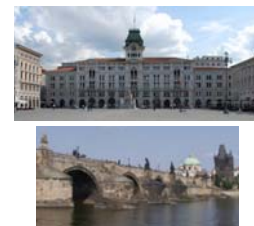


Bari 26 Ottobre 2016

SISTEMI DI RINFORZO DI EDIFICI IN MURATURA MEDIANTE IMPIEGO DI INTONACO ARMATO CON RETE PREFORMATA IN FIBRE DI VETRO



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Università di Trieste
Department of Concrete and Masonry Structures
Czech Technical University in Prague



1

SOMMARIO

- **Edifici soggetti ad eccitazione sismica**
- **Tecnica di rinforzo con rete in GFRP**
- **Campagna sperimentale**
- **Formule per il dimensionamento dei rinforzi**
- **Simulazioni numeriche di pareti rinforzate sollecitate fuori piano**
- **Analisi push over di edifici in muratura rinforzati con l'intonaco armato**
- **Sperimentazione numerica sull'efficacia del rinforzo delle volte**
- **Considerazioni conclusive**



2

EDIFICI IN MURATURA SOGGETTI AD ECCITAZIONE SISMICA



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste - DCMS - CTU Prague



3

EDIFICI IN MURATURA SOGGETTI AD ECCITAZIONE SISMICA

Cause di danno

- *Inadeguata integrità strutturale*
- *Inadeguata distribuzione degli elementi resistenti*
- *Inadeguata resistenza dei materiali*

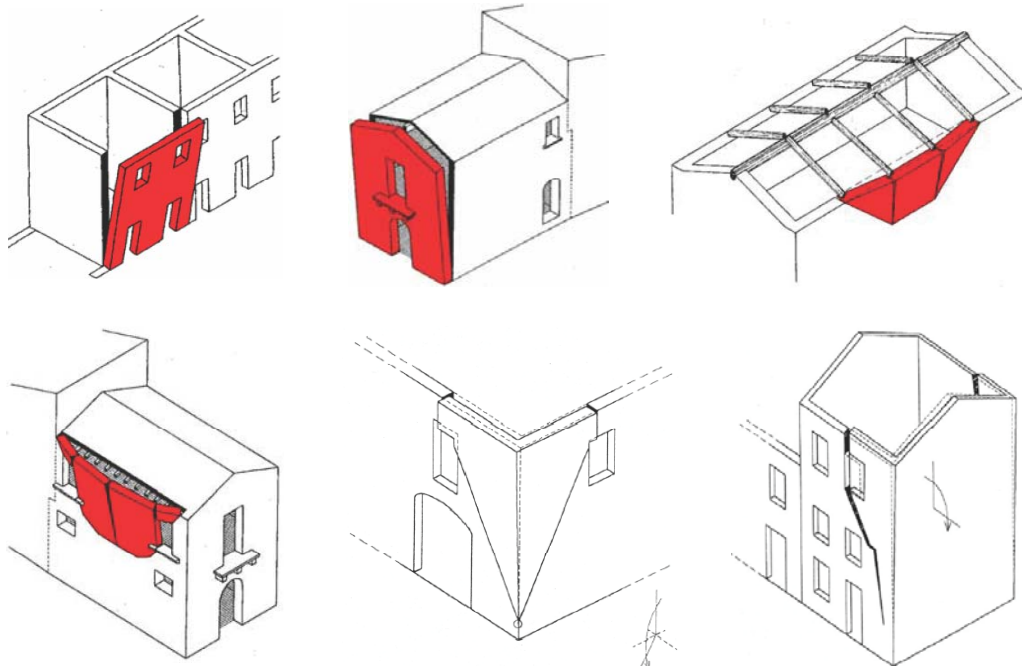


Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste - DCMS - CTU Prague



4

INADEGUATA INTEGRITA' STRUTTURALE



Ribaltamenti fuori piano di pareti e cantonali



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste

- DCMS - CTU Prague



5



Mirandola (Emilia) 2012: Ribaltamento pareti laterali



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste

- DCMS - CTU Prague



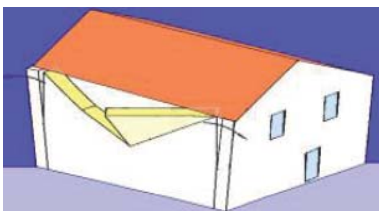
6



Mirandola (Emilia) 2012: Ribaltamento timpano



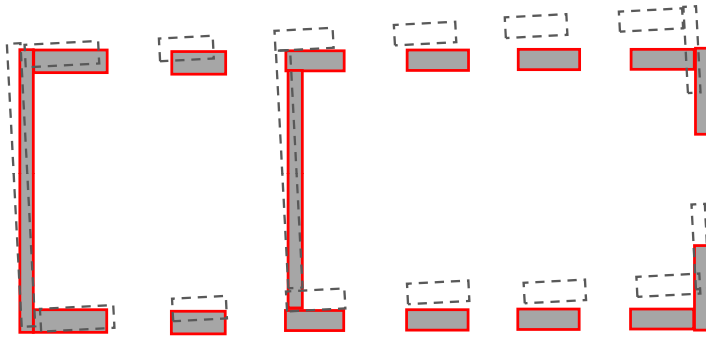
INADEGUATA INTEGRITA' STRUTTURALE



**Collasso a
flessione
orizzontale
parete
laterale**

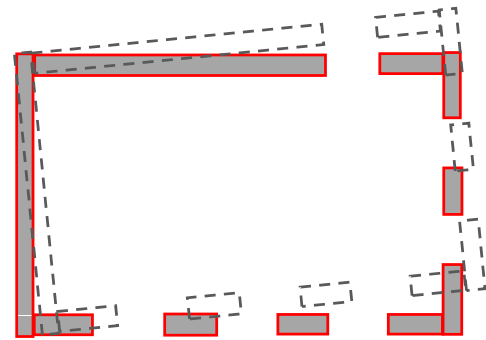


DISTRIBUZIONE DEGLI ELEMENTI RESISTENTI

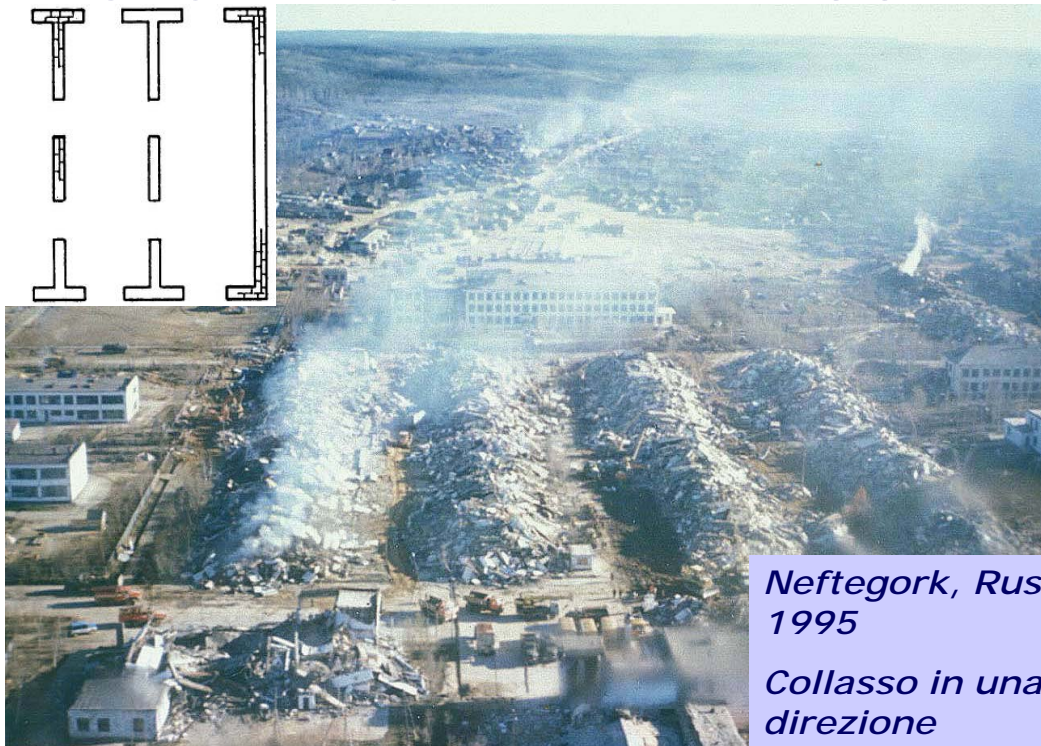
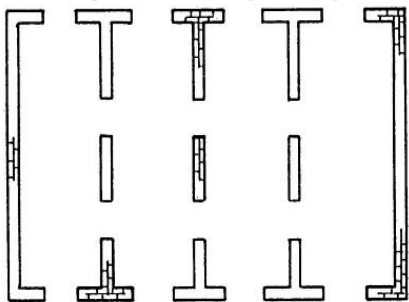


Distribuzione dissimmetrica rispetto ad un asse.

