

TECNICHE INNOVATIVE DI INTERVENTO SUL PATRIMONIO EDILIZIO

RINFORZO CON COMPOSITI COSTITUITI DA
MATRICE IN MALTA CEMENTIZIA E RETI IN FIBRE
DI CARBONIO E IN FIBRE DI VETRO

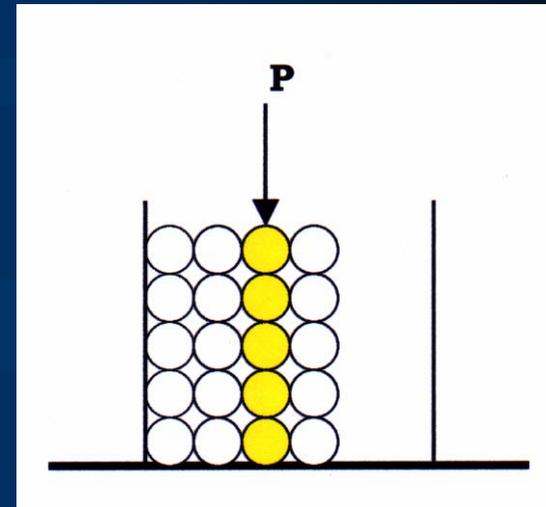
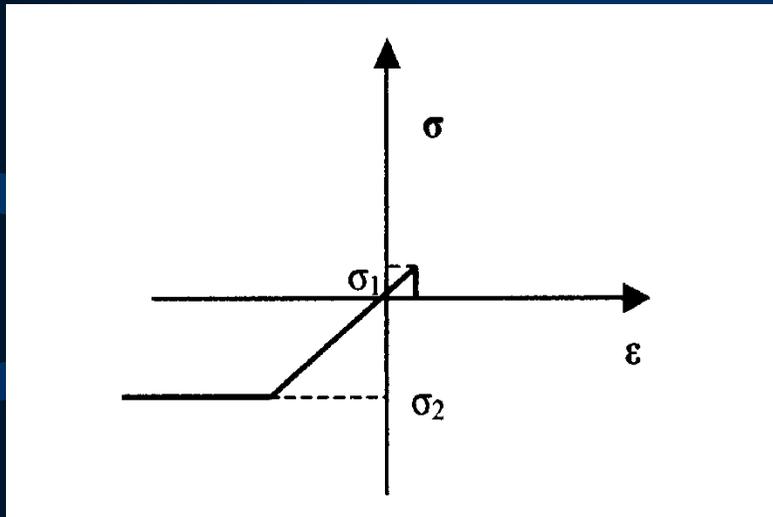
Silvia Briccoli Bati

Dipartimento di Costruzioni
Università degli Studi di Firenze

MURATURA

- La muratura è un composito costituito dalla giustapposizione di materiale lapideo artificiale e/o naturale di varia natura e forma e da una matrice anch'essa di varia natura
- Le sue caratteristiche peculiari sono:
 - eterogeneità
 - anisotropia
 - eteroresistenza
 - macroporosità
 - scarsa capacità di diffondere gli sforzi
 - capacità di compattarsi
 - fragilità

COMPORTAMENTO DELLE STRUTTURE IN MURATURA



- distinzione tra costruzione e struttura

MATERIALI COMPOSITI INNOVATIVI

- Tecnica di rinforzo:
PLACCAGGIO
- Materiali:
 - CFRP (carbon fiber reinforced polymer)
 - GFRCCM (glass fiber reinforced cement matrix)

I MATERIALI

- CFRP

- elevata resistenza a trazione
- alto modulo elastico
- basso peso specifico
- anisotropia

- GFRCM

- buona resistenza a trazione
- elevato modulo elastico
- basso peso specifico
- anisotropia

IL RINFORZO

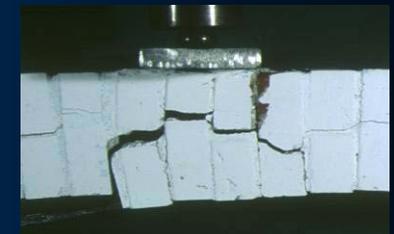
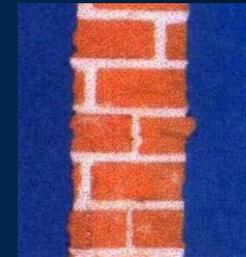
- Cerchiatura di pilastri
- Intradosso e estradosso di strutture voltate
- Pannelli solleccitati fuori piano
- Cerchiatura di scatole murarie con pareti non ben ammorsate

INDAGINE SPERIMENTALE

- Prove di adesione
- Prove di durabilità
- Prove su elementi strutturali
 - travi
 - piattabande
 - pannelli
 - archi
 - volta a crociera

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

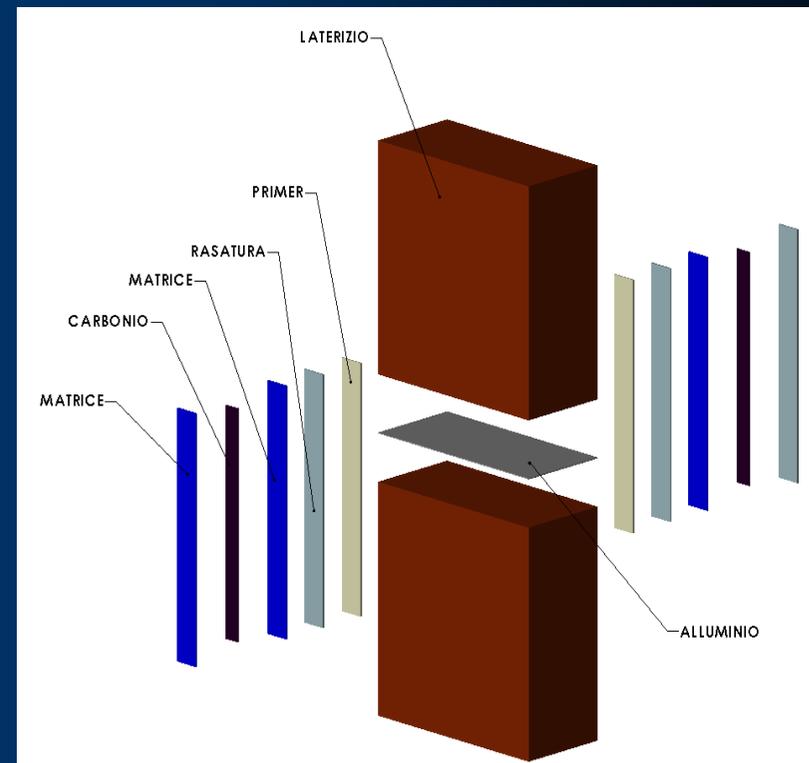


PROVE DI ADESIONE

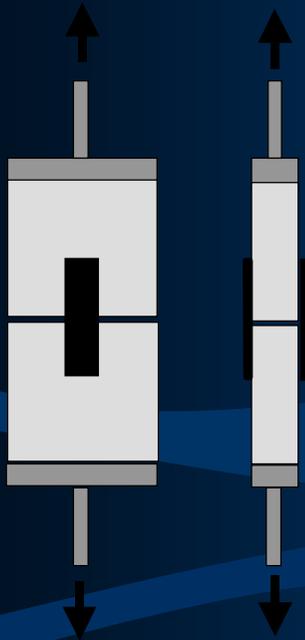
- Supporto: Laterizio
 - Peso specifico = 1800 kg/m^3
 - Modulo di elasticità = 1750 MPa
 - Tensione di rottura a compressione = 17.4 MPa
 - Tensione di rottura a trazione = 1.7 MPa

PROVE DI ADESIONE - CFRP

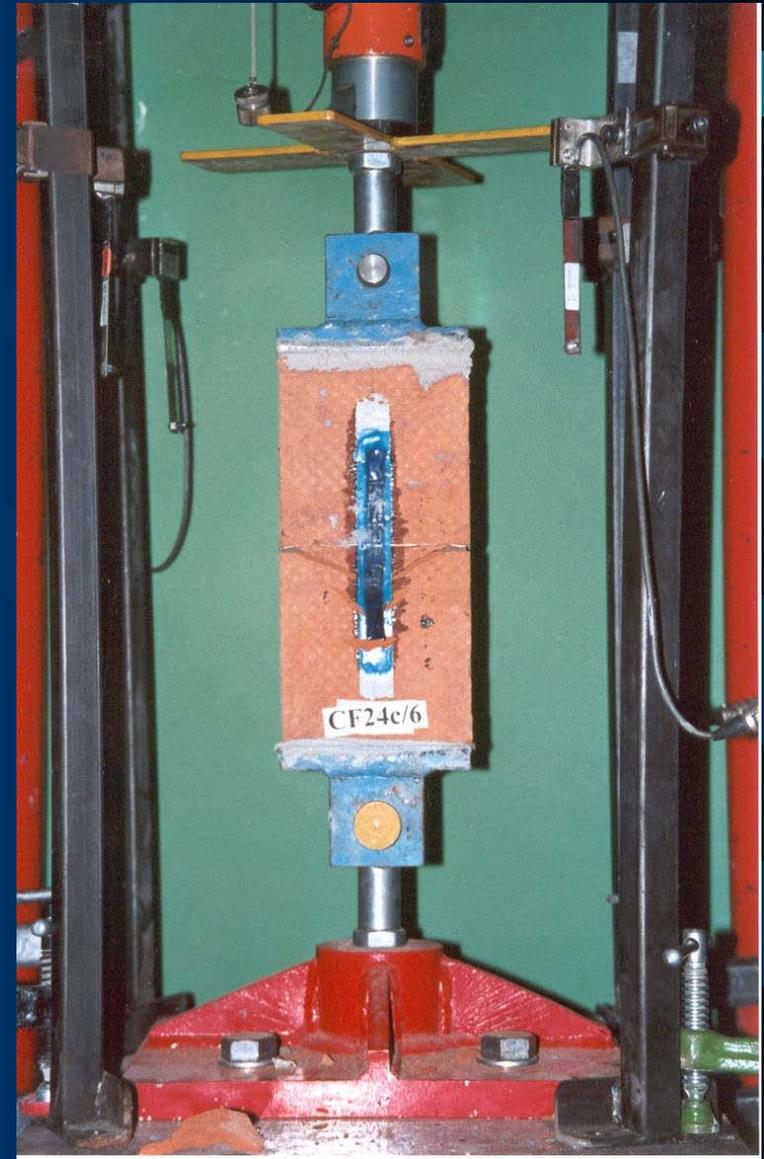
	γ (kg/m ³)	E_t (MPa)	E_f (MPa)	σ_t (MPa)	σ_f (MPa)	$\alpha 10^{-6}$ (1/°C)	ϵ (%)
FibraC1-30	1820	230000	-	5500	-	-	1.5
Primer	1067	700	580	12	24	-	3
Adesivo	1020	3000	3500	50	24	60	2.5



