



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

Dottorato di Ricerca in
Ingegneria delle Strutture e del Recupero Edilizio ed Urbano
IX Ciclo – Nuova Serie (2007-2010)

**Un contributo alla progettazione di interventi
di rinforzo di strutture in muratura con
materiali compositi:
indagine sperimentale e modelli teorici**

Gianpietro Camorani

Tutor:

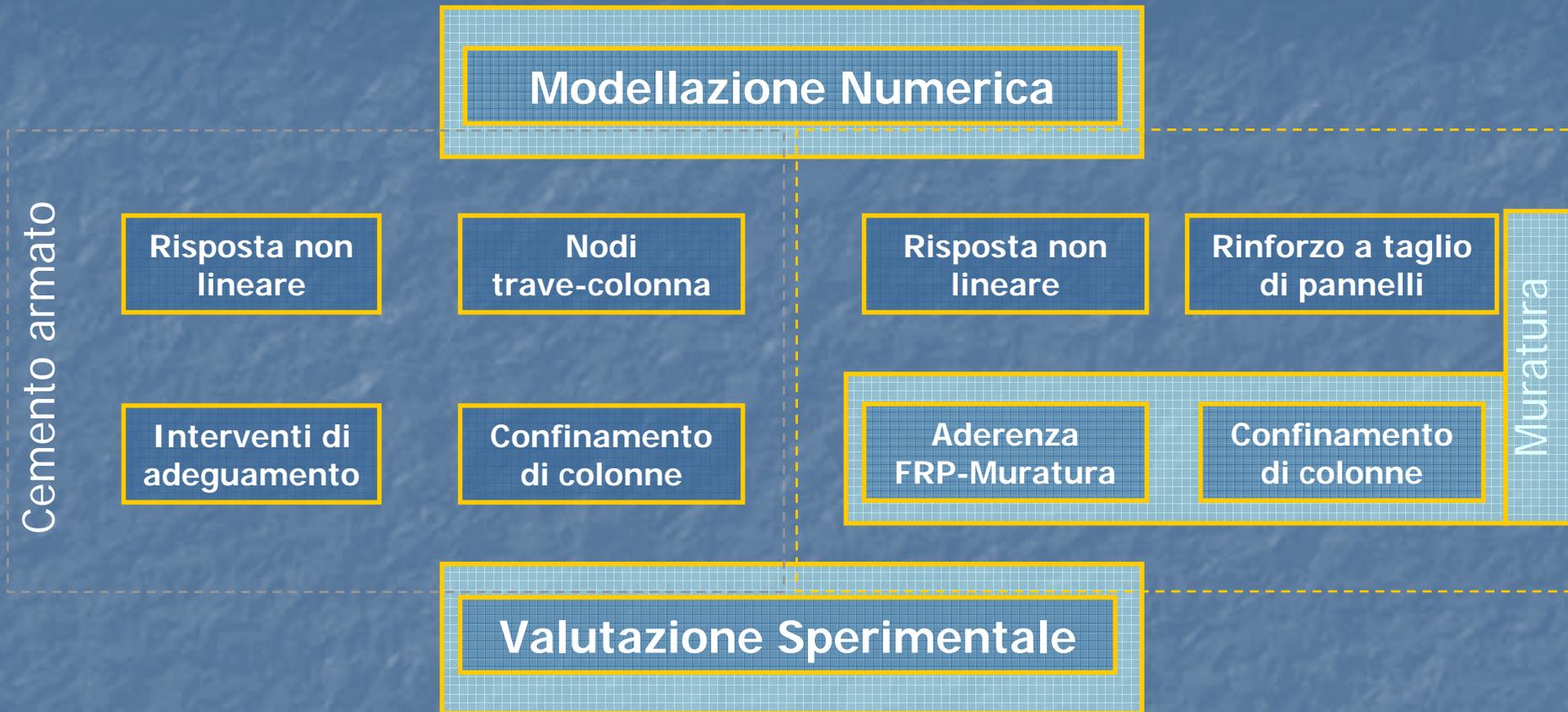
Dott. Ing. Enzo Martinelli

Coordinatore:

Prof. Ciro Faella



Strutture esistenti in c.a. e muratura



Dottorandi:

IX Ciclo – N,S

Gianpietro Camorani

Carmine Lima
Francesco Perri

X Ciclo – N,S,

Antonio Caggiano
Carmen Sguazzo

XI Ciclo – N,S,

Giuseppe Di Palma

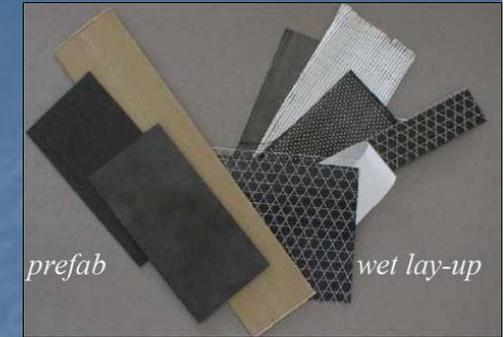
Tutors:

Prof, Ing, Ciro Faella

Dott. Ing, Enzo Martinelli



Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO



Introduzione ed obiettivi

Confrontati con gli interventi su elementi strutturali in calcestruzzo armato, dove i materiali compositi sono già ampiamente utilizzati (ad es. Stati Uniti e Giappone), gli interventi con FRP nelle costruzioni in muratura sono ancora, per certi versi, in una fase molto acerba.



**Il documento
CNR-DT 200/2004**

“Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati (FRP)”
Materiali, strutture in c.a. e in c.a.p., strutture murarie



CONSIGLIO NAZIONALE delle RICERCHE

Guide for the Design and Construction of Externally Bonded Fiber-Reinforced Polymer Systems for Strengthening Unreinforced Masonry Structures

Reported by ACI Committee 440

Francesco Clementi
Stefano Lenzi

I COMPOSITI NELL'INGEGNERIA STRUTTURALE



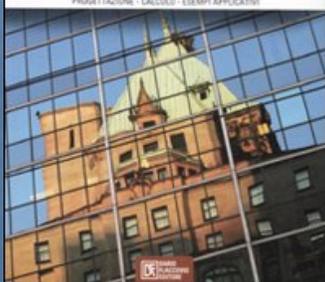
L'adeguamento statico e sismico di strutture in c.a. e muratura secondo il CNR-DT 200/2004, la NTC e le relative circolari applicative.

EDIZIONE
ESCLAPIO

FRANCESCO FUGAZZI

Rinforzo delle murature con materiali compositi

PROGETTAZIONE - CALCOLE - ESEMPI APPLICATIVI






Introduzione ed obiettivi

- l'**aderenza** con il supporto, spesso vincolante nella progettazione dell'intervento;
- il **confinamento** di elementi compressi, problematica ancora bisognosa di approfondimenti nel caso di colonne in muratura.

Obiettivi
della
ricerca



Sperimentazione
Validazione formulazioni esistenti
Proposta formulazioni alternative



Intro



Materiali



Interventi



Aderenza



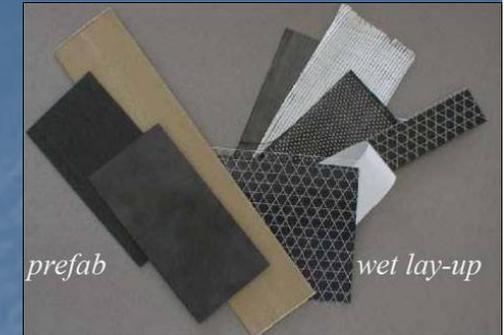
Confinamento



Conclusioni



Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

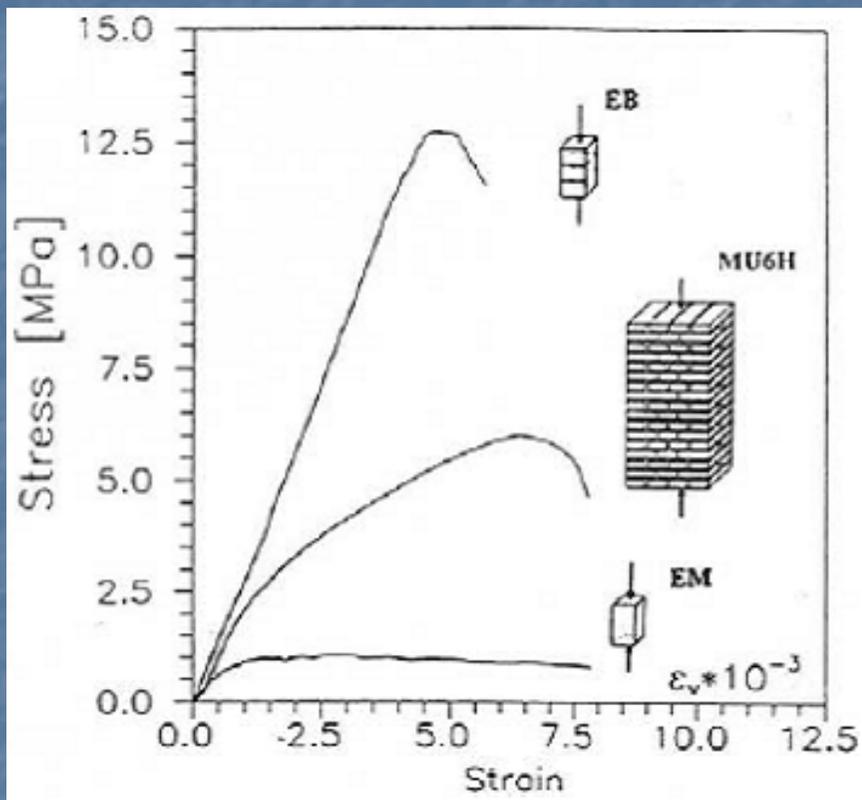
Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO

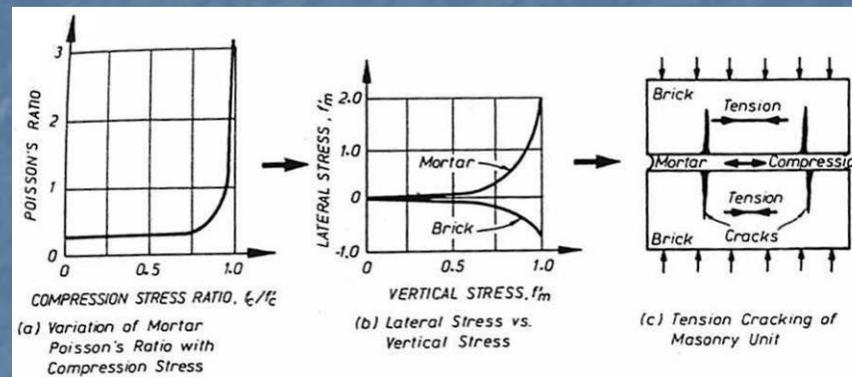


Materiali: muratura



Tipologia

Tessitura



Materiali di base

Modalità di rottura





Materiali: muratura



| Classe | Tipo di malta | Composizione | | | | | |
|--------|---------------|--------------|---|------|---------------|------|-------|
| | | Cemento | Resistenza caratteristica a compressione f_{mk} dell'elemento [MPa] | | Tipo di malta | | |
| | | | | M 15 | M 10 | M 5 | M 2.5 |
| M 2,5 | Idraulica | - | 2.0 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 |
| M 2,5 | Pozzolonica | - | 3.0 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.0 |
| M 2,5 | Bastarda | 1 | 5.0 | 3.5 | 3.4 | 3.3 | 3.0 |
| M 5 | Bastarda | 1 | 7.5 | 5.0 | 4.5 | 4.1 | 3.5 |
| M 8 | Cementizia | 2 | 10.0 | 6.2 | 5.3 | 4.7 | 4.1 |
| M 12 | Cementizia | 1 | 15.0 | 8.2 | 6.7 | 6.0 | 5.1 |
| | | | 20.0 | 9.7 | 8.0 | 7.0 | 6.1 |
| | | | 30.0 | 12.0 | 10.0 | 8.6 | 7.2 |
| | | | 40.0 | 14.3 | 12.0 | 10.4 | - |

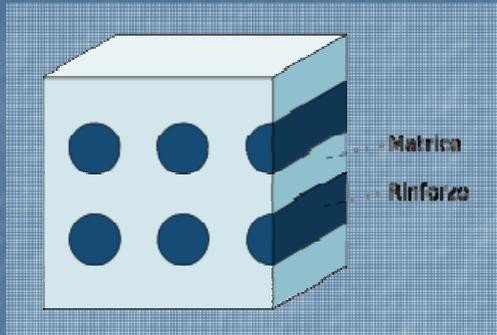
EC 6

$$f_k = k \cdot f_b^{0,7} \cdot f_m^{0,3}$$

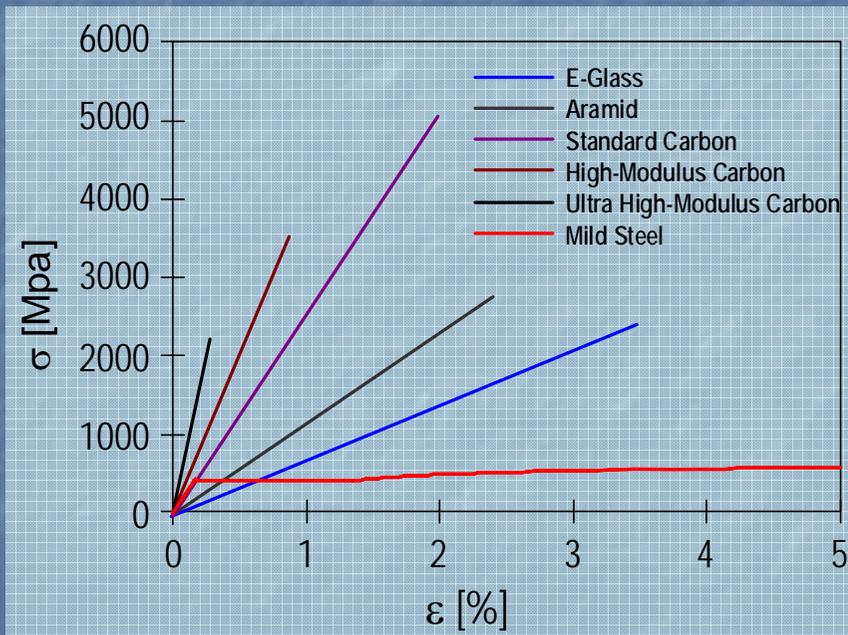
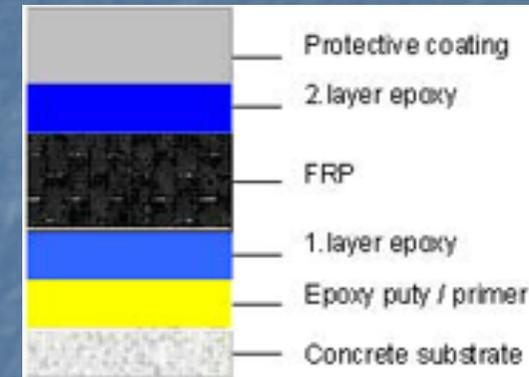