Distribuzione dissimmetrica rispetto ai due assi



DISTRIBUZIONE DEGLI ELEMENTI RESISTENTI



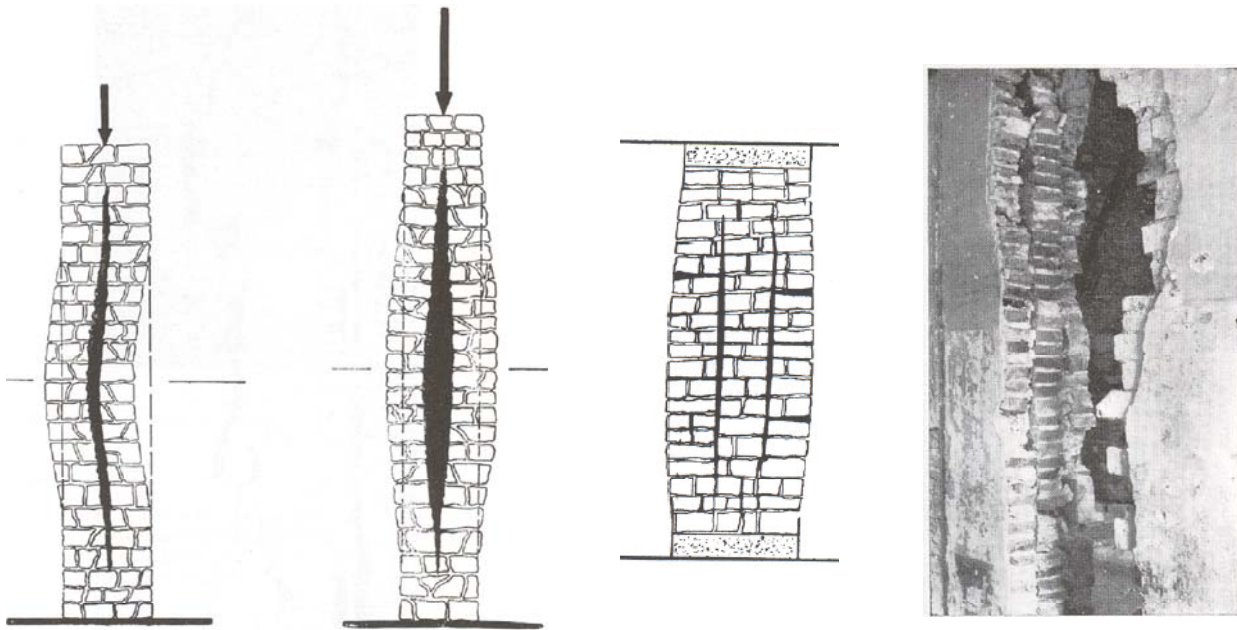
*Neftegorsk, Russia
1995*

*Collasso in una
direzione*



INADEGUATA RESISTENZA DEI MATERIALI

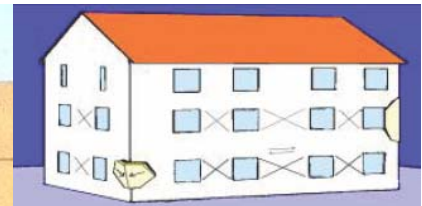
- Murature a strati senza legature trasversali



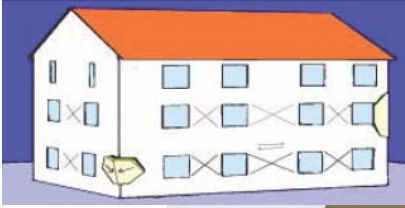
INADEGUATA RESISTENZA DEI MATERIALI

Budva, 1979

Rottura a taglio dei maschi del piano terra



INADEGUATA RESISTENZA DEI MATERIALI



L'Aquila, 2009
Fessurazione
diagonale
maschi



INTERVENTI DI RINFORZO

- sollecitazioni fuori piano nelle pareti con ribaltamento o rottura per flessione delle stesse



**Tecniche per l'integrità strutturale (*tiranti, colleg. muri-solai*)
Incremento della resistenza a flessione fuori piano**

- Scarsa resistenza a taglio dei maschi murari



Incremento della resistenza a taglio della muratura



TECNICHE PER L'INTEGRITA' STRUTTURALE

- **Legature orizzontali e verticali (cordoli in cls o in acciaio)**
- **Solai adeguatamente rigidi nel proprio piano, efficacemente collegati alle pareti e in grado di trasferire l'azione orizzontale alle pareti di taglio e di impedire il collasso fuori piano delle pareti**
- **Efficace collegamento tra pareti che si intersecano**
- **Assenza di spinte orizzontali sulle pareti**



INCREMENTO RESISTENZA MURATURA

Il materiale della muratura non deve disgregarsi in seguito all'eccitazione sismica

- **Per murature che tendono a disgregarsi: necessarie tecniche di rinforzo in grado di contenere la muratura**
- **Per murature poco resistenti: necessario adottare tecniche che consentano di incrementare la resistenza a flessione fuori piano e a taglio nel piano**
 - **Diatoni artificiali (acciaio, c.a.)**
 - **Incamiciatura (**intonaco armato**, ecc.)**
 - **Legature contenitive (**reticolatus**, sistema CAM, ecc.)**
 - **Nastri o lamine in composito incollate (con diatoni artificiali)**



TECNICA DI RINFORZO CON RETE IN GFRP



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste

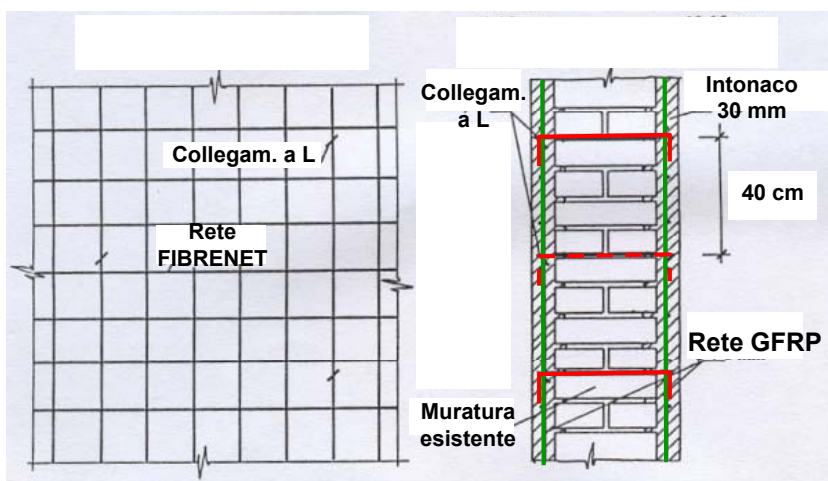
- DCMS - CTU Prague



17

TECNICA DI RINFORZO CON RETE IN GFRP

- *Consiste nell'utilizzo di reti in GFRP disposte sulla superficie delle pareti, collegate fra loro con connettori a L giuntati per sovrapposizione all'interno di fori passanti attraverso la muratura, e realizzazione di intonaco di malta bastarda dello spessore di circa 3 cm*