Prova di adesione



- Trazione diretta



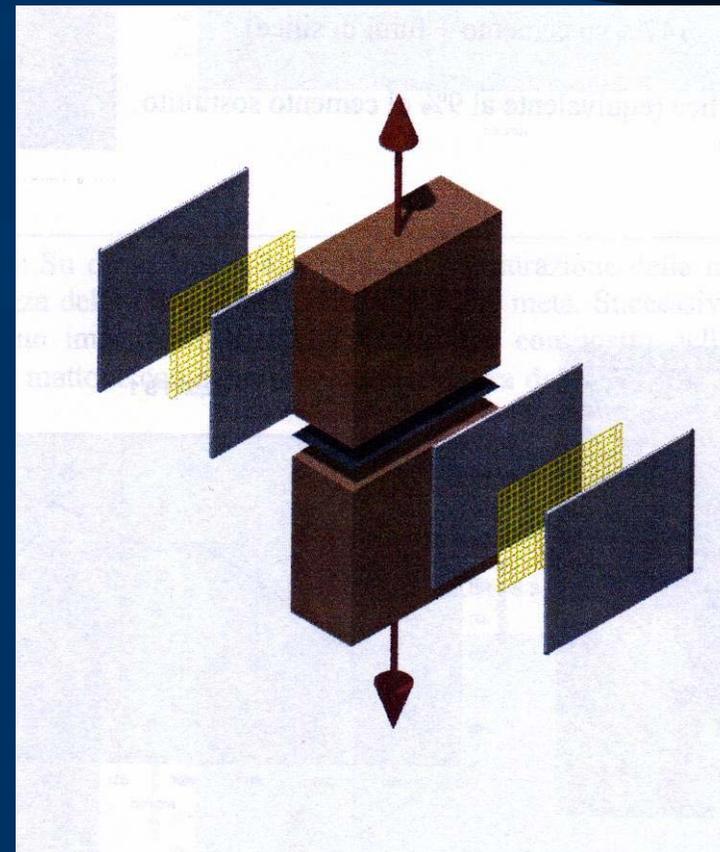
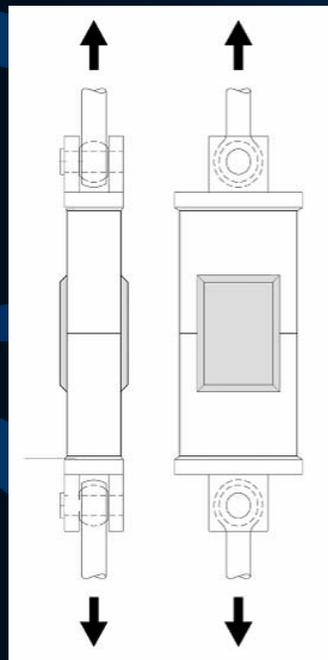
Programma sperimentale

- 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



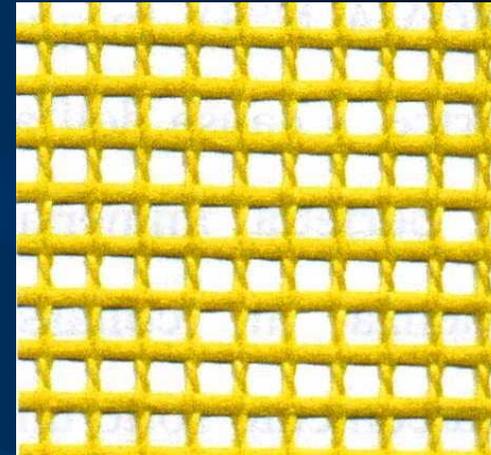
PROVE DI ADESIONE - GFRCM

	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



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

Malta cementizia

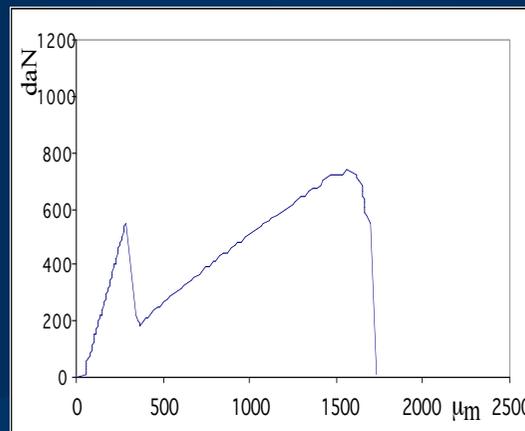
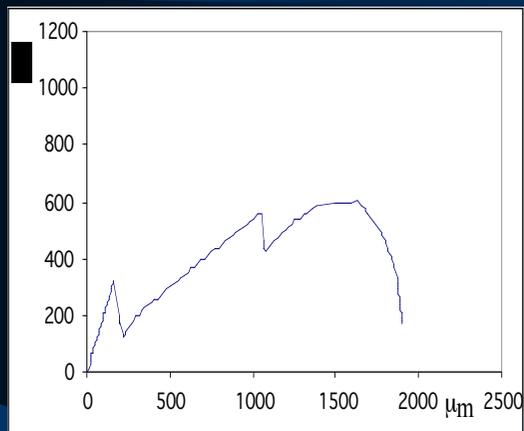
- Composizione messa a punto dai tecnici del Laboratorio annesso al Dipartimento di Costruzioni:
 - cemento Portland 425 e sabbia di Massaciuccoli (rapporto 1:3)
 - additivi: Mapeplast SF (fumi di silice) e Mapefluid PZ 500 (fluidificante)
 - acqua-cemento rapporto 3:5



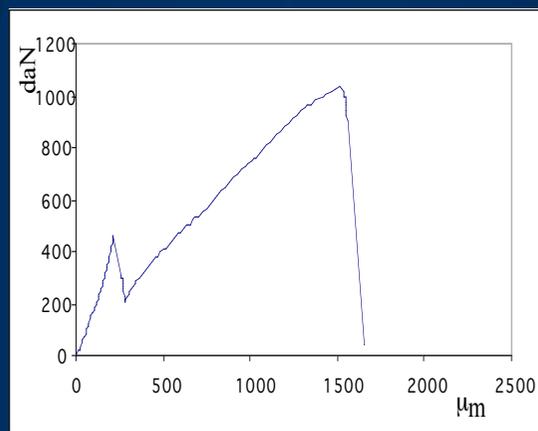
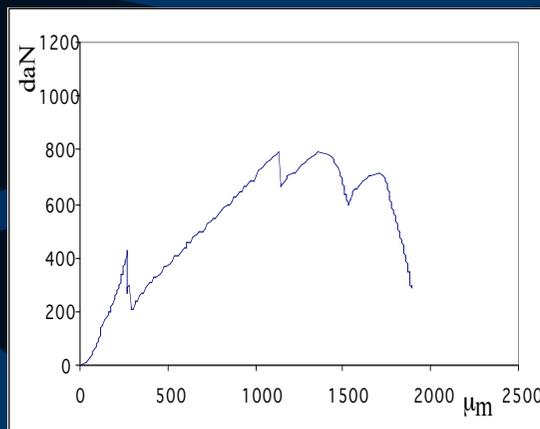
	Resistenza a trazione per flessione (MPa)	Resistenza a trazione diretta (MPa)	Modulo elastico (MPa)	Resistenza a compressione (MPa)
14 days	5.5	3.1		35
28 days	6.0	3.3	25000	38



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



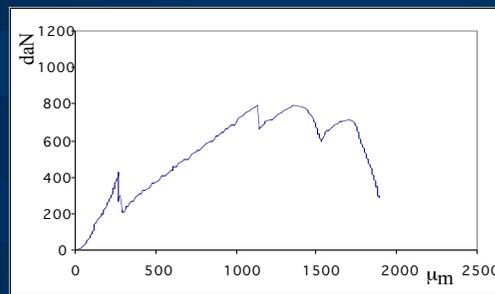
10 cm di larghezza
(rete con 13 maglie)



12 cm di larghezza
(rete con 17 maglie)

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

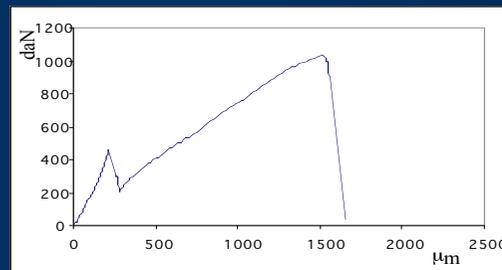
- A. espulsione dello strato superiore di matrice cementizia (tipica per una stagionatura di 14 giorni)
- B. rottura delle fibre in vetro (tipica per una stagionatura di 28 giorni e oltre)



A.

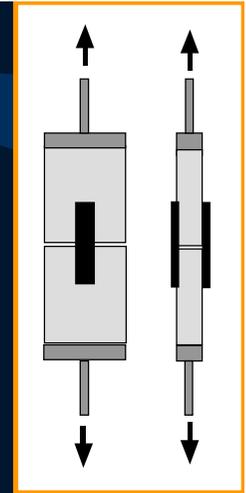
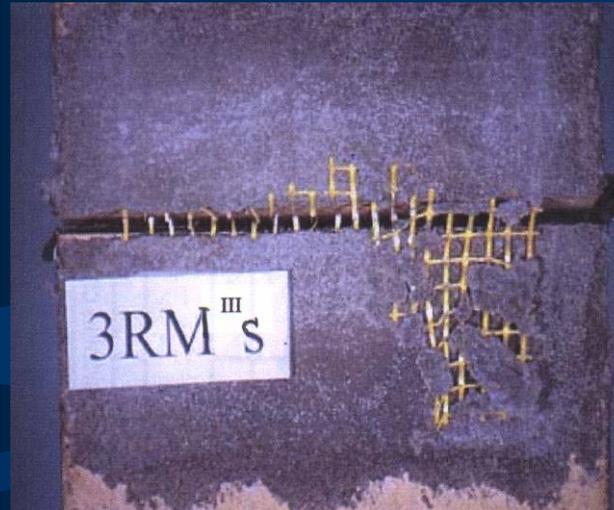
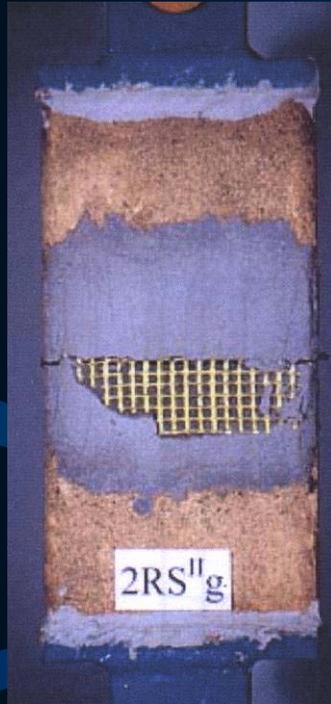


B.



Prova di trazione

- 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 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

