



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:

Tutors:

IX Ciclo – N,S

Gianpietro Camorani

Carmine Lima
Francesco Perri

X Ciclo – N,S,

Antonio Caggiano
Carmen Sguazzo

XI Ciclo – N,S,

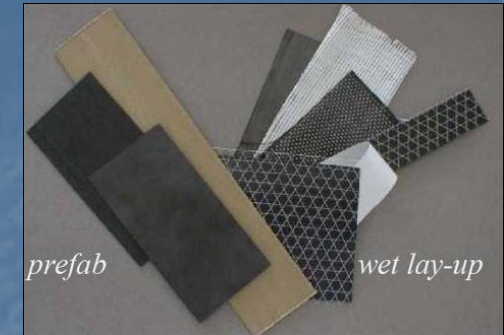
Giuseppe Di Palma

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 EDITRICE ESCULAPIO

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



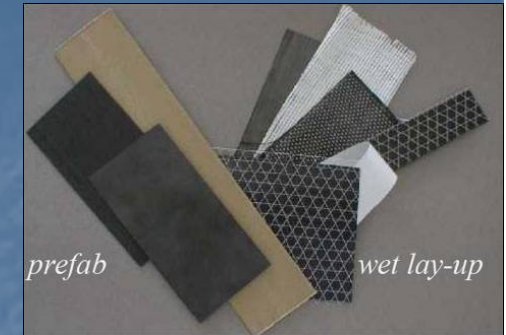
Confinamento



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

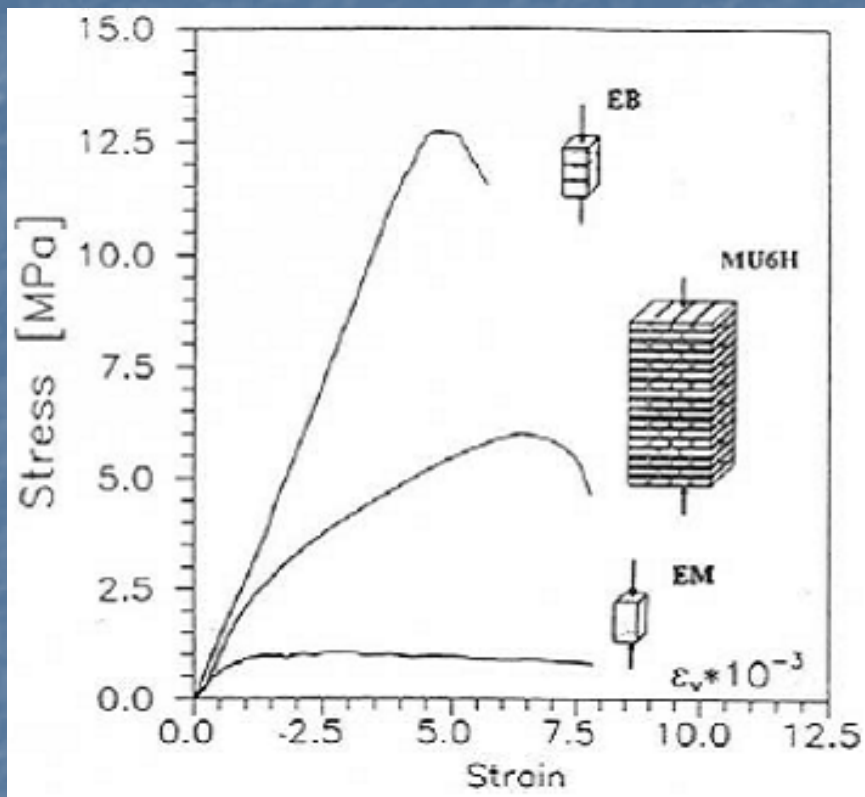
Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO

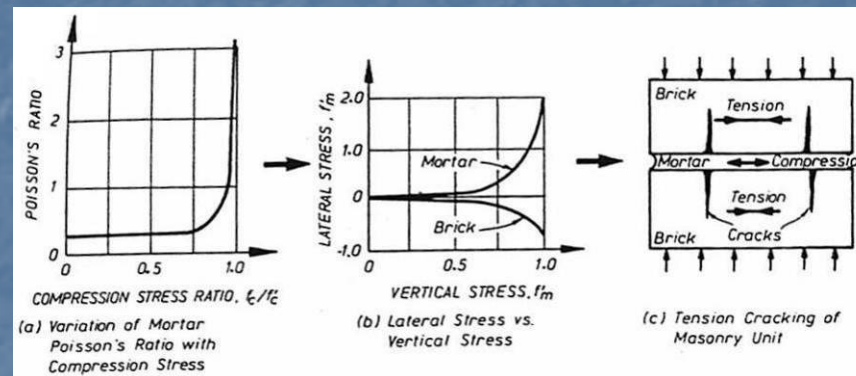


Materiali: muratura



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	-

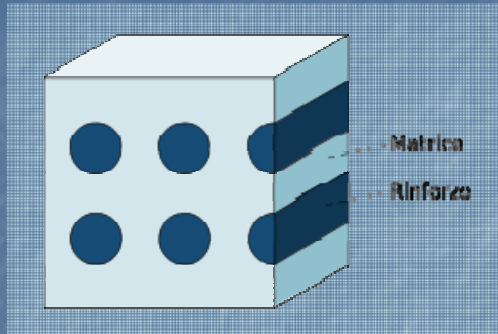
EC 6

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

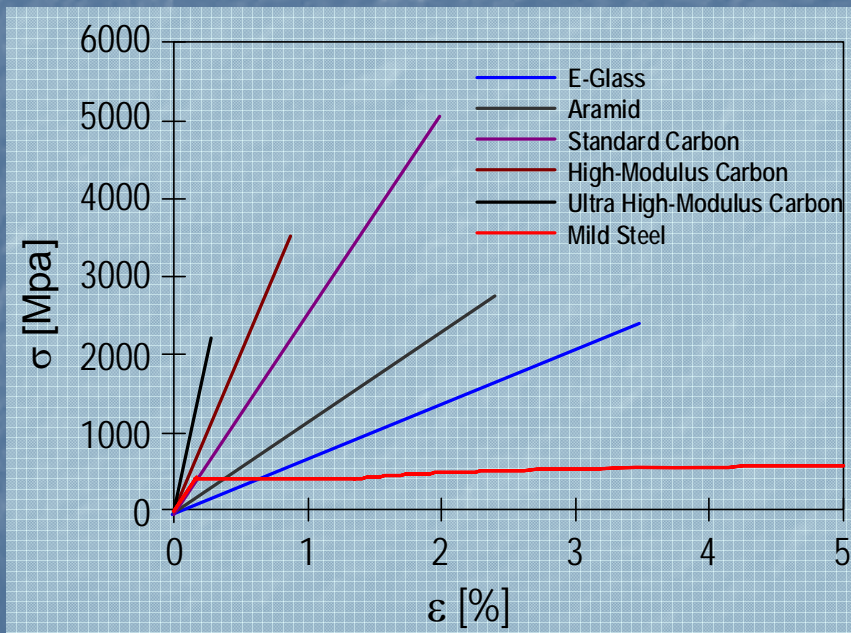
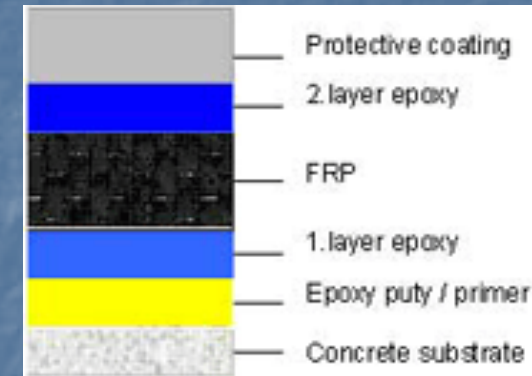




Materiali: FRP

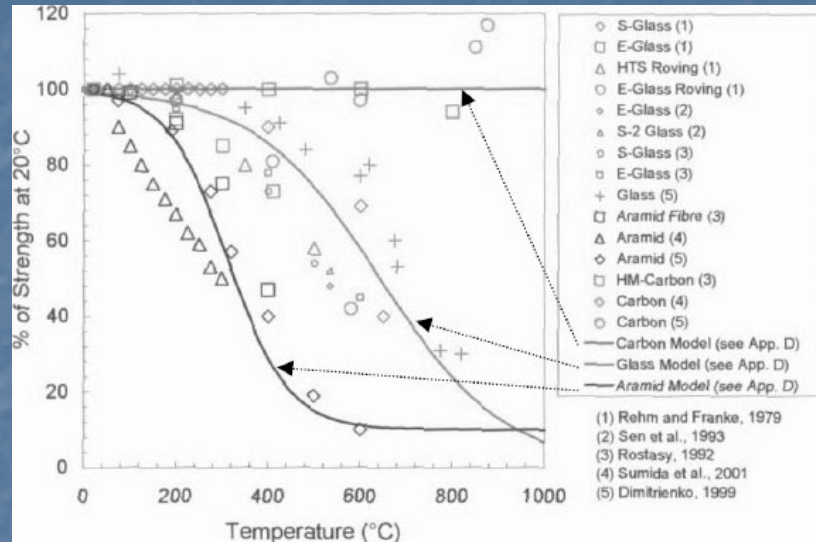


Sistema wet-lay up





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

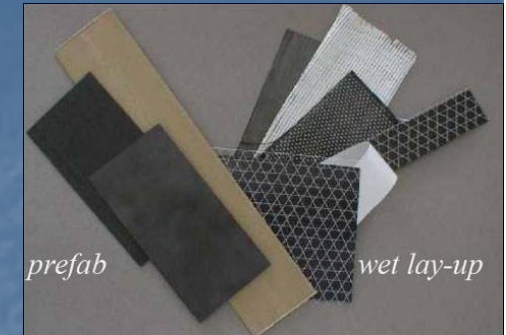
Modalità di carico	Tipo di fibra/resina	η_l
Persistente (viscosità e rilassamento)	Vetro/Epossidica	0.30
	Arammidica/Epossidica	0.50
	Carbonio/Epossidica	0.80
Ciclico (fatica)	tutte	

	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

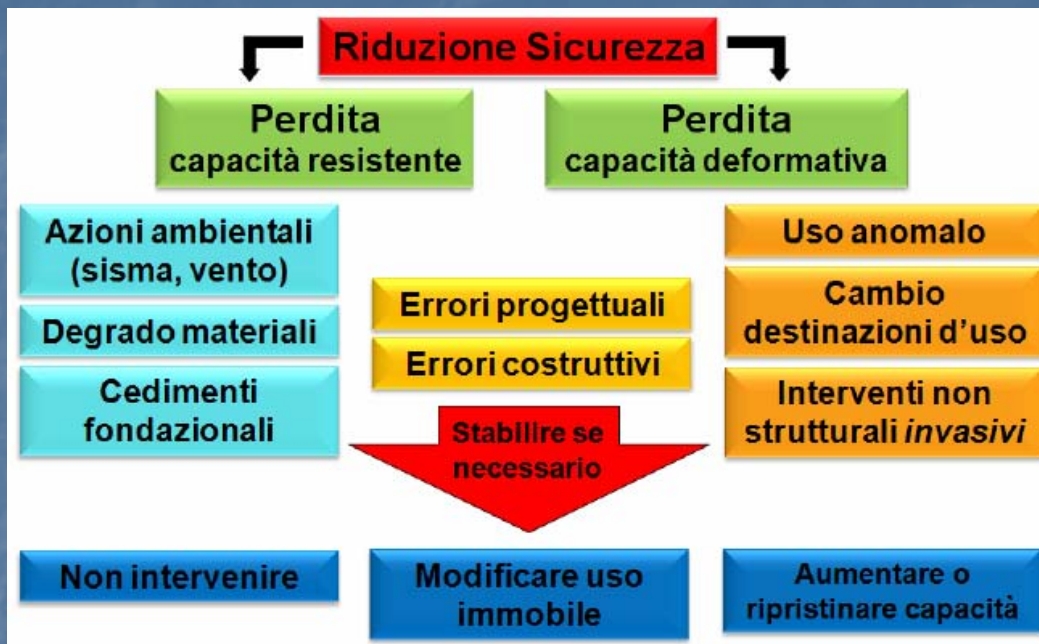
Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO



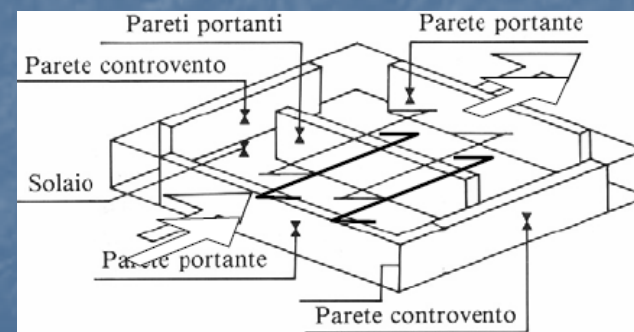
Criteri generali di intervento



S. Francisco



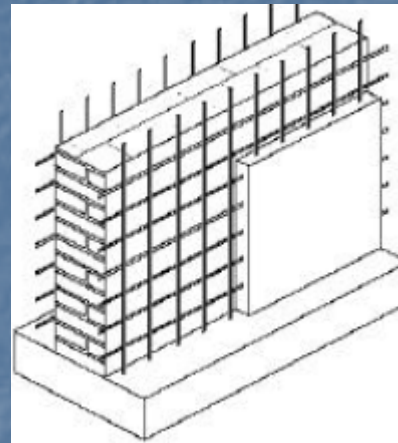
Pont du Gard, Provenza





Interventi tradizionali

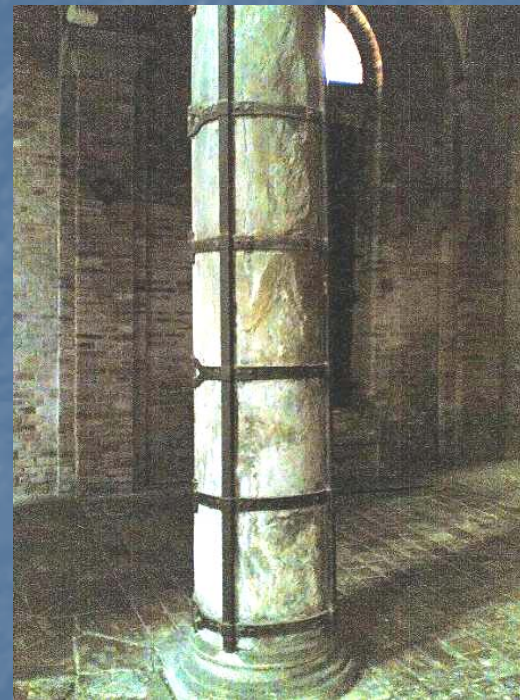
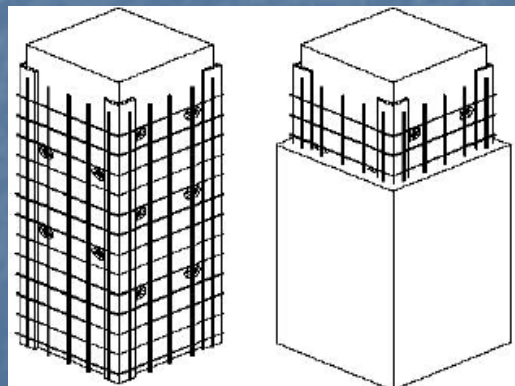
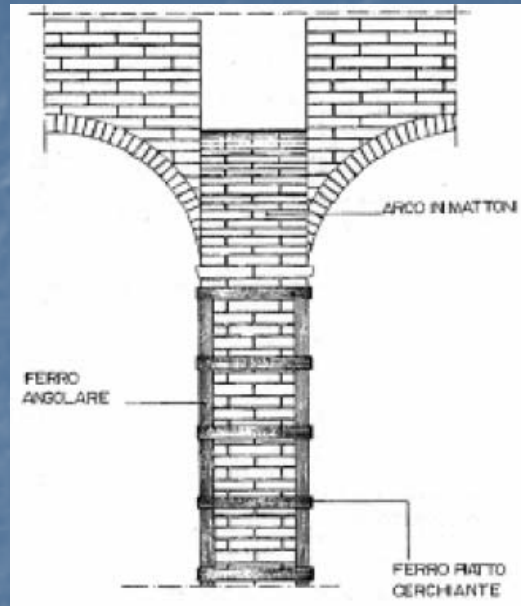
Resistenza a taglio





Interventi tradizionali

Confinamento e cerchiatura



Cesena, Centro Storico





Interventi con FRP

Resistenza a taglio





Interventi con FRP

Confinamento e cerchiatura

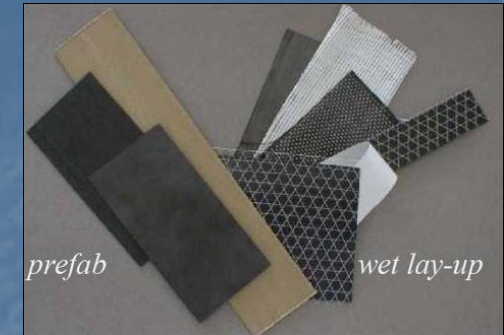


cerchiatura esterna con nastri monodirezionali in carbonio





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



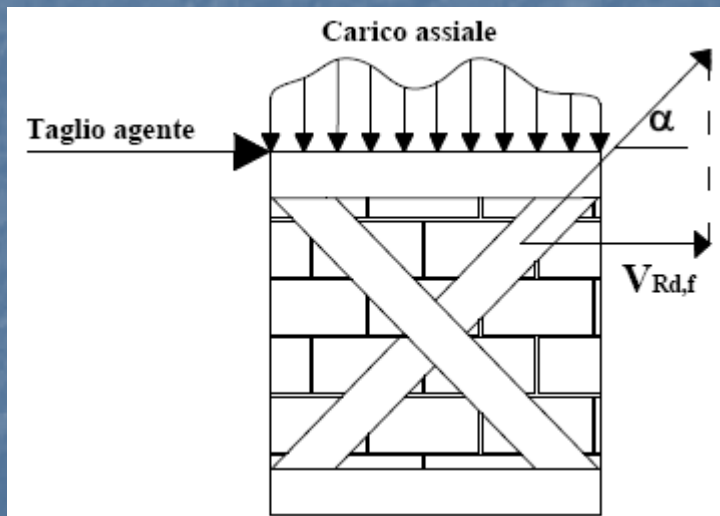
La perdita di aderenza col supporto abbatte sensibilmente il valore di V_{frp}

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

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

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

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



Stato dell'arte – Massima forza di aderenza

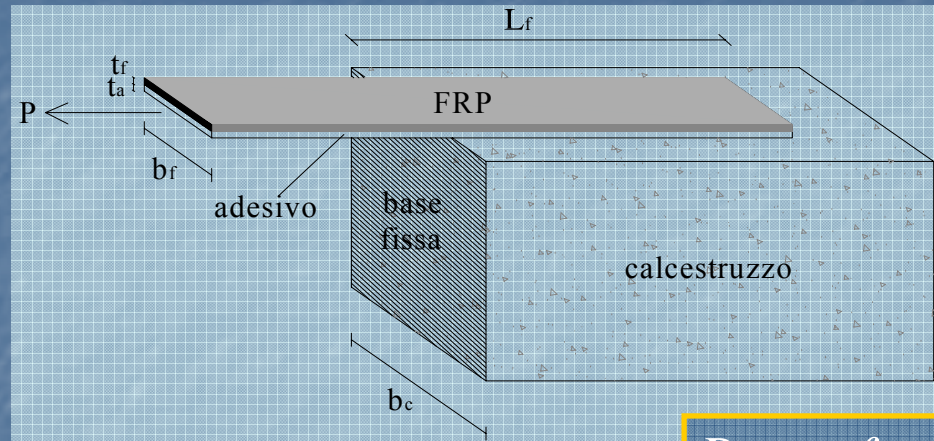


$$f_f = \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \Gamma_{Fk}}{t_f}}$$

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

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

con $L_f < L_{eff}$



Energia di frattura

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

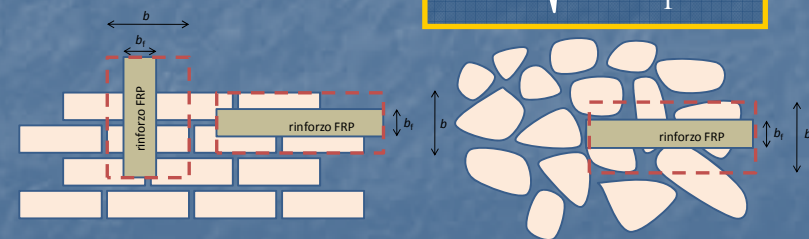
$$\Gamma_{Fk} = c_1 \sqrt{f_{bm} f_{btm}}$$

$c_1 = 0,015$

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

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

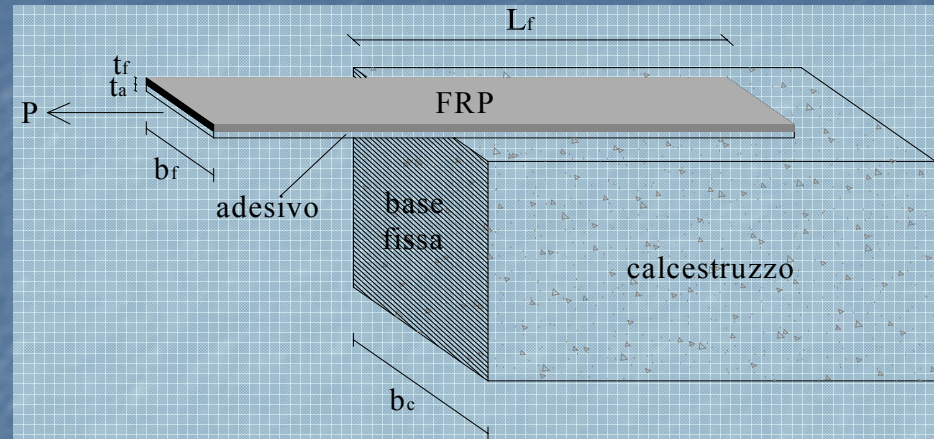
CNR DT 200 (revisione 2011)



Stato dell'arte – Massima forza di aderenza

Van Germert et al. (1997)

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



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)

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

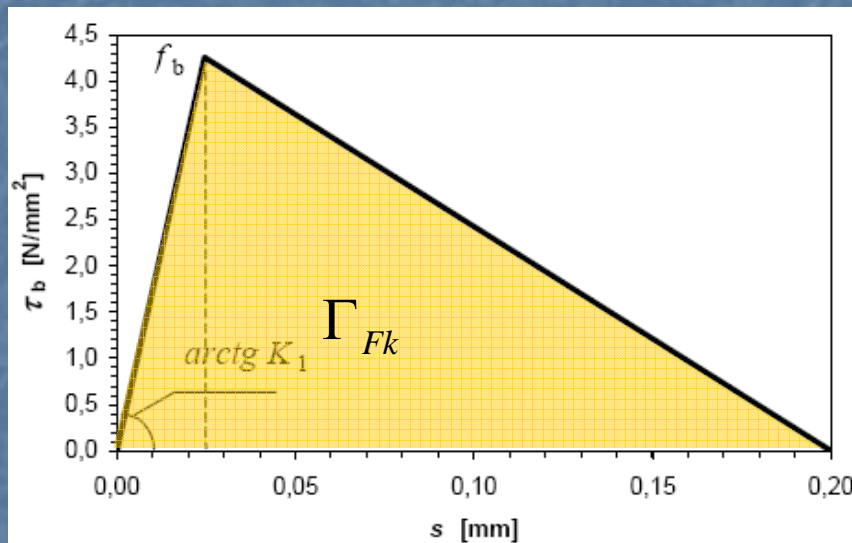
$$P_u = \tau_u \cdot L_{eff} \cdot b_f;$$