- *Demolizione dell'intonaco esist.*
- *Rimozione di circa 10÷15 mm di malta dai giunti sui due lati*
- *Applicazione rinzaffo*
- *Esecuzione fori con attrezzo a rotazione per elem. di collegam.*
- *Rimozione detriti dai fori*
- *Messa in opera rete*
- *Inserimento connettori (6/m²) e iniezione con resina epossidica*
- *Applicazione secondo strato di intonaco (~30 mm)*



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste

- DCMS - CTU Prague



18

TECNICA DI RINFORZO CON RETE FIBRENET

**Applicazione rete in GFRP
ed iniezione dei dispositivi
di connessione a L**



**Applicazione intonaco di
malta bastarda**



CAMPAGNA SPERIMENTALE



INDAGINI SPERIMENTALI

Prove di compressione diagonale

Determinazione resistenza a trazione muratura (taglio puro)

Prove di taglio-compressione

Verifica comportamento elementi soggetti a compressione e taglio

Prove di flessione fuori piano

Determinazione resistenza a flessione muratura



INDAGINI SPERIMENTALI

Prove di compressione diagonale

Tipologie di muratura testate

- *Mattoni pieni a due teste (25 cm)*
- *Mattoni pieni a tre teste (38 cm)*
- *Due paramenti a una testa in mattoni e sacco da 14 cm in ciottoli legati con malta magra (38 cm)*
- *Pietra grossolanamente squadrata (40-70 cm)*
- *Ciottoli (dim. 10-11 cm) spessore 40 cm*



COMPRESSIONE DIAGONALE

Mattoni pieni, due e tre teste

(spessore 25 e 38 cm)



Mattoni, a sacco

(spessore 38 cm)



Pietra

(spessore 40 e 70 cm)



Ciottoli

(spessore 40 cm)



CARATTERISTICHE MATERIALI

CARATTERISTICHE DELLE MALTE

	Sigla identificativa	Resistenza a compressione f_{cm} [MPa]	Resistenza a trazione f_{tm} [MPa]
Malte idrauliche di confezionamento	Malta A	3.10	
	Malta B	2.90	
	Malta C	6.10	
	Malta D	4.09	
	Malta E	3.52	
	Malta F	1.30	
Malte per intonaco armato	L (calce)	4.23	0.55
	N (calce)	4.66	0.77
	M1 (bastarda)	6.81	0.80
	M2 (bastarda)	7.35	1.05
	Z (pozzolanica)	11.66	1.44

CARATTERISTICHE MATERIALI

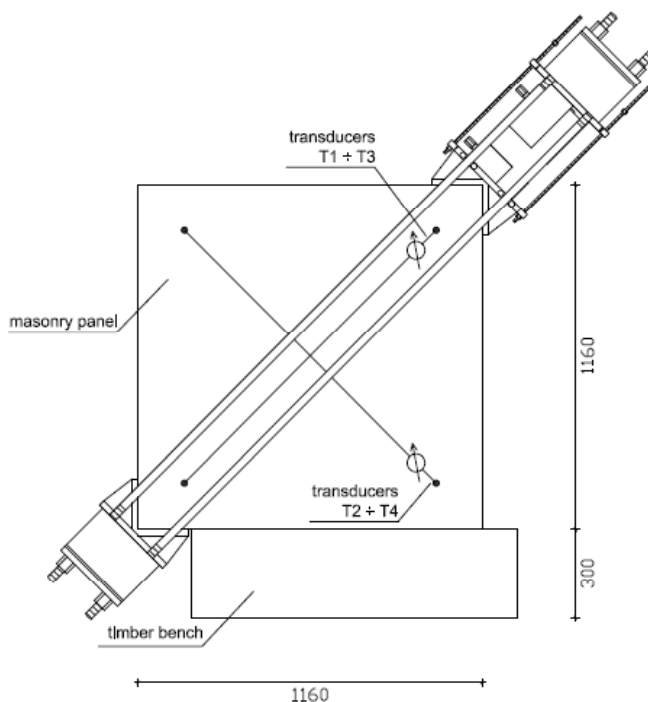
CARATTERISTICHE RETE E CONNETTORI

Elementi in GFRP	Carico ultimo [kN]
<i>Rete, Tipo "S" (area delle fibre 3,8mm²)</i>	
Fibre parallele	4.47
Fibre intrecciate	3.54
<i>Rete, Tipo "D" (area delle fibre 7,6mm²)</i>	
Fibre parallele	8.49
Fibre intrecciate	5.21
<i>Connettori (area delle fibre 57.6 mm²)</i>	
Sezione 8x12mm	36.01

