



Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Costruzioni e Trasporti



# Modelli analitici per l'interpretazione dei meccanismi di rottura locali di archi e volte in muratura rinforzati con tessuti FRP

M.R.Valluzzi, E. Garbin, M. Panizza, C. Modena



12, 13 febbraio 2007

Università degli Studi di Salerno – Consorzio ReLUIS



*Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture*

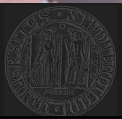
## La sperimentazione eseguita a Padova



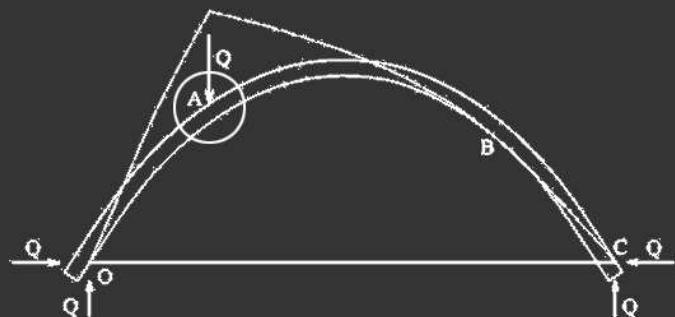
Valluzzi M.R., Valdemarca M., Modena C., 2001, *Behaviour of brick masonry vaults strengthened by FRP laminates*, International Journal of Composites for Construction 5(3), 163-169

Prove su 6 archi rinforzati con FRP:

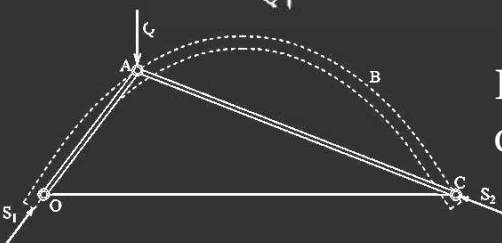
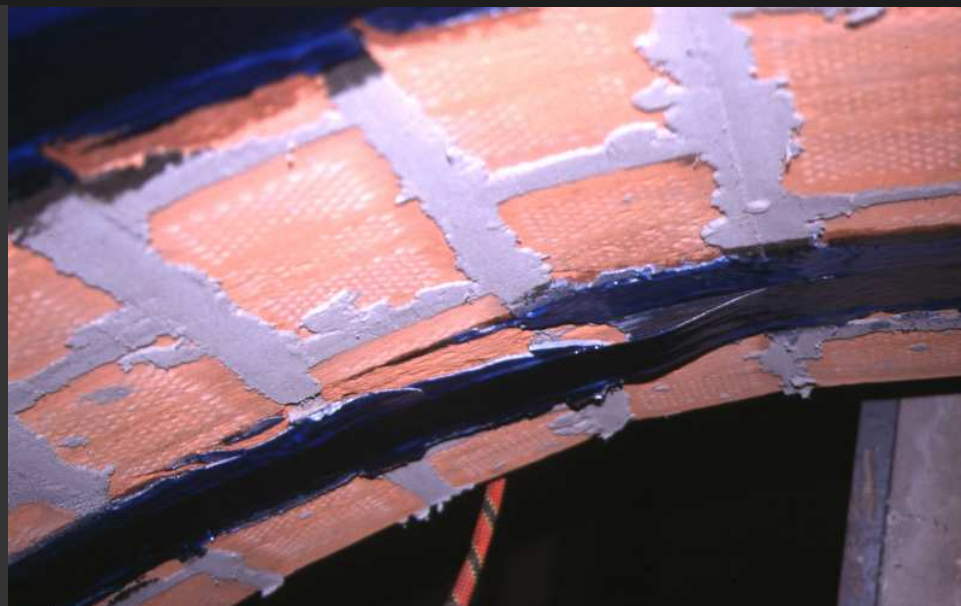
- 4 all'estradosso (2 CFRP + 2 GFRP)
- 2 all'intradosso (CFRP)