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



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)

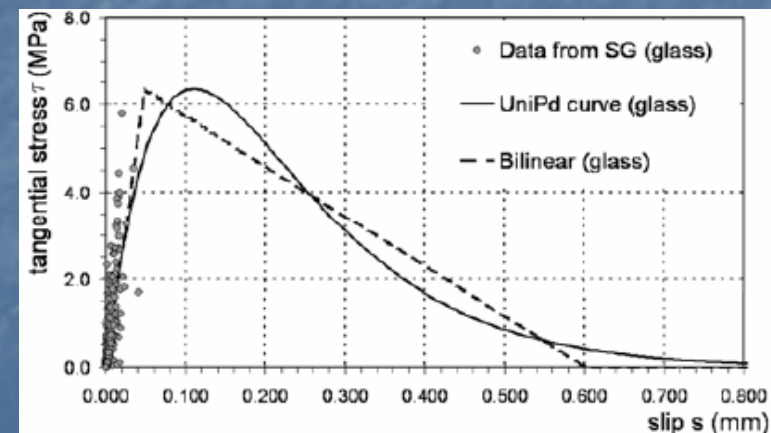
$$K_1 = \frac{c_1}{\frac{t_a}{G_a} + \frac{t_c}{G_c}}$$

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

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

f.i.b. 14 (2002)

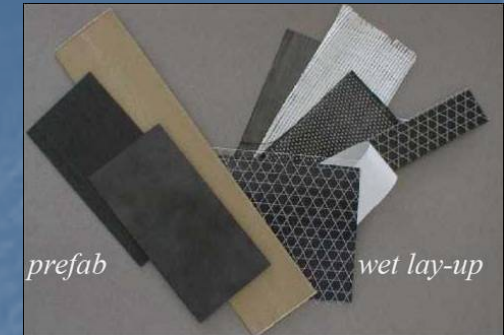
$$s_{fo} = c_3 = \frac{c_1^2}{c_4}$$



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

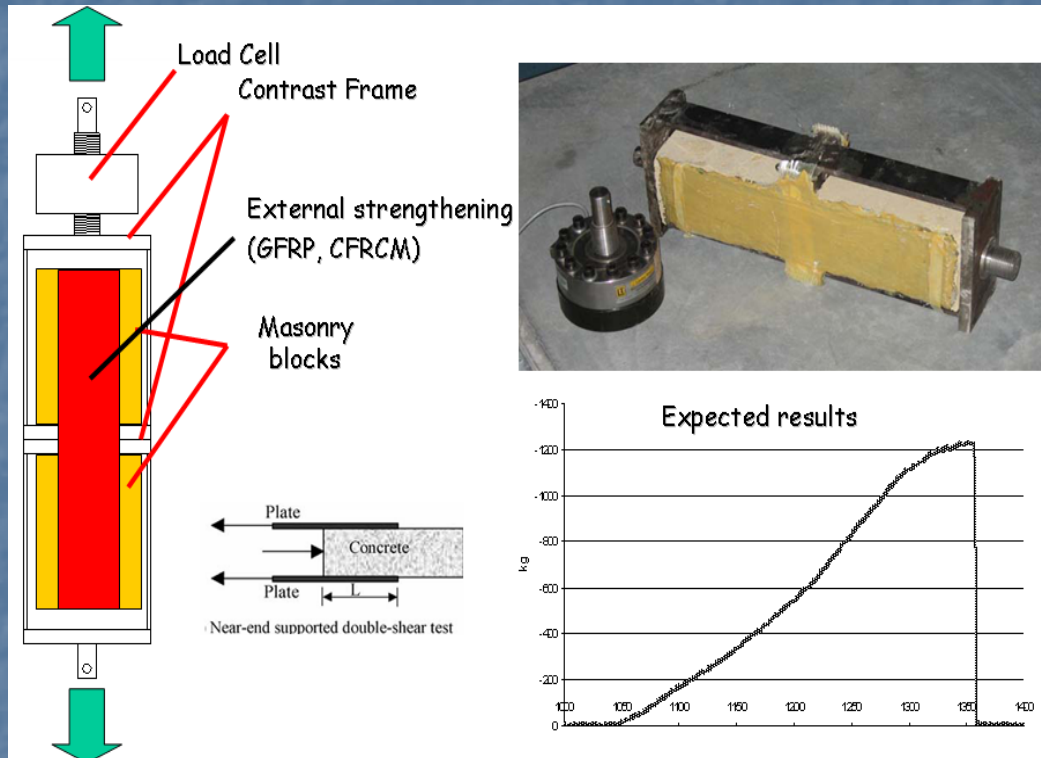
Modelli alternativi

Conclusioni

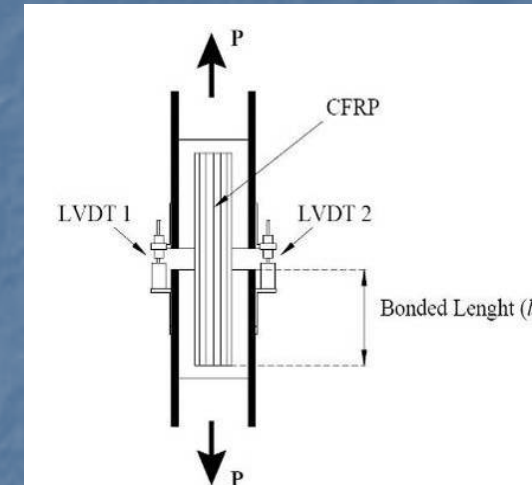
ADERENZA

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



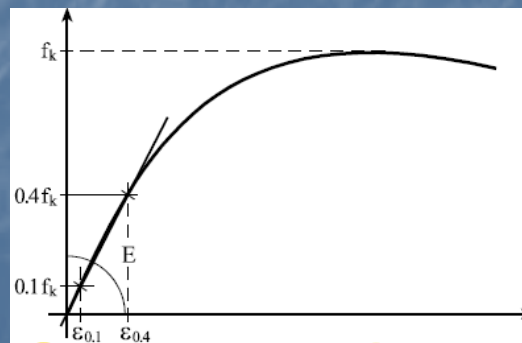


Sperimentazione – Murature di base

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



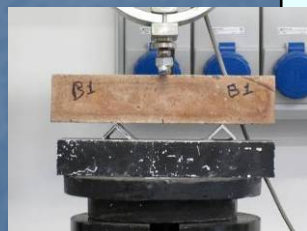


Sperimentazione – Murature di base

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



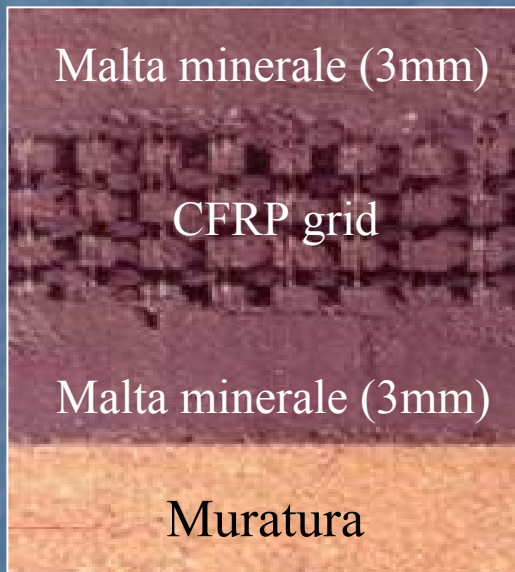
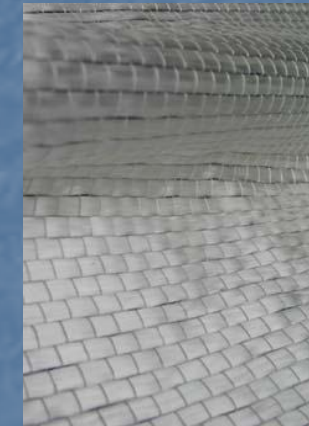
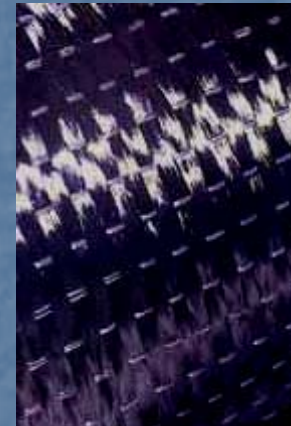


Sperimentazione – Sistemi di rinforzo

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 ®



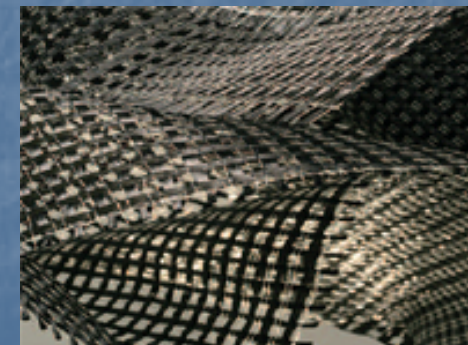
Carbon-Fiber Reinforced
Cement Matrix

Ruredil S,p,A, - Italy

X-Mesh C10/M25 ®

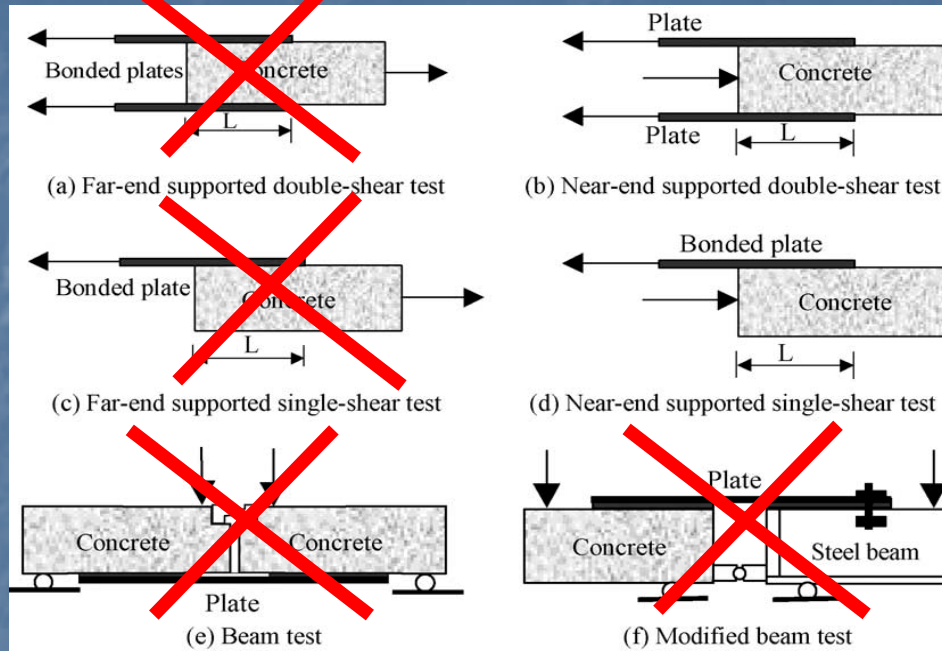
Fiber density [g/m ²]	168
Nominal thickness [mm]	0.047
Strength (for a width of 1 cm) [N/cm]	1600
Young modulus [GPa]	240