4 e 6 connettori/m²



PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE



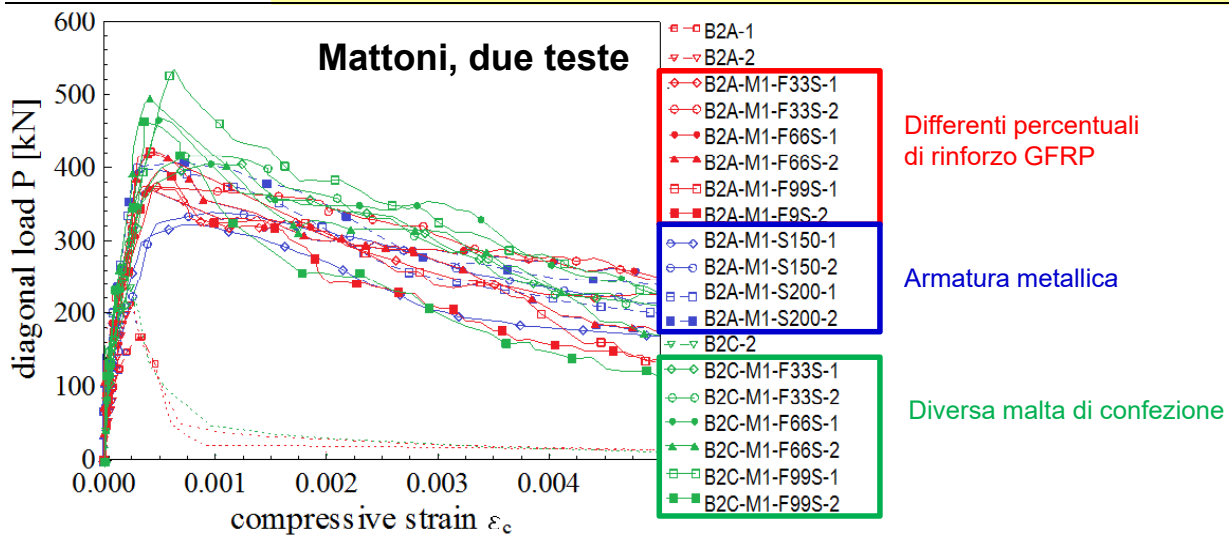
RISULTATI

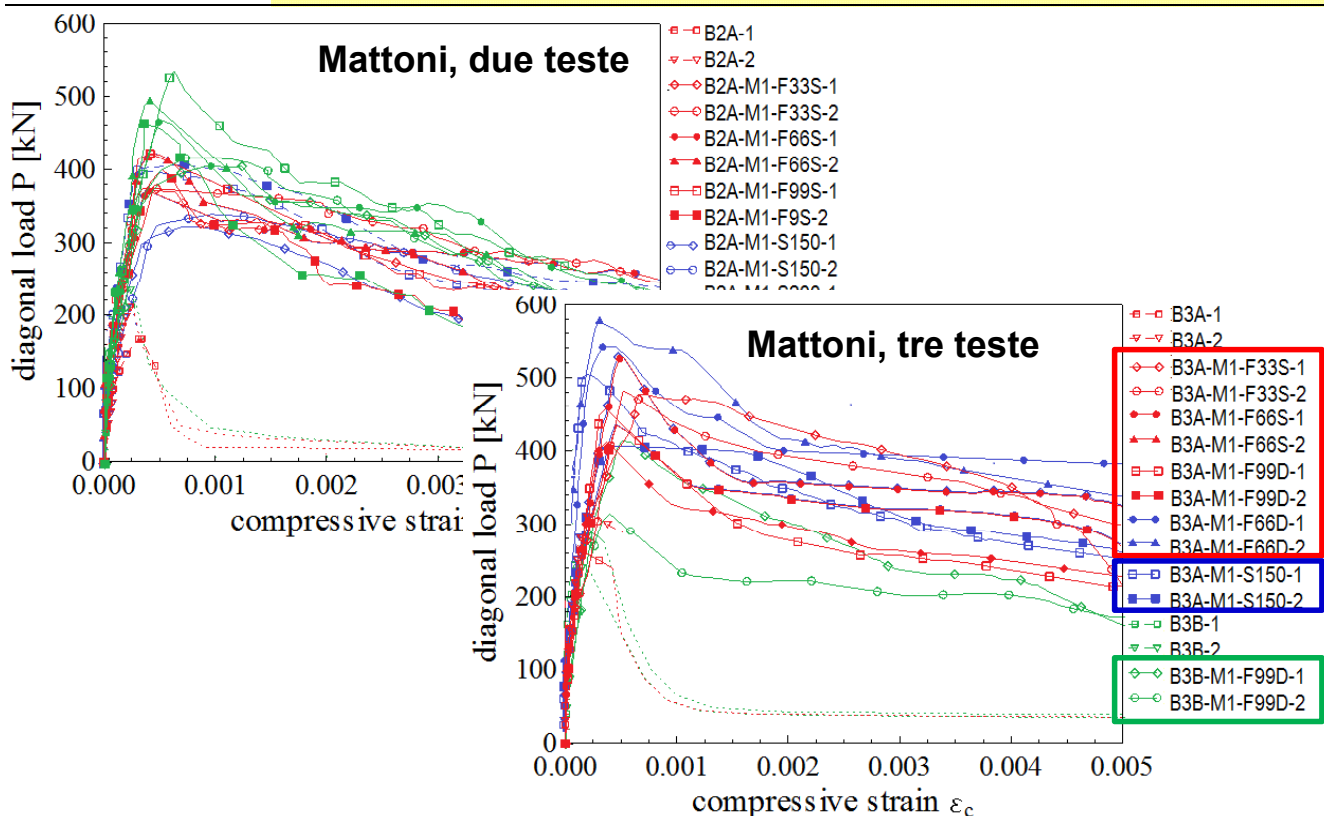
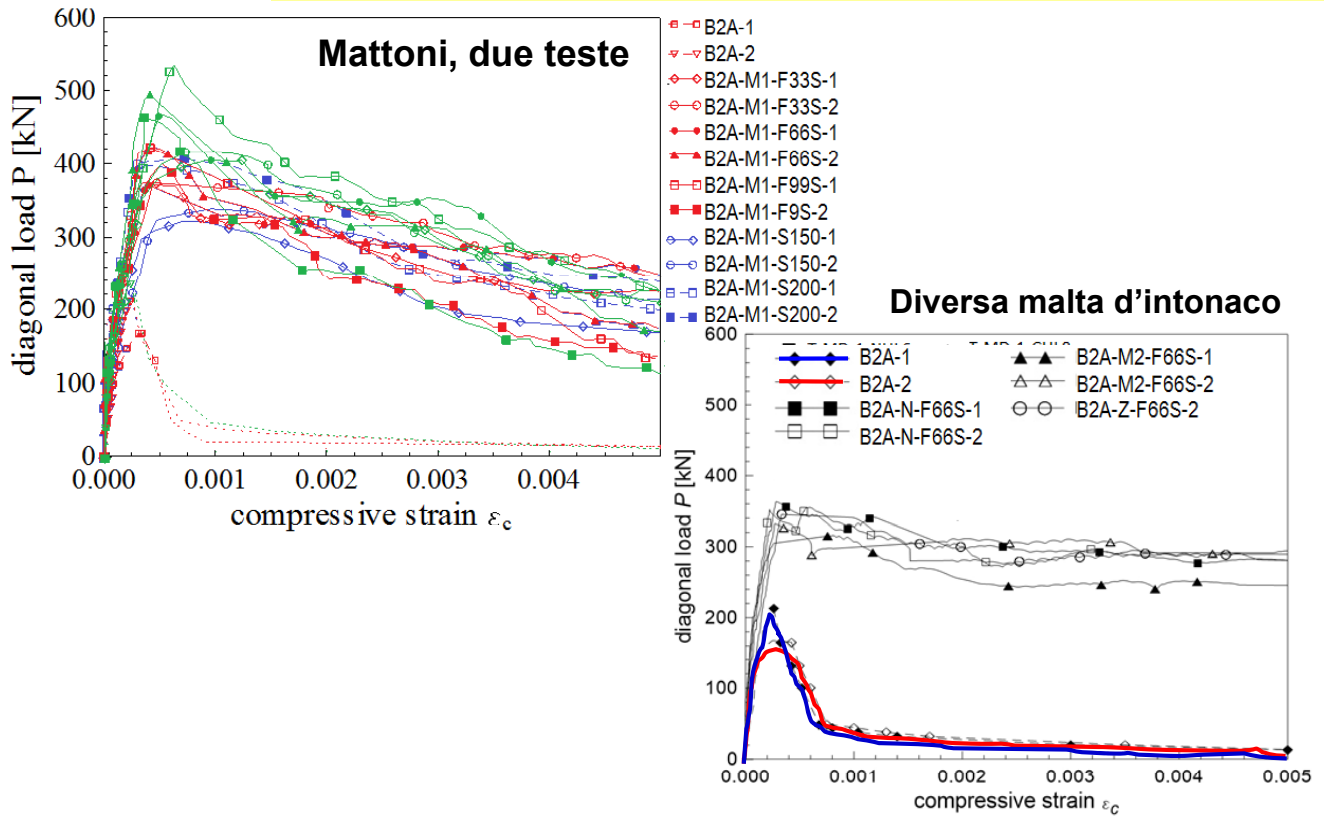