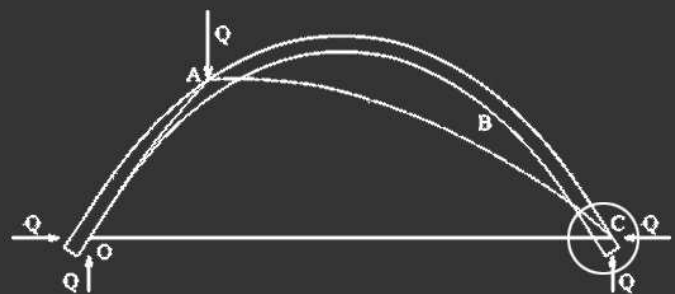
# I meccanismi di collasso registrati



Rinforzo intradossale:  
distacco del composito

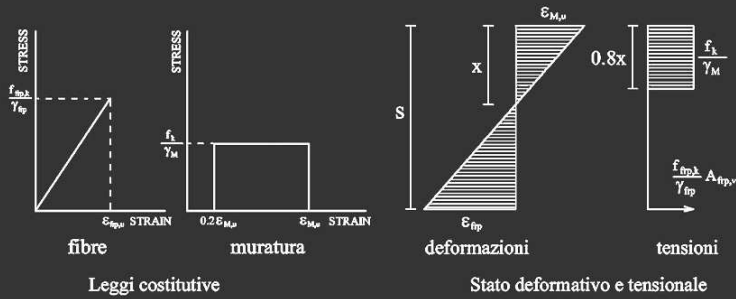


Rinforzo estradossale:  
taglio del giunto



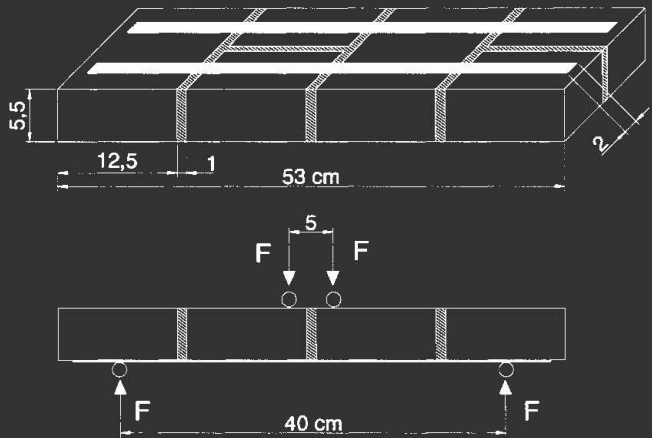
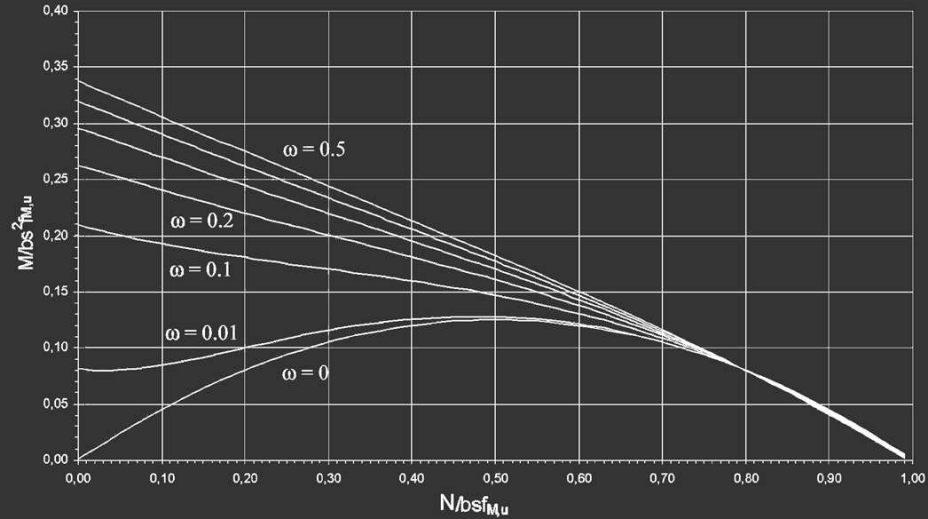
# I modelli di calcolo e le prove locali