MapeWrap G-UNI-AX ®

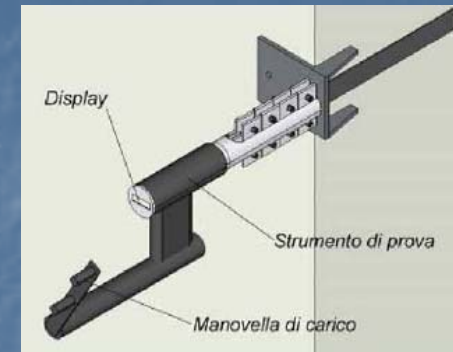




Sperimentazione – Setup di prova



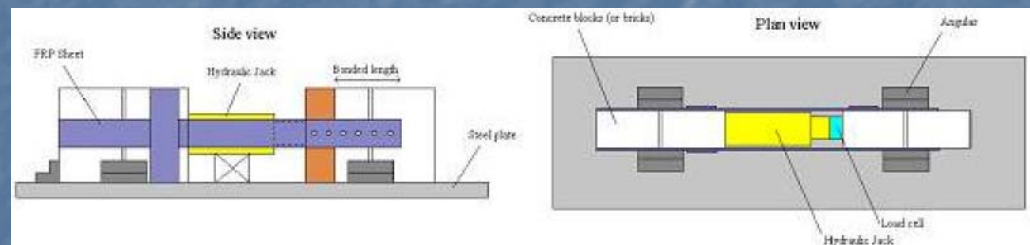
Yao et al, (2005)



Savoia et al. (2008)



Olivito et al. (2007)

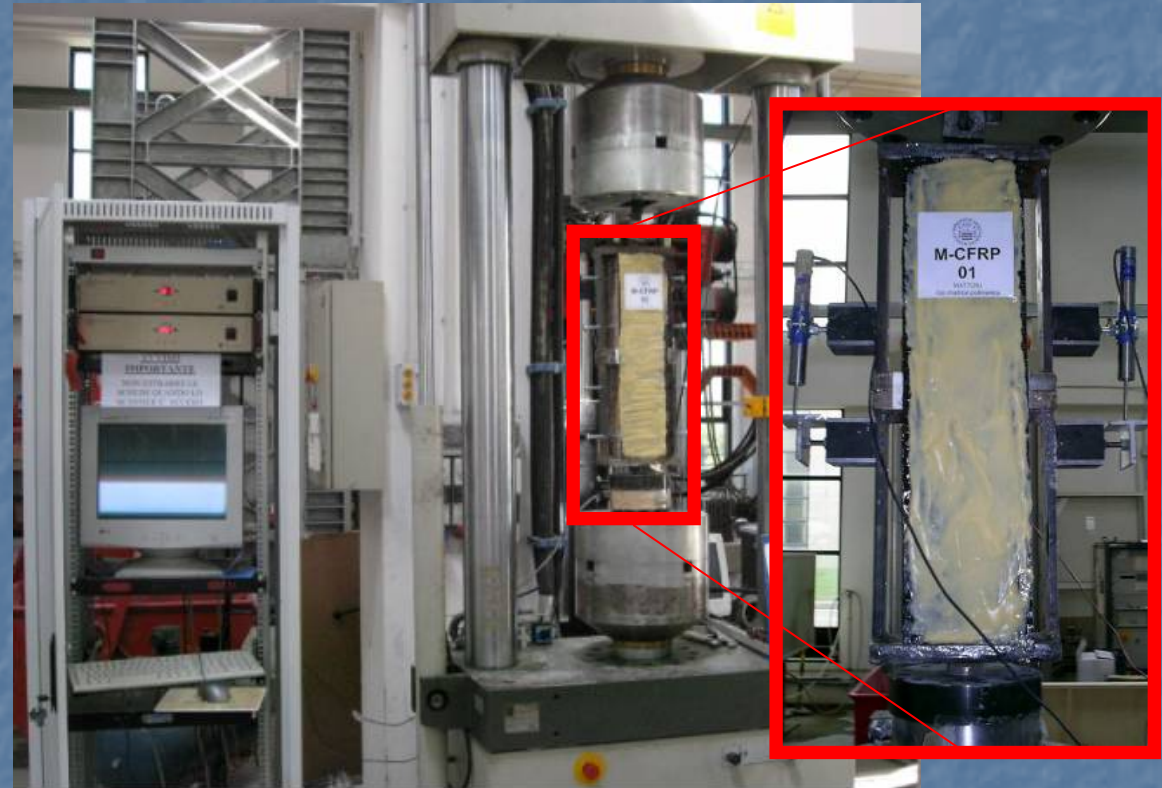
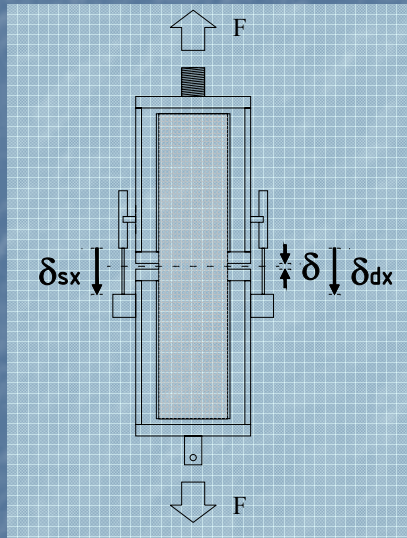


Casareto et al. (2003)





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

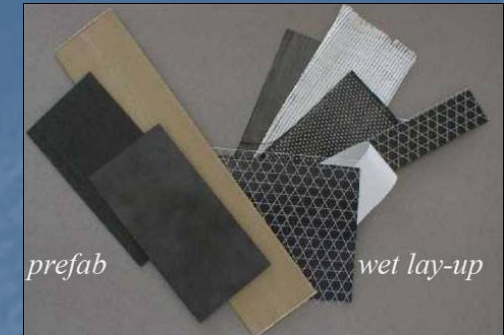


"R"





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

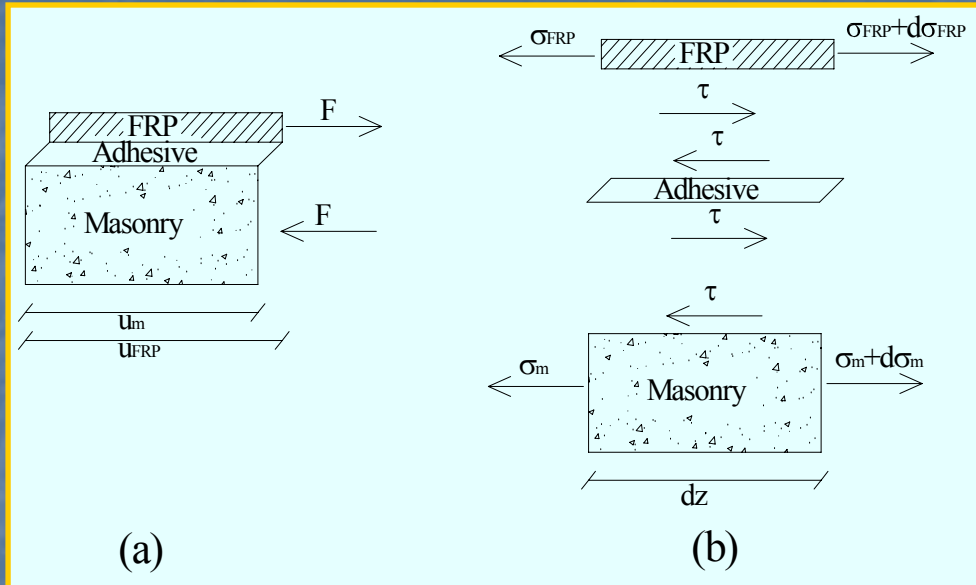
Modelli alternativi

Conclusioni

ADERENZA

CONFINAMENTO

Identificazione legame aderenza



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

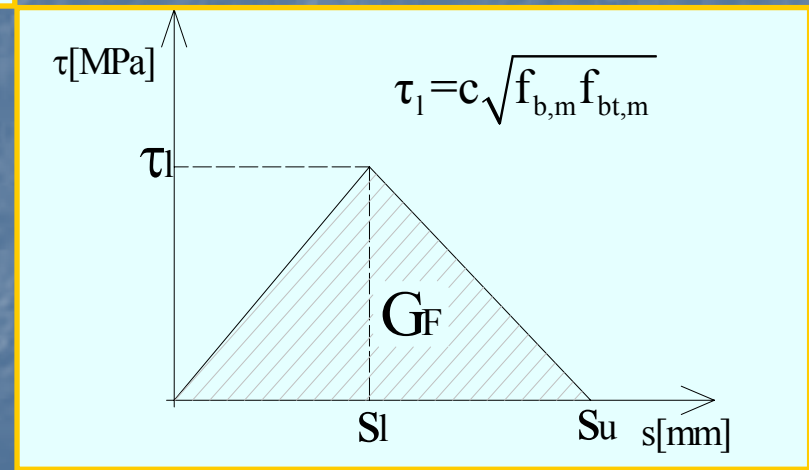
$$\sigma_f = E_f \frac{du_f}{dz}$$

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

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

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

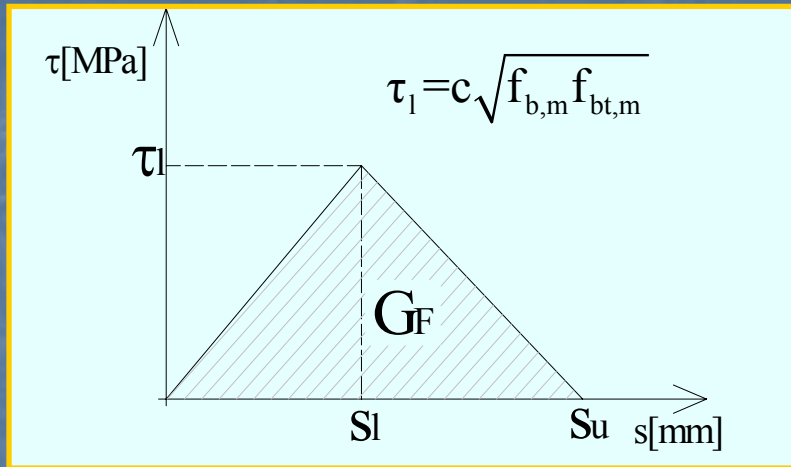
Tensioni normali

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





Identificazione legame aderenza

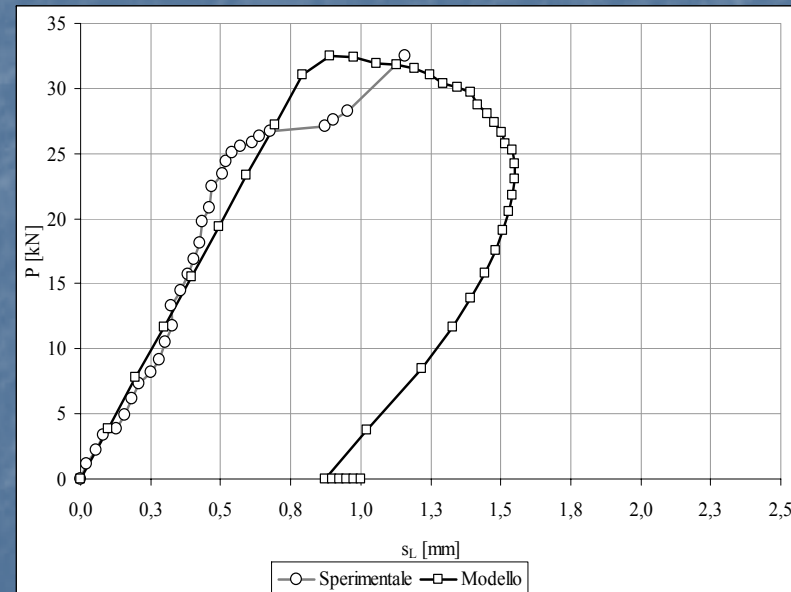
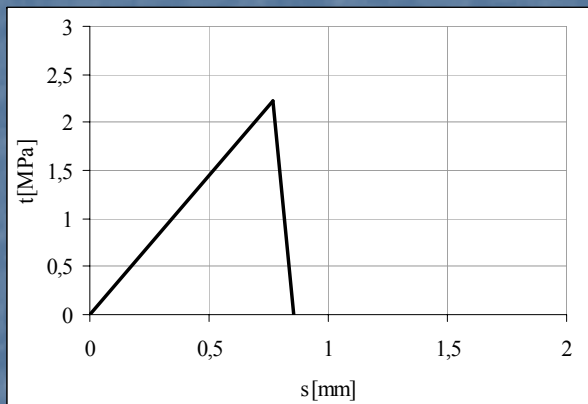


$$(\bar{c}, \bar{s}_l, \bar{s}_u) = \underset{(c, s_l, s_u)}{\operatorname{argmin}} \sum_{i=1}^n [P_i^{\text{exp}} - P_i^{\text{th}}(c, s_l, s_u, E_f, t_f)]^2$$