PROVE DI DURABILITÀ

Bagnato-Asciutto

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

Freddo-Caldo

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

PROVE DI DURABILITÀ Freddo-Caldo

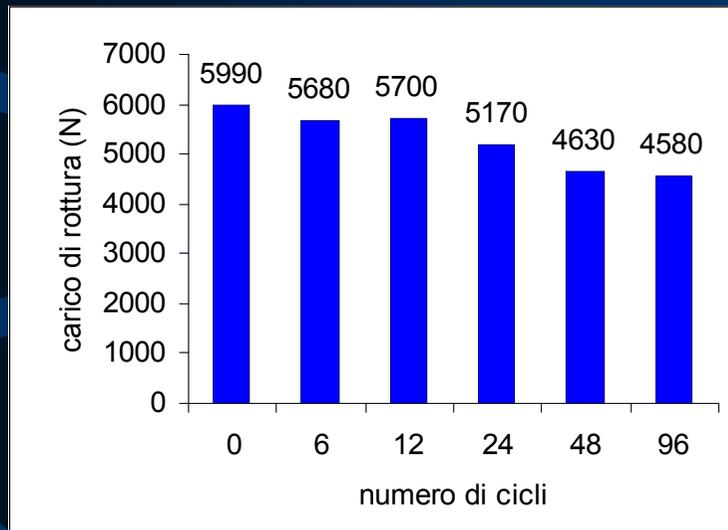
CFRP larghezza=8 cm



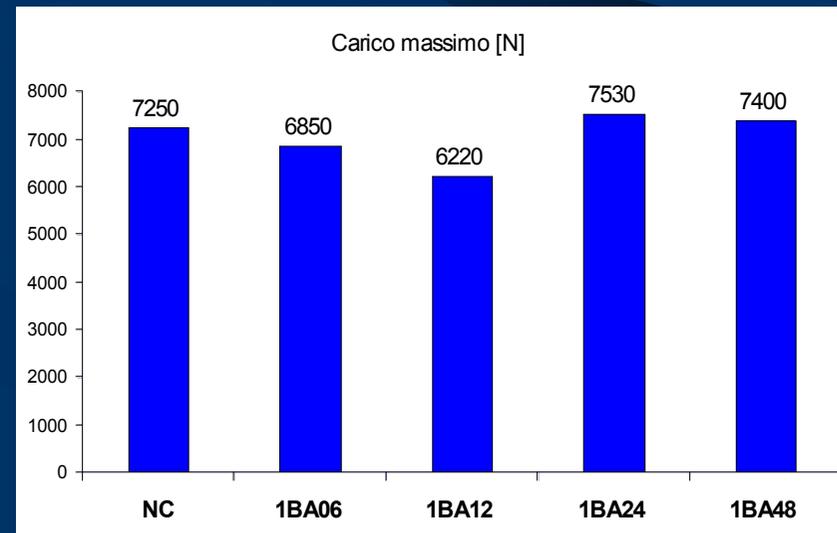
PROVE DI DURABILITÀ

Bagnato-Asciutto

- CFRP

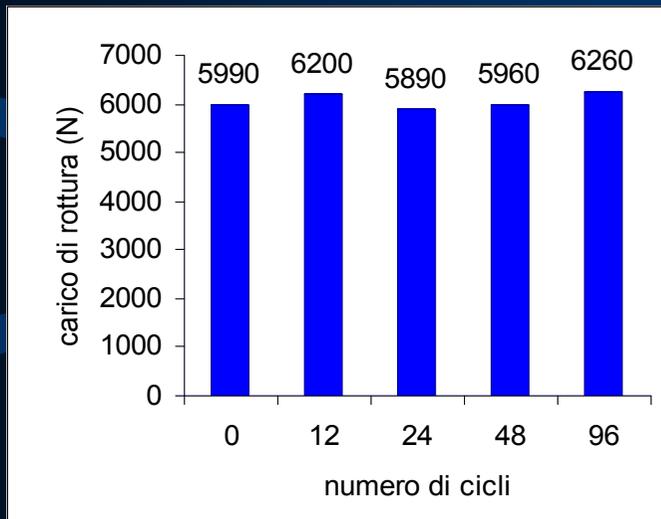


- GFRCM

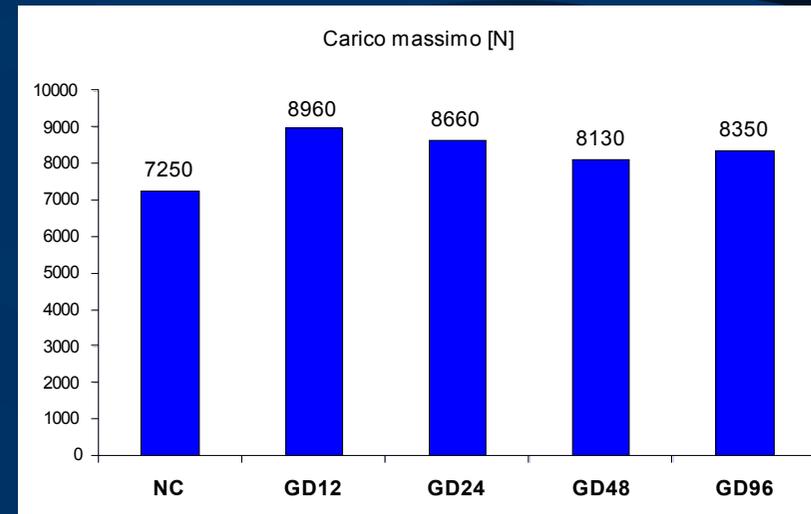


PROVE DI DURABILITÀ Freddo-Caldo

- CFRP

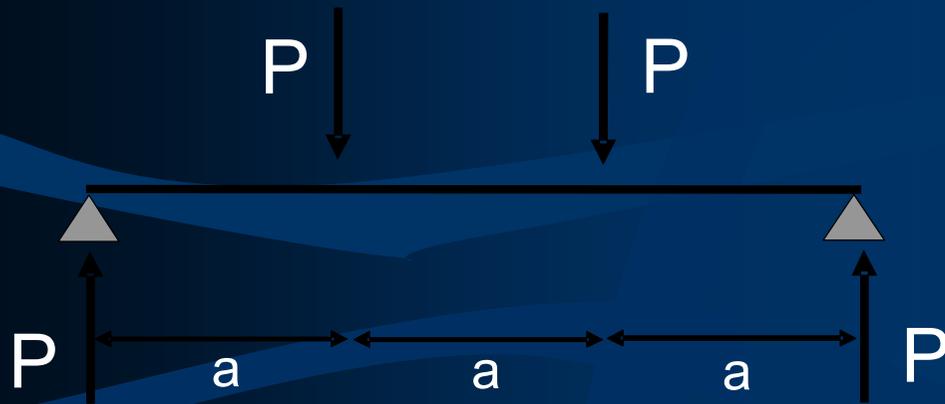


- GFRCM



trave in muratura

- Elemento strutturale non realistico



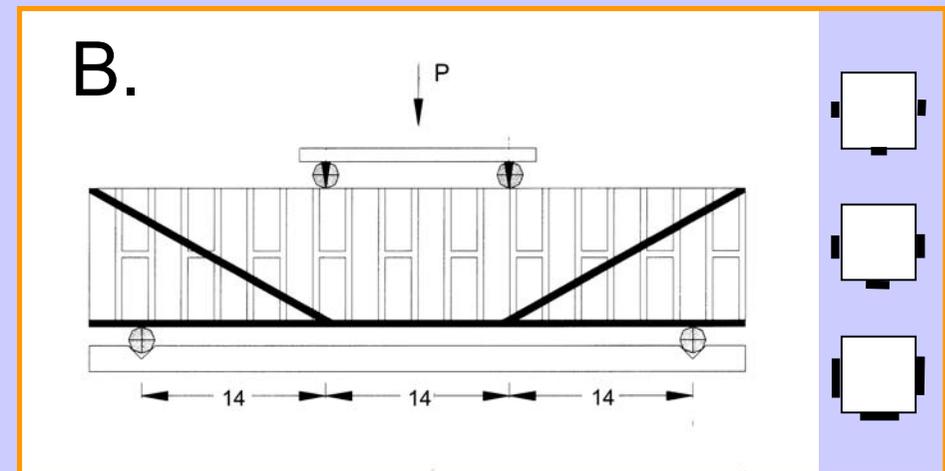
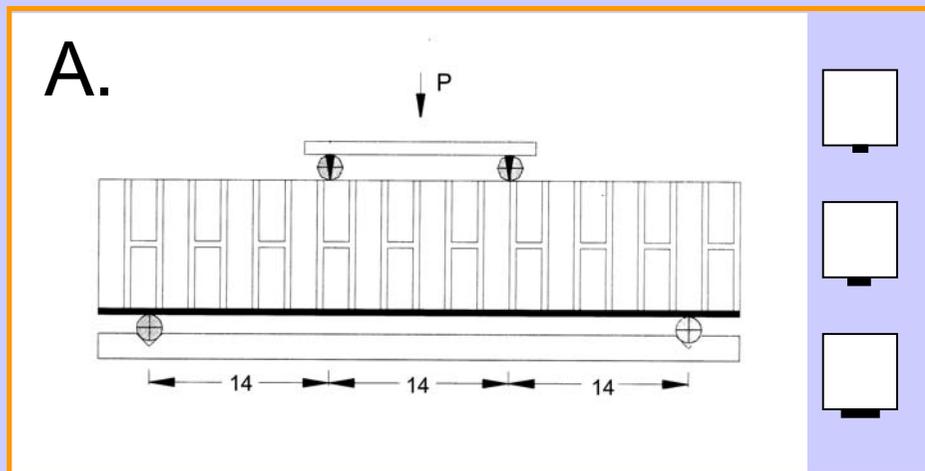
Taglio



Momento flettente

Prova di flessione su quattro punti su travi in muratura rinforzate

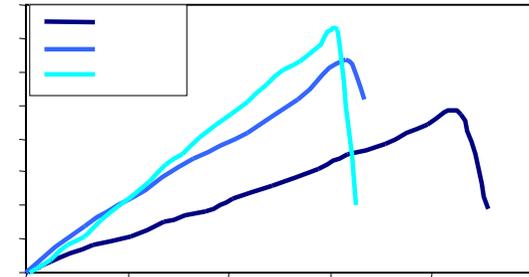
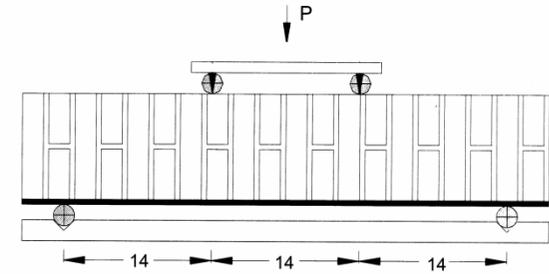
- **Due tipi di rinforzo**
 - A. Rinforzo all'intradosso di diverso spessore
 - B. Rinforzo all'intradosso e sulle superfici laterali di diverso spessore
- **Due tipi di materiali compositi**
 - Fibre di Carbonio e matrice polimerica (CFRP)
 - Fibre di vetro e matrice cementizia (GFRCM)



Rinforzo all'intradosso

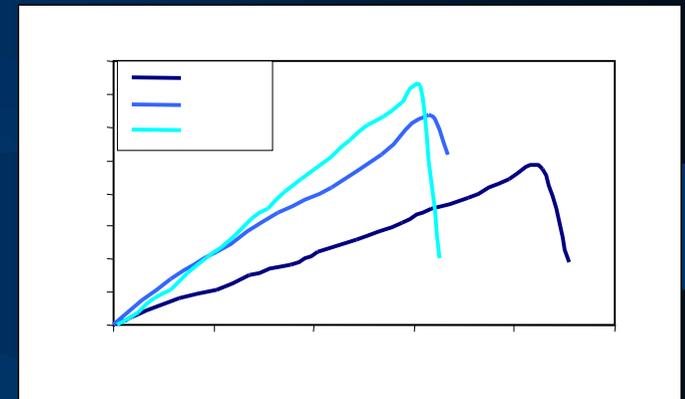
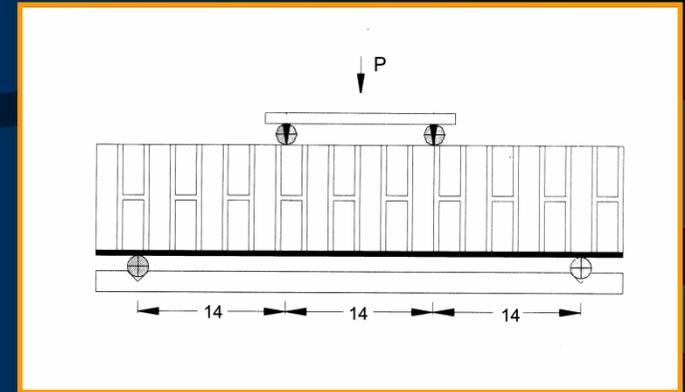
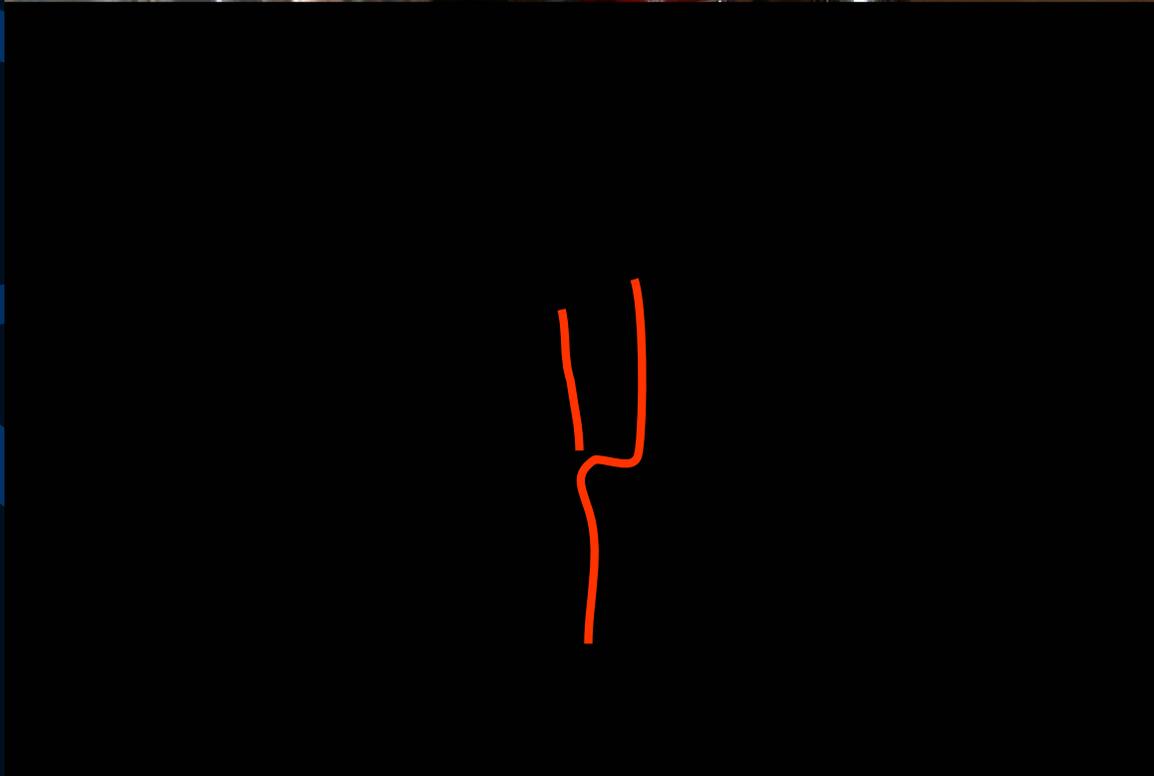
con placcaggi di 1.25cm, 2.5cm e 5cm in CFRP