Materiali: FRP

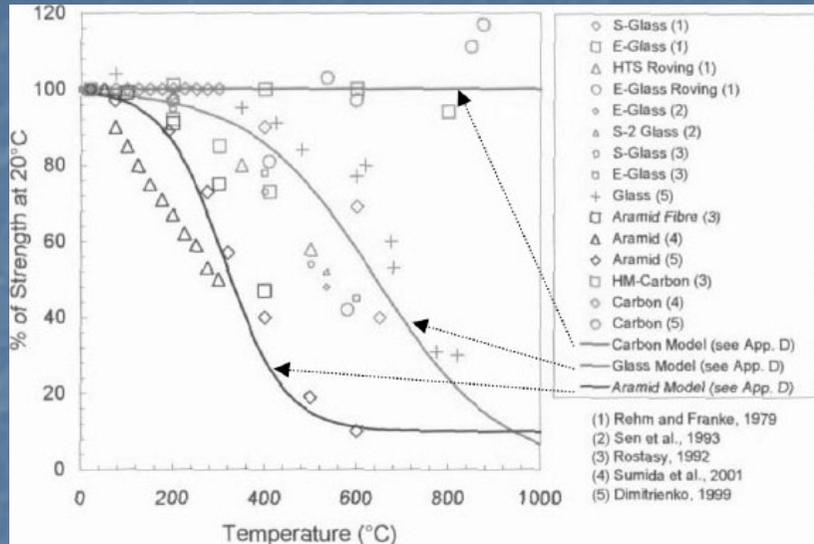


Sistema wet-lay up





Materiali: FRP



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

CNR DT 200 (2004)

| Condizioni di esposizione | Tipo di fibra/resina | η_a |
|---------------------------|-----------------------|----------|
| Interna | Vetro/Epossidica | 0,75 |
| | Arammidica/Epossidica | 0,85 |
| | Carbonio/Epossidica | 0,95 |
| Esterna | Vetro/Epossidica | 0,65 |
| | Arammidica/Epossidica | 0,75 |
| | Carbonio/Epossidica | 0,85 |
| Ambiente aggressivo | Vetro/Epossidica | 0,50 |
| | Arammidica/Epossidica | 0,70 |
| | Carbonio/Epossidica | 0,85 |

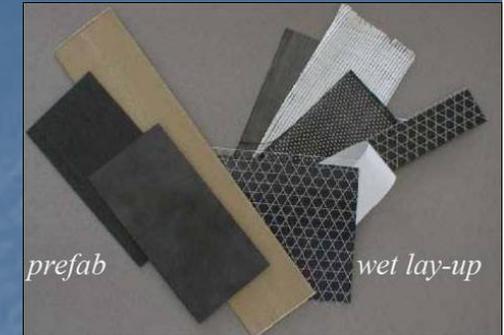
| Modalità di carico | Tipo di fibra/resina | η_l |
|---|-----------------------|----------|
| Persistente (viscosità e rilassamento) | Vetro/Epossidica | 0.30 |
| | Arammidica/Epossidica | 0.50 |
| | Carbonio/Epossidica | 0.80 |
| Ciclico (fatica) | tutte | |

| | CNR Ambiente aggressivo Carico persistente | | | CHBC EBR Made in the field | | |
|------|--|----------|-----------------|----------------------------------|----------|-----------------|
| | η_a | η_l | $\eta_a \eta_l$ | η_a | η_l | $\eta_a \eta_l$ |
| GFRP | 0.50 | 0.30 | 0.15 | 0.65 | 0.75 | 0.49 |
| AFRP | 0.70 | 0.50 | 0.35 | 0.50 | 0.75 | 0.37 |
| CFRP | 0.85 | 0.80 | 0.68 | 0.75 | 0.75 | 0.56 |





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

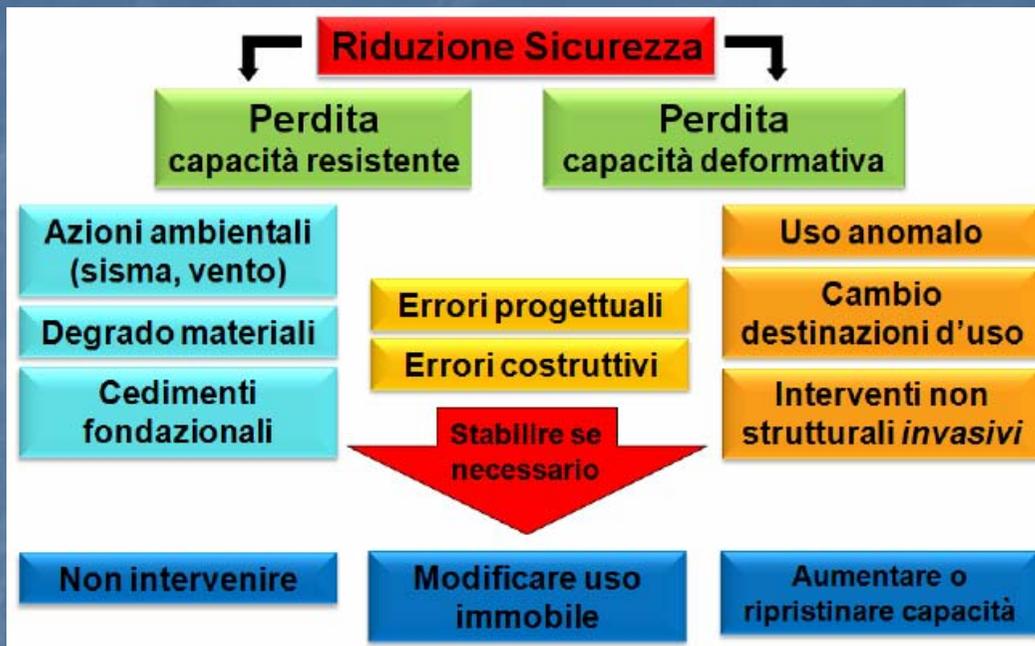
Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO



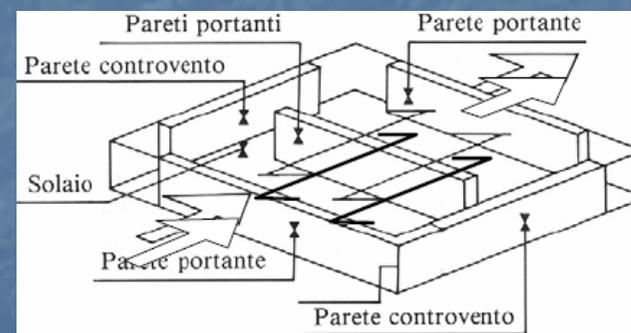
Criteri generali di intervento



S. Francisco



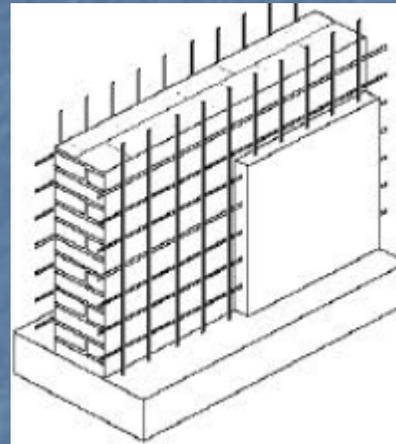
Pont du Gard, Provenza





Interventi tradizionali

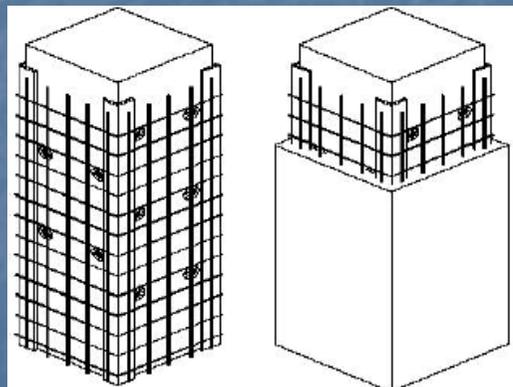
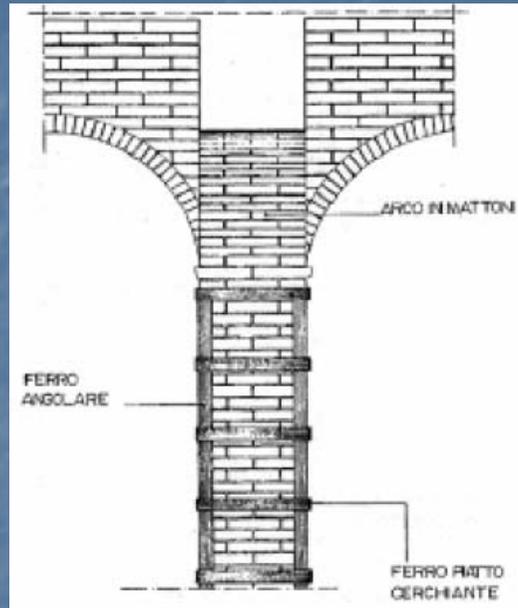
Resistenza a taglio





Interventi tradizionali

Confinamento e cerchiatura



Cesena, Centro Storico





Interventi con FRP

Resistenza a taglio





Interventi con FRP

Confinamento e cerchiatura

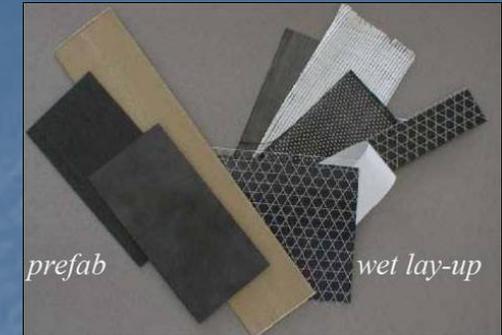


cerchiatura esterna con nastri monodirezionali in carbonio





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO

Stato dell'arte – Massima forza di aderenza



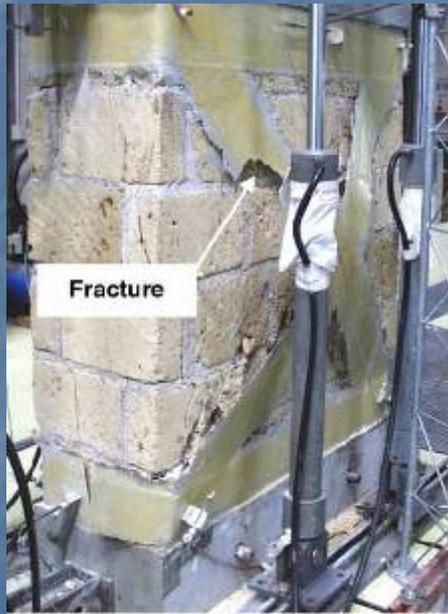
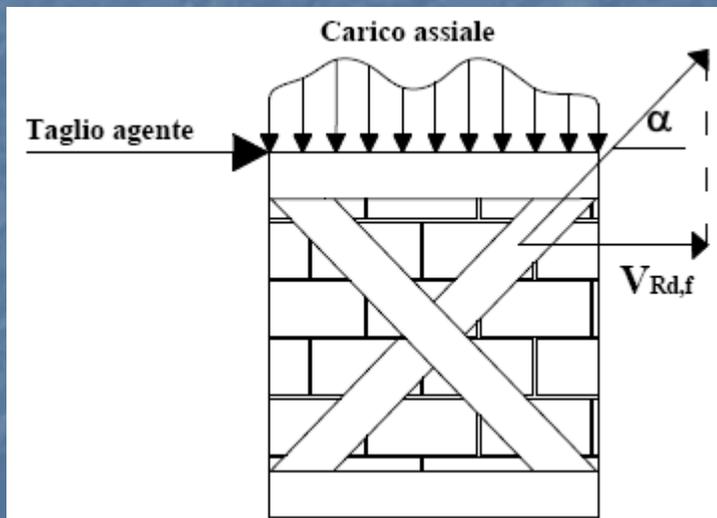
La perdita di aderenza col supporto abbatte sensibilmente il valore di V_{frp}

$$V_{Rd} = \min \left\{ V_{Rd,m} + V_{Rd,f}, V_{Rd,max} \right\}$$

$$V_{Rd,max} = 0,3 f_{md}^h \cdot t \cdot d$$

$$V_{Rd,f} = \frac{0,6 \cdot d_f \cdot A_{fw} \cdot f_{fd}}{p_f}$$

$$f_{fd} = \min \left\{ f_{fd,u}, f_{fd,d} \right\}$$



Stato dell'arte – Massima forza di aderenza

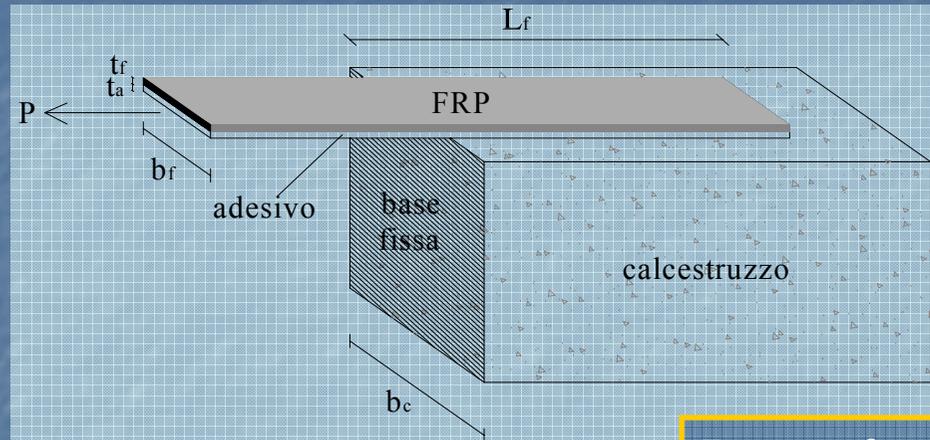


$$f_f = \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}}$$

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 \cdot f_{bm}}}$$

$$f_{f,red} = f_f \frac{L_f}{L_{eff}} \left(2 - \frac{L_f}{L_{eff}} \right)$$

con $L_f < L_{eff}$



$$P_{max} = f_f \cdot b_f \cdot t_f$$

Energia di frattura

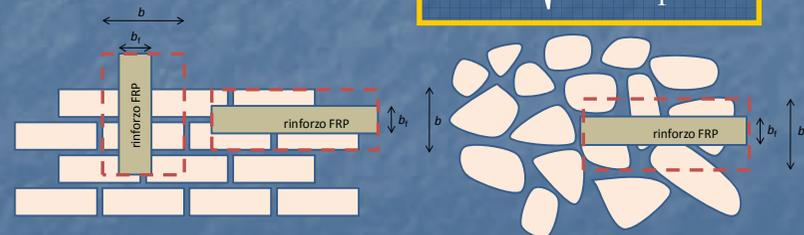
$$\Gamma_{Fk} = c_1 \sqrt{f_{bm} f_{btm}}$$

$c_1 = 0,015$

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f / b}{1 + b_f / b}}$$

$$\Gamma_{Fd} = \frac{k_b \cdot k_G}{FC} \cdot \frac{f_{bm} \cdot f_{btm}}{f_{bm} + f_{btm}}$$