## (a) Rottura della sezione rinforzata per schiacciamento della muratura



$$\frac{M_{Rd}}{l_s^2 f_k} = \frac{1}{2} \omega \frac{\left(1 - \frac{x}{s}\right)}{\frac{x}{s}} + \frac{0.4}{\gamma_M} \frac{x}{s} \left(1 - 0.8 \frac{x}{s}\right); \quad \frac{x}{s} = \frac{\gamma_M}{1.6} \left( \frac{N_{Rd}}{l_s f_k} - \omega + \sqrt{\left(\omega - \frac{N_{Rd}}{l_s f_k}\right)^2 + \frac{3.2}{\gamma_M} \omega} \right)$$

Campo di resistenza della sezione al variare di  $\omega$



Prova a flessione su pannelli murari rinforzati:

Momento di rottura calcolato

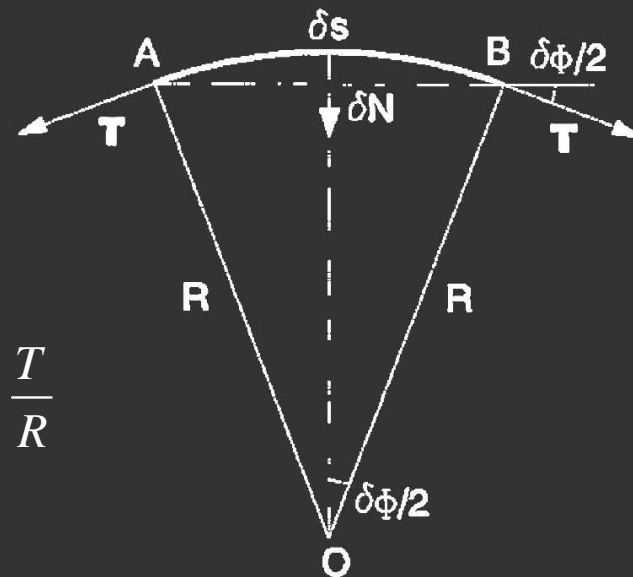
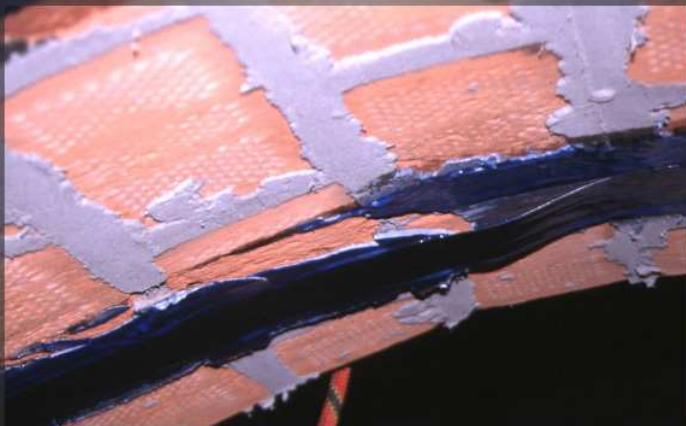
Momento di rottura medio registrato