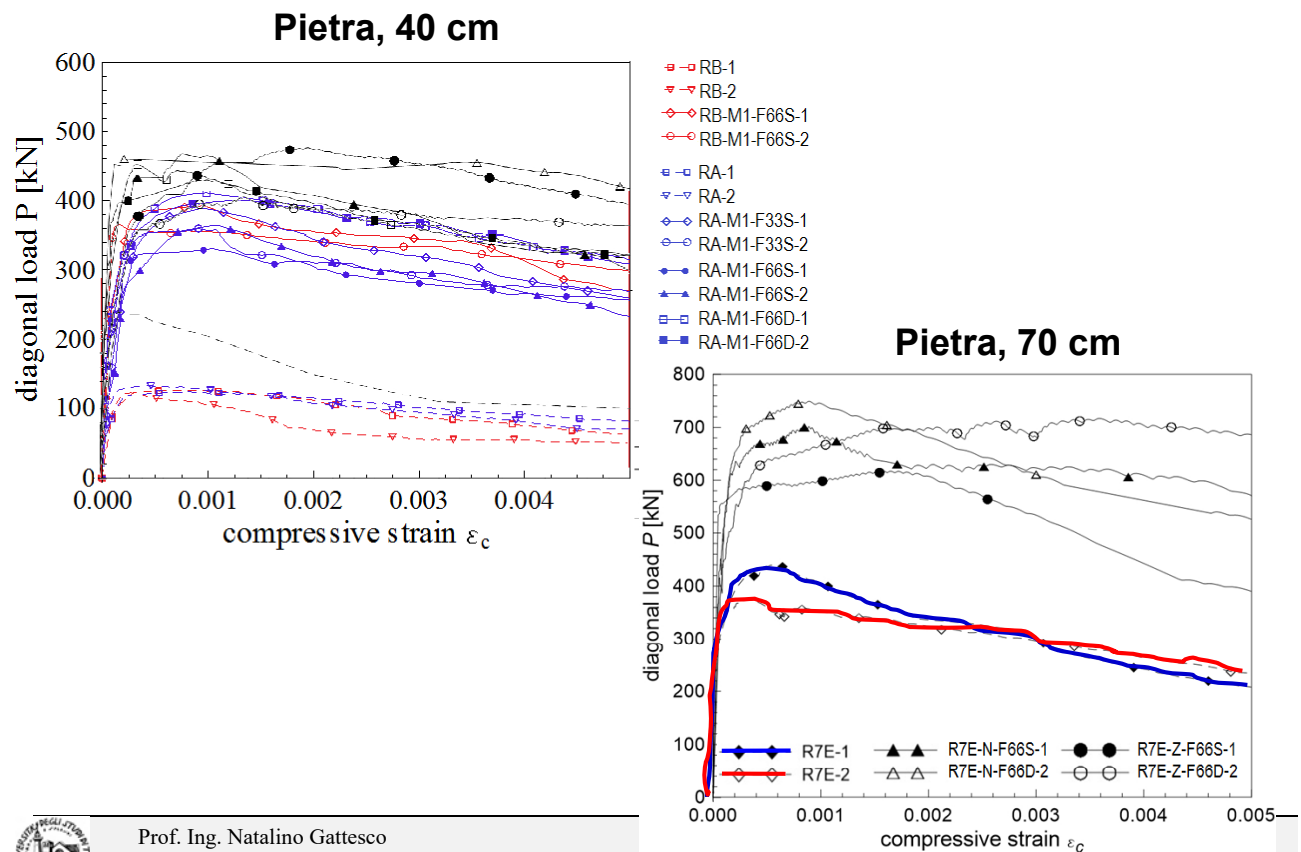
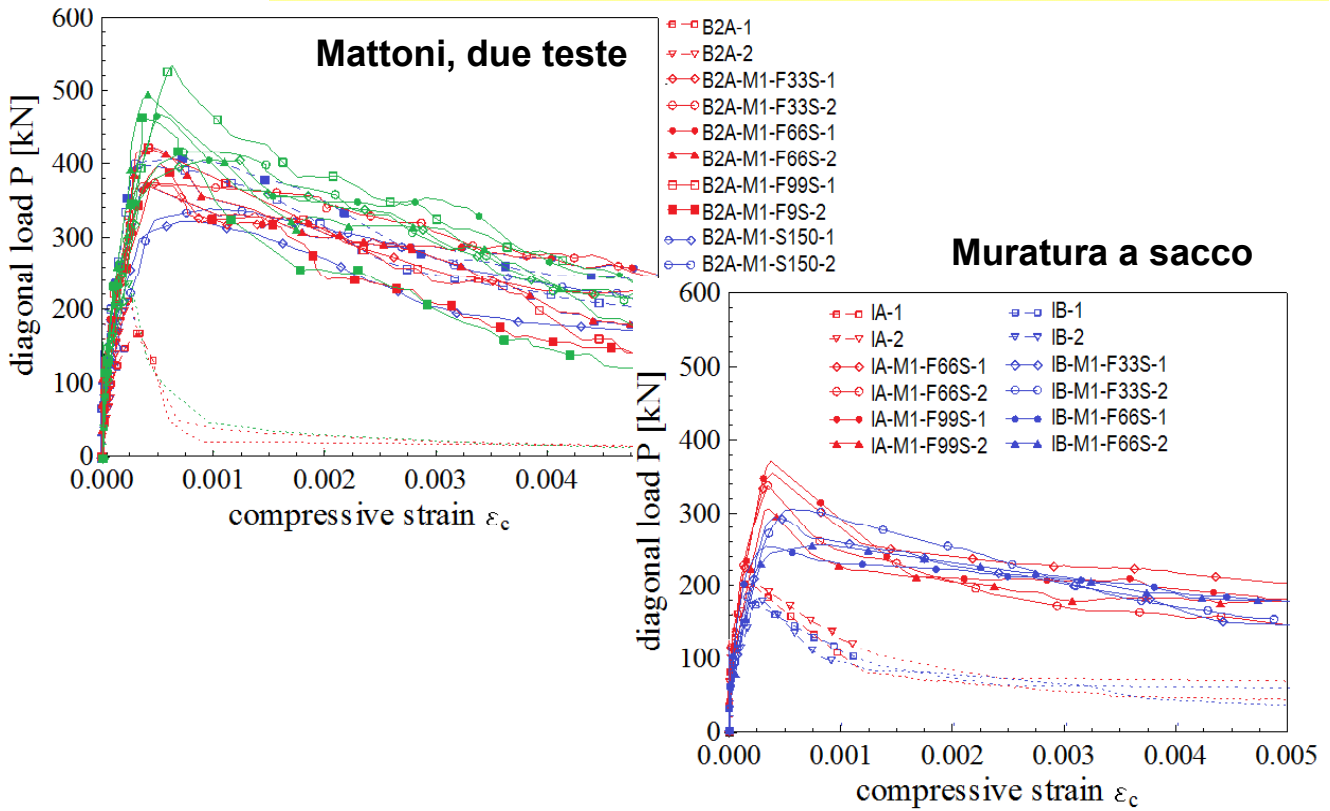
Campioni non rinforzati