- 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)

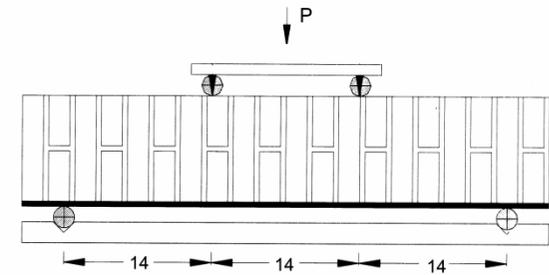


Rinforzo all' intradosso larghezza 1.25cm, 2,5cm e 5cm

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



Carichi di collasso

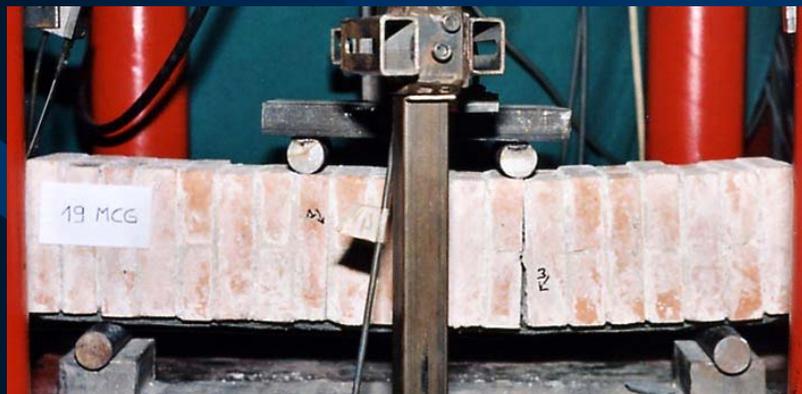
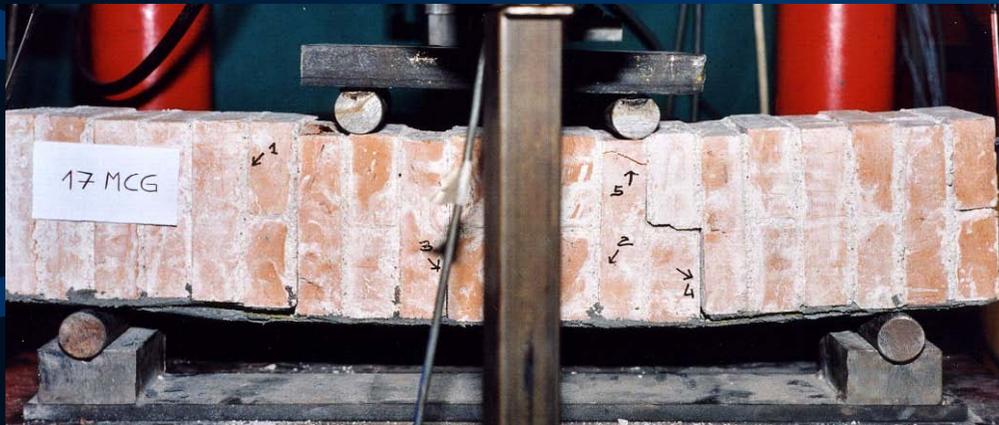
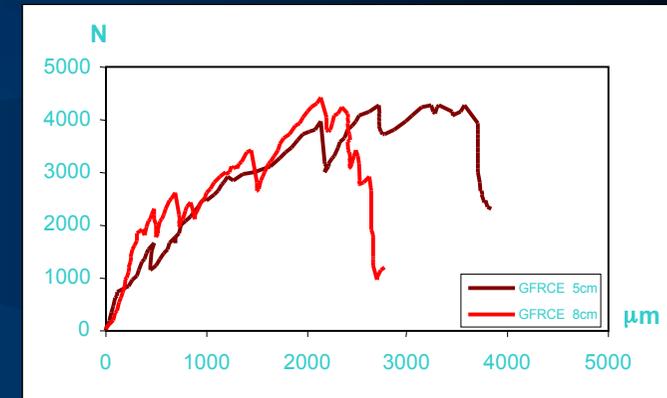
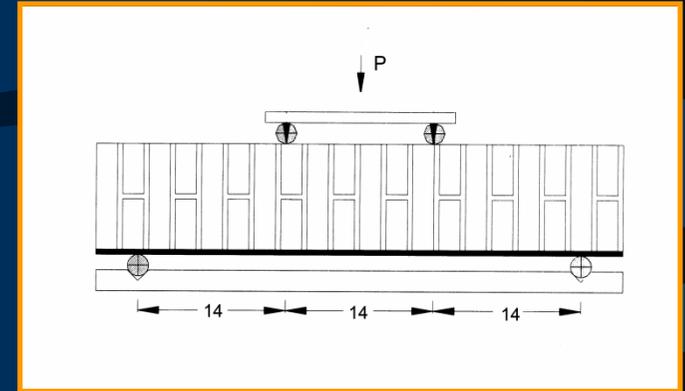


	Experimental collapse loads (N)	Masonry crushing (N)	Detachment of sheet (N)	Sliding along joint (N)
CFRP 1.25x50cm intradosso	2360	10770	7380	2280 (-3%)
CFRP 2.5x50cm intradosso	3190	14500	14440	2420 (-24%)
CFRP 5x50cm intradosso	3620	19140	28170	3270 (-4%)

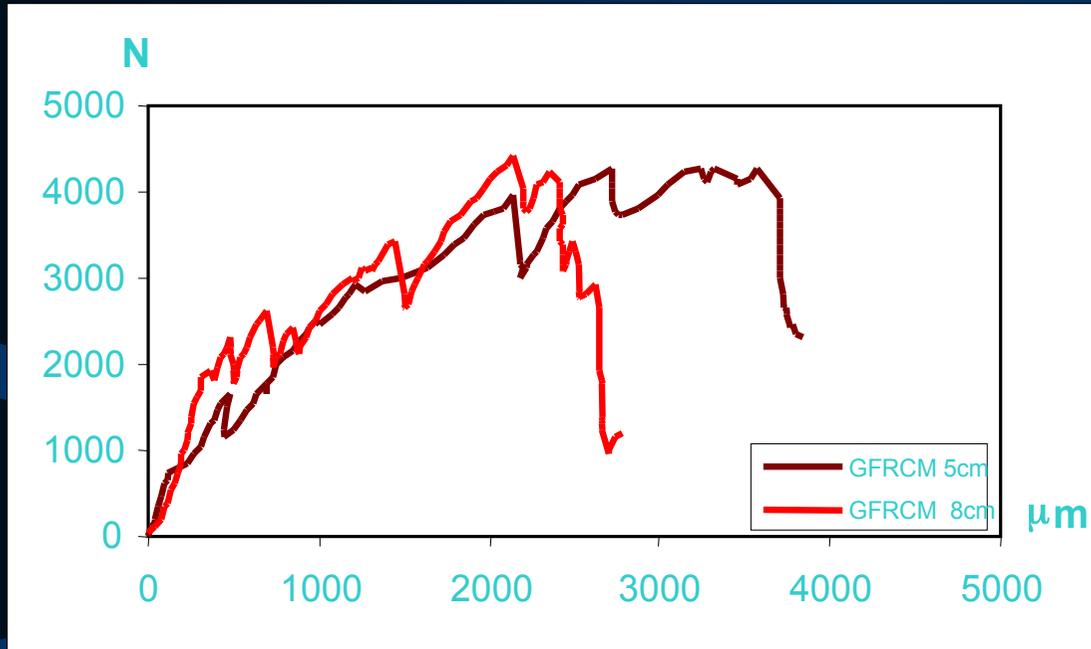
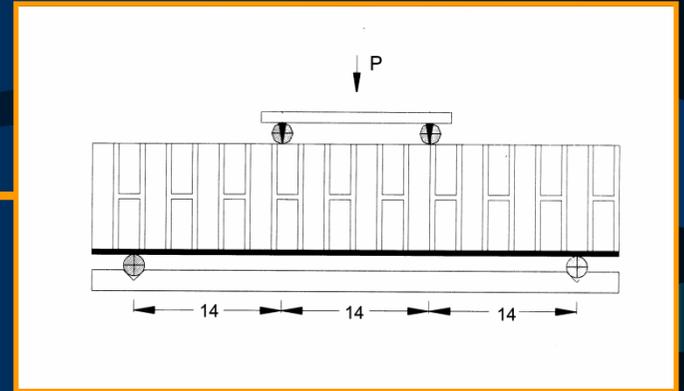
Rinforzo all'intradosso Composito di 8cm e 5cm in GFRCM

La larghezza del rinforzo, 5 o 8 cm non influenza

- il valore del carico di collasso
- la qualità del percorso di equilibrio
- il meccanismo di collasso è caratterizzato dal distacco della fibra di vetro anticipato dalla frattura dei giunti verticali in corrispondenza dei punti di applicazione del carico



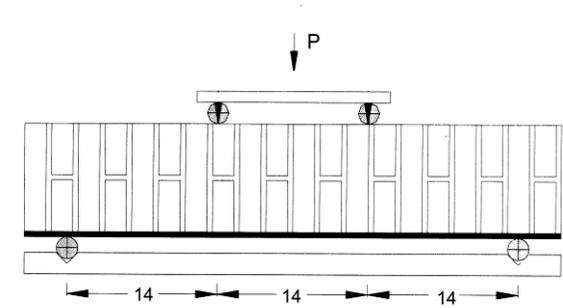
Rinforzo all'intradosso di 8cm e 5cm in GFRCM



- 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

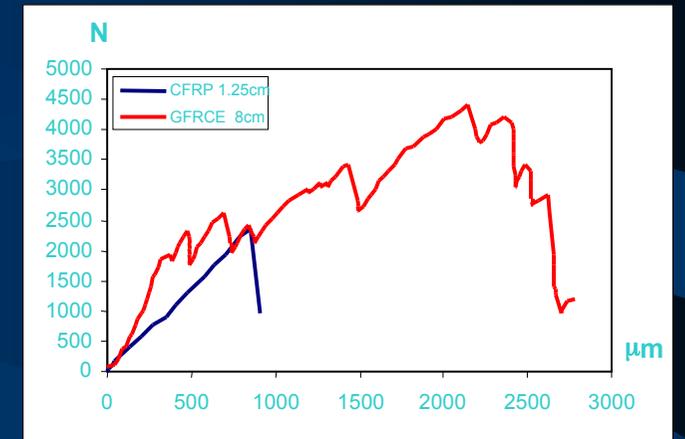
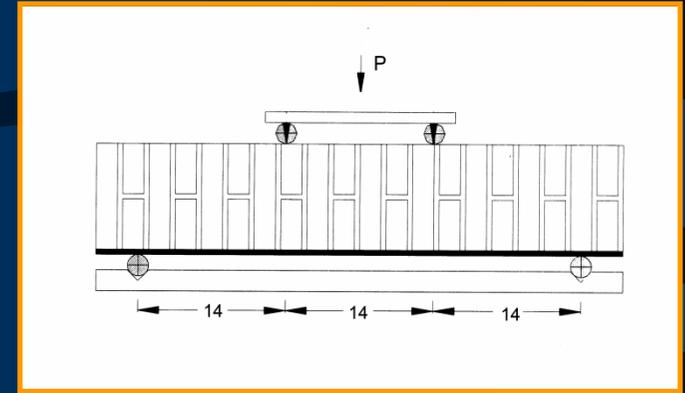
Carichi di collasso



