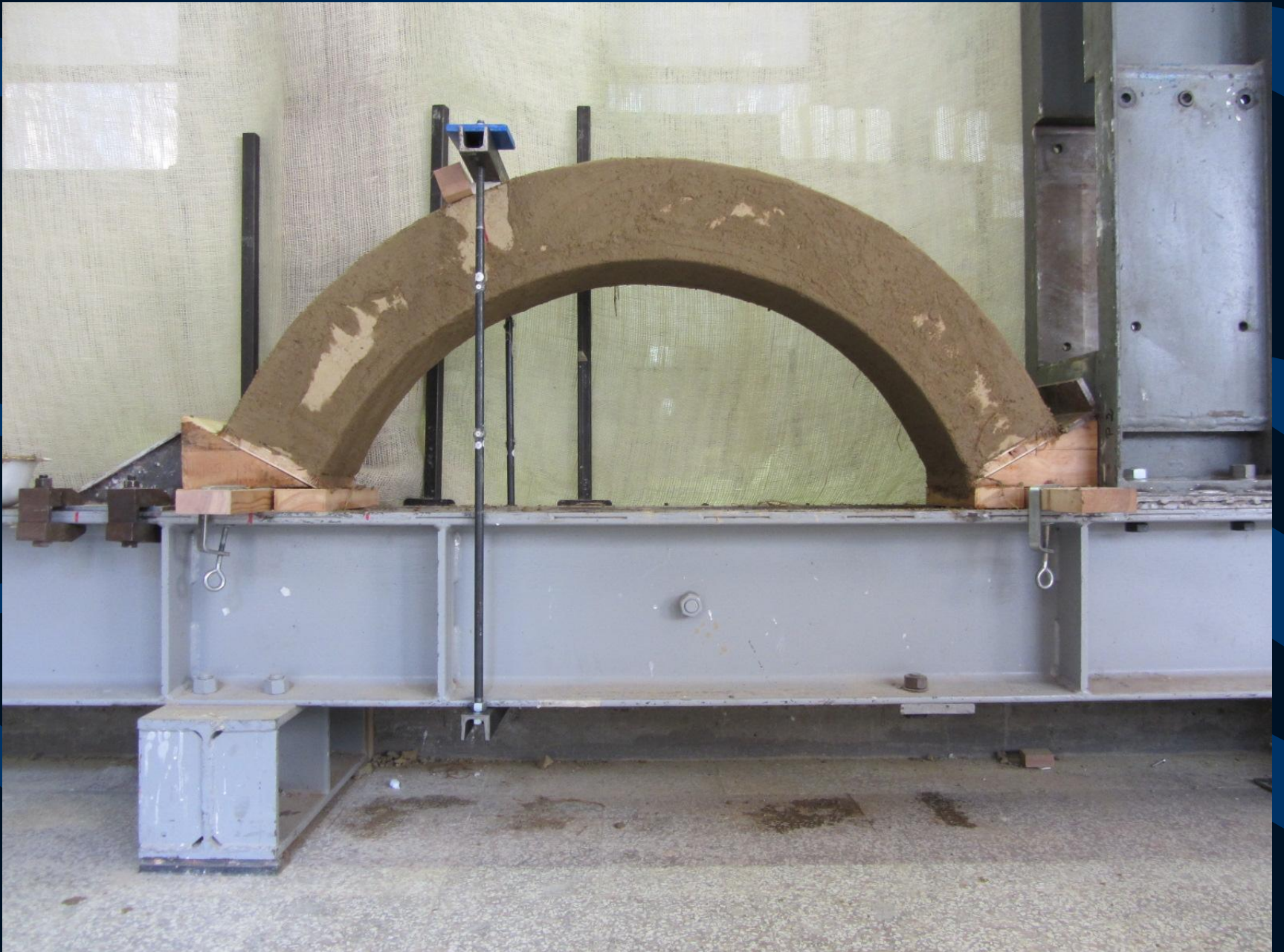




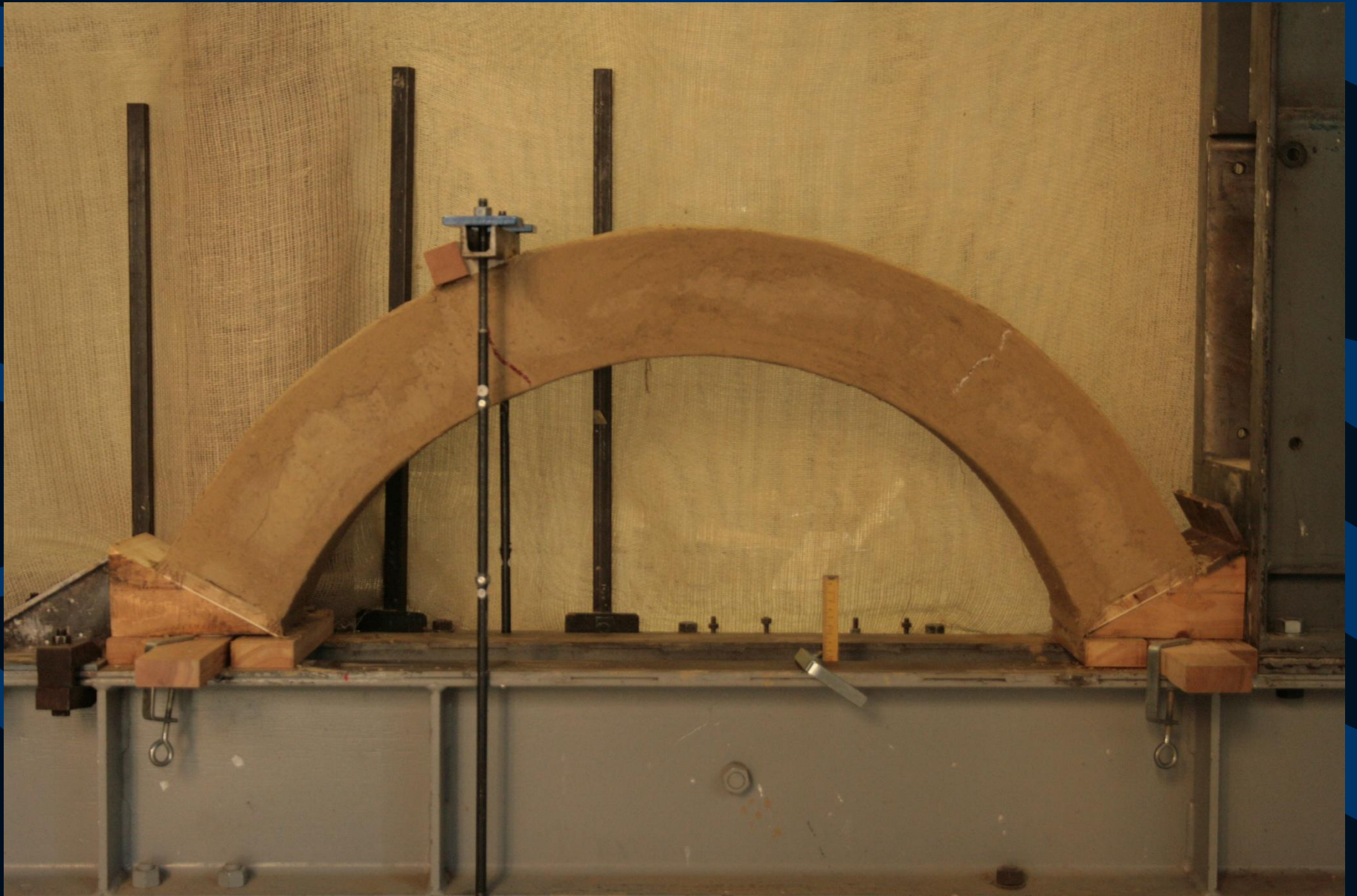




















Conclusioni

- E' importante sottolineare che la scelta del tipo di rinforzo deve tener conto della compatibilità meccanica e fisica tra i materiali innovativi e quelli tradizionali
 - questa caratteristica tipica del composito GFRCM, permette un miglior comportamento meccanico grazie alla migliore aderenza tra matrice cementizia e supporto
 - inoltre la maggiore compatibilità della matrice cementizia fa sì che in nessun caso si abbia delaminazione che invece si manifesta nel caso di compositi polimerici in prossimità del collasso
- Queste considerazioni sembrano fondamentali nel contesto del rinforzo e conservazione degli edifici storici
 - spesso gli interventi di consolidamento riguardano edifici monumentali in muratura e dunque , a prescindere dai benefici di natura meccanica e fisica, (adesione e traspirazione) valori di carattere storico ed estetico (percezione di congruenza materiale e necessità del rispetto della identità strutturale e costruttiva dell'edificio) devono essere salvaguardati