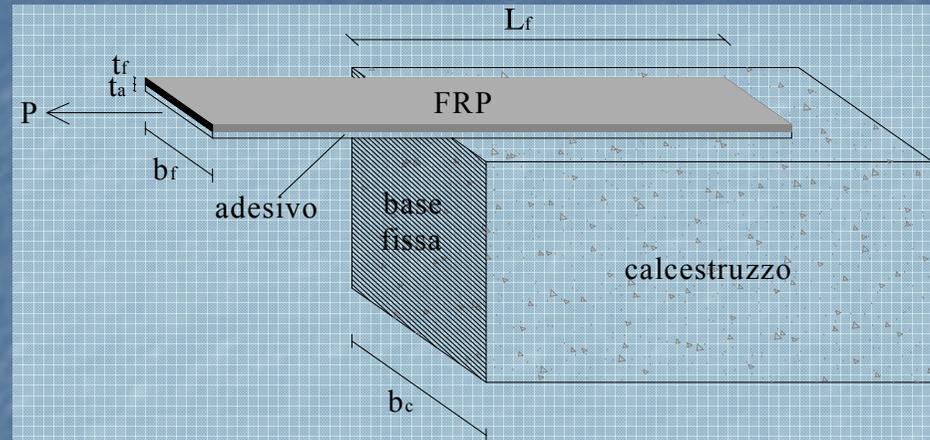
CNR DT 200 (revisione 2011)



Stato dell'arte – Massima forza di aderenza

Van Germert et al. (1997)

$$P_u = 0,5 \cdot b_f L_f \cdot f_t$$



Neubauer et al. (1997)

$$P_u = \begin{cases} L \geq L_{eff} \rightarrow 0.64k_p \cdot b_f \sqrt{E_f t_f f_t} \\ L < L_{eff} \rightarrow 0.64k_p \cdot b_f \sqrt{E_f t_f f_t} \cdot \alpha \end{cases}$$

$$\alpha = \left(\frac{L_f}{L_{eff}} \right) \left(2 - \frac{L_f}{L_{eff}} \right);$$

$$L_{eff} = \sqrt{\frac{E_f t_f}{2 \cdot f_t}};$$

$$G_f = c_f f_t$$

Yuan et al. (1999)

$$P_u = \frac{\tau_f b_f \delta_f}{\lambda_2 (\delta_f - \delta_l)} \sin(\lambda_2 a);$$

$$\lambda_1 \tanh[\lambda_1 (L - a)] = \lambda_2 \tanh(\lambda_2 a);$$

$$\lambda_1^2 = \frac{\tau_f}{\delta_l} E_f t_f \left(1 + \frac{E_f t_f b_f}{E_c t_c b_c} \right);$$

$$\lambda_2^2 = \frac{\tau_f}{\delta_f - \delta_l} E_f t_f \left(1 + \frac{E_f t_f b_f}{E_c t_c b_c} \right).$$

Iso et al. (2003)

$$\tau_u = 0.93 \cdot f'_c{}^{0.44};$$

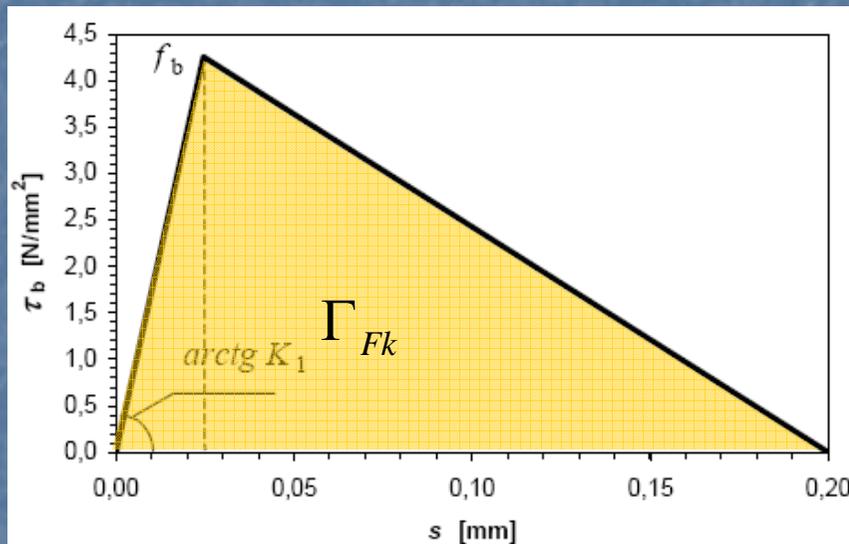
$$P_u = \tau_u \cdot L_{eff} \cdot b_f;$$

$$L_{eff} = 0.125 (E_f t_f)^{0.57}$$



Stato dell'arte – Legge locale di interfaccia

Andamento delle tensioni tangenziali con lo scorrimento relativo



$$f_b = 0.64 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}$$

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_f}{b}}{1 + \frac{b_f}{400}}} \geq 1$$

CNR DT 200 (2004)

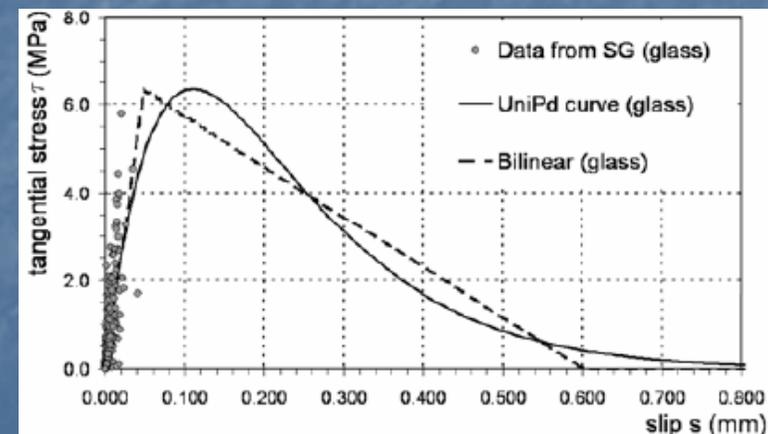
$$K_1 = \frac{c_1}{\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_c}{G_c}}$$

$$\tau_{fl} = c_4 \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}}$$

$$G_F = 0,5 \cdot \tau_{fld} S_{fo}$$

f.i.b. 14 (2002)

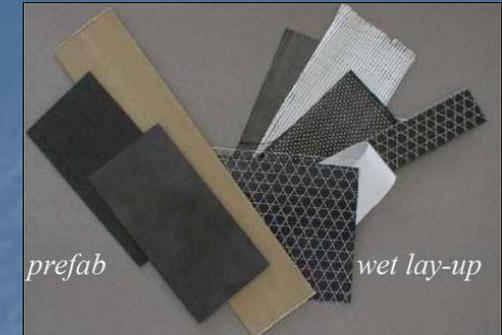
$$s_{fo} = c_3 = \frac{c_1^2}{c_4}$$



GFRP-laterizio, Modena (2007)



Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

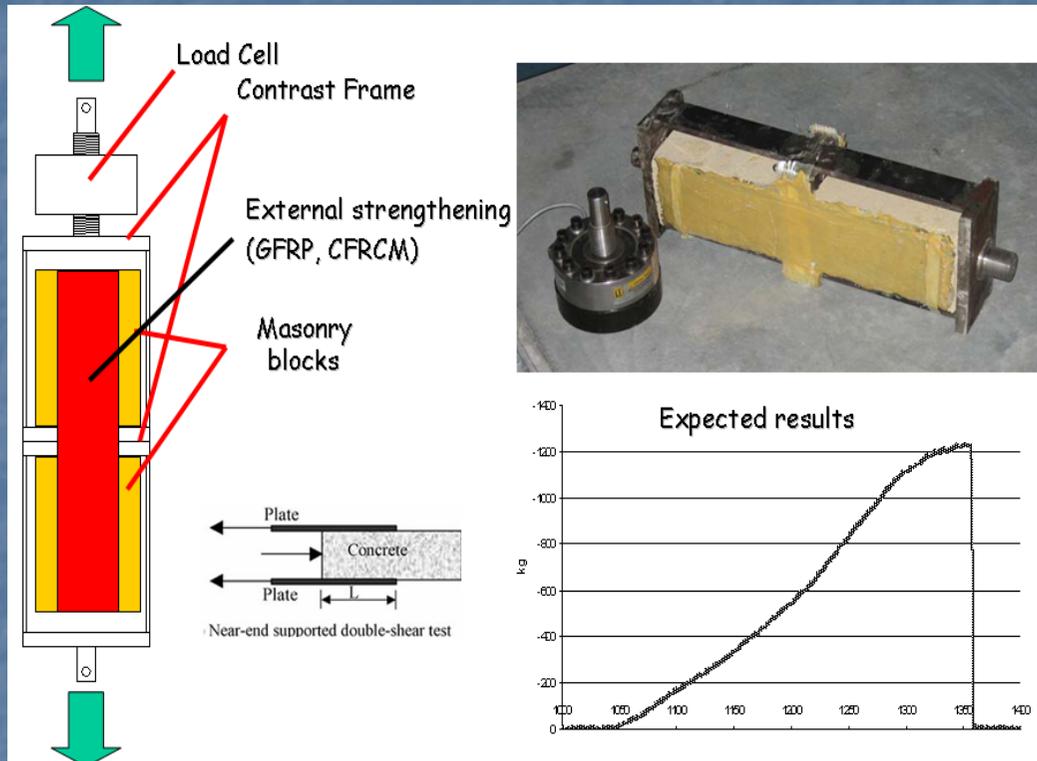
Modelli alternativi

Conclusioni

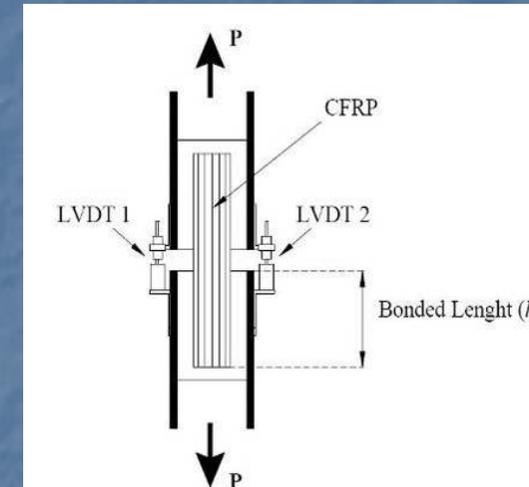
ADERENZA

CONFINAMENTO

Sperimentazione – Generalità



Provino pilota (Paciello, Camorani, Perri, 2006)



Problematiche:

- Scelta murature di supporto
- Scelta rinforzo
- Modalità di prova





Sperimentazione – Murature di base



Calcarenite



Tufo giallo

Criteri di scelta:

- Caratteristiche meccaniche eterogenee
- Diffusione in Italia meridionale



Laterizio



Pietra
Calcareo



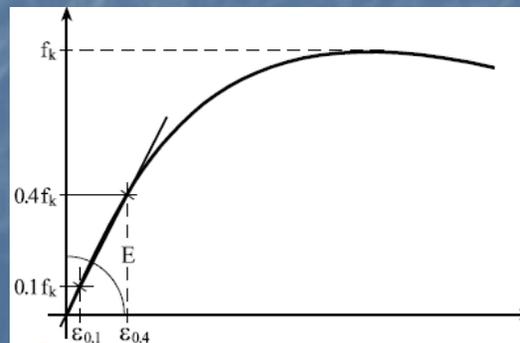


Sperimentazione – Murature di base

Resistenza a compressione



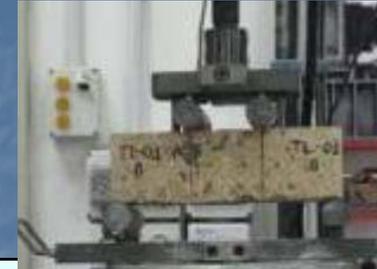
| Materiale | Numero di prove | $f_{b,m}$ [MPa] | CoV | $E_{b,m}$ [MPa] | $\epsilon_{m,b}$ |
|----------------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|------------------|
| Calcarenite (Tipo 1) | 12 | 2,28 | 0,113 | 343,71 | 0,0072 |
| Calcarenite (Tipo 2) | 11 | 2,48 | 0,130 | 360,44 | 0,0060 |
| Tufo Giallo (Tipo 1) | 15 | 5,03 | 0,107 | 382,40 | 0,0129 |
| Tufo Giallo (Tipo 2) | 21 | 4,41 | 0,264 | 404,31 | - |
| Laterizio (Tipo 1) | 11 | 24,97 | 0,068 | 292,92 | 0,0857 |
| Laterizio (Tipo 2) | 8 | 25,51 | 0,084 | 322,65 | 0,0720 |
| Pietra calcarea | 37 | 70,04 | 0,135 | 489,72 | 0,0740 |





Sperimentazione – Murature di base

Resistenza a trazione



| Material | Numero di prove | $f_{bt,m}$ | CoV |
|----------------------|-----------------|------------|-------|
| | | [MPa] | |
| Calcarenite (Tipo 1) | - | - | - |
| Calcarenite (Tipo 2) | 4 | 0,710 | 0,320 |
| Tufo Giallo (Tipo 1) | 6 | 1,940 | 0,106 |
| Tufo Giallo (Tipo 2) | 5 | 0,614 | 0,160 |
| Laterizio (Tipo 1) | - | - | - |
| Laterizio (Tipo 2) | 5 | 9,808 | 0,096 |
| Pietra calcarea | 3 | 11,380 | 0,195 |



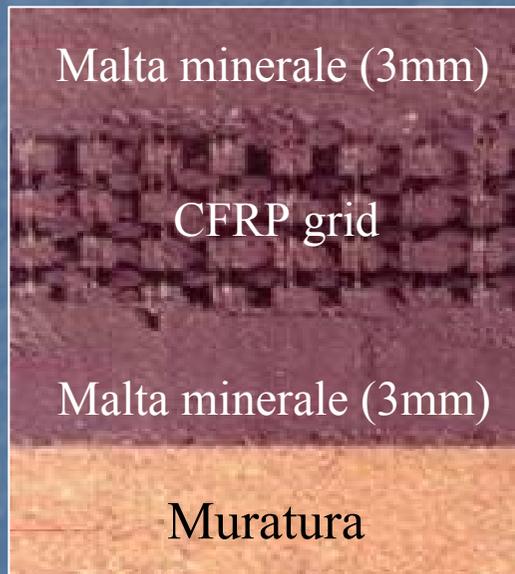
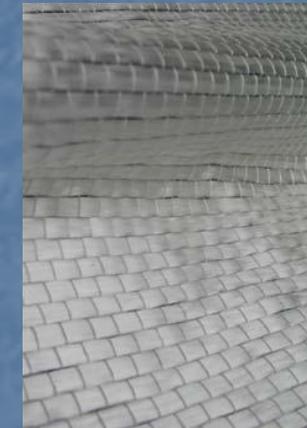
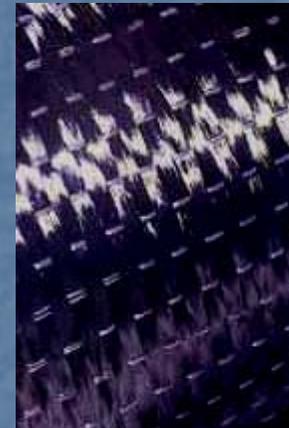


Sperimentazione – Sistemi di rinforzo

G-FRP: t_f [mm]=0,48; E_f [GPa]=80,7;

C-FRP: t_f [mm]=0,166; E_f [GPa]=240;