	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



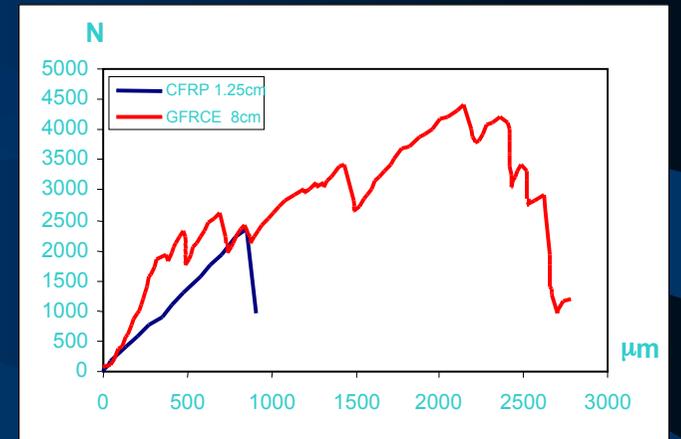
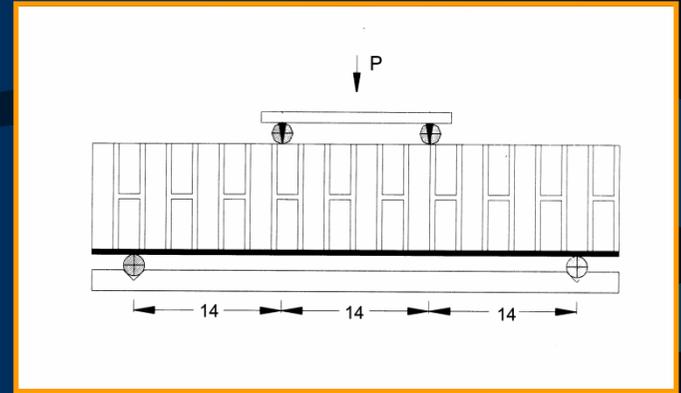
Confronto tra i rinforzi all'intradosso

- **1.25cm CFRP** **8cm GFRCM**
 - stessa resistenza
 - Resistenza per unità di larghezza della striscia

$$\cdot \sigma_{CFRP} = 566 \text{ Kg/cm}$$

$$\cdot \sigma_{GFRCM} = 90 \text{ Kg/cm}$$

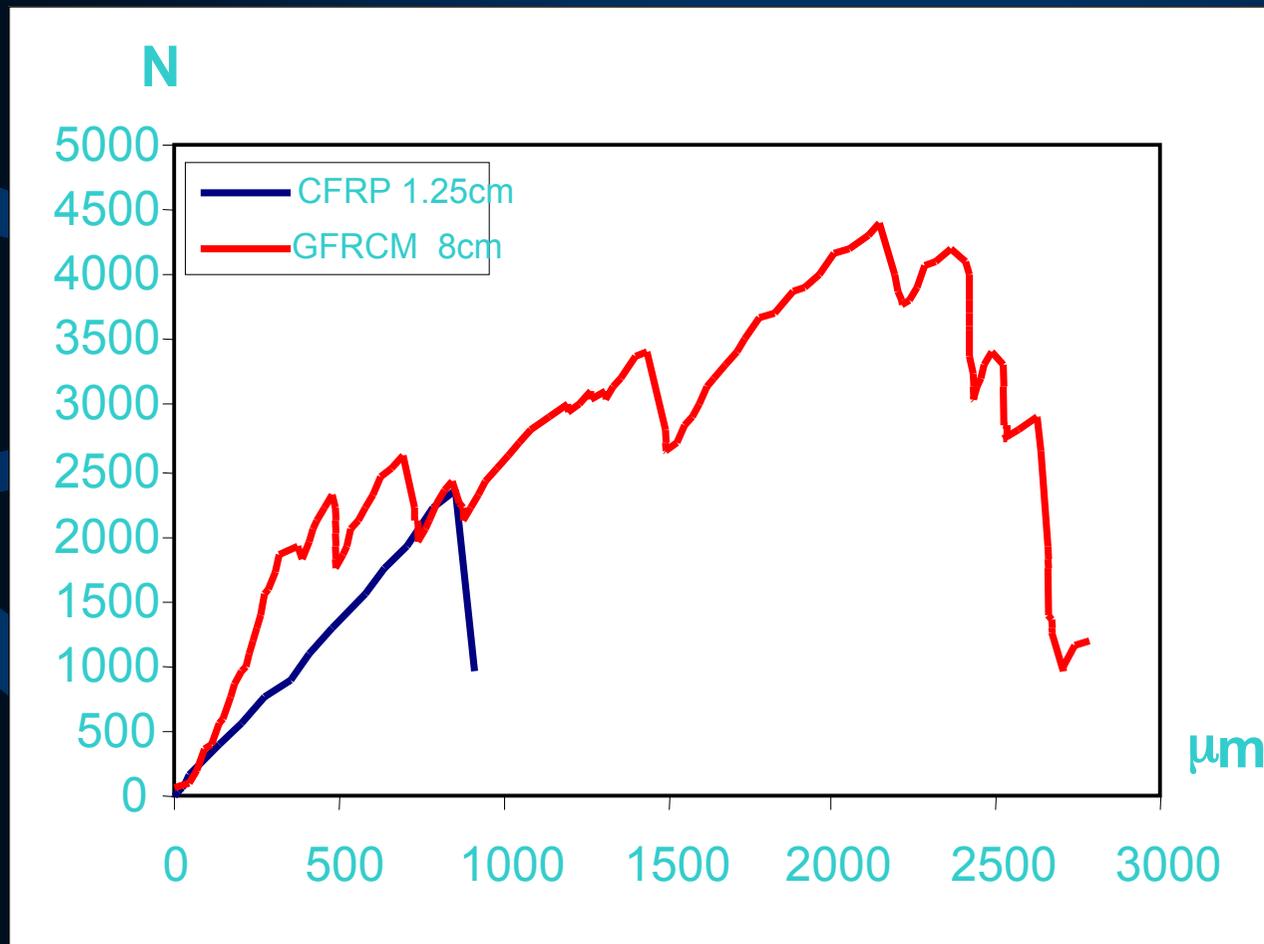
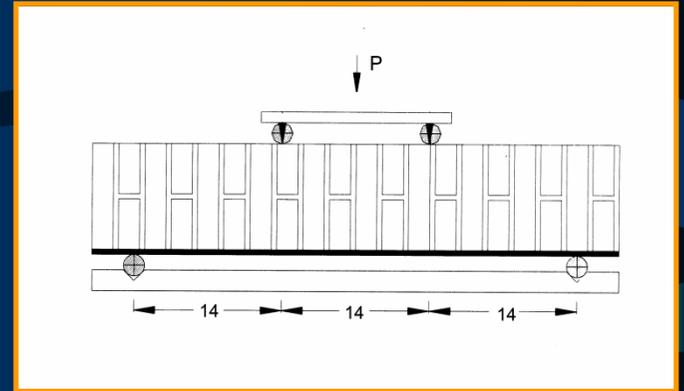
$$\sigma_{GFRCM} / \sigma_{CFRP} = 1/6$$



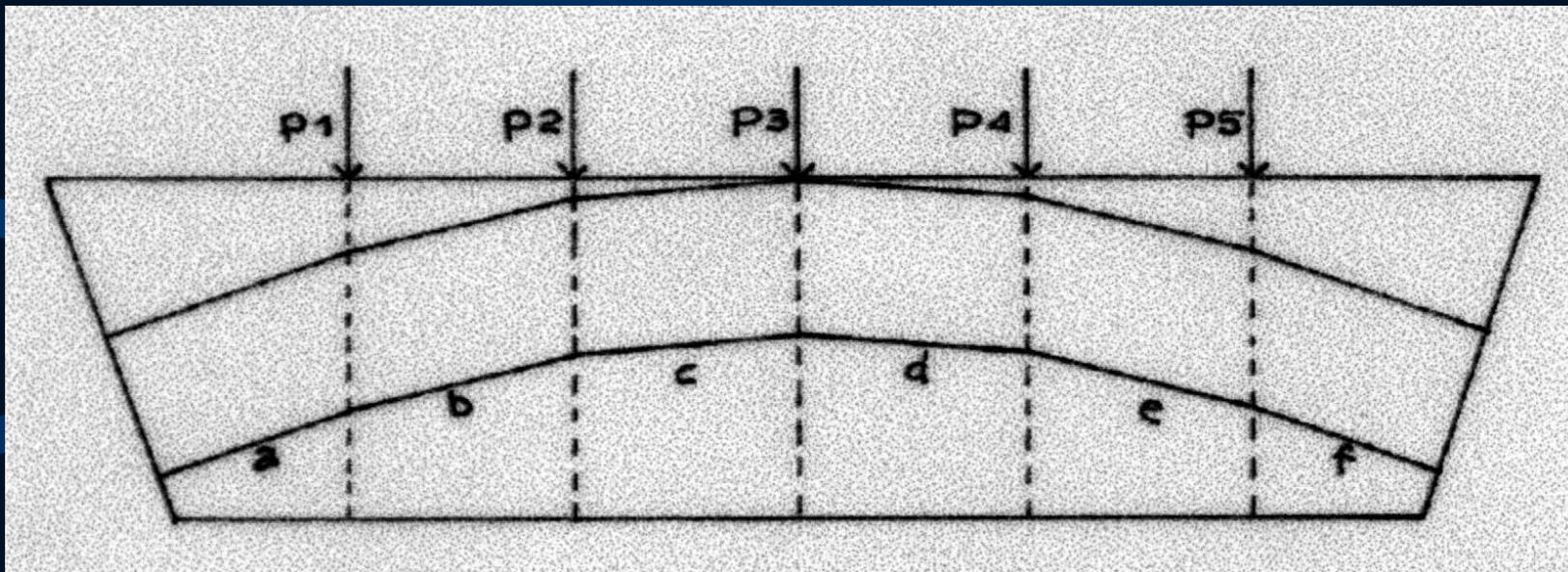
	Carico di picco (N)	Rigidezza (N/mm)	Duttilità
GFRCM 8x50cm intradosso	4623	6.9	4.5
CFRP 1.25x50cm intradosso	2360	2.7	1