Vincoli:

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

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

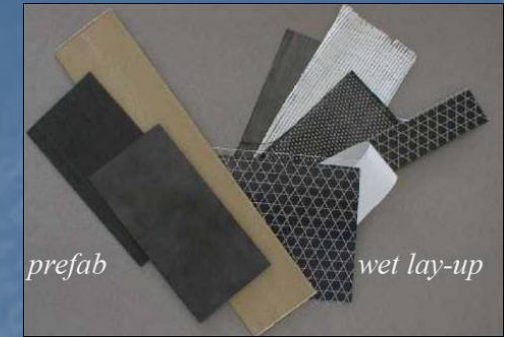


Applicazione: pietra calcarea con C-FRP





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

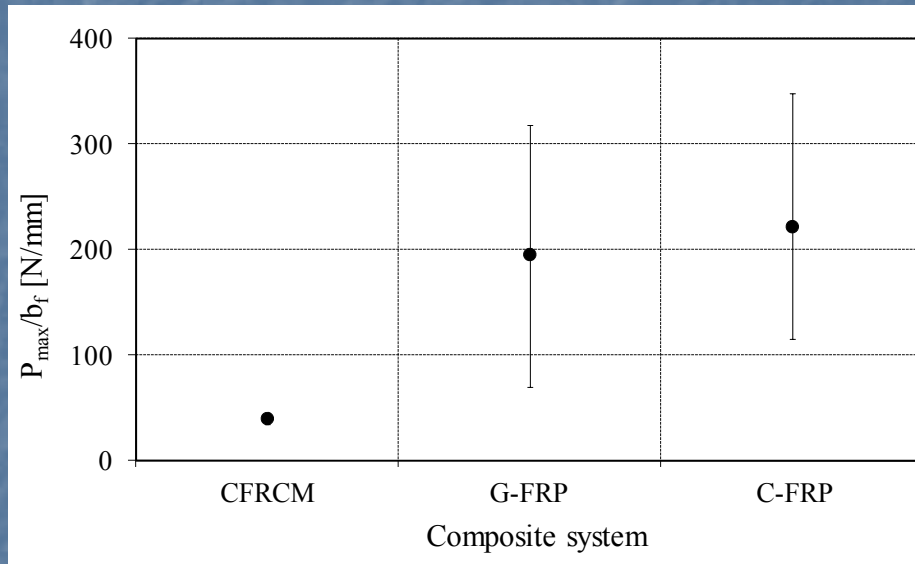
Conclusioni

ADERENZA

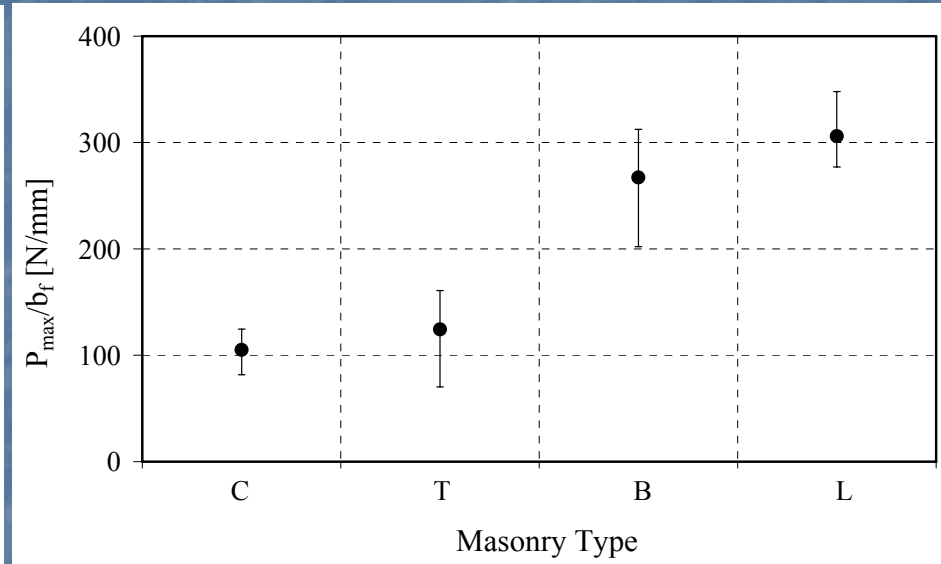
CONFINAMENTO

Confronti preliminari

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



Influenza del sistema di rinforzo



Influenza del tipo di muratura





Confronti DT CNR 200

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



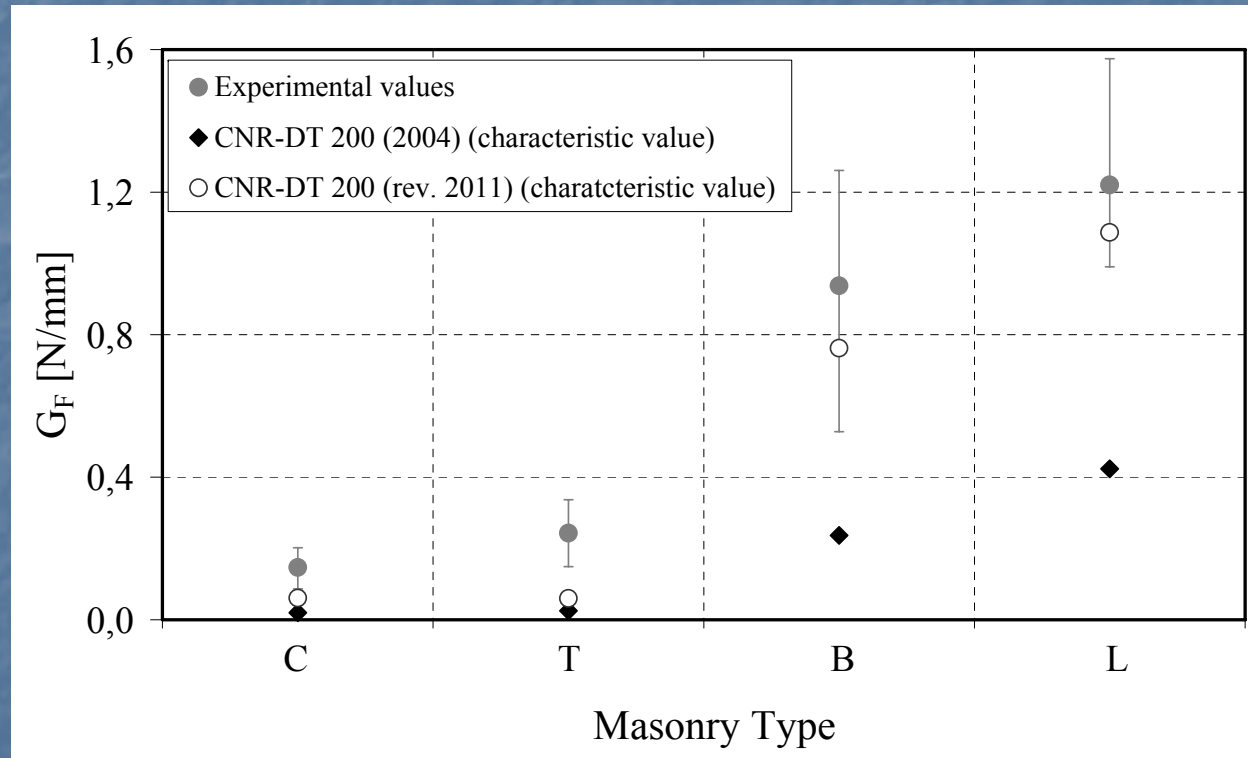
$$G_{F,i}^{\text{exp}} = \frac{(P_{\max} / b_f)^2}{2E_f t_f}$$

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

CNR DT 200 (2004)

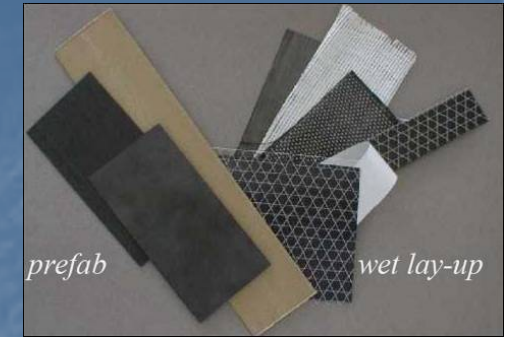
$$\Gamma_{Fd} = k_b \cdot k_G \frac{f_{bm} \cdot f_{btm}}{f_{bm} + f_{btm}}$$