differenza

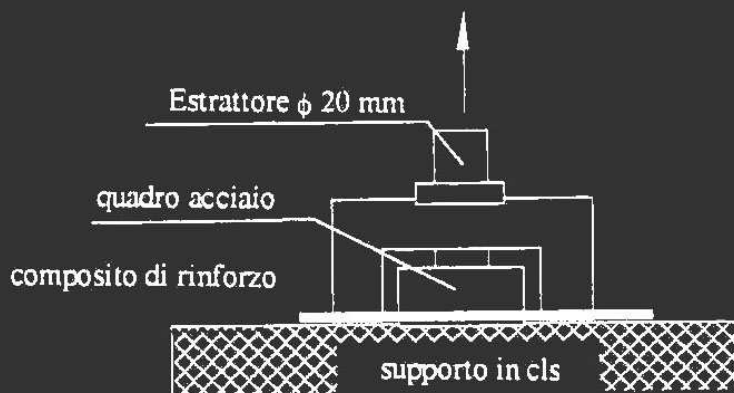
< 8%

# I modelli di calcolo e le prove locali

(b) Distacco del rinforzo all'interfaccia composito - muratura



$$\frac{\delta N}{\delta s} = \frac{T}{R}$$



*Sulla base della prova di pull-off ortogonale:*

Carico di rottura calcolato per l'arco

Carico di rottura medio registrato

|            |
|------------|
| differenza |
| < 7%       |

# I modelli di calcolo e le prove locali

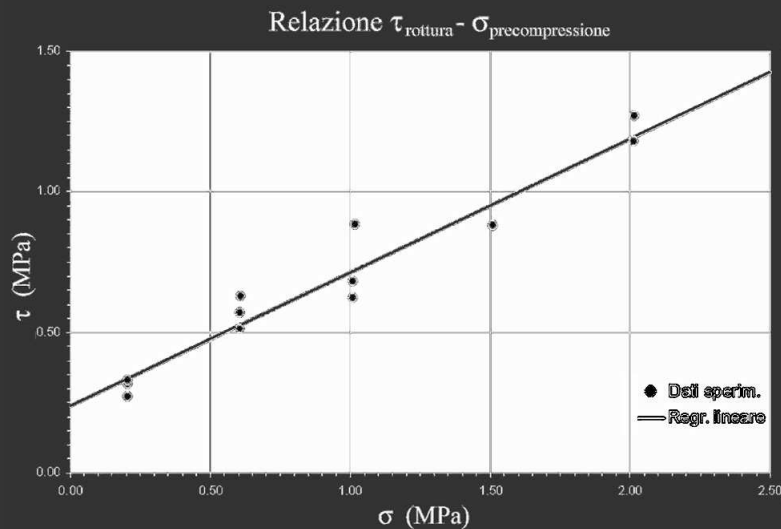
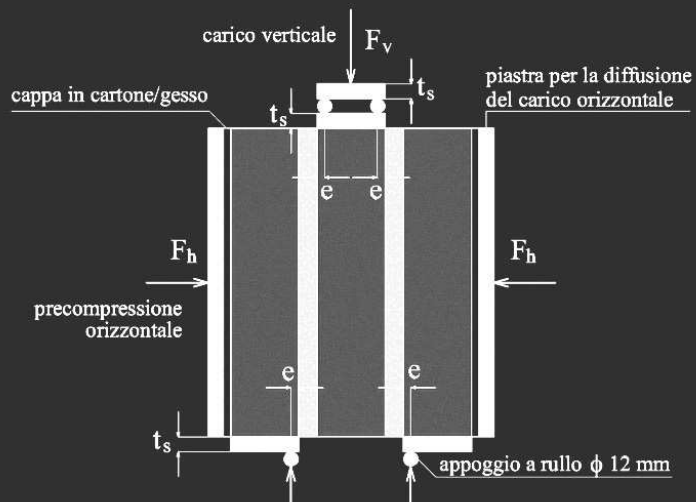
## (c) Scorrimento per taglio lungo in giunto di malta - (1)