Confronto tra i rinforzi in intradosso

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

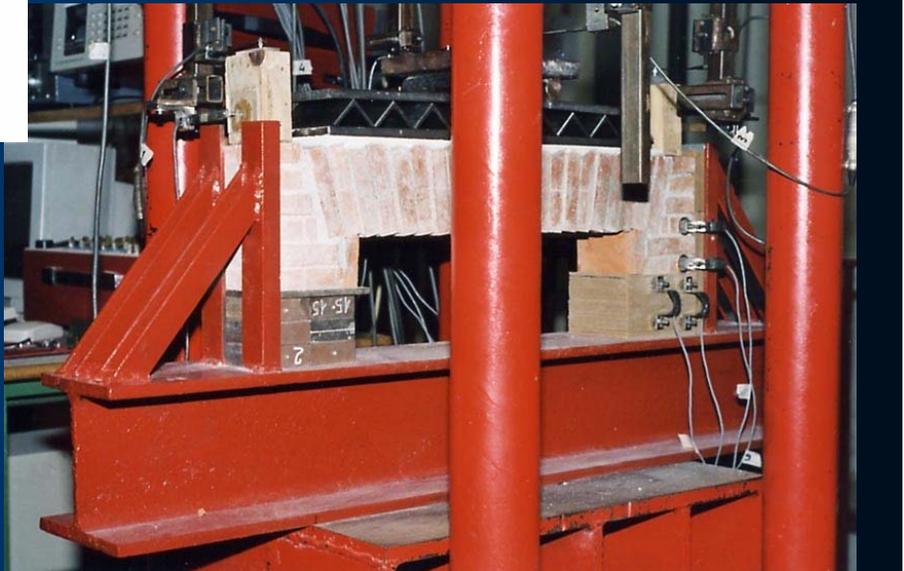
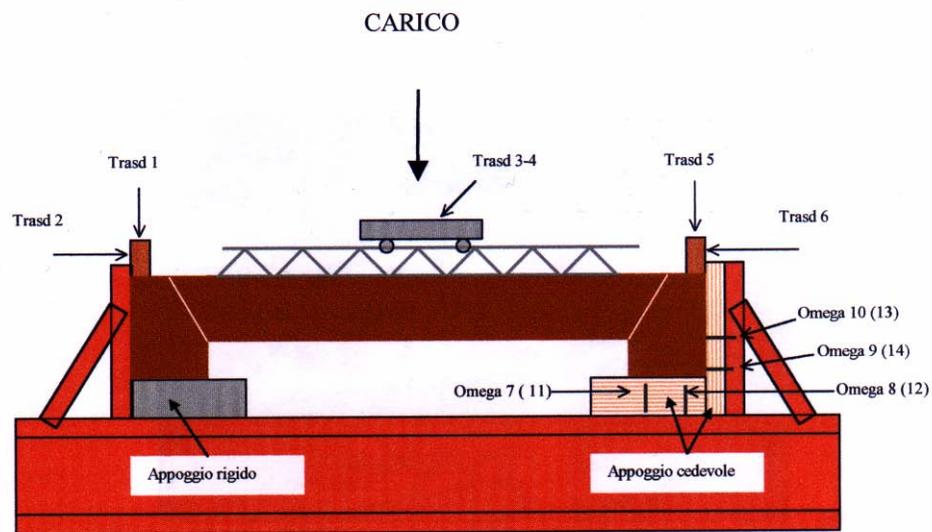


PIATTABANDE



Prove su elementi strutturali PIATTABANDE

Apparecchiatura di prova

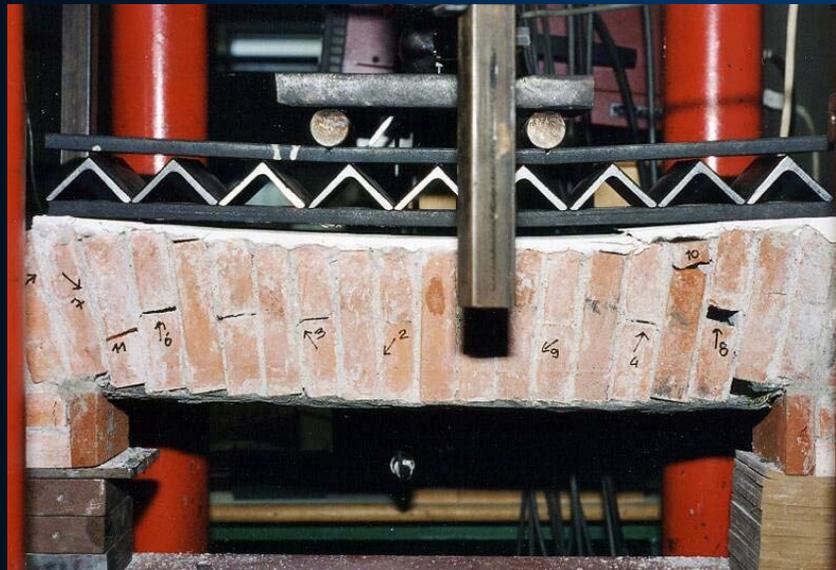


PIATTABANDE



Piattabanda non rinforzata

Piattabande rinforzate



PIATTABANDE

Modalità di distacco del rinforzo



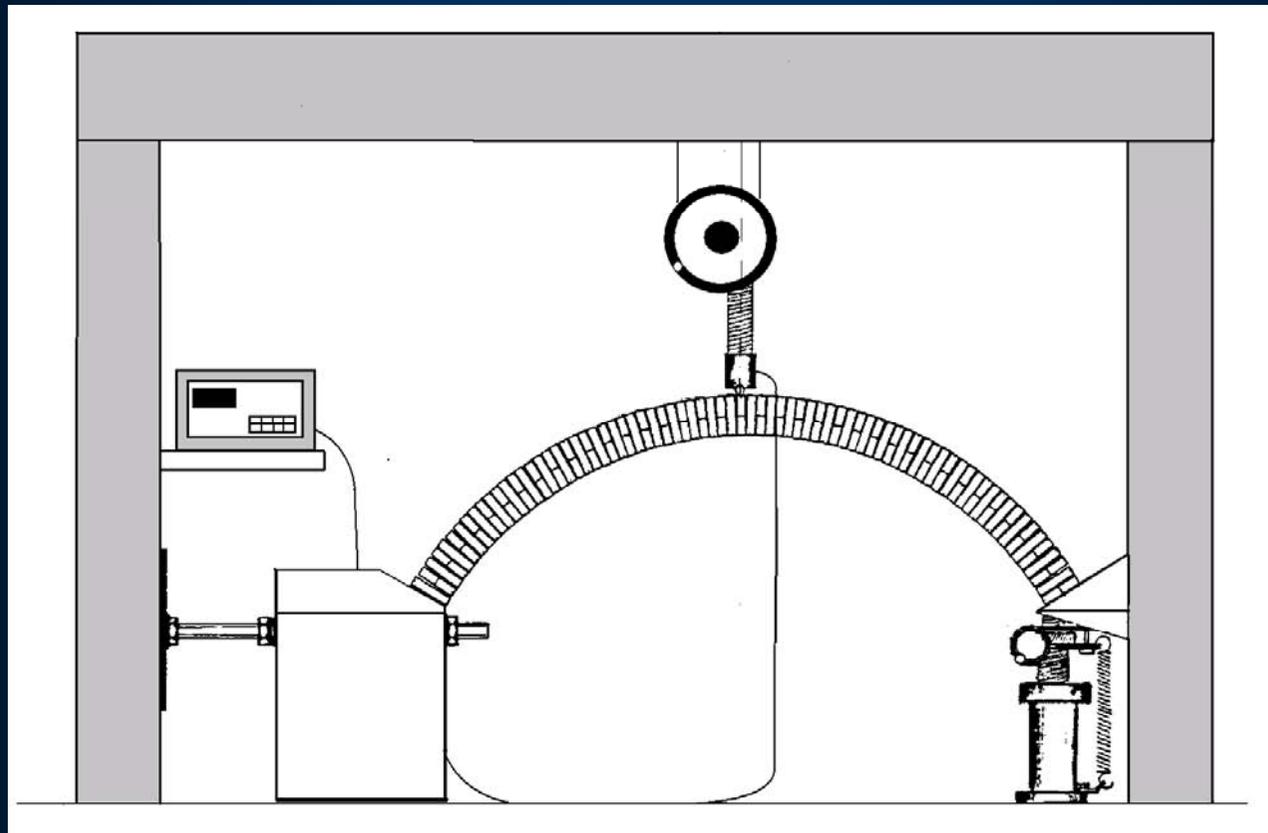
GFRCM



CFRP

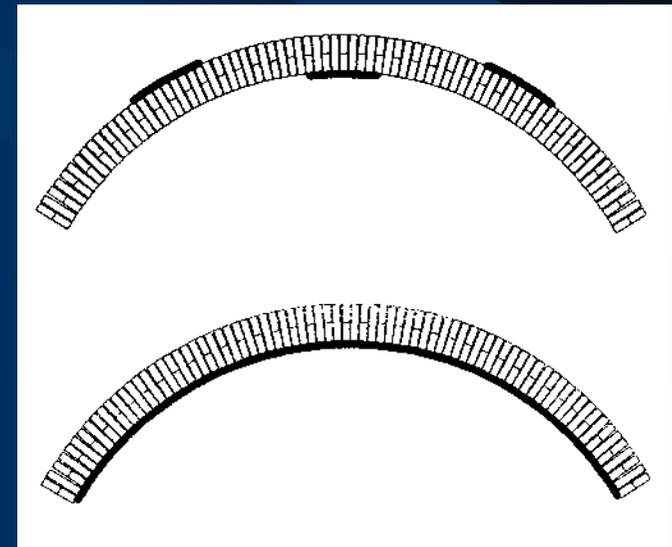
ARCHI

Apparecchiatura di prova

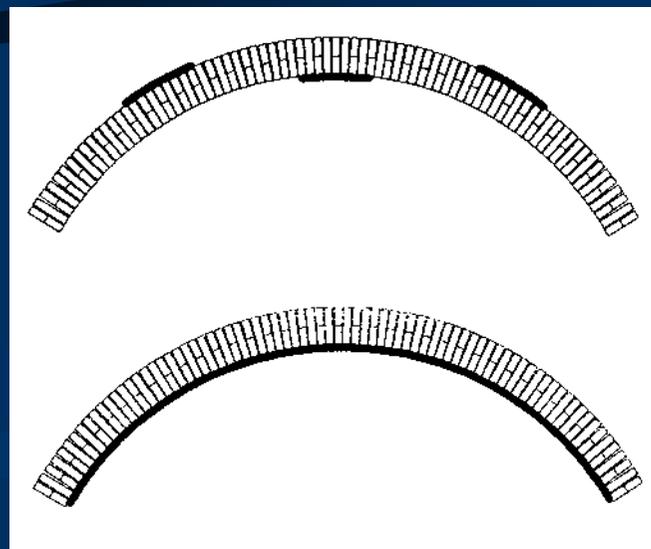


ARCHI - CFRP

- 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)

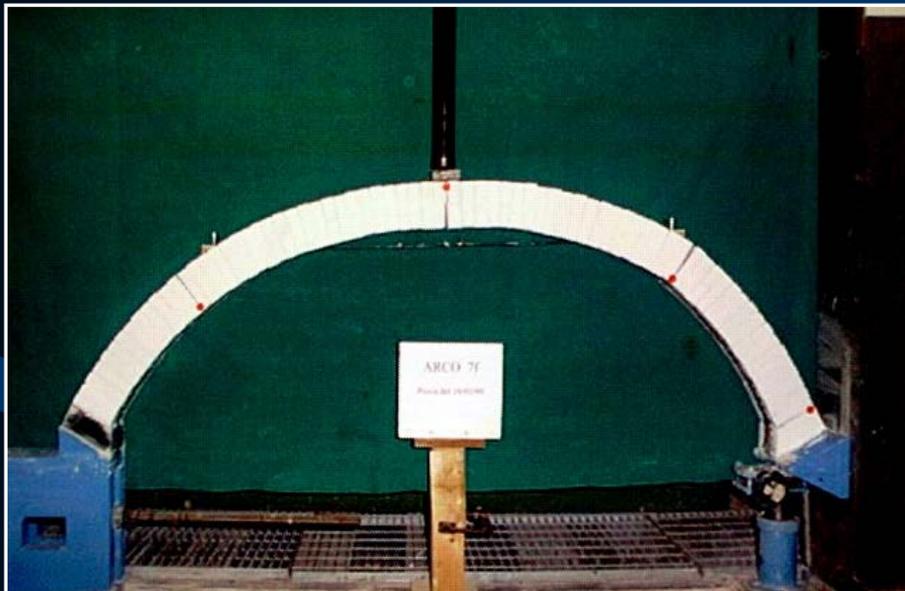


ARCHI - CFRP



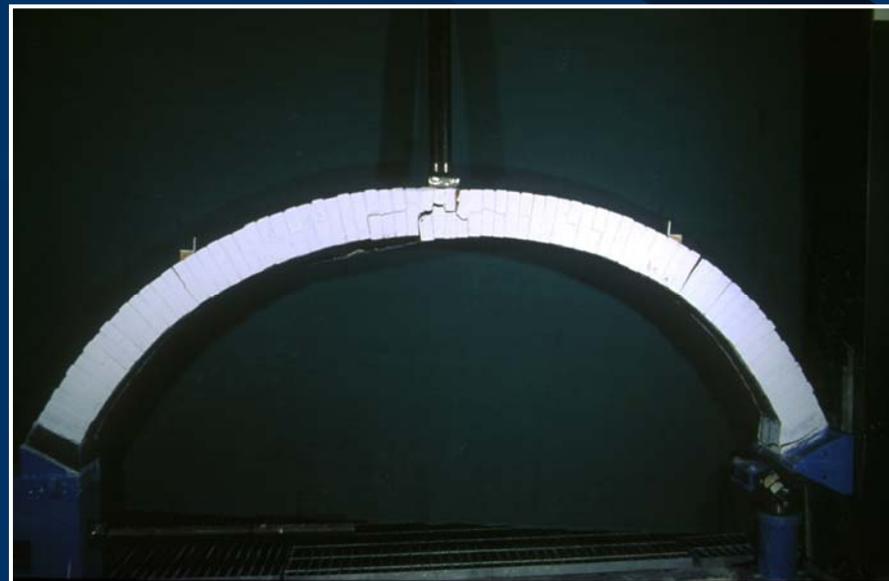
	carico di picco (N)	rigidezza		duttilità	
		Kt (N/ μ m)	Ks (N/ μ m)	μ_c	μ_{cd}
non consol	450	0.35	0.10	1.45	1.39
cons. locale	700	0.41	0.15	1.52	1.48
1.25 cm	3560	1.52	0.92	1.11	1.32
2.5 cm	4520	1.71	1.05	1.13	1.48
5 cm	6580	1.83	1.25	1.21	1.66