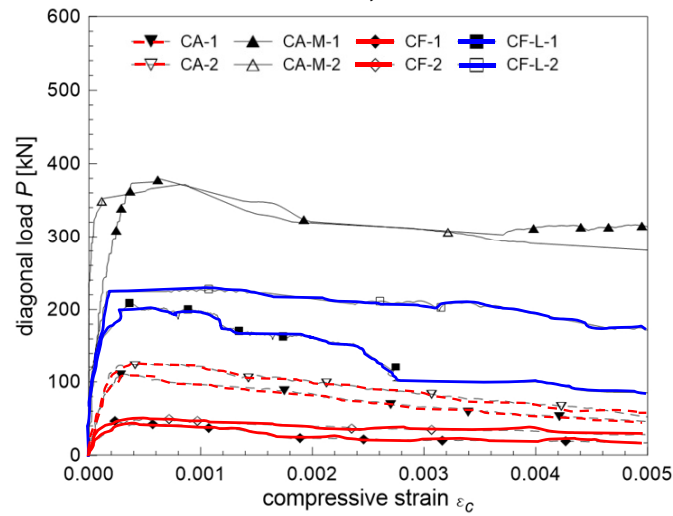
Campioni rinforzati







Ciottoli, 40 cm

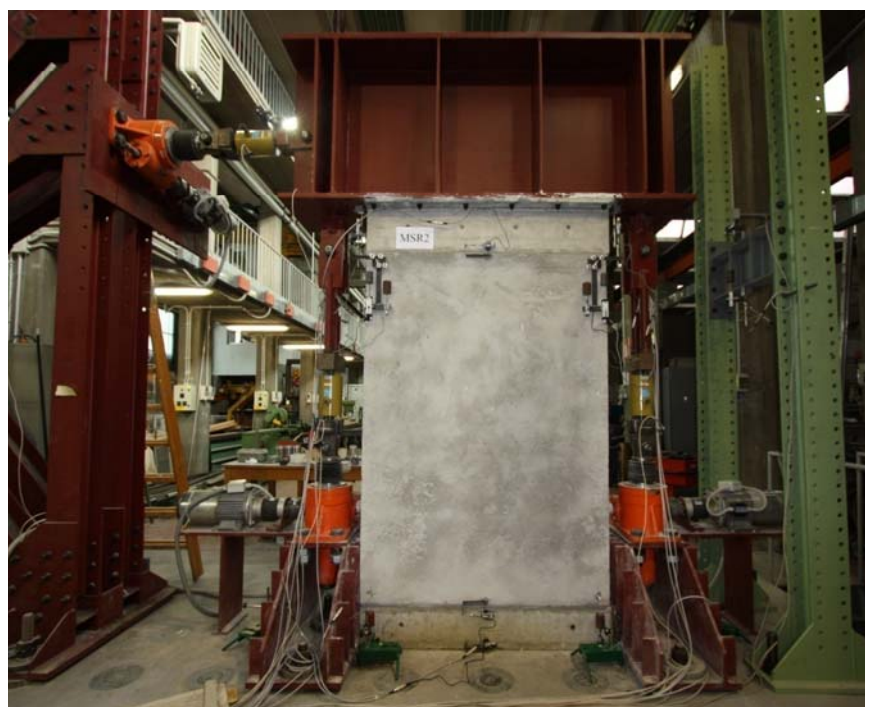


PROVA DI TAGLIO-COMPRESSIONE

**Muratura in pietra
grezza da 35 cm di
spessore.**

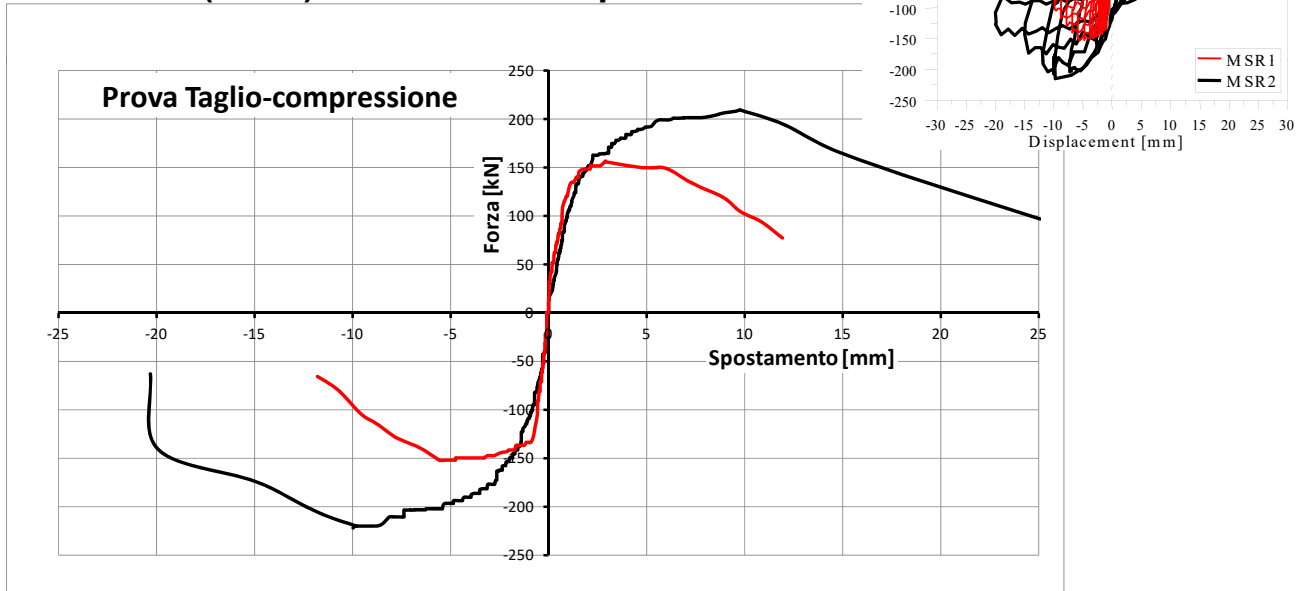
**Intonaco in malta
bastarda.**

**Connettori passanti
con ancoraggio di
estremità debole**



PROVA TAGLIO-COMPRESSIONE

Confronto tra campione rinforzato (*nero*) e non rinforzato (*rosso*). Azione assiale pari a 0.8 MPa.



PROVA DI TAGLIO-COMPRESSIONE

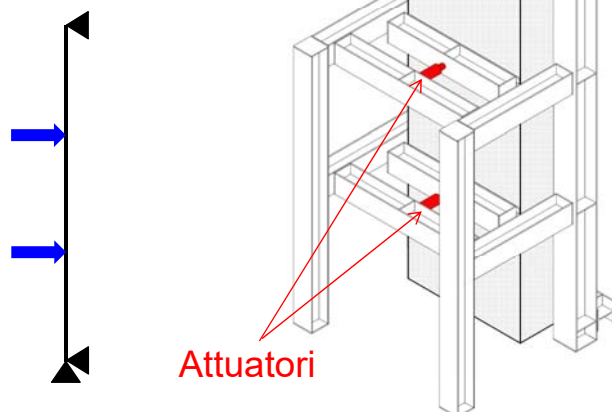


PROVE DI FLESSIONE FUORI PIANO

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE E APPARATO DI PROVA

4 connettori/m² GFRP
 (rinforzo con intonaco arm)

8 connettori/m²
 (rinforzo ibrido)



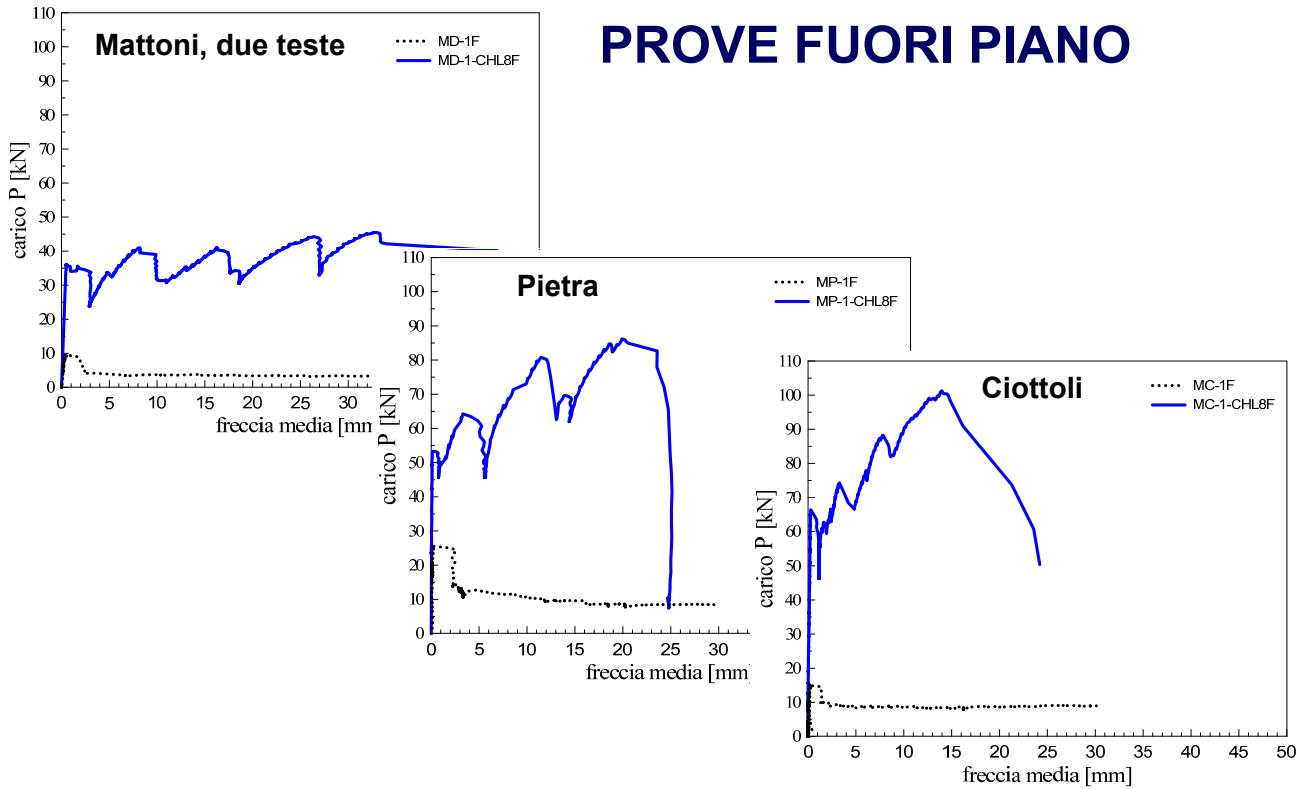
PROVE FUORI PIANO

CAMPAGNA SPERIMENTALE (8 CAMPIONI)