Resistenza attritiva  
della sola muratura  
(fase post-critica)

$$R_m = \mu C$$

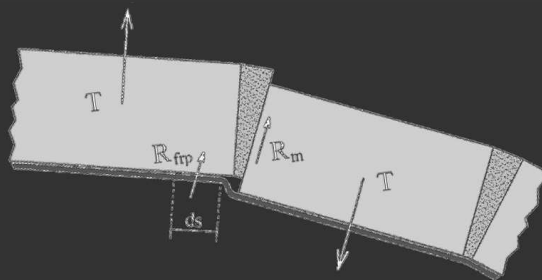
Test su triplette:  
andamento  
lineare



# I modelli di calcolo e le prove locali

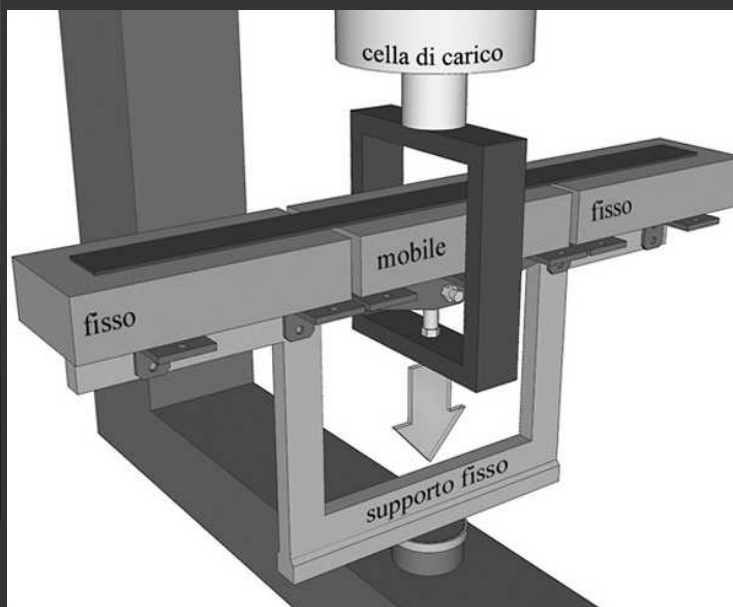
## (c) Scorrimento per taglio lungo in giunto di malta - (2)

Le fibre, se adeguatamente ancorate, potrebbero offrire un contributo di resistenza ?