ARCHI - CFRP

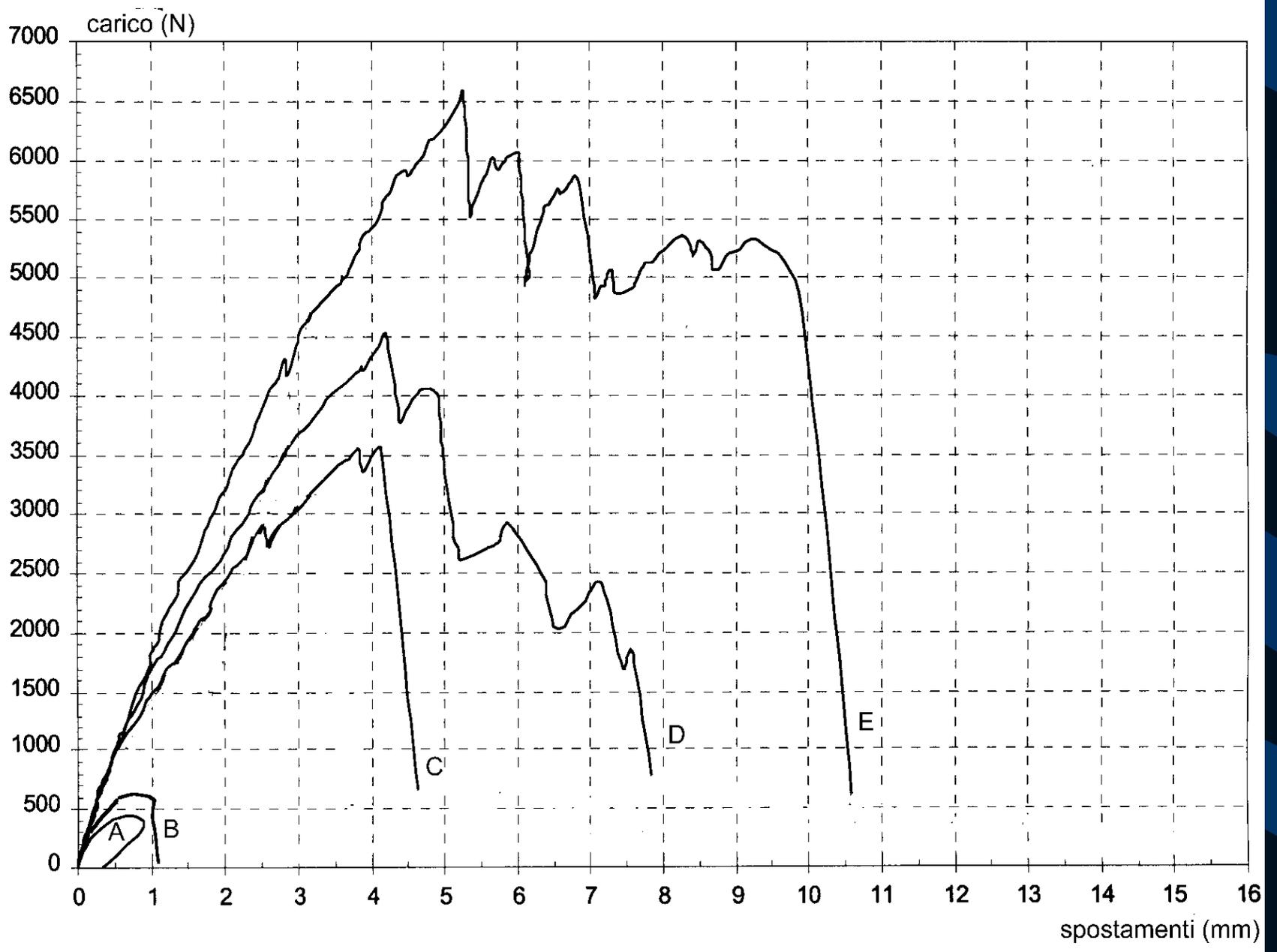


Striscia 1.25 cm

CFRP

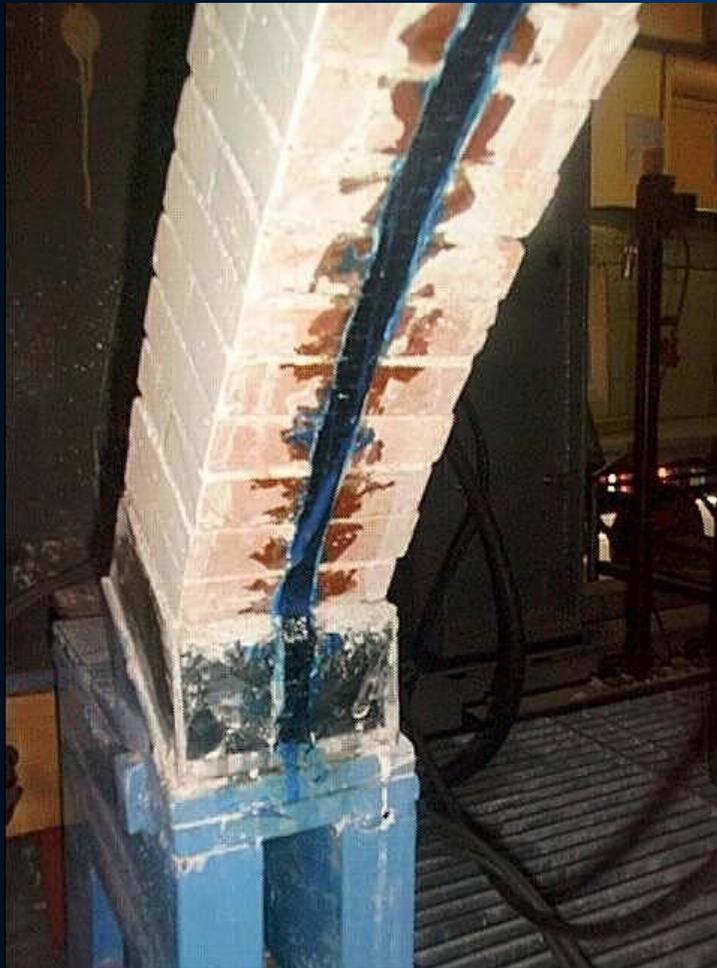


Striscia 5 cm



ARCHI - CFRP & GFRCM

- CFRP

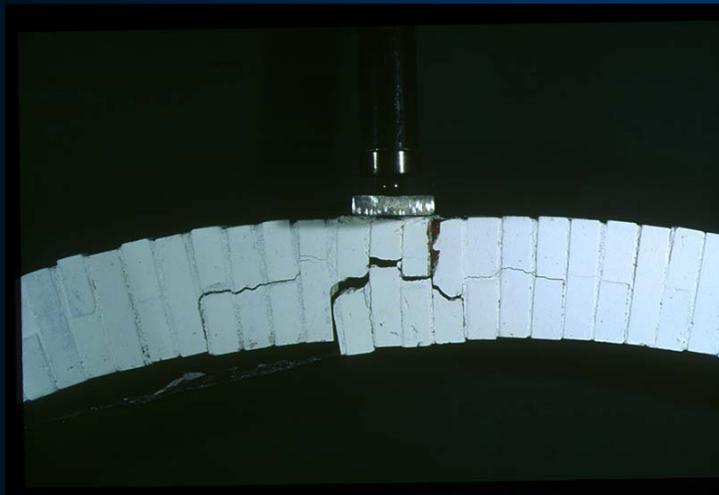


- GFRCM



ARCHI - CFRP & GFRCM

	1° crack load (kg)	peak load (kg)	stiffness (kg/ μ m)	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

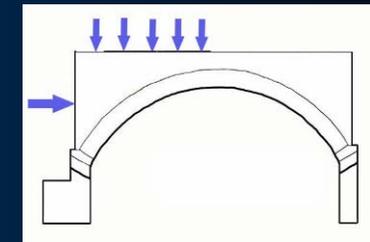
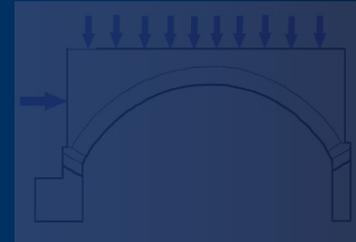
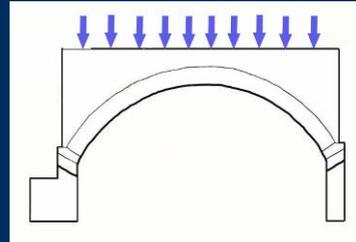