	Sigla id.	Malta confez.	Malta intonaco
MATTONI (25 cm)	MD-1F	1	-
	MD1-CHL8F	1	CHL8
PIETRA (40 cm)	MP-1F	1	-
	MP1-CHL8F	1	CHL8
CIOTTOLI (40 cm)	MC-1F	1	-
	MC1-CHL8F	1	CHL8
	MC1-CHL8ibF	1	CHL8 (front)
	MC2-CHL8ibF	1	CHL8 (back)



PROVE FUORI PIANO



FLESSIONE FUORI PIANO

MODALITA' DI COLLASSO CAMPIONI NON RINFORZATI

Mattoni, due teste



Pietra



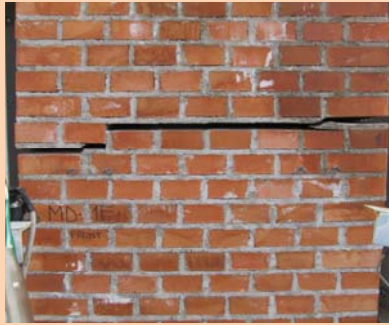
Ciottoli



FLESSIONE FUORI PIANO

MODALITA' DI COLLASSO CAMPIONI NON RINFORZATI

Mattoni, due teste



Pietra



Ciottoli



FLESSIONE FUORI PIANO

MODALITA' DI COLLASSO CAMPIONI RINFORZATI



- Fessure orizzontali dell'intonaco;
- Rottura dei fili verticali di rete, cui è associata una repentina perdita di carico.



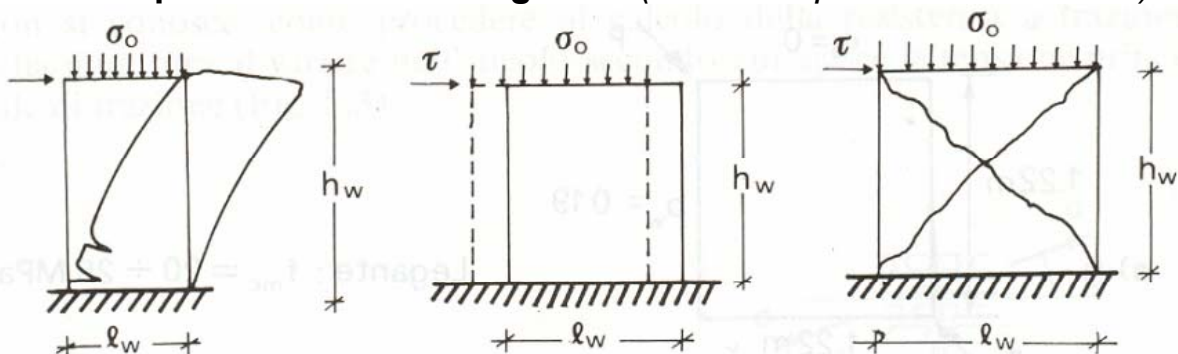
FORMULE PER IL DIMENSIONAMENTO DEI RINFORZI



RESISTENZA PER AZIONI ORIZZONTALI

Nel piano, le modalità di rottura di un elemento murario dipendono sia dalle sue dimensioni che dal carico applicato (D.M. 14.01.2008)

- Rottura per pressoflessione (si verifica per valori di $h/b > 2$)
- Rottura per scorrimento (si verifica per bassi valori dell'azione assiale)
- Rottura per fessurazione diagonale (si verifica per valori di $h/b < 1.5$)



a) Rottura per flessione

b) Cedimento per scorrimento

c) Rottura per taglio

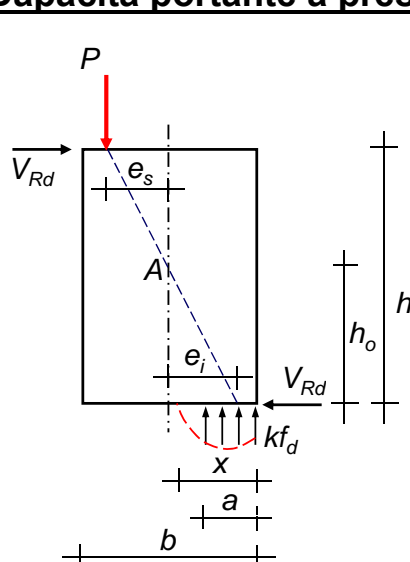


RESISTENZA A PRESSOFLESSIONE

I maschi murari sono soggetti a pressoflessione e taglio.

Nel caso di edifici con non più di due piani è possibile trascurare la variazione di sforzo normale nei maschi dovuta alle azioni sismiche

Capacità portante a pressoflessione



$$\begin{cases} M_{Rd} = kf_d at \left(\frac{b}{2} - \frac{a}{2} \right) \\ P = kf_d at \end{cases} \quad \rightarrow \quad a = \frac{P}{kf_d t} \quad \begin{matrix} a = 0.8x \\ \sigma_o = \frac{P}{bt} \end{matrix}$$

Sostituendo a e σ_o nella prima

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_o b^2 t}{2} \left(1 - \frac{\sigma_o}{kf_d} \right)$$

Nota la posizione di annullamento del momento h_o

$$V_{Rd}^p = \frac{\sigma_o b^2 t}{2 h_o} \left(1 - \frac{\sigma_o}{kf_d} \right)$$

$$k = 0.85$$



RESISTENZA A TAGLIO

La resistenza a taglio associata alla rottura per scorrimento fa riferimento alla relazione:

$$f_v = f_{v0} + 0.4 \sigma$$

Eurocodici n. 6, 8 – DM 14.01.2008

La resistenza a taglio associata alla rottura per fessurazione diagonale è fornita dalla relazione di Turnsek e Cacovic (1971)

$$V_R = \frac{1.5 f_{v0} b t}{\xi} \sqrt{1 + \frac{\sigma_o}{1.5 f_{v0}}}$$

$$\xi = 1.0 \quad \text{per } h/b \leq 1.0$$

$$\xi = h/b \quad \text{per } 1.0 < h/b \leq 1.5$$

$$\xi = 1.5 \quad \text{per } h/b > 1.5$$

f_{v0} è la resistenza a taglio in assenza di azione assiale

Si ricava sperimentalmente mediante prove di compressione

diagonale, che forniscono $f_t \Rightarrow f_{v0} = f_t/1.5$



FORMULE DI UTILITA' PRATICA

Dallo studio del comportamento meccanico dei materiali componenti il sistema muratura rinforzata sono state ricavate alcune formule di utilità pratica per la valutazione di

- **Resistenza a trazione equivalente massima (Resistenza)**
- **Modulo di elasticità tangenziale equivalente (Rigidità)**
- **Stima del massimo drift di pannello (Duttilità)**



FORMULE DI UTILITA' PRATICA

Resistenza a trazione equivalente massima (RESISTENZA)

$$f_{t,calc} = \beta \cdot \left[f_{t,m} + 2 \cdot \left(f_{t,int} \cdot \frac{t_{int}}{t_m} + \frac{EA_r \cdot \bar{\varepsilon}}{t_m \cdot p} \right) \right]$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{f_{t,int}}{E_{int}}$$

β è funzione del tipo di muratura e si riduce all'aumentare della resistenza a trazione della malta dell'intonaco (assume valori che vanno da 0.8 a 1.3 per le murature e intonaci utilizzati nella campagna sperimentale)

$f_{t,m}$ è la resistenza a trazione della muratura non rinforzata

Un confronto con i risultati sperimentali ha mostrato il buon accordo tra i valori teorici e sperimentali.