$$R_{tot} = R_m + R_{fibre} ?$$

*Test di caratterizzazione del contributo del rinforzo*

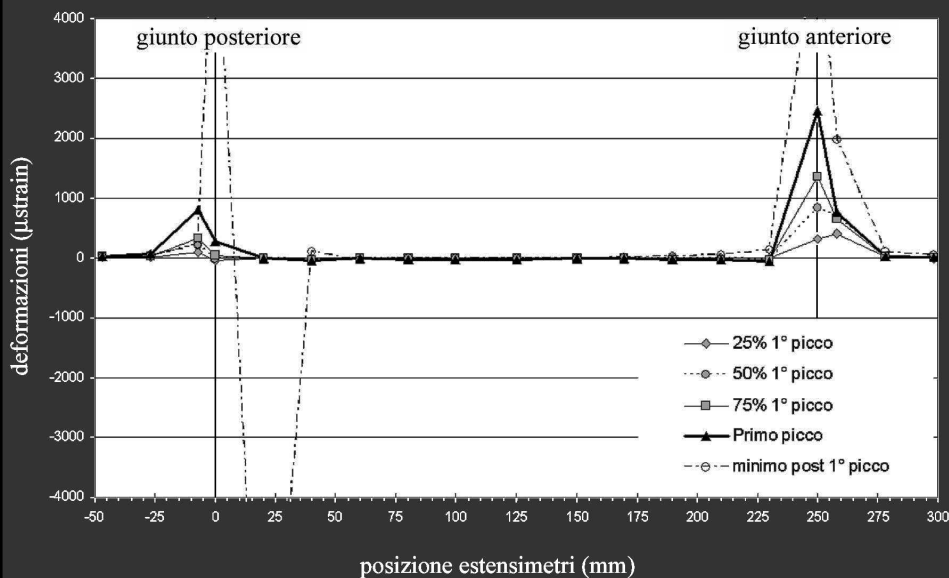


# Test di caratterizzazione del contributo a taglio del rinforzo

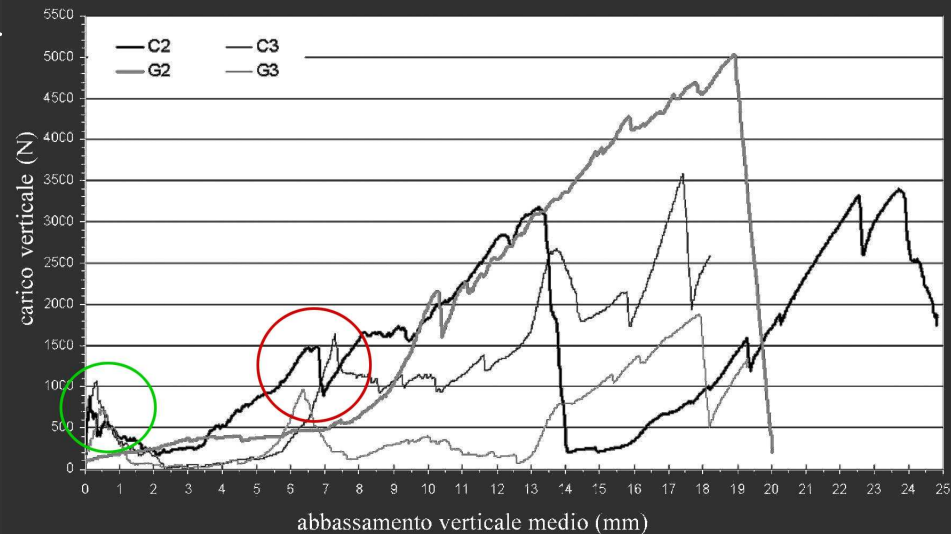
## Andamento del carico verticale

- 1° picco: spostamenti inferiori a 0.7 mm
- 2° picco: spostamenti di circa 6 - 8 mm
- picchi successivi: non considerati

Deformazioni degli estensimetri a vari passi di carico - C2 [primo picco]



Diagrammi carico-spostamento - Rilevazioni Spider8



Lunghezze efficaci:

inferiori al passo degli estensimetri  
(20 mm)





## Ipotesi di partenza

Volte testate  $\longrightarrow$  Geometria e materiali

Test di caratterizzazione  $\longrightarrow$  Carichi di 2° picco (“resistenza del rinforzo”)

Parametri di confronto  $\longrightarrow$  Spessori arco (muratura in foglio, a una e due teste)  
Carico di rottura per schiacciamento della muratura

## Confronto

Resistenza per solo attrito  $\longrightarrow R_m = \mu C$  Relazione coulombiana

“Resistenza del rinforzo”  $\longrightarrow R_{fibre}$  Calibrazione dati prova

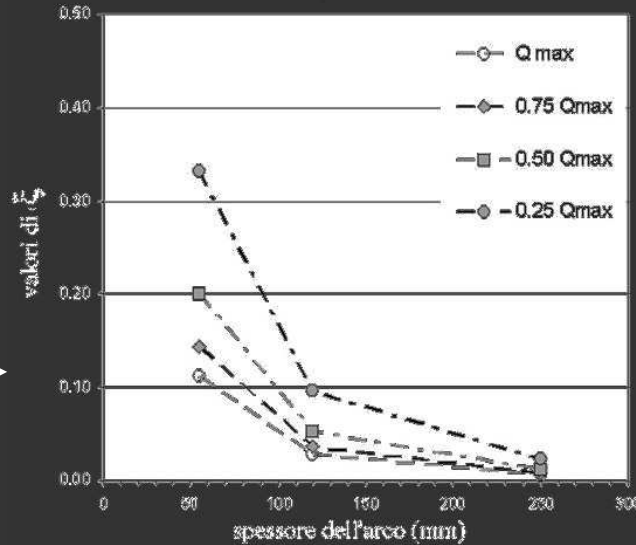
Rapporto fra le due grandezze precedenti:  $\xi = \frac{R_{fibre}}{R_m}$