MapeWrap C-UNI-AX ®



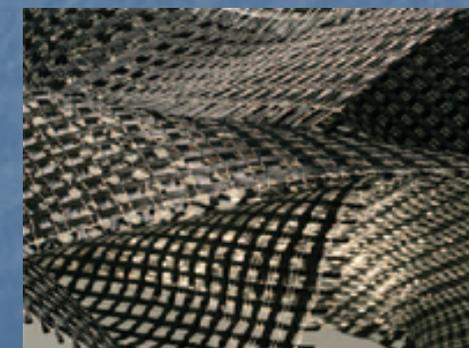
Carbon-Fiber Reinforced
Cement Matrix

Ruredil S,p,A, - Italy

X-Mesh C10/M25 ®

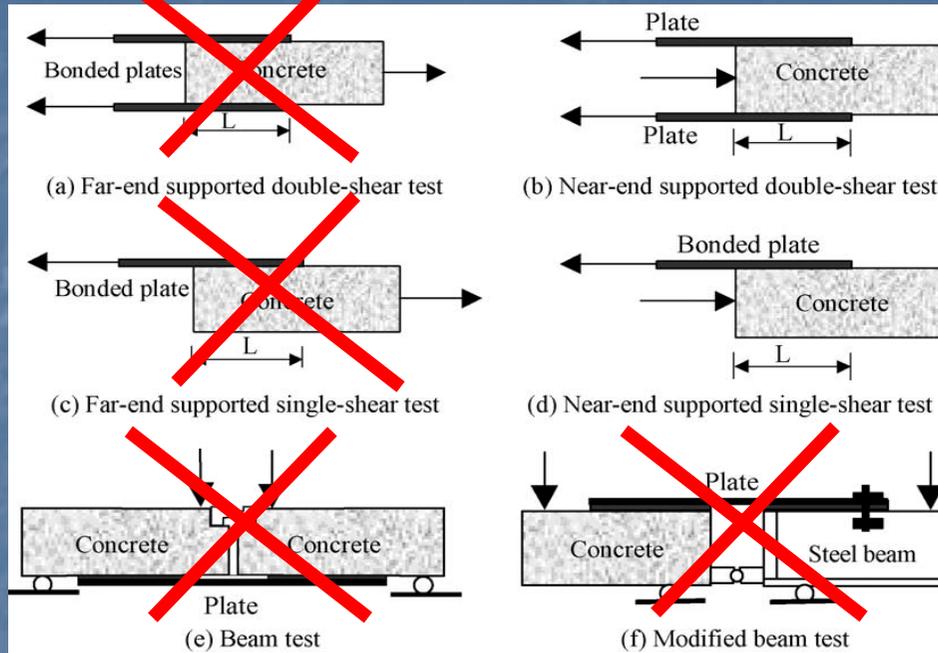
| | |
|---------------------------------------|-------|
| Fiber density [g/m ²] | 168 |
| Nominal thickness [mm] | 0.047 |
| Strength (for a width of 1 cm) [N/cm] | 1600 |
| Young modulus [GPa] | 240 |

MapeWrap G-UNI-AX ®





Sperimentazione – Setup di prova



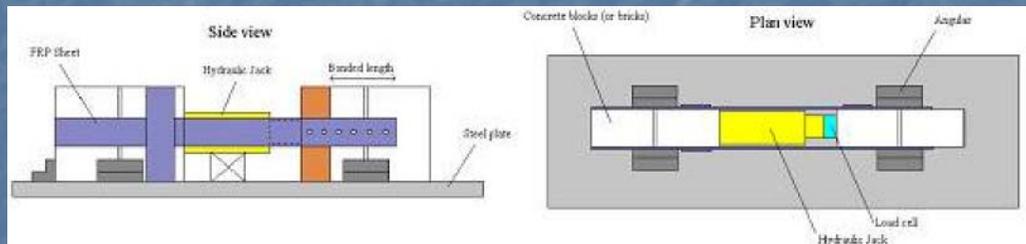
Yao et al, (2005)



Savoia et al. (2008)



Olivito et al. (2007)

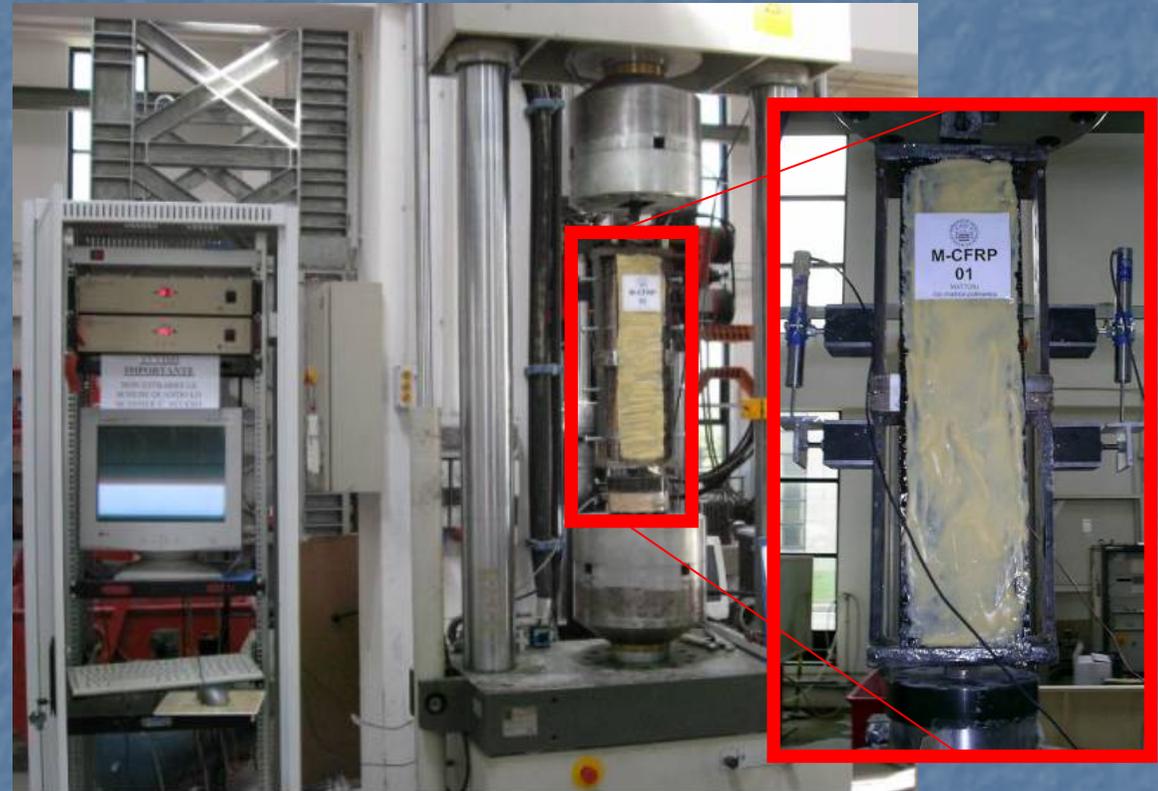
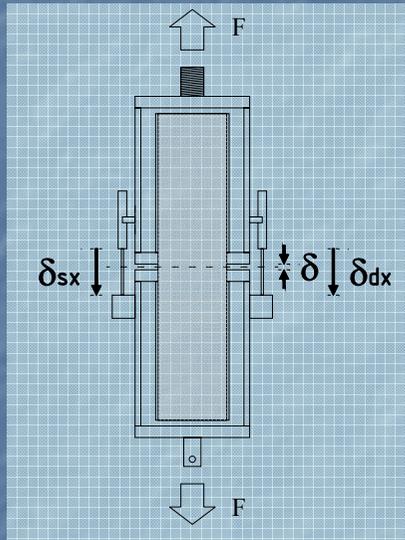


Casareto et al. (2003)





Sperimentazione – Setup di prova



Sperimentazione – Risultati e modalità di rottura

| # | Test | Masonry | Composite | b_f [mm] | L_f [mm] | $2P_{max}$ [kN] | Rupture Mode [S/R/M*] | P_{max}/b_f [N/mm] | $\sigma_{f,max}$ [MPa] |
|----|------------|-------------------------|-----------|---------------|---------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | C-CFRCM 02 | Calcarenite (Type 1) | CFRCM | 125 | 245 | 11.43 | S | 45,72 | 972.34 |
| 2 | C-CFRCM 03 | | | 128 | 247 | 8.88 | S | 34,69 | 737.62 |
| 3 | C-GFRP 01 | | G | 129 | 243 | 25.10 | S | 97,29 | 202.68 |
| 4 | C-GFRP 02 | | | 123 | 243 | 22.85 | S | 92,89 | 194.30 |
| 5 | C-GFRP 03 | | | 128 | 243 | 20.93 | S | 81,76 | 170.96 |
| 6 | C-CFRP 01 | Calcarenite (Type 2) | C | 118 | 242 | 28.03 | S | 118,77 | 717.01 |
| 7 | C-CFRP 02 | | | 119 | 241 | 27.58 | S | 115,88 | 696.62 |
| 8 | C-CFRP 03 | | | 121 | 242 | 30.13 | S | 124,50 | 748.35 |
| 9 | T-CFRCM 01 | Yellow Tuff (Type 1) | CFRCM | 123 | 244 | 9.98 | R | 40,57 | 863.17 |
| 10 | T-CFRCM 02 | | | 126 | 247 | 9.28 | R | 36,83 | 783.52 |
| 11 | T-CFRCM 03 | | | 121 | 248 | 11.40 | R | 47,11 | 1002.29 |
| 12 | T-GFRP 01 | Yellow Tuff (Type 2) | G | 123 | 245 | 30.65 | S | 124,59 | 259.57 |
| 13 | T-GFRP 02 | | | 120 | 243 | 25.80 | S | 107,50 | 224.90 |
| 14 | T-GFRP 03 | | | 121 | 241 | 17.00 | S | 70,25 | 146.96 |
| 15 | T-CFRP 01 | | C | 119 | 244 | 37.48 | S | 157,48 | 950.54 |
| 16 | T-CFRP 02 | | | 121 | 236 | 38.93 | S | 160,87 | 972.98 |
| 17 | T-CFRP 03 | | | 120 | 241 | 30.25 | S | 126,04 | 757.71 |



"M"



"S"



Sperimentazione – Risultati e modalità di rottura

| # | Test | Masonry | Composite | b_f [mm] | L_f [mm] | $2P_{max}$ [kN] | Rupture Mode [S/R/M*] | P_{max}/b_f [N/mm] | $\sigma_{f,max}$ [MPa] | |
|----|------------|-------------------------|-----------|---------------|---------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------|
| 18 | B-CFRCM 01 | Clay Bricks (Type 1) | CFRCM | 116 | 235 | 9.70 | R | 41,81 | 889.58 | |
| 19 | B-CFRCM 02 | | | 115 | 235 | 9.93 | R | 43,17 | 922.14 | |
| 20 | B-CFRCM 03 | | | 116 | 241 | 8.85 | R | 38,15 | 813.38 | |
| 21 | B-GFRP 01 | | G | 116 | 235 | 46.90 | S | 202,16 | 421.16 | |
| 22 | B-GFRP 02 | | | 116 | 226 | 50.63 | S | 218,23 | 454.61 | |
| 23 | B-CFRP 01 | Clay Bricks (Type 2) | C | 115 | 243 | 62.40 | S | 271,30 | 1630.82 | |
| 24 | B-CFRP 02 | | | 116 | 246 | 64.48 | S | 277,93 | 1670.58 | |
| 25 | B-CFRP 03 | | | 117 | 245 | 64.70 | S | 276,50 | 1672.79 | |
| 26 | SB-GFRP 01 | | G | 51 | 238 | 31.875 | S | 312,50 | 651.04 | |
| 27 | SB-GFRP 02 | | | 57 | 238 | 30.575 | S | 268,20 | 562.45 | |
| 28 | SB-GFRP 03 | | | 57 | 236 | 31.15 | S | 273,25 | 573.03 | |
| 29 | SB-CFRP 01 | | C | 56 | 237 | 29.8 | S | 266,07 | 1599.27 | |
| 30 | SB-CFRP 02 | | | 55 | 238 | 30.3 | S | 275,46 | 1651.86 | |
| 31 | SB-CFRP 03 | | | 57 | 238 | 33.85 | S | 296,93 | 1777.04 | |
| 32 | L-GFRP 01 | | | Limestone | G | 122 | 246 | 71.78 | M | 294,18 |
| 33 | L-GFRP 02 | | 123 | | | 243 | 68.15 | M | 277,03 | 578.33 |
| 34 | L-GFRP 03 | 123 | 240 | | | 78.35 | M | 318,50 | 663.53 | |
| 35 | L-CFRP 01 | C | 120 | | 239 | - | - | - | - | |
| 36 | L-CFRP 02 | | 121 | | 243 | 70.63 | M | 291,86 | 1765.36 | |
| 37 | L-CFRP 03 | | 123 | | 240 | 85.55 | M | 347,76 | 2103.52 | |

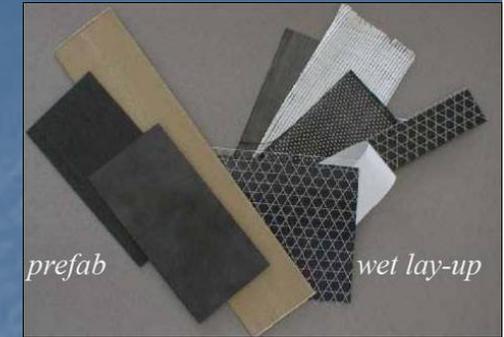


"R"





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Analisi e confronti

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

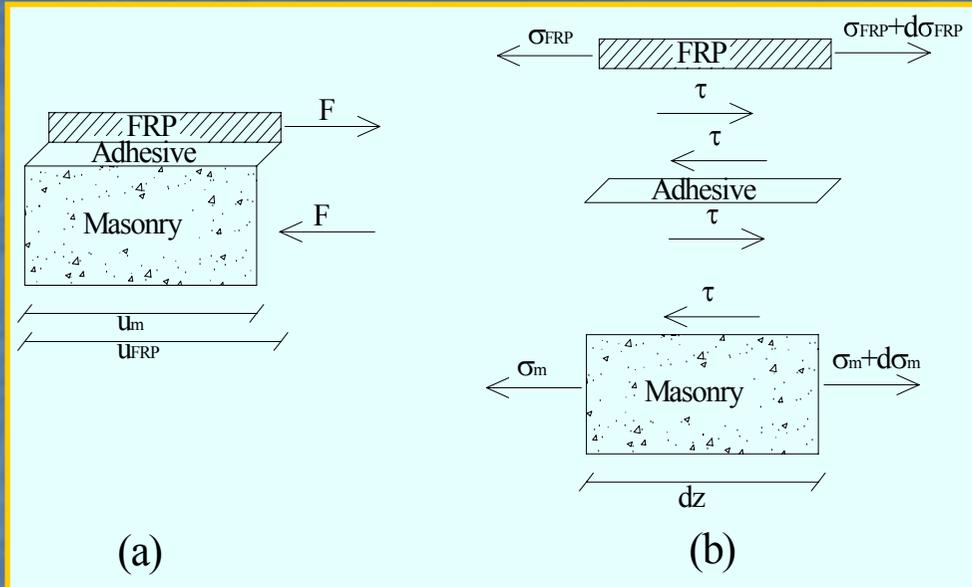
Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO