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

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



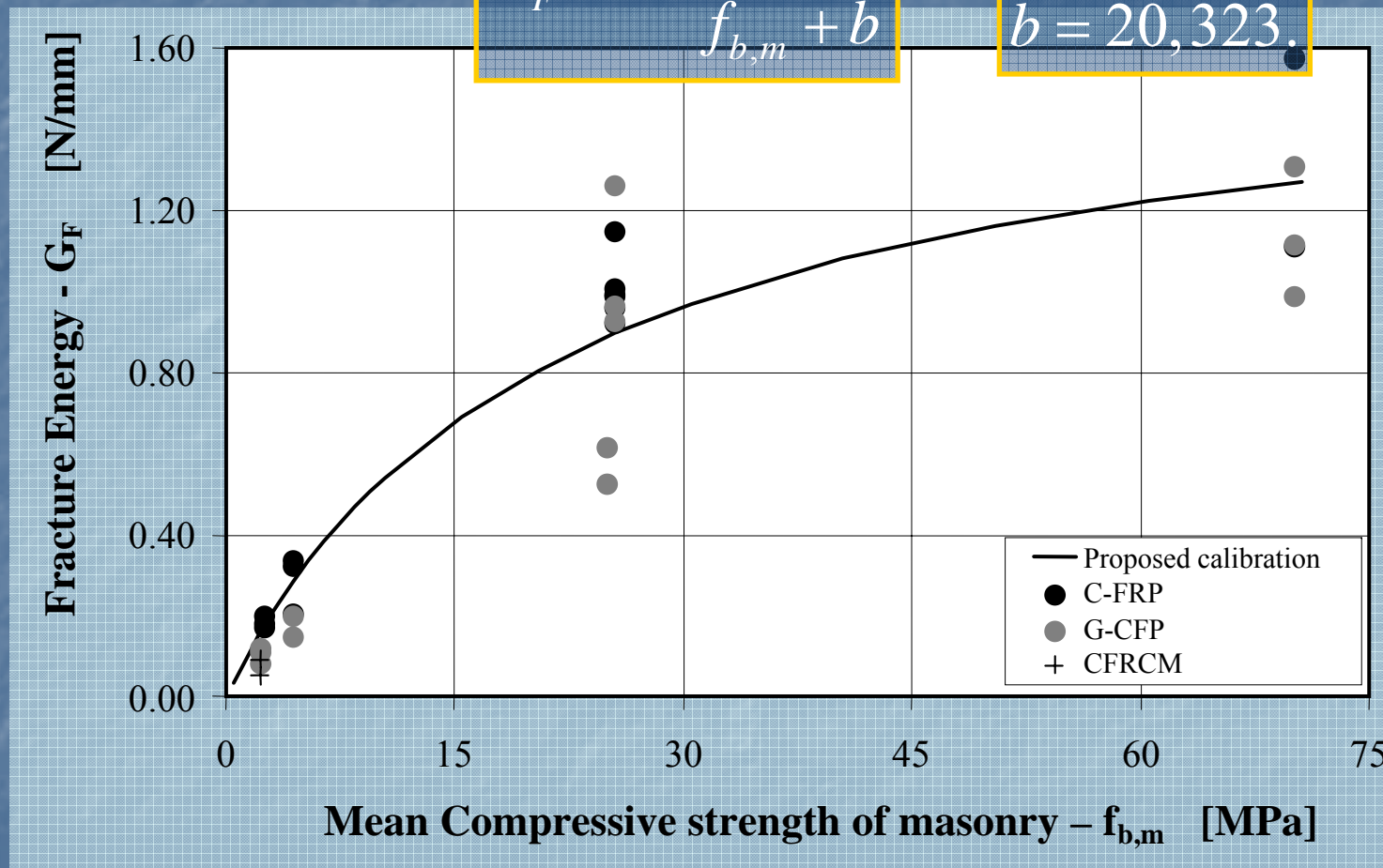


Proposta alternativa per l'energia di frattura

$$G_F = a \cdot \frac{f_{b,m}}{f_{b,m} + b}$$

$$a = 1,623;$$

$$b = 20,323.$$





Obiettivi raggiunti

1 – Incremento dei dati sperimentali disponibili in letteratura.

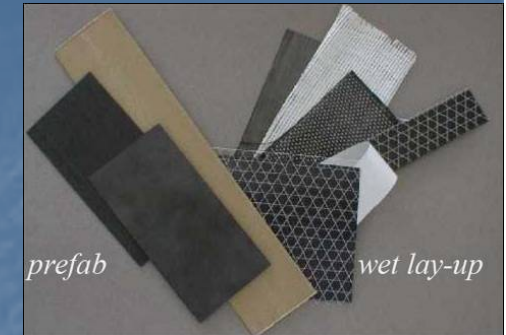
2 – Identificazione preliminare del legame di interfaccia con metodi di calcolo “poveri”.

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

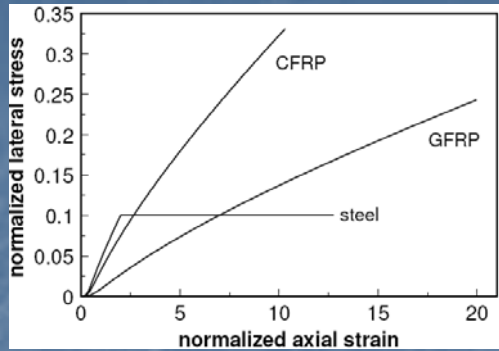
Conclusioni

ADERENZA

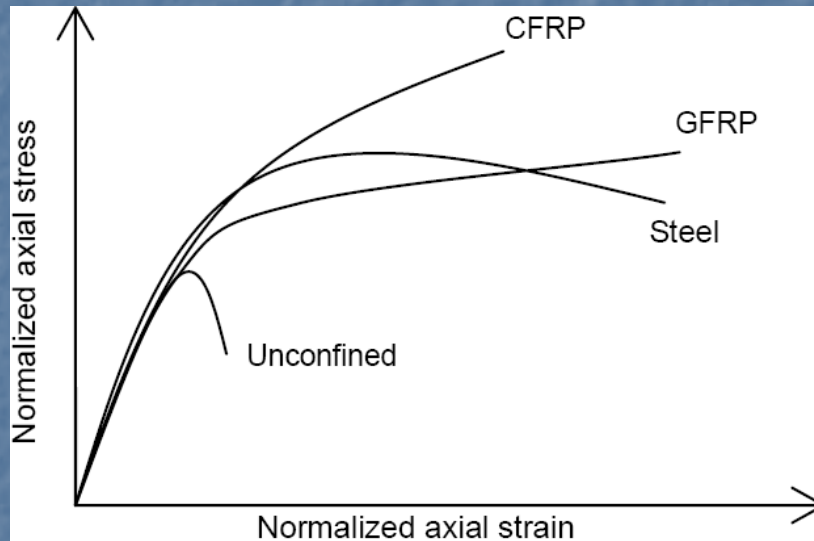
CONFINAMENTO



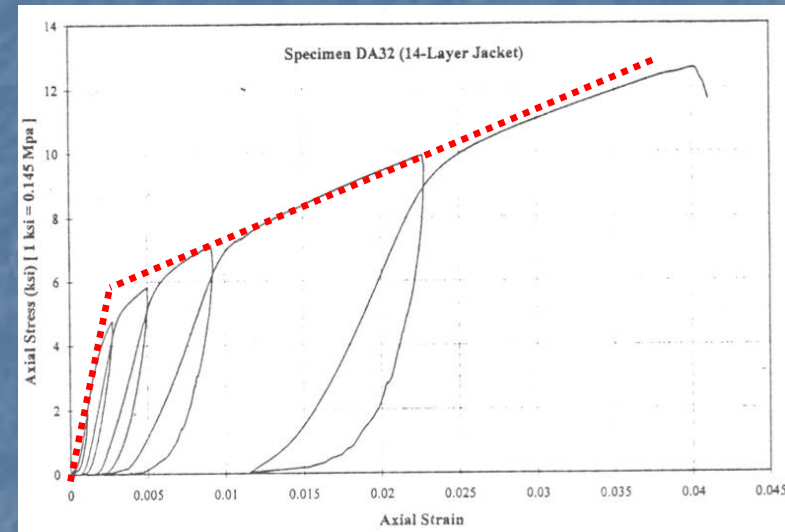
Stato dell'arte



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



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



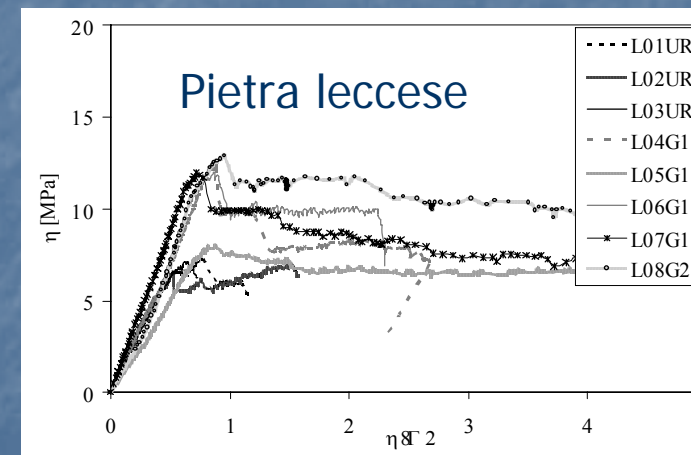
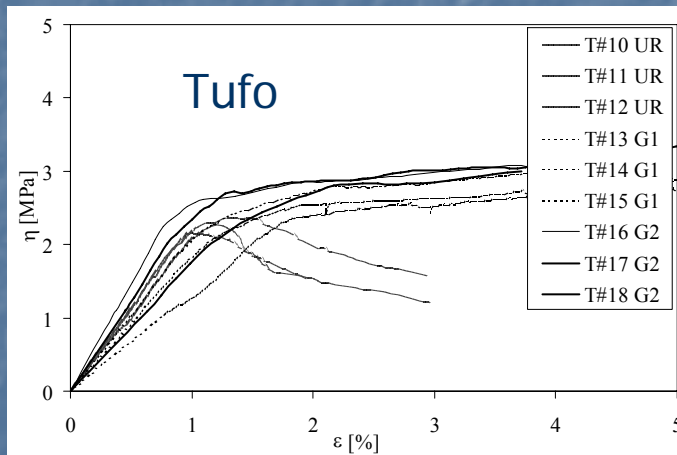
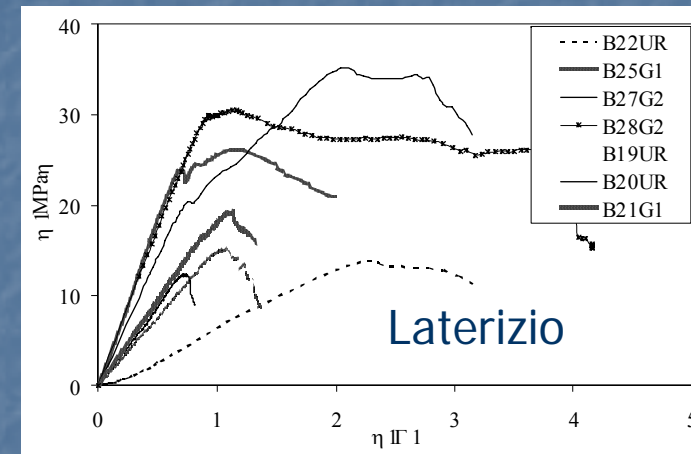
Curva sperimentale per un cilindro di calcestruzzo fasciato con FRP (Shahawy et al. 2000)





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



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

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

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

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

$$k' = \frac{g_m}{1250}$$

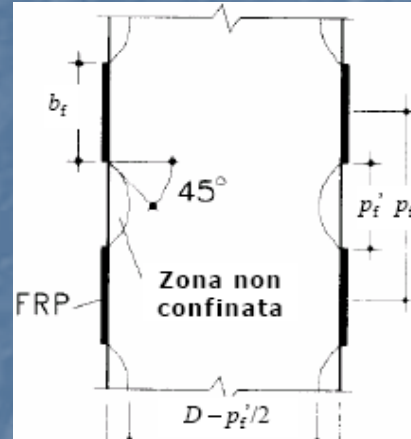
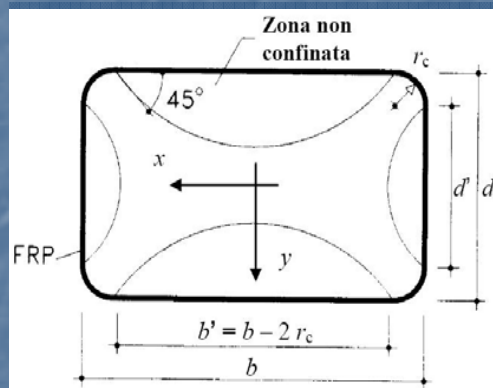
Monti
(2007)

$$\varepsilon_f = 0,004$$

Pressione di confinamento

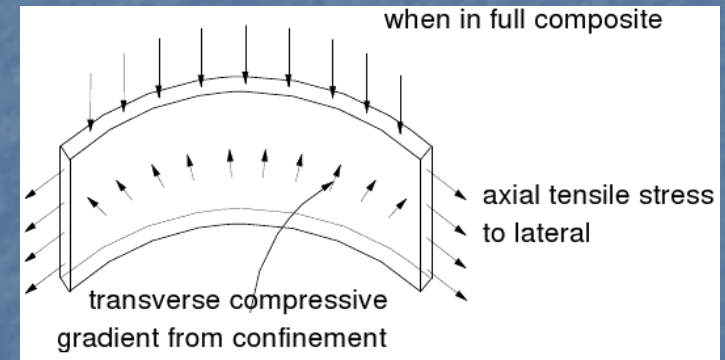
$$f_l = \frac{1}{2} \cdot \rho_f E_f \cdot \varepsilon_{f,rid}$$