# Analisi parametrica del possibile contributo delle fibre, $R_{fibre}$

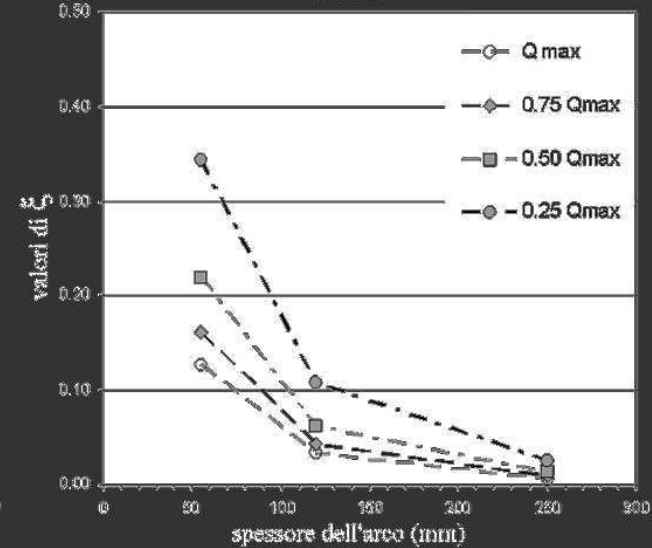
variazione di  $\xi = \frac{R_{fibre}}{R_m}$