Identificazione legame aderenza



$$\sigma_m = E_m \frac{du_m}{dz}$$

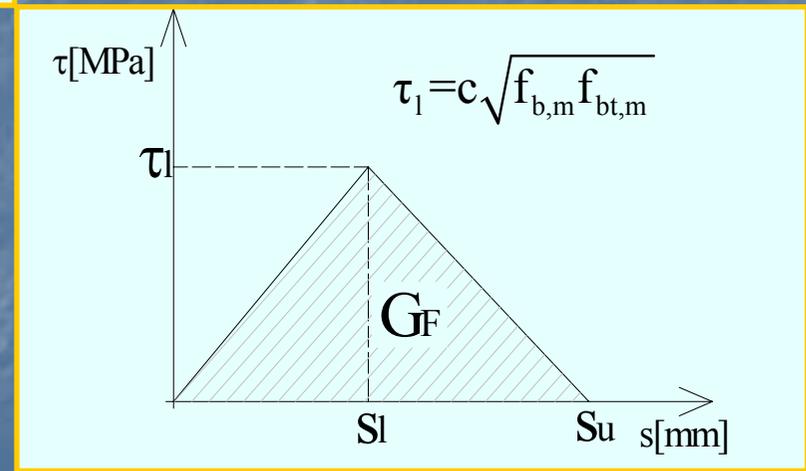
$$\sigma_f = E_f \frac{du_f}{dz}$$

$$\frac{d^2 s}{dz^2} = -\tau(s) \left(\frac{1}{E_f t_f} + \frac{b_f}{E_m t_m b_m} \right)$$

Schema prova di strappo

$$\frac{d^2 s}{dz^2} + \frac{\tau(s)}{E_f t_f} = 0$$

Equazione differenziale dell'aderenza



Identificazione legame aderenza

Sistema risolvente

$$\left\{ \begin{array}{l} s_0 \\ s_1 \cong s_0 \text{ condizione al contorno} \\ s_2 = -\frac{\tau(s_2)}{E_f t_f} \Delta z^2 + 2s_1 - s_0 \\ \dots \\ \dots \\ s_i = -\frac{\tau(s_i)}{E_f t_f} \Delta z^2 + 2s_{i-1} - s_{i-2} \\ \dots \\ s_n = -\frac{\tau(s_n)}{E_f t_f} \Delta z^2 + 2s_{n-1} - s_{n-2} = s_L \end{array} \right.$$

Forza trasmessa al supporto

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{\tau(s_i) - \tau(s_{i-1})}{2} \Delta z \cdot b_f$$

Tensione tangenziale all'interfaccia

$$\tau(s_i) = (2s_{i-1} - s_{i-2}) \frac{E_f t_f}{\Delta z^2}$$

Deformazioni

$$\varepsilon_i = \frac{s_i - s_{i-1}}{\Delta z}$$

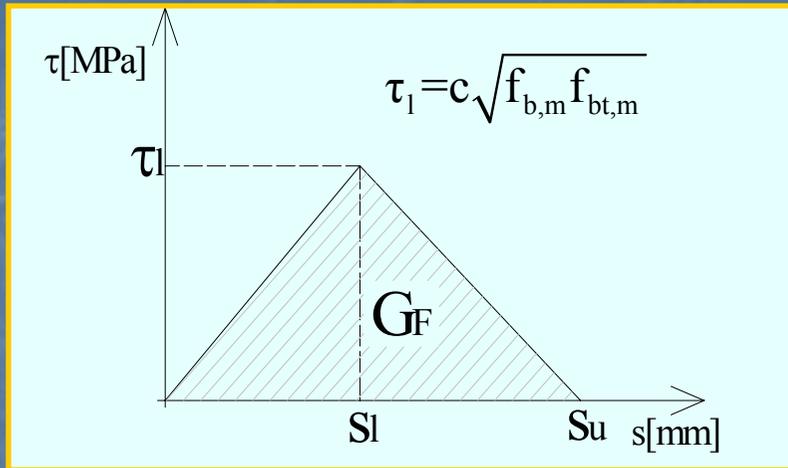
Tensioni normali

$$\sigma_{f,i} = E_f \varepsilon_i$$





Identificazione legame aderenza

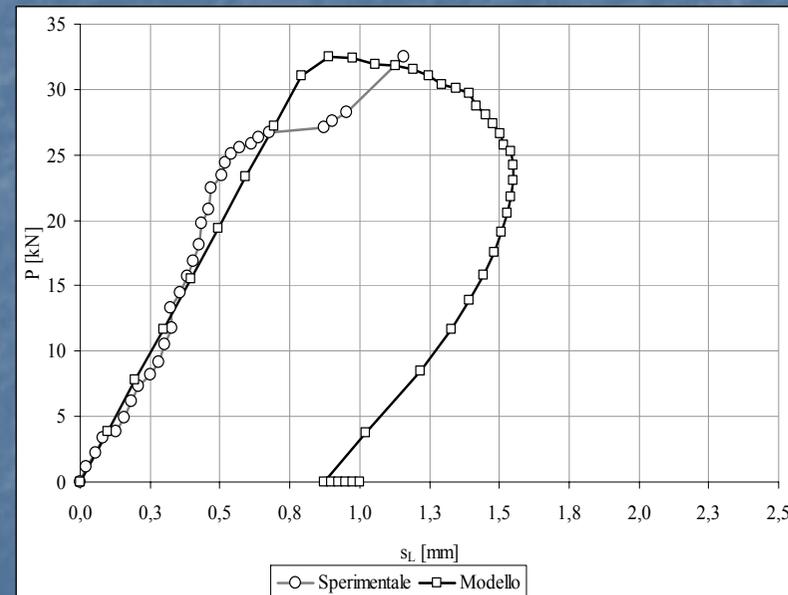
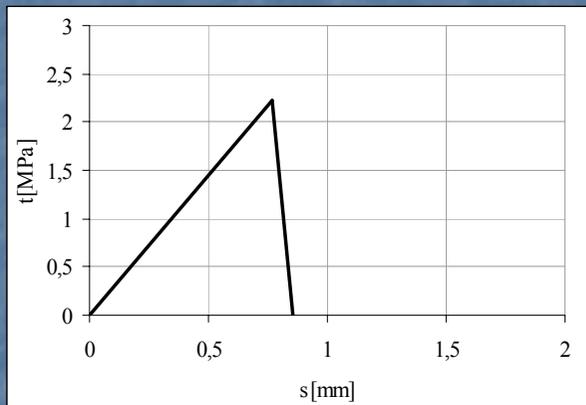


$$(\bar{c}, \bar{s}_l, \bar{s}_u) = \underset{(c, s_l, s_u)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n \left[P_i^{\text{exp}} - P_i^{\text{th}}(c, s_l, s_u, E_f, t_f) \right]^2$$

Vincoli:

$$s_{L,i}^{\text{th}} \leq s_{L,i}^{\text{exp}}$$

$$\frac{1}{2} \tau_l s_u = \left(\frac{P_{\text{max}}}{b_f} \right)^2 \frac{1}{2 E_f t_f}$$



Applicazione: pietra calcarea con C-FRP





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Analisi e confronti

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

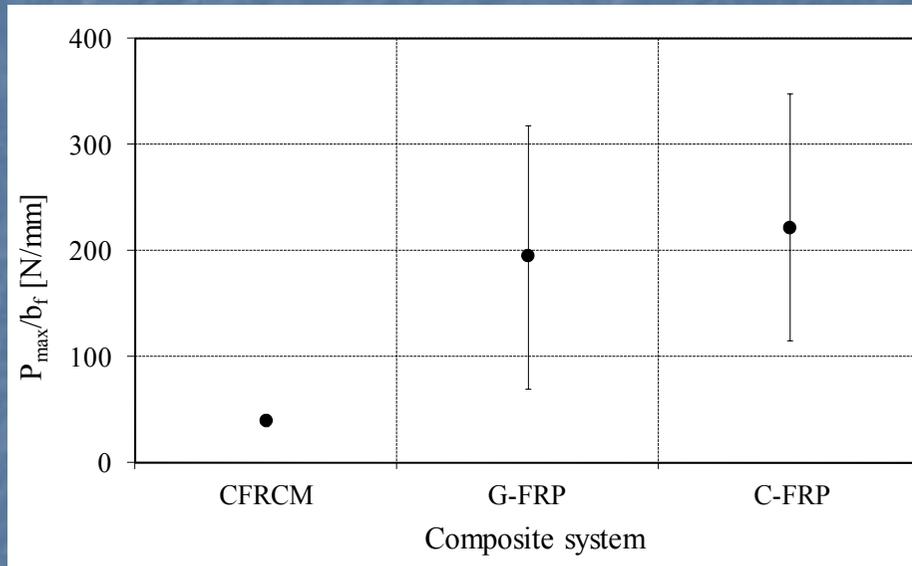
Conclusioni

ADERENZA

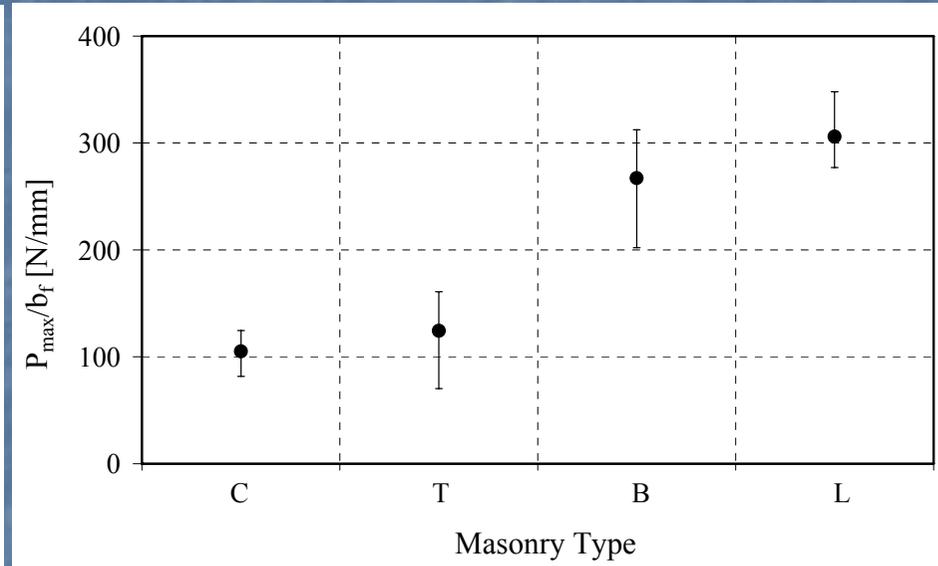
CONFINAMENTO

Confronti preliminari

P_{\max}/b_f = Forza di aderenza "specifica"



Influenza del sistema di rinforzo



Influenza del tipo di muratura





Confronti DT CNR 200

$$P_{\max}^{\text{exp}} = \sqrt{2G_F E_f t_f} \cdot b_f$$



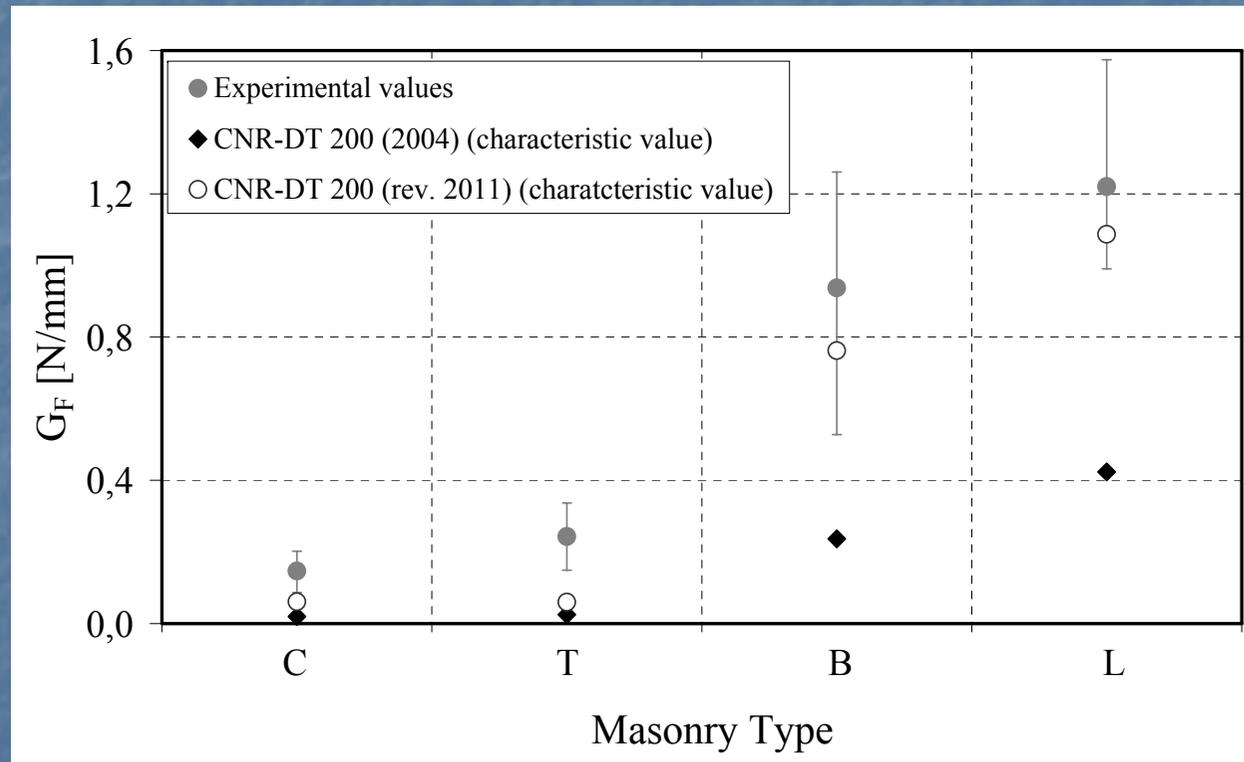
$$G_{F,i}^{\text{exp}} = \frac{(P_{\max} / b_f)^2}{2E_f t_f}$$

$$\Gamma_{Fk} = 0,015 \sqrt{f_{bm} f_{btm}}$$

CNR DT 200 (2004)

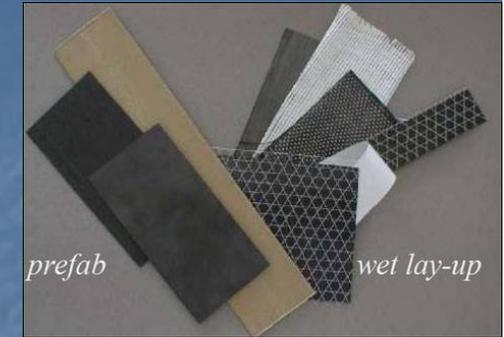
$$\Gamma_{Fd} = k_b \cdot k_G \frac{f_{bm} \cdot f_{btm}}{f_{bm} + f_{btm}}$$

CNR DT 200
(revisione 2011)