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



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

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





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)

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

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

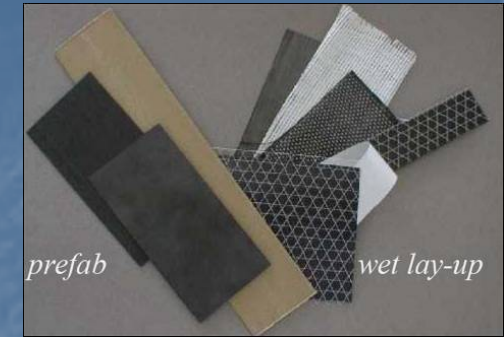
Di Ludovico et al. (2010)

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





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

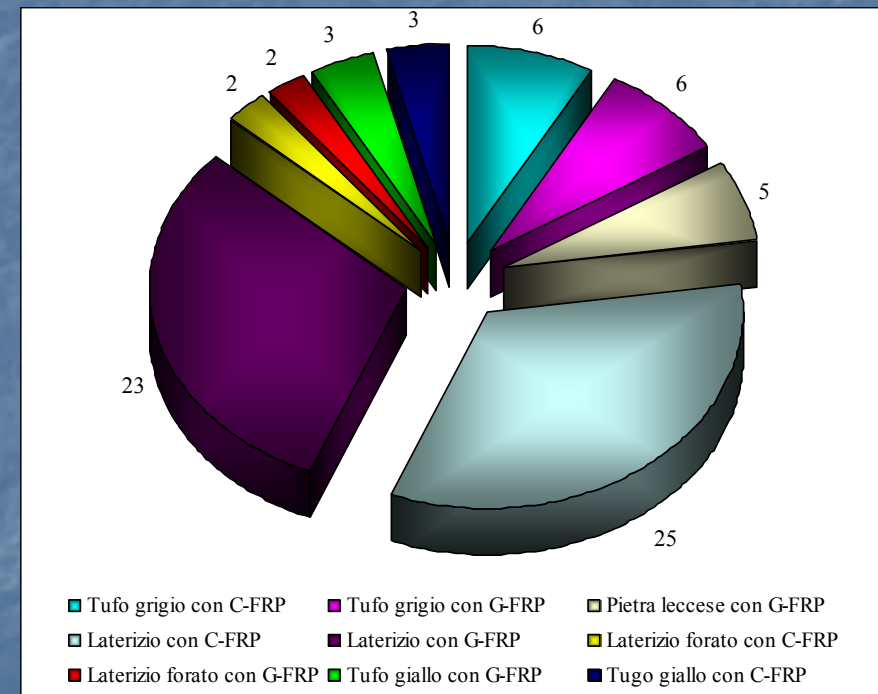
Theofanis et al.(2005): 42 prove; laterizio confinato con C-FRP e G-FRP.

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.

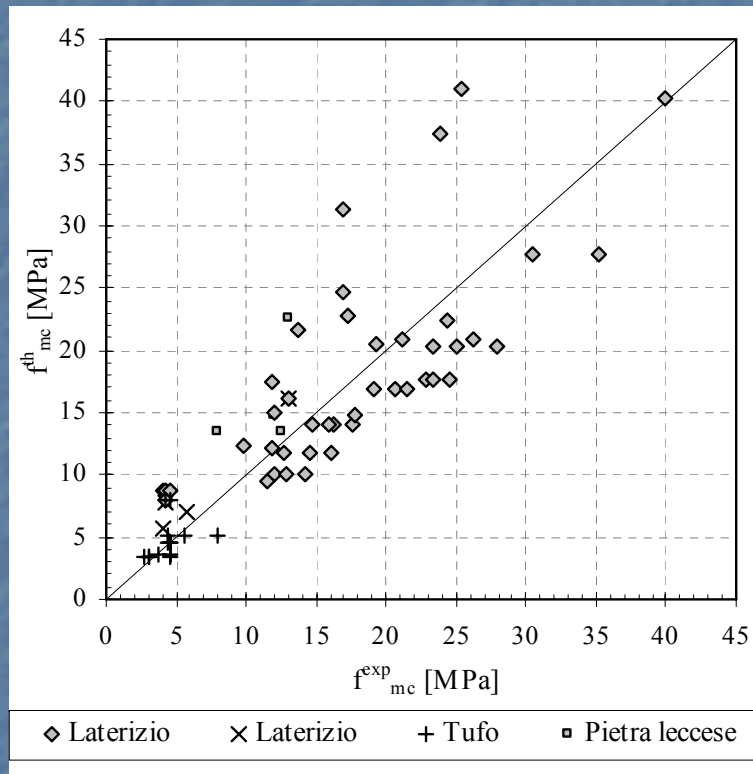
Alecci V. et al. (2009): 9 prove; laterizio confinato con C-FRP.



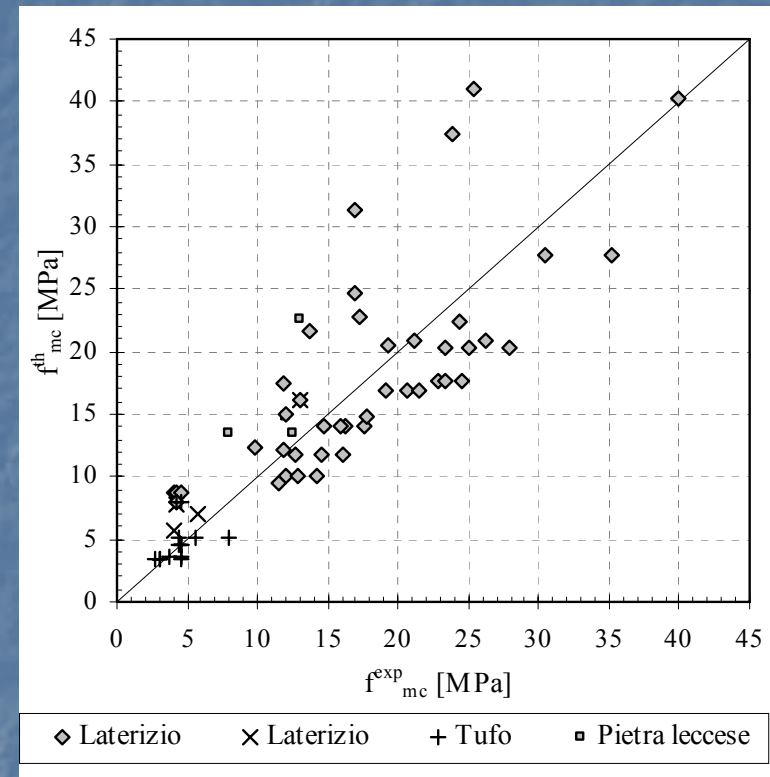


Confronti

Kreivacas e Triantafillou (2005)



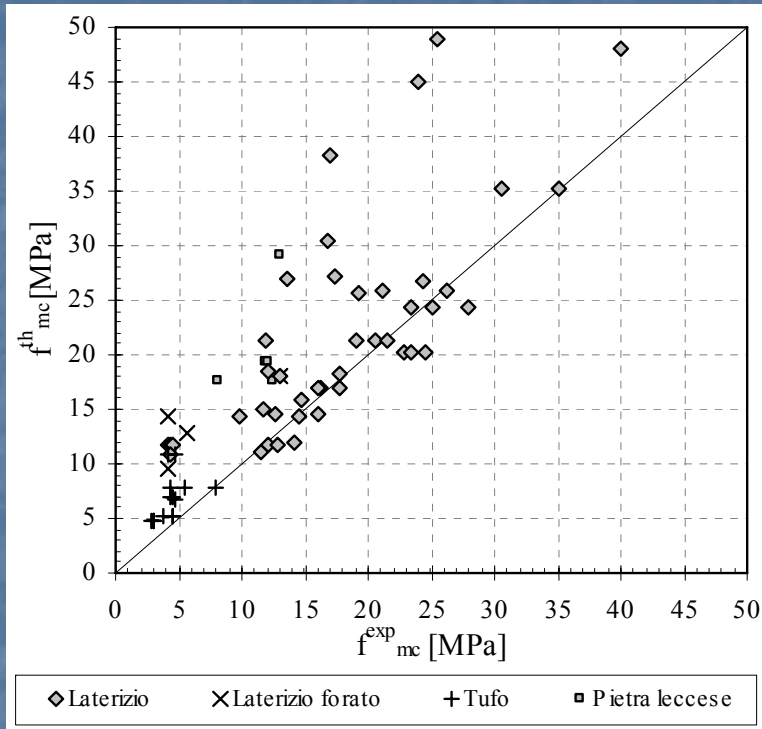
DT CNR 200 (2004)



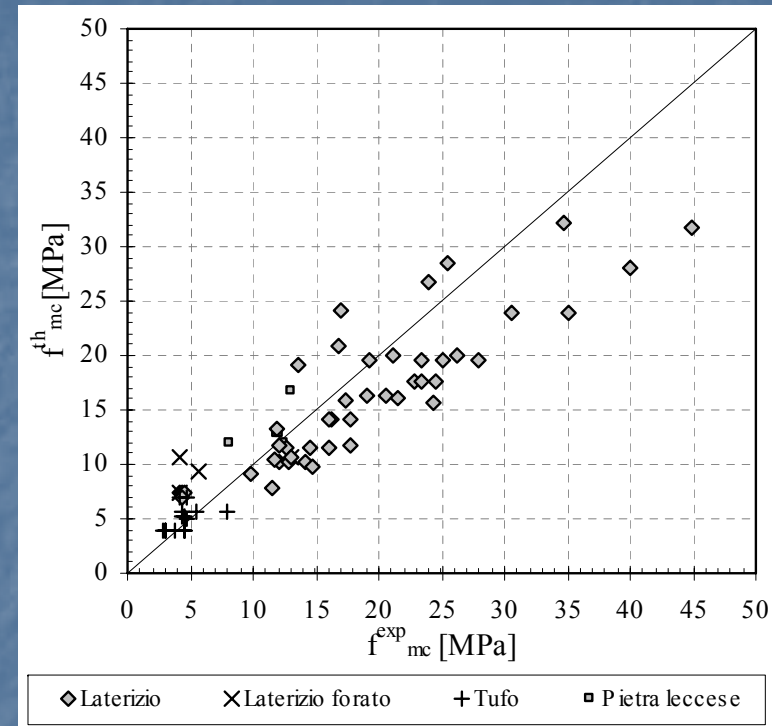


Confronti

Corradi et al. (2007)



Di Ludovico et al. (2010)

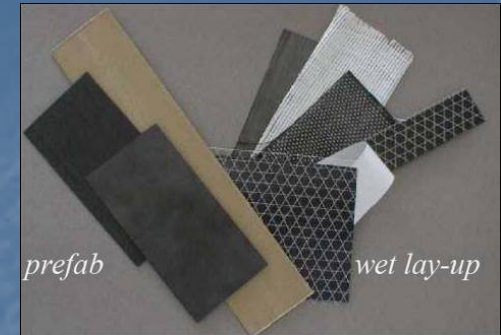


Modello	Δ_d	δ_m	σ_d	Asimmetria	S_n	E_m
C.N.R. 200/2004 [7.47]	0,985	0,962	0,283	-0,072	1801,247	24,345
Corradi et al.[7.20]	0,717	0,752	0,251	0,008	4134,045	28,419
Krevaikas e Triantafillou [7.15]	1,116	1,169	0,396	-0,055	2104,290	35,893
Di Ludovico et al.[7.18]	1,078	1,038	0,298	-0,206	1346,599	25,774