larghezza di rinforzo costante da uno spessore all'altro

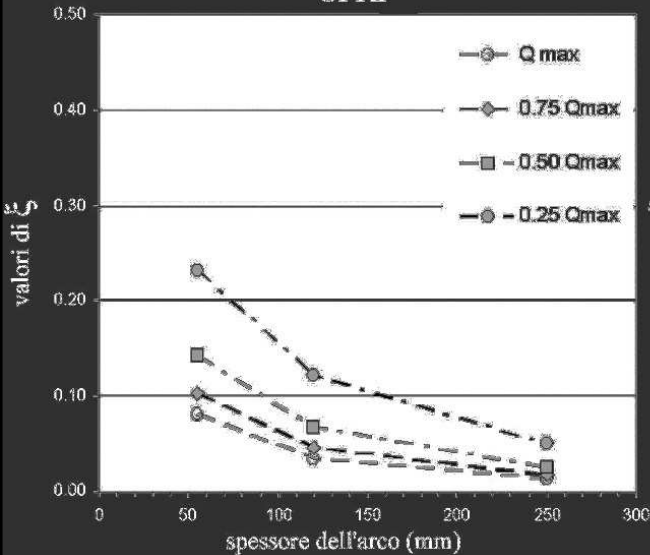
CFRP



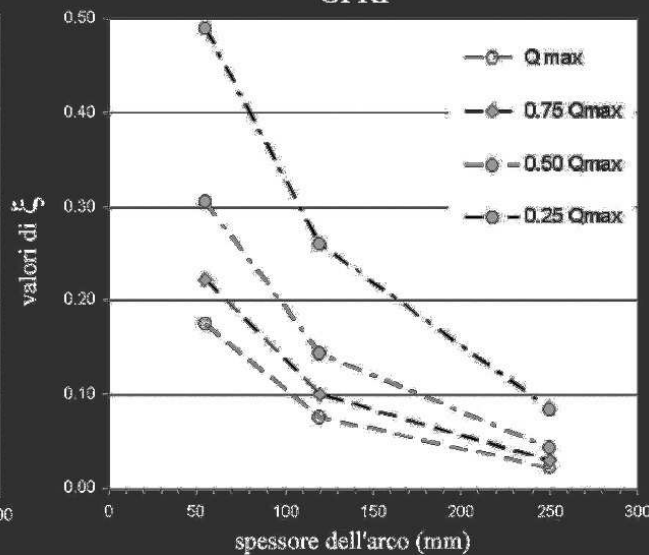
GFRP



CFRP



GFRP



variazione di  $\xi = \frac{R_{fibre}}{R_m}$

densità areolare  $\omega$  di fibre costante da uno spessore all'altro

$$\left( \omega = \frac{\varepsilon_{M,u} E_{frp}}{f_k} \frac{A_{frp}}{ls} \right)$$

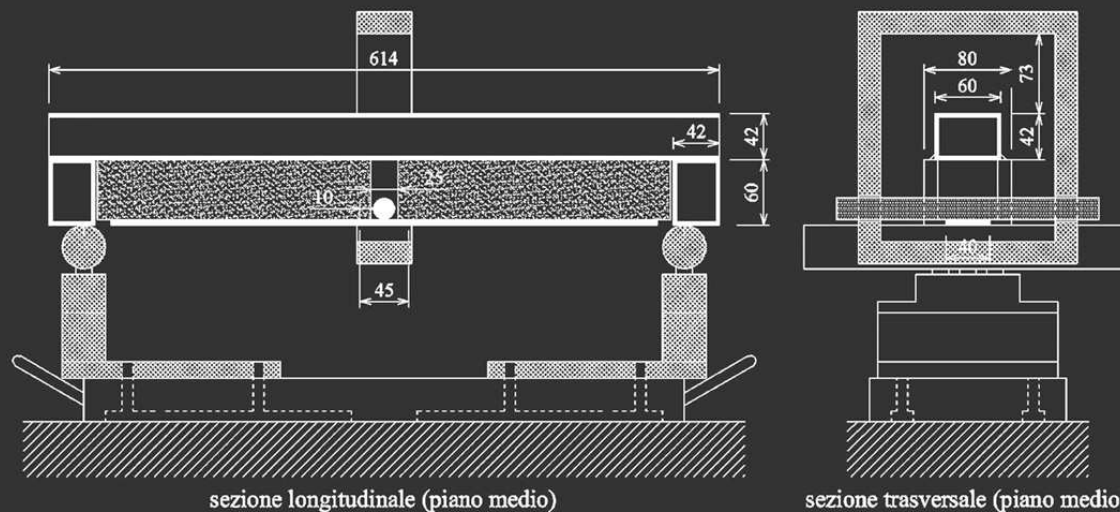


# Conclusioni

A livello locale, un contributo resistivo offerto dal rinforzo è stato registrato

Nel caso di volte sottili, esso può risultare non marginale

La procedura di prova necessita di essere semplificata:  
possibili sviluppi sulla linea del *V-Shape Peel Test* (\*)



(\*) Sun Z., Wan K.T., Dillard D.A., 2004, *A theoretical and numerical study of thin film delamination using the pull-off test*, Int. Journal of Solids and Structures 41 717-730.

Wu Z., Yuan H. et al., *Peeling Behavior and Spalling Resistance of Bonded Bidirectional Fiber Reinforced Polymer Sheets*, Journal of Composites for Construction, 9(3), 214-226, 2005



Università degli Studi di Padova  
Dipartimento di Costruzioni e Trasporti



Modelli analitici per l'interpretazione dei meccanismi di rottura  
locali di archi e volte in muratura rinforzati con tessuti FRP

*Grazie per la cortese attenzione*



12, 13 febbraio 2007

Università degli Studi di Salerno – Consorzio ReLUIS



*Materiali ed Approcci Innovativi per il Progetto in Zona Sismica e la Mitigazione della Vulnerabilità delle Strutture*