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Analisi e confronti

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO



Proposta alternativa per l'energia di frattura

Calibrazione di un modello empirico

$$G_F^{th} = G_F(f_{b,m}; a, b)$$

Modello generale

$$G_{F,i}^{exp} = \frac{(P_{max}/b_f)^2}{2E_f t_f}$$

Resistenza a
compressione

Parametri da
calibrare

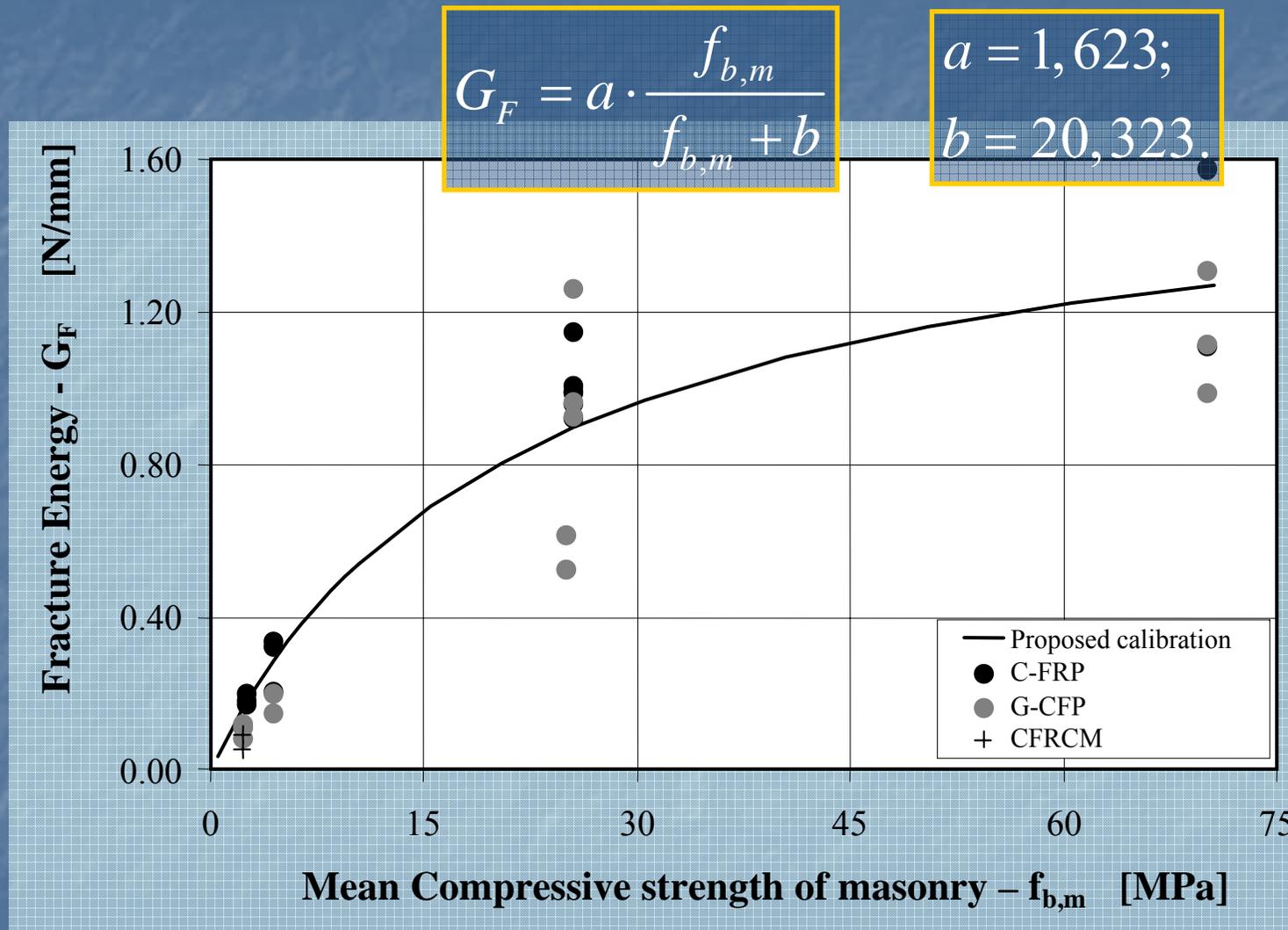
Minimi quadrati

$$(\bar{a}, \bar{b}) = \underset{(a,b)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^{n_s} \left[G_{F,i}^{exp} - G_F(f_{b,m,i}; a, b) \right]^2$$





Proposta alternativa per l'energia di frattura





Obiettivi raggiunti

1 – Incremento dei dati sperimentali disponibili in letteratura.

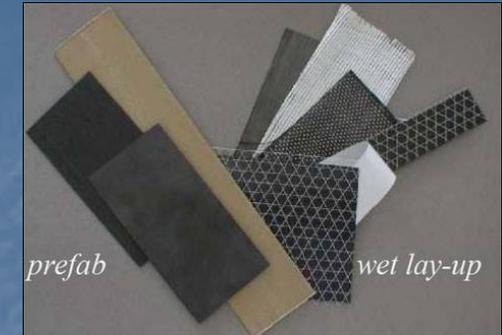
2 – Identificazione preliminare del legame di interfaccia con metodi di calcolo “poveri”.

3 – Proposta alternativa “empirica” per l’energia di frattura dipendente dalla sola resistenza a compressione del supporto che tiene conto, implicitamente, dell’eventuale crisi del composito.





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

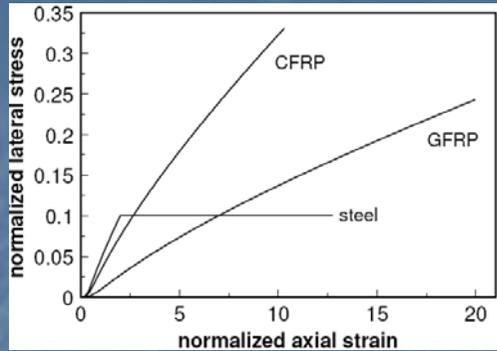
Conclusioni

ADERENZA

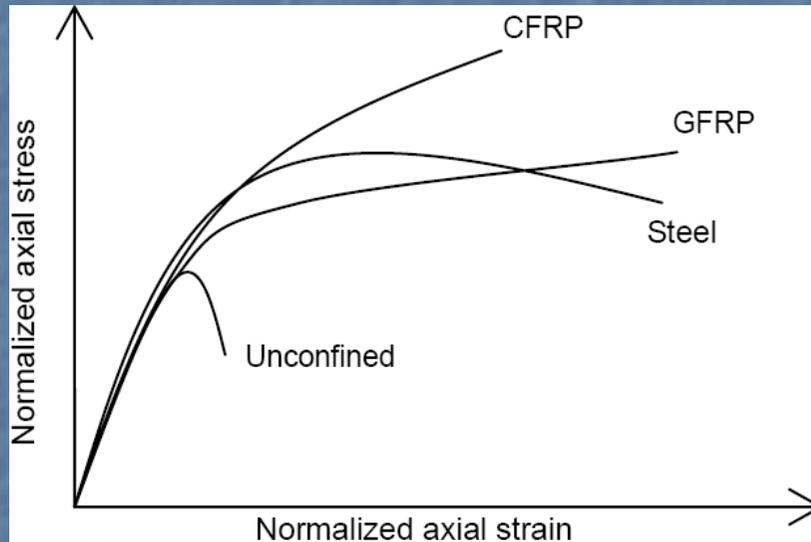
CONFINAMENTO



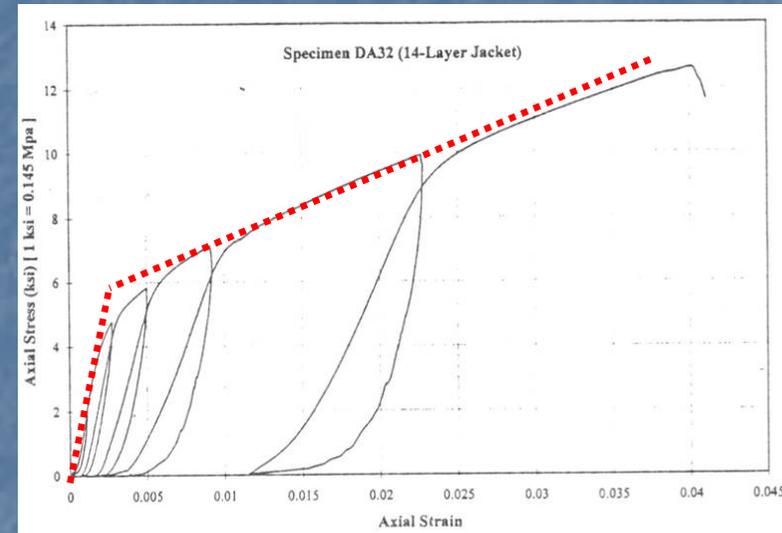
Stato dell'arte



A differenza dell'acciaio, gli FRP hanno comportamento elastico lineare fino a rottura



Confinamento del calcestruzzo con acciaio ed FRP (Monti et al. 1999)



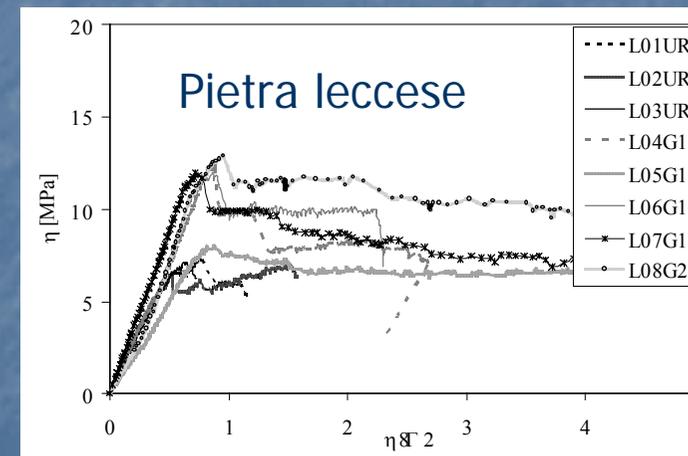
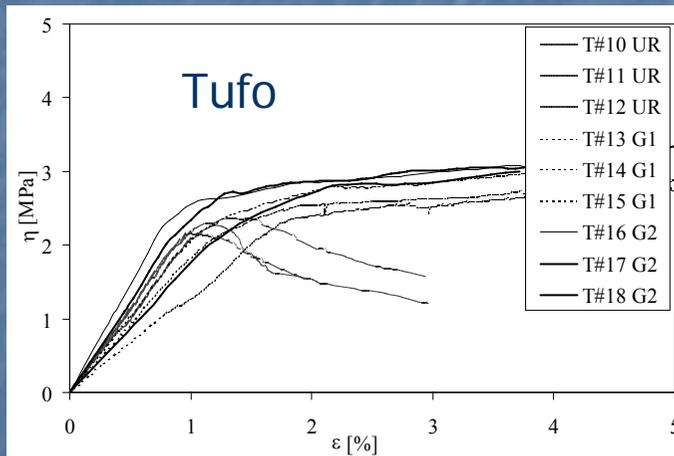
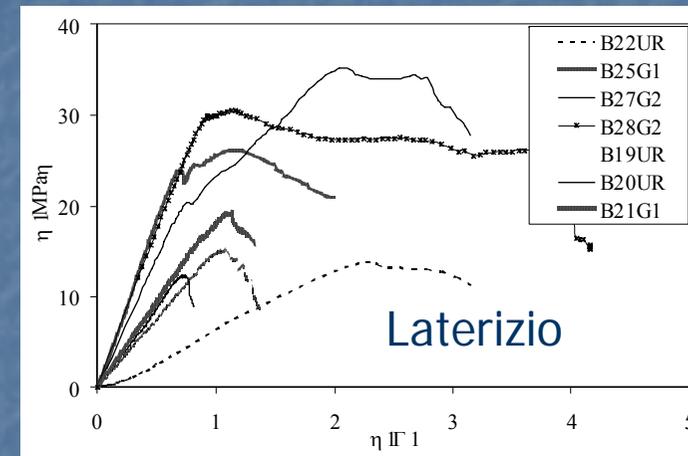
Curva sperimentale per un cilindro di calcestruzzo fasciato con FRP (Shahawy et al. 2000)





Stato dell'arte

L'effetto del confinamento sulle murature è più difficilmente valutabile rispetto al calcestruzzo per l'elevata eterogeneità.





Stato dell'arte – Resistenza a compressione



$$f_{mcd} = f_{md} + k' f_{l,eff}$$

$$f_{mcd} \leq 1,5 \cdot f_{md}$$

$$f_{l,eff} = k_H k_V f_l$$

$$k' = \frac{g_m}{1000}$$

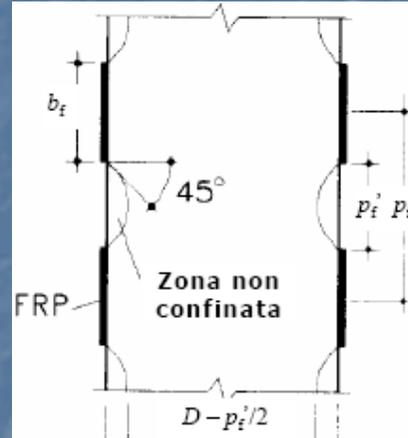
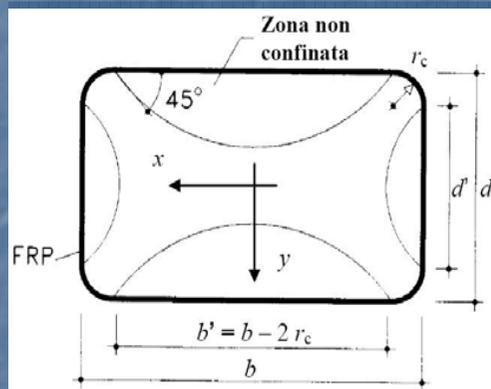
$$k' = \frac{g_m}{1250} \text{ Monti (2007)}$$

$$\varepsilon_f = 0,004$$

Pressione di confinamento

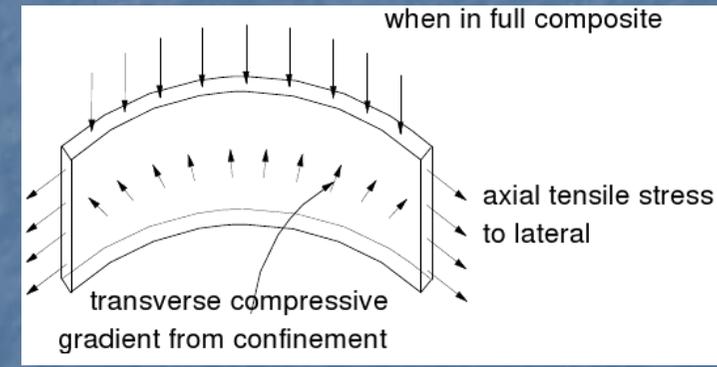
$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f E_f \cdot \varepsilon_{f,rid}$$

$$\varepsilon_{f,rid} = \eta_a \frac{\varepsilon_f}{\gamma_f}$$



$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + d'^2}{3 \cdot A_m}$$

$$k_V = \left(1 - \frac{p'_f}{2 \cdot \min\{b, d\}} \right)^2$$





Stato dell'arte – Modelli

$$f_{mc} = f_{m0}$$

$$\frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \leq 0,24$$

$$f_{mc} = 0,6 f_{m0} + 1,65 f_{l,eff}$$

$$\frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \geq 0,24$$

Kreivacas e Triantafillou (2005)

$$k' = 2,4 \left(\frac{f_{m0}}{f_{l,eff}} \right)^{-0,17}$$

Corradi et al. (2007)

$$f_{mc} = f_{m0} + k' f_{l,eff}$$

$$k' = 1,53 \left(\frac{f_{m0}}{f_{l,eff}} \right)^{-0,10}$$

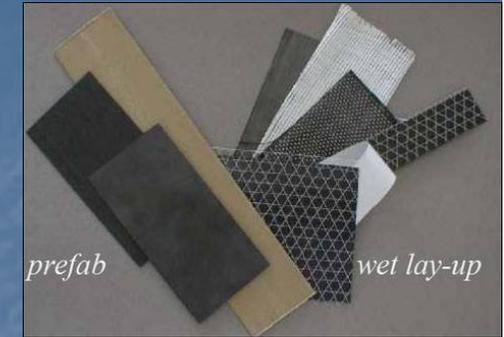
Di Ludovico et al. (2010)

$$k' = 1,09 \left(\frac{f_{m0}}{f_{l,eff}} \right)^{-0,24}$$





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO



Database



Università del Salento

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INNOVAZIONE



Prove di compressione su pilastri in laterizio, tufo e pietra leccese
confinati con G-FRP e C-FRP