Archi

- Due modelli

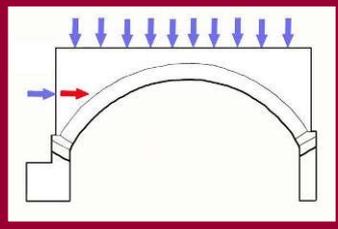


- Condizioni di carico

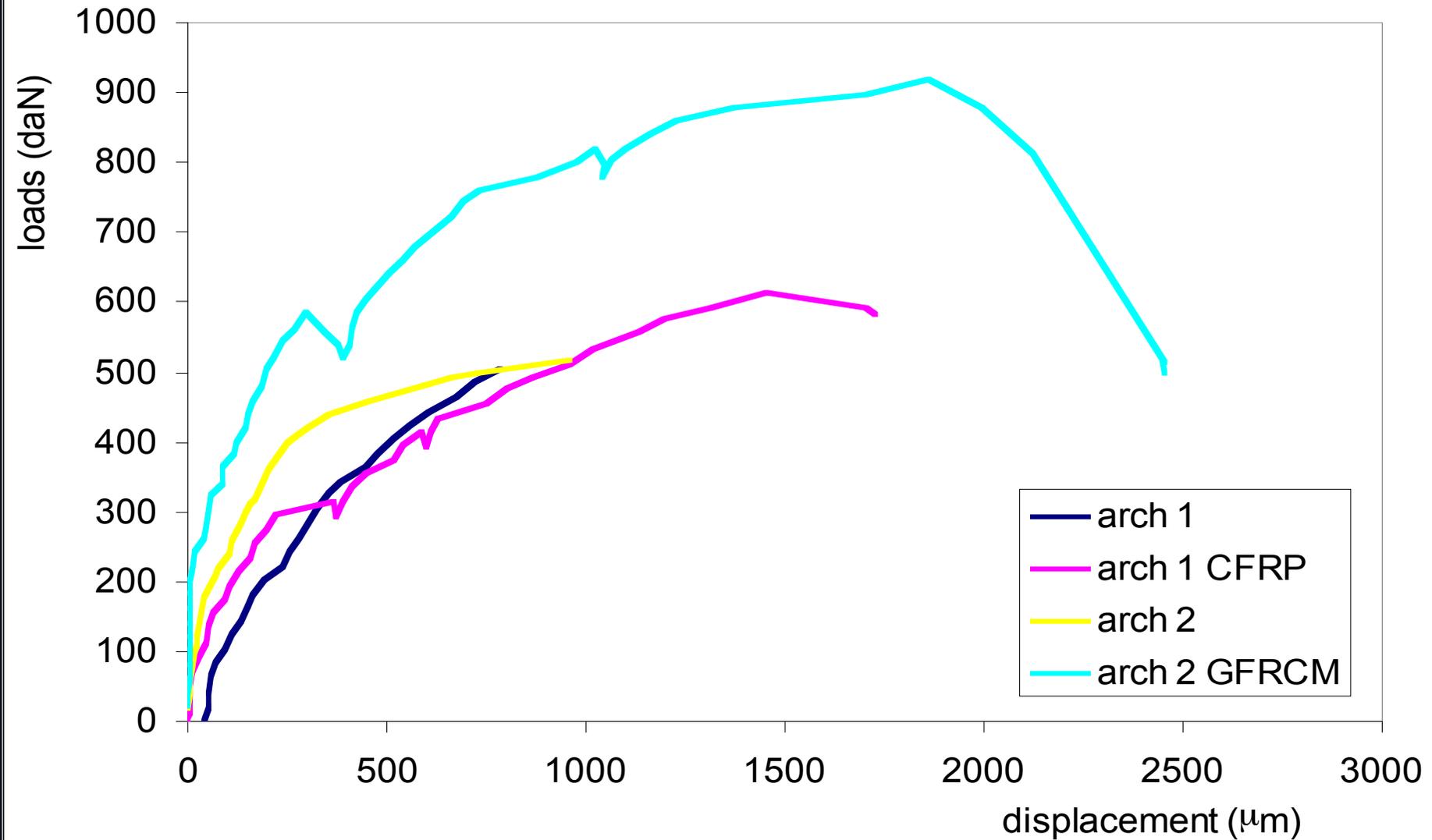


- Prove

- 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%

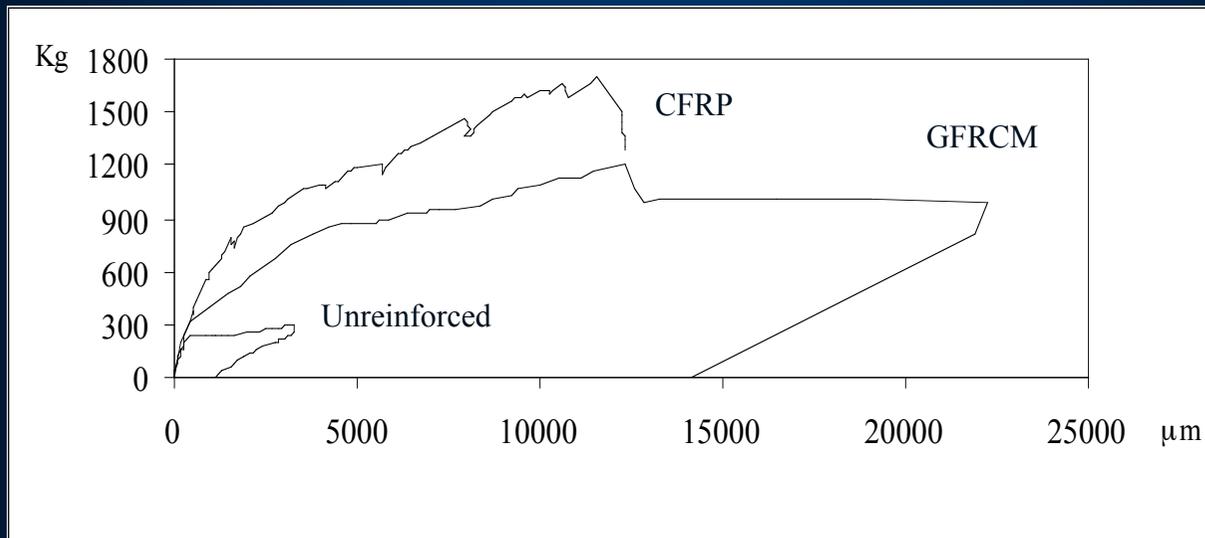
PANNELLI

- Pannello 150x150x12 cm

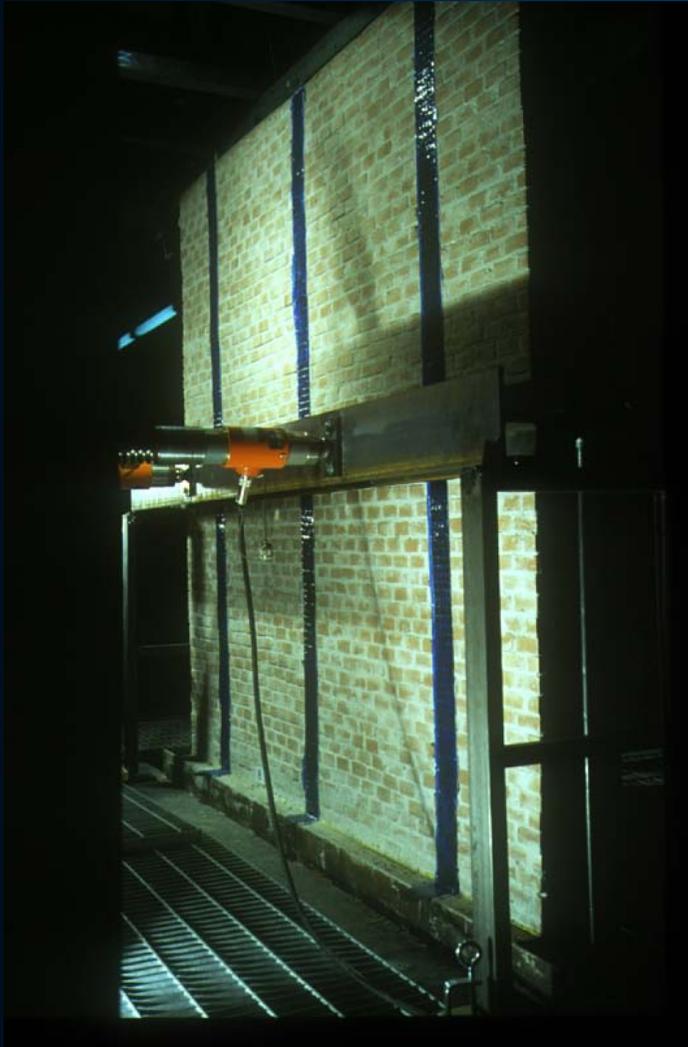


PANNELLI

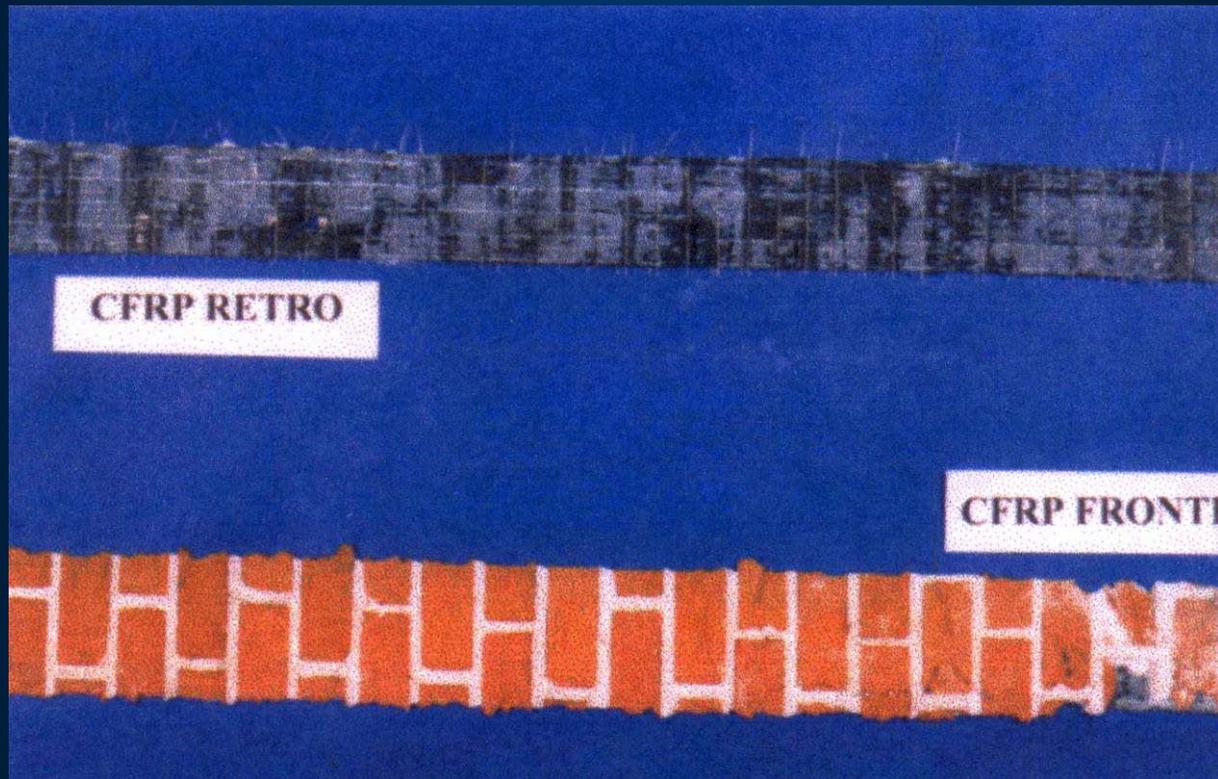
Panel	1° crack load (kg)	peak load (kg)	stiffness (kg/ μm)	kinematic ductility	available ductility
Unreinforced	80	296	1.2	1.7	>7.5
CFRP (5cm)	800	1688	1.2	4.8	1.1
GFRCM (10cm)	180	1200	1.8	17	>1.8



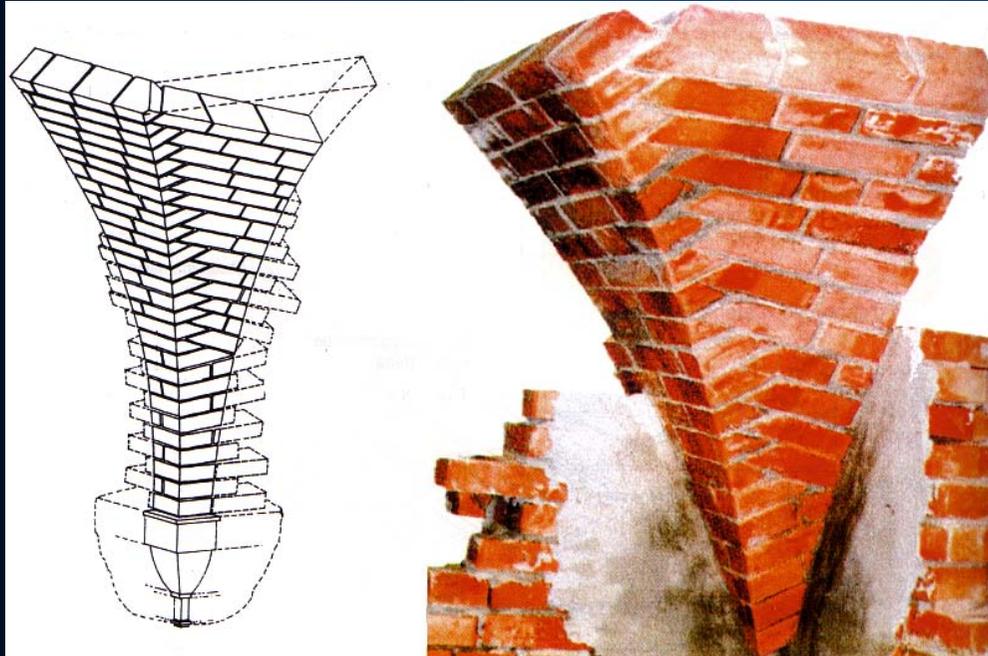
PANNELLI



PANNELLI



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



VOLTA A CROCIERA



Conclusioni

- 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
- 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 strengthened
 - questo risultato dipende ovviamente anche dall'incremento di sezione resistente prodotto dall'applicazione del composito

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 ci 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