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

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

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

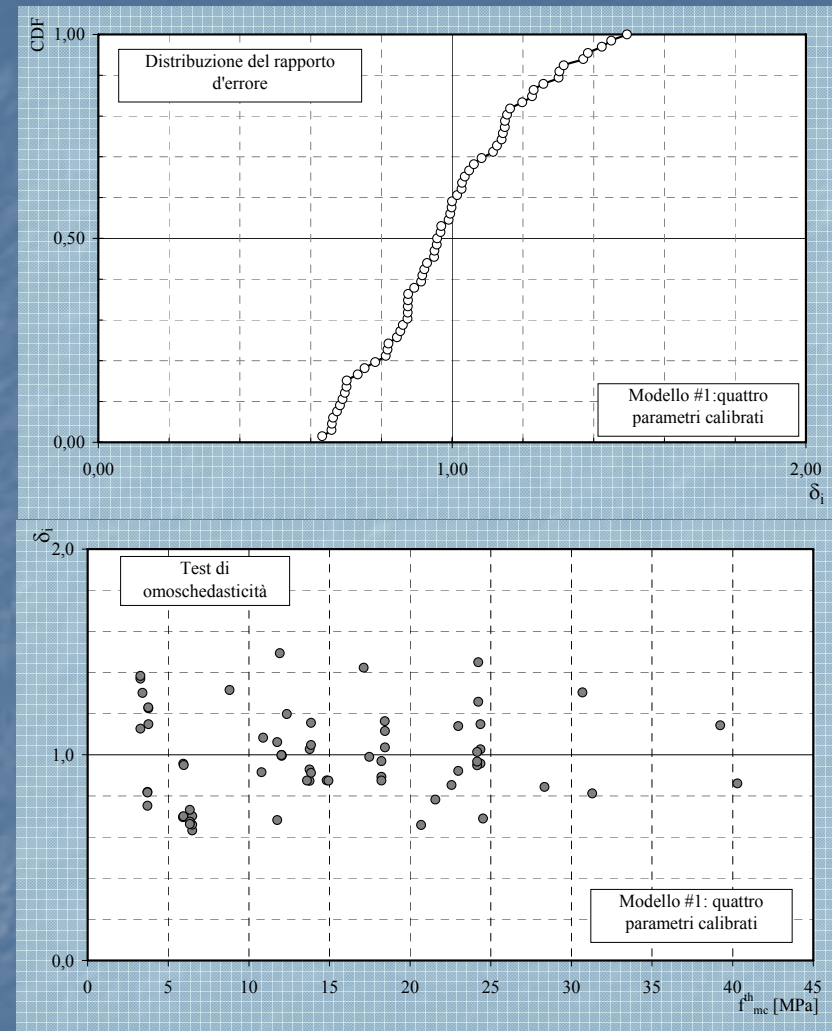
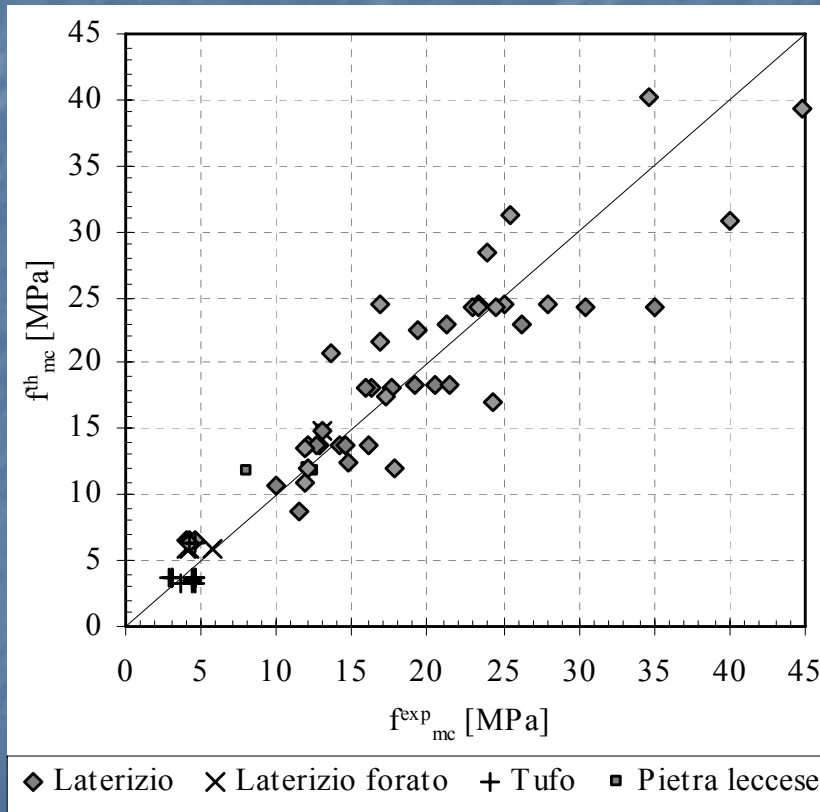
#	n _k	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	S _r (X,K)	Δ _s	δ _m	σ _s	γ _s	E _m
1	4	1,618	0,013	6,325	2,118	733,651	0,963	0,987	0,218	0,383	0,18
2		1	0,416	2,064	0,507	894,48	1,004	0,999	0,229	-0,101	0,19
3	3	0,627	1	0,963	0,353	944,374	1,004	0,968	0,223	-0,212	0,18
4		1,601	0,3	1	2,058	786,337	0,972	0,966	0,232	0,261	0,19
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
$$f_{mc}^{th} = f_m \cdot \left[1 + 0,416 \left(\frac{g_m}{1000} \right)^{2,064} \left(\frac{f_{l,eff}}{f_m} \right)^{0,507} \right]$$

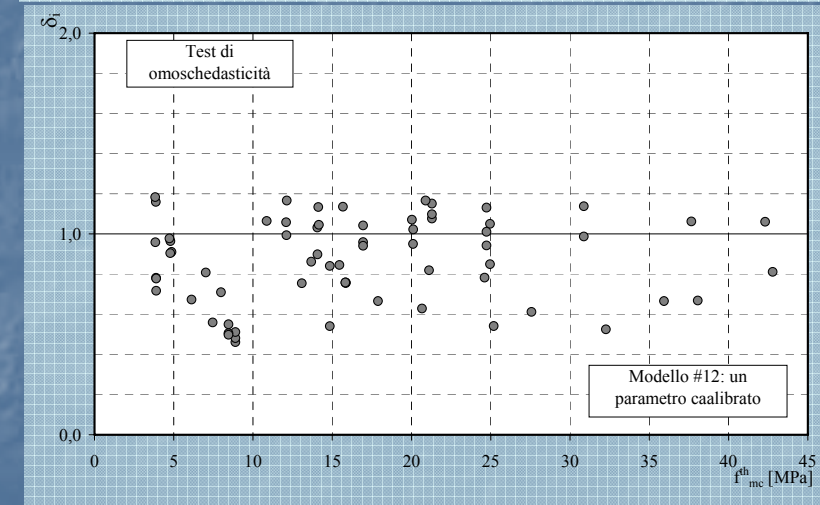
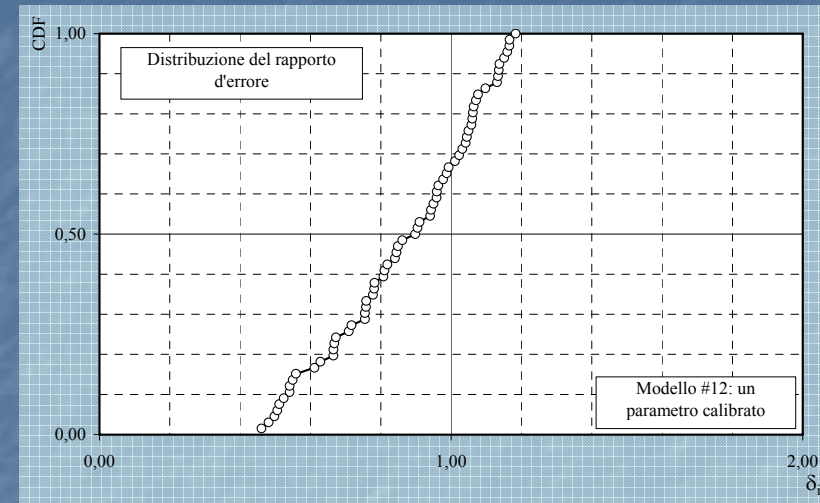
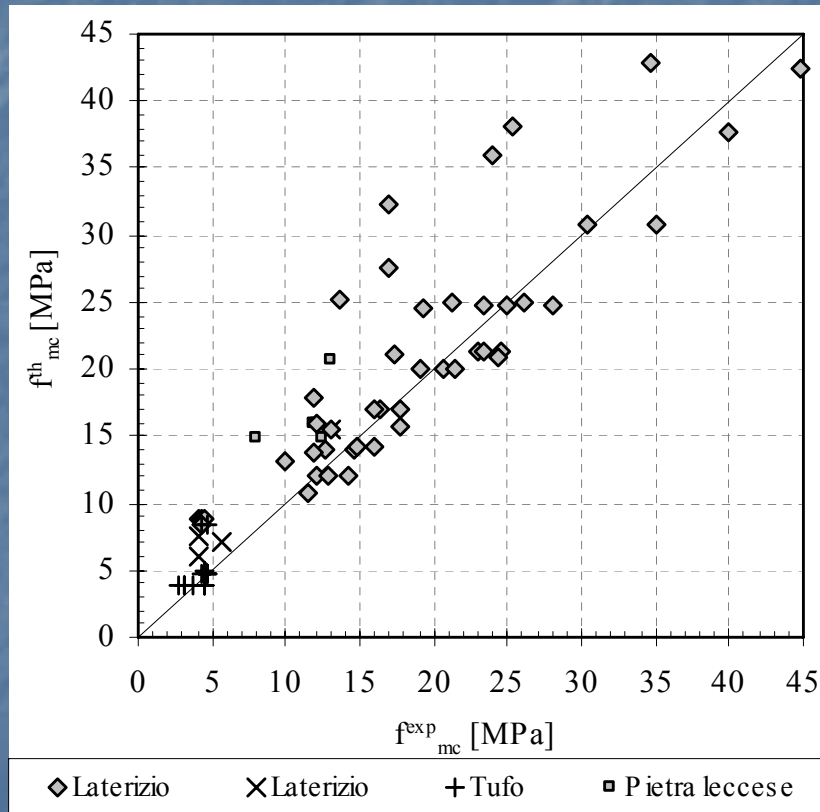




Formulazioni alternative

#12

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





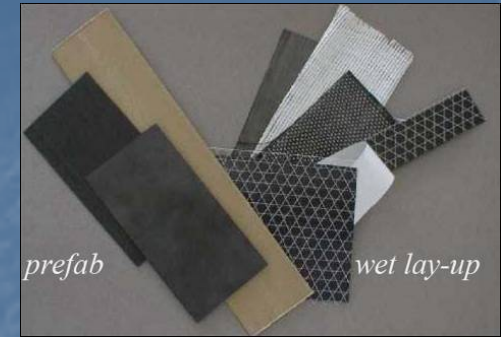
Obiettivi raggiunti

- 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.

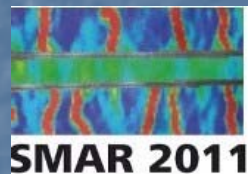
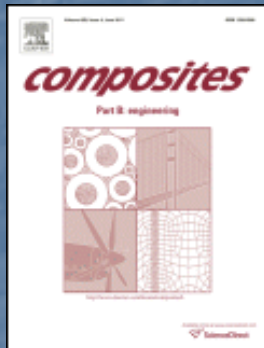
Relativamente all’aderenza, sembra possibile pervenire ad una formulazione alternativa in complessivo accordo ai risultati sperimentali, fermo restando l’influenza di spessore e geometria dei corsi di malta.

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