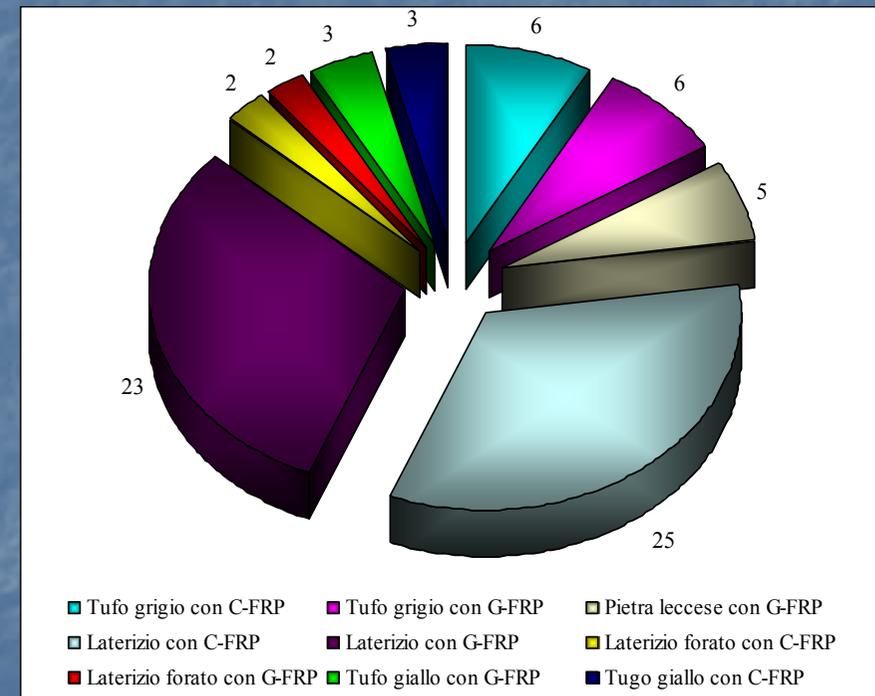
Theofanis et al.(2005): 42 prove; laterizio confinato con C-FRP e G-FRP.

Bieker et al. (2002): 18 prove; laterizio confinato con C-FRP e G-FRP.

Corradi et al. (2007): 24 prove; laterizio confinato con C-FRP e G-FRP.

Di Ludovico et al. (2008): 12 prove; laterizio confinato con C-FRP, G-FRP, rete in G-FRP.

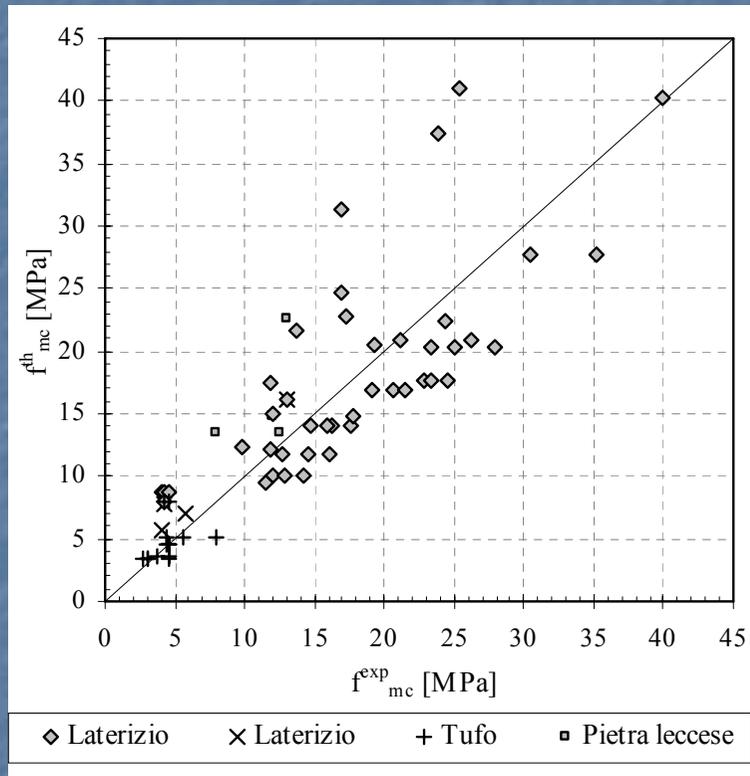
Alecci V. et al. (2009): 9 prove; laterizio confinato con C-FRP.



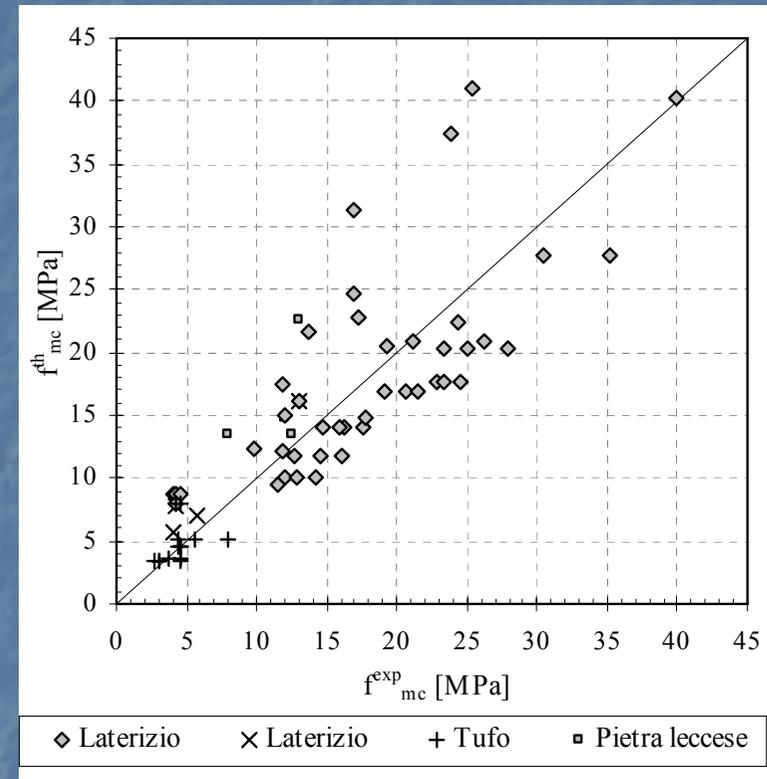


Confronti

Kreivacas e Triantafillou (2005)



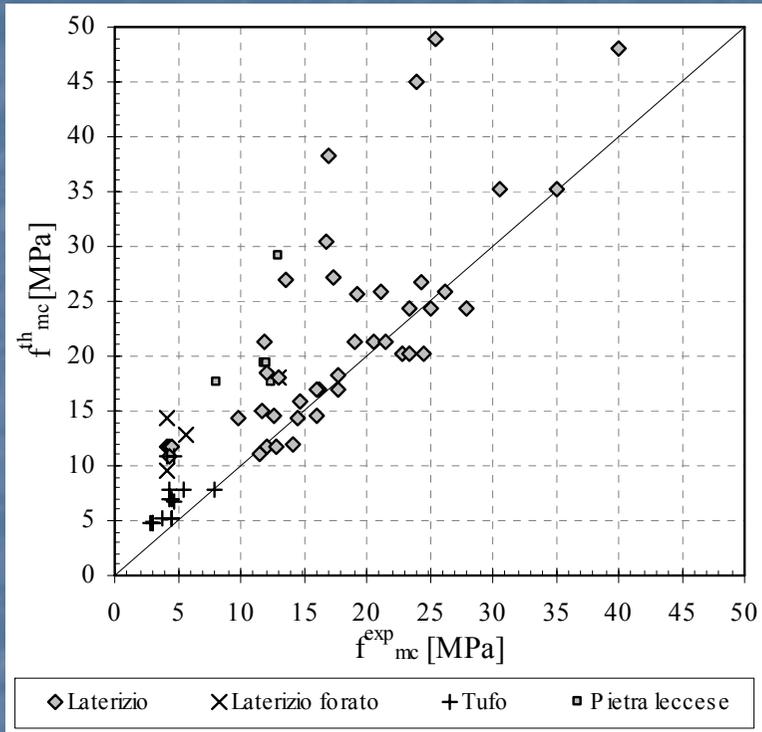
DT CNR 200 (2004)



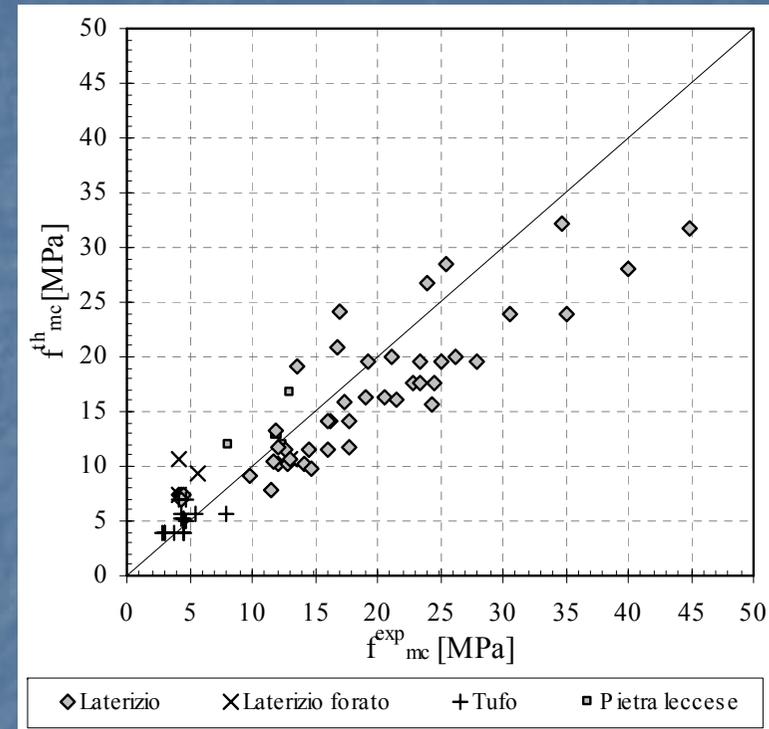


Confronti

Corradi et al. (2007)



Di Ludovico et al. (2010)

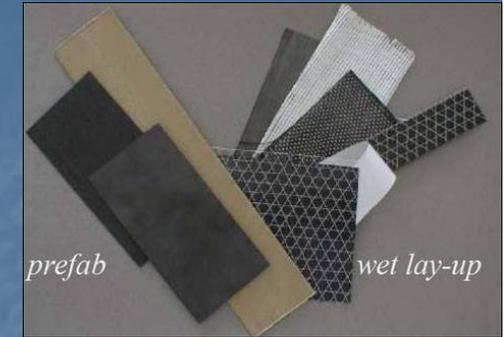


| Modello | Δ_d | δ_m | σ_d | Asimmetria | S_n | E_m |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|----------|--------|
| C.N.R. 200/2004 [7.47] | 0,985 | 0,962 | 0,283 | -0,072 | 1801,247 | 24,345 |
| Corradi et al.[7.20] | 0,717 | 0,752 | 0,251 | 0,008 | 4134,045 | 28,419 |
| Krevaikas e Triantafillou [7.15] | 1,116 | 1,169 | 0,396 | -0,055 | 2104,290 | 35,893 |
| Di Ludovico et al.[7.18] | 1,078 | 1,038 | 0,298 | -0,206 | 1346,599 | 25,774 |





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

ADERENZA

CONFINAMENTO

Conclusioni

Formulazioni alternative

Limitazioni dei modelli:

- Variazione lineare di f_{mc} con g_m e $f_{l,eff}$
- Sperimentalmente, incrementi di $f_{l,eff}$ non comportano incremento proporzionale di f_{mc}



$$f_{mc}^{th} = f_{m0} \left[K_1 + K_2 \left(\frac{g_m}{1000} \right)^{K_3} \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \right)^{K_4} \right]$$



Minimi quadrati

$$\underline{\alpha} = \arg \min_{\underline{K}} \sum_{i=1}^n \left[f_{mc,i}^{exp} - f_{mc,i}^{th}(\underline{K}, \underline{X}_i) \right]^2 = \arg \min_{\underline{K}} S_n(\underline{K}, \underline{X}_i, \underline{f}_{mc}^{exp})$$

Vincolo:

$$f_{mc}^{th} \geq f_{m0}$$





Formulazioni alternative

$$f_{mc}^{th} = f_{m0} \left[K_1 + K_2 \left(\frac{g_m}{1000} \right)^{K_3} \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{m0}} \right)^{K_4} \right]$$

$$n_s = \sum_{i=1}^m \frac{m!}{i! (m-i)!}$$

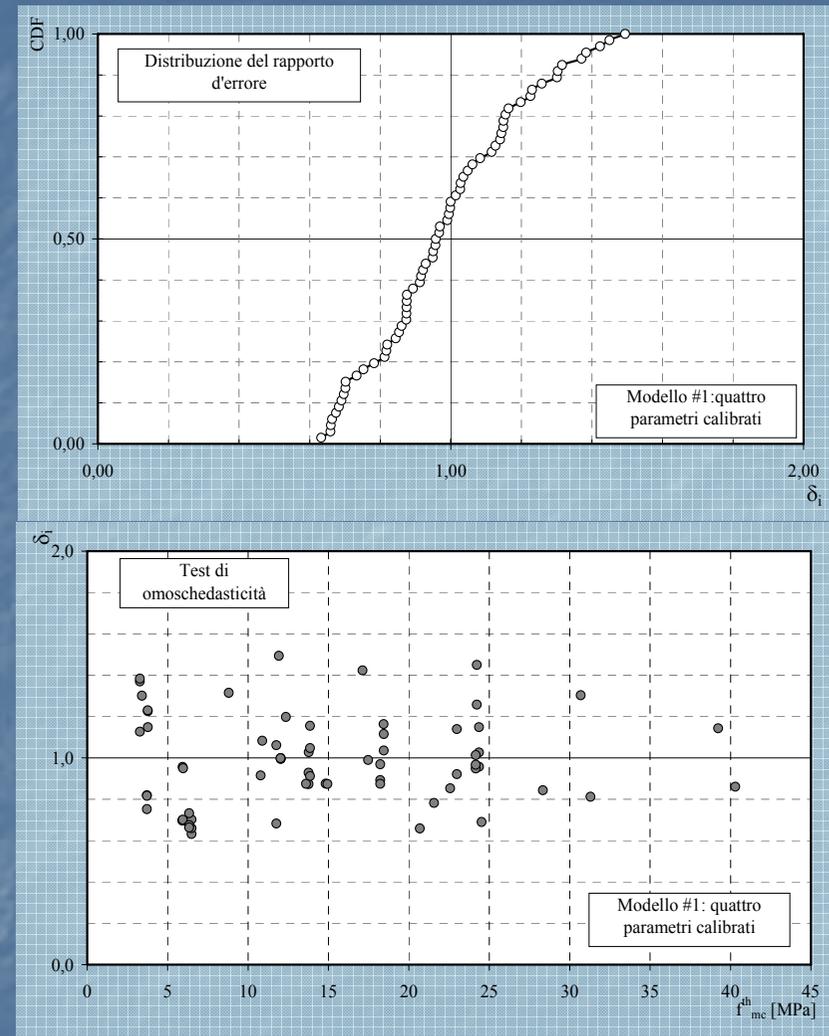
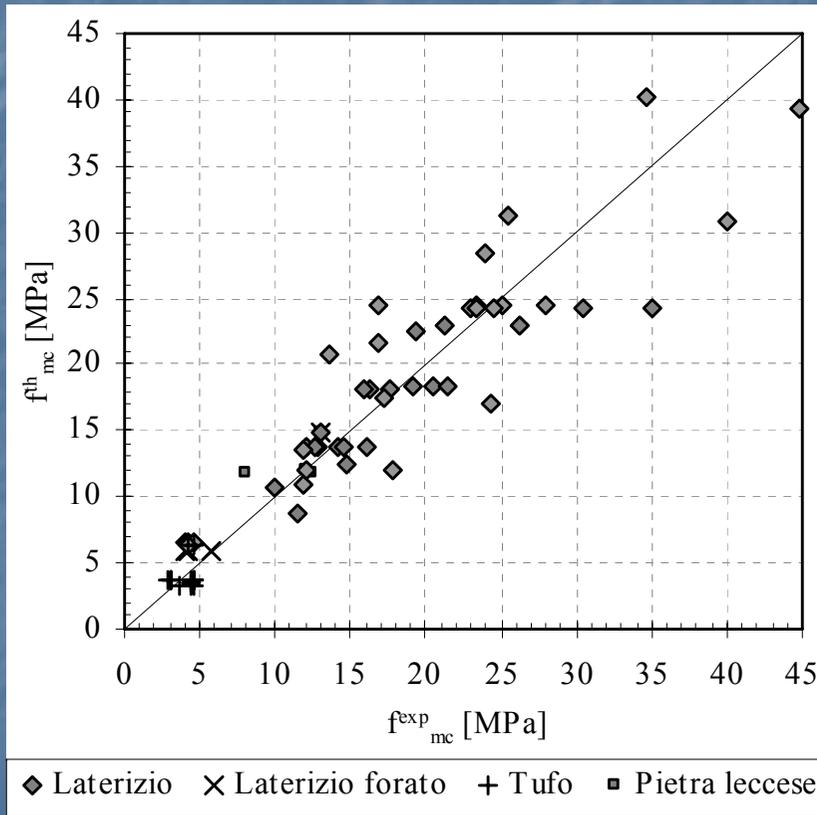
| # | n _k | K ₁ | K ₂ | K ₃ | K ₄ | S _r (X,K) | Δ _s | δ _m | σ _s | γ _s | E _m |
|----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 | 4 | 1,618 | 0,013 | 6,325 | 2,118 | 733,651 | 0,963 | 0,987 | 0,218 | 0,383 | 0,18 |
| 2 | | 1 | 0,416 | 2,064 | 0,507 | 894,48 | 1,004 | 0,999 | 0,229 | -0,101 | 0,19 |
| 3 | 3 | 0,627 | 1 | 0,963 | 0,353 | 944,374 | 1,004 | 0,968 | 0,223 | -0,212 | 0,18 |
| 4 | | 1,601 | 0,3 | 1 | 2,058 | 786,337 | 0,972 | 0,966 | 0,232 | 0,261 | 0,19 |
| 5 | | 1,439 | 0,094 | 3,849 | 1 | 799,371 | 0,986 | 0,984 | 0,218 | 0,084 | 0,18 |
| 6 | 2 | 1 | 1 | 0,542 | 0,541 | 948,139 | 0,98 | 0,94 | 0,23 | -0,19 | 0,19 |
| 7 | | 1 | 0,761 | 1 | 0,527 | 916,441 | 0,993 | 0,961 | 0,224 | -0,214 | 0,18 |
| 8 | | 1 | 0,613 | 1,34 | 1 | 1249,102 | 1,121 | 1,082 | 0,278 | -0,259 | 0,25 |
| 9 | | 0,591 | 1 | 1 | 0,341 | 944,463 | 1,005 | 0,972 | 0,223 | -0,211 | 0,18 |
| 10 | | 1,357 | 1 | -0,067 | 1 | 938,633 | 0,946 | 0,929 | 0,244 | -0,153 | 0,20 |
| 11 | | 1,406 | 0,503 | 1 | 1 | 844,204 | 0,975 | 0,95 | 0,224 | -0,086 | 0,18 |
| 12 | | 1 | 1 | 1 | 0,622 | 1355,945 | 0,901 | 0,866 | 0,212 | -0,331 | 0,20 |
| 13 | 1 | 1 | 0,744 | 1 | 1 | 1252,215 | 1,113 | 1,068 | 0,281 | -0,248 | 0,25 |
| 14 | | 1 | 1 | 0,498 | 1 | 1273,359 | 1,07 | 1,044 | 0,289 | -0,23 | 0,25 |
| 15 | | 0,953 | 1 | 1 | 1 | 1781,571 | 0,984 | 0,978 | 0,291 | -0,077 | 0,25 |





Formulazioni alternative

#2
$$f_{mc}^{th} = f_m \cdot \left[1 + 0,416 \left(\frac{g_m}{1000} \right)^{2,064} \left(\frac{f_{l,eff}}{f_m} \right)^{0,507} \right]$$

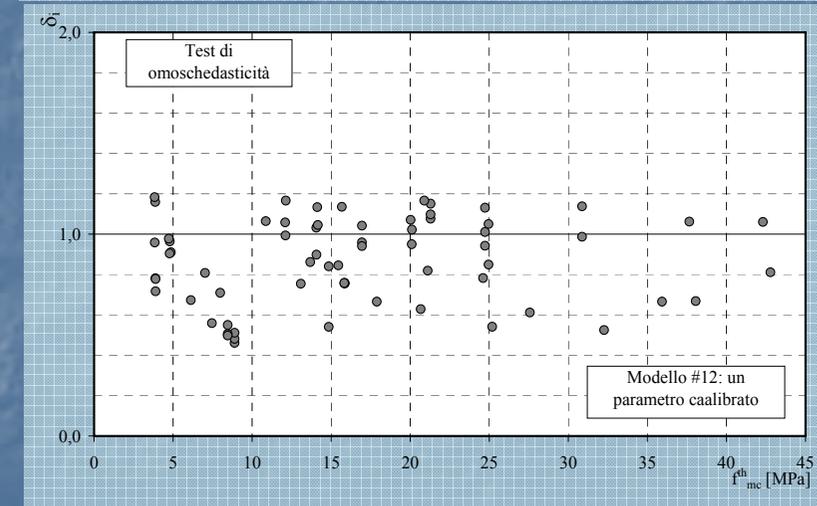
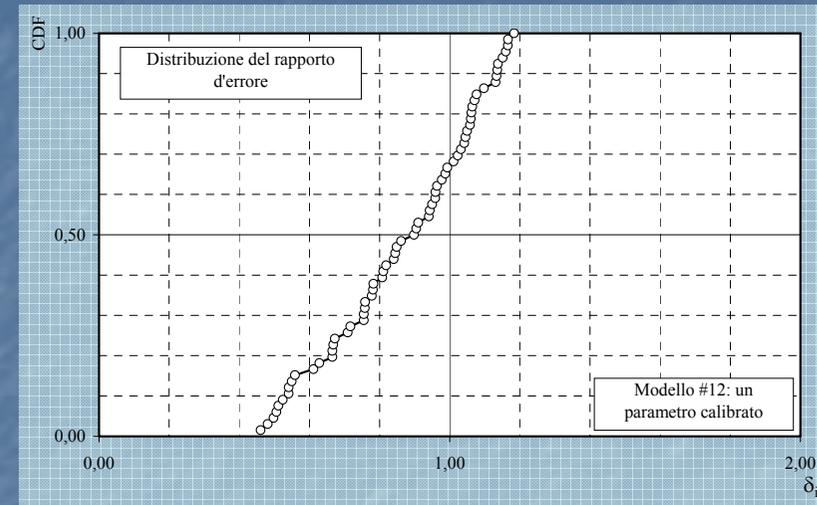
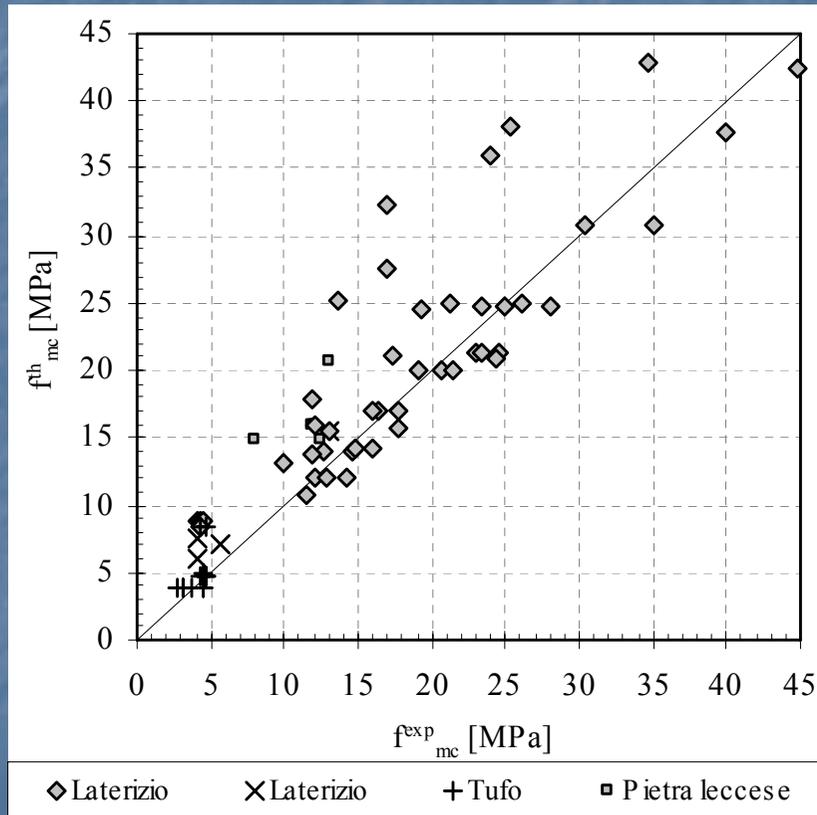




Formulazioni alternative

#12

$$f_{mc}^{th} = f_m \left[1 + \left(\frac{g_m}{1000} \right) \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_m} \right)^{0,662} \right]$$





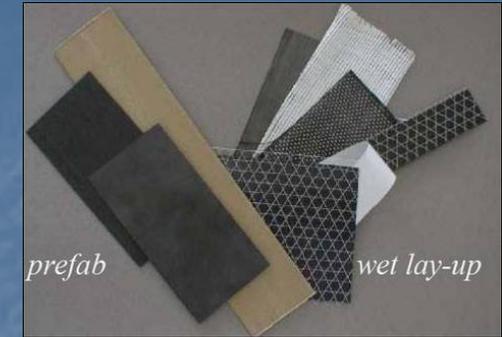
Obiettivi raggiunti

- 1 – Organizzazione dei dati sperimentali reperibili in letteratura;
- 2 – Confronti e validazione dei modelli attualmente reperibili;
- 3 – Proposta di modelli alternativi.





Struttura della tesi



Introduzione ed obiettivi

Materiali: muratura, FRP

Tipologie di intervento

Stato dell'arte

Stato dell'arte

Sperimentazione

Database e confronti

Confronti e analisi

Analisi modelli esistenti

Modelli alternativi

Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO



Considerazioni conclusive e sviluppi futuri

La forte variabilità dei materiali rende difficoltoso ricavare modelli di resistenza “unificati” per tutte le tipologie di murature.

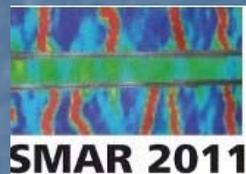
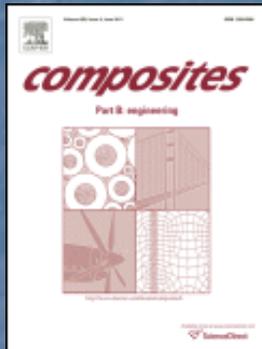
Relativamente all’aderenza, sembra possibile pervenire ad una formulazione alternativa in complessivo accordo ai risultati sperimentali, fermo restando l’influenza di spessore e geometria dei corsi di malta.

Relativamente al confinamento si è pervenuta ad una formulazione alternativa a quella proposta nel DT CNR 200, la definizione di una legge tensioni-deformazioni è particolarmente difficoltosa per la forte variabilità delle grandezze in gioco, anche per tipologie di murature simili tra loro.





Publicazioni:



| Anno | Articolo su rivista |
|------|--|
| 2011 | FAELLA C, MARTINELLI E, CAMORANI G., AIELLO M. A, NIGRO E (2011). Masonry Columns Confined by Composite Materials: Design Formulae. COMPOSITES. PART B, ENGINEERING, vol. 42; p. 705-716, ISSN: 1359-8368, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.02.024 |
| 2011 | FAELLA C, MARTINELLI E, CAMORANI G., AIELLO M. A, NIGRO E (2011). Masonry Columns Confined by Composite Materials: Experimental Investigation. COMPOSITES. PART B, ENGINEERING, vol. 42; p. 692-704, ISSN: 1359-8368, doi: 10.1016/j.compositesb.2011.02.001 |
| Anno | Proceedings (atti dei congressi) |
| 2011 | FAELLA C, MARTINELLI E, CAMORANI G., PERRI F (2011). Experimental investigation on the behavior of composite laminates bonded on masonry. In: SMAR 2011 First Middle East Conference on Smart Monitoring, Assesment and Rehabilitation of Civil Structures |
| 2010 | FAELLA C, MARTINELLI E, CAMORANI G., PERRI F, PACIELLO S (2010). Adhesion between composite materials and masonry structures: From experimental investigation to numerical modeling. In: 14 European Conference on Earthquake Engineering Ohrid 2010. Ohrid, Macedonia |
| 2009 | FAELLA C, MARTINELLI E, PACIELLO S, CAMORANI G., AIELLO M. A, MICELLI F, VALENTE L, NIGRO E (2009). Validazione sperimentale di modelli teorici per il confinamento di colonne murarie con materiali compositi. In: ANIDIS 2009 XIII - Atti del Convegno. Bologna, 28 giugno - 2 luglio 2009 |



FINE
Grazie per l'attenzione