FORMULE DI UTILITA' PRATICA

Resistenza a trazione equivalente massima (**RESISTENZA**)

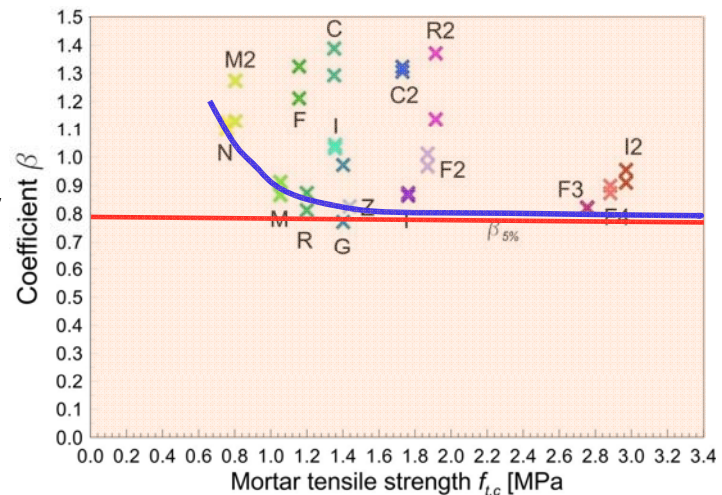
Per muratura di mattoni pieni

$$\beta = 0.8 + 6.0 \cdot e^{-4.0 f_{t,int}}$$

Per semplicità si può assumere:

Muratura di mattoni $\beta = 0.8$

Muratura in pietra $\beta = 1.0$



FORMULE DI UTILITA' PRATICA

Modulo di elasticità tangenziale equivalente (**RIGIDEZZA**)

$$G_{calc} = G_m + 2 \cdot \left(G_{int} \cdot \frac{t_{int}}{t_m} \right)$$

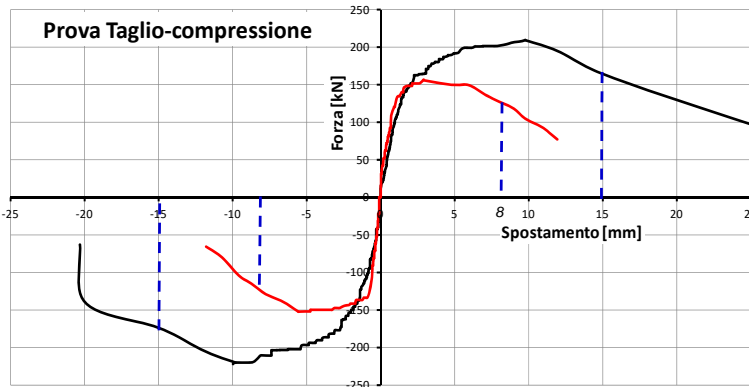
G_m è il modulo di elasticità tangenziale della muratura non rinforzata

Un confronto con i risultati sperimentali ha mostrato il buon accordo tra i valori teorici e sperimentali.

FORMULE DI UTILITA' PRATICA

Capacità di spostamento del pannello (**DUTTILITA'**)

Dai risultati sperimentali delle prove di taglio-compressione sono stati ottenuti i seguenti valori per lo spostamento ultimo, valutato in corrispondenza di una riduzione della resistenza del 20% dopo il valore massimo. Si trascura la deformabilità degli elementi in cls in sommità e al piede della parete (250 mm).



$$\frac{\delta_{0.8}}{h} = \frac{8}{2000} = 0.40\% \quad \text{Non rinforzato}$$

$$\frac{\delta_{0.8}}{h} = \frac{15}{2000} = 0.75\% \quad \text{Rinforzato}$$

Una migliore efficacia dei dispositivi di unione assicura una maggiore duttilità.



FORMULE DI UTILITA' PRATICA

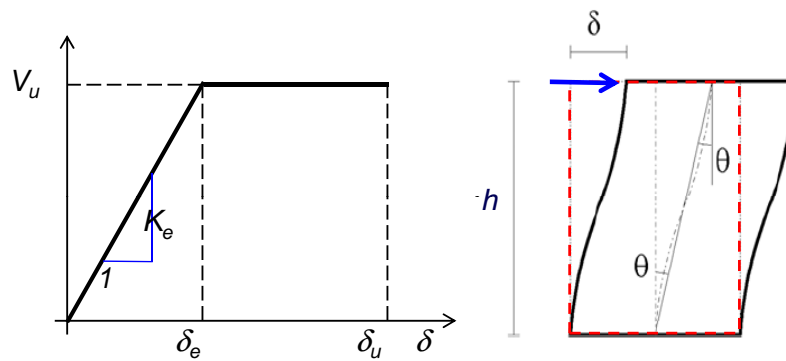
Massimo drift sul pannello (**DUTTILITA'**)

$$\gamma_{0.8} = \frac{\delta_{0.8}}{h}$$

Specimen	P_{max} [kN]	$\frac{P_{max(R)}}{P_{max(U)}}$	$\gamma_{0.8}$ [%]	μ	$\frac{\mu_{(R)}}{\mu_{(U)}}$	Specimen	P_{max} [kN]	$\frac{P_{max(R)}}{P_{max(U)}}$	$\gamma_{0.8}$ [%]	μ	$\frac{\mu_{(R)}}{\mu_{(U)}}$
<i>Solid brick masonry, 250 mm thick</i>						<i>Cobblestone masonry, 400 mm thick</i>					
B2A-1	214.2	-	0.65	1.33	-	CA-1	110.4	-	4.28	36.05	-
B2A-2	169.5	-	2.29	5.34	-	CA-2	126.0	-	5.34	47.56	-
B2A-N-1	363.4	1.89	6.96	22.99	6.89	CA-M-1	379.5	3.21	8.72	58.01	1.39
B2A-N-2	355.2	1.85	7.22	26.33	7.89	CA-M-2	371.5	3.14	9.56	85.11	2.04
B2A-M-1	315.9	1.65	5.08	23.66	7.09	CF-1	46.7	-	3.39	24.18	-
B2A-M-2	332.4	1.73	9.68	32.20	9.65	CF-2	49.8	-	4.52	33.09	-
B2A-Z-1	345.3	1.80	10.33	26.82	8.04	CF-L-1	209.2	4.34	4.62	32.11	1.12
						CF-L-2	227.4	4.72	9.50	65.08	2.27
<i>Rubble stone masonry, 400 mm thick</i>						<i>Rubble stone masonry, 700 mm thick</i>					
R4D-1	238.6	-	2.60	17.37	-	R7E-1	439.5	-	7.58	32.94	-
R4D-N-1	427.7	1.79	8.37	34.39	1.98	R7E-2	376.0	-	6.05	22.61	-
R4D-N-2	449.6	1.88	6.78	24.14	1.39	R7E-M-1	702.1	1.72	14.73	79.34	2.86
R4D-M-1	464.6	1.95	7.80	33.60	1.93	R7E-M-2	749.5	1.84	8.50	44.12	1.59
R4D-M-2	457.6	1.92	10.03	42.52	2.45	R7E-Z-1	617.4	1.51	10.69	63.49	2.29
R4D-Z-1	473.4	1.98	13.55	29.54	1.70	R7E-Z-2	717.2	1.76	17.74	78.98	2.84
R4D-Z-2	402.8	1.69	19.14	41.58	2.39						



PARAMETRI MURATURA



V_u **Resistenza di picco (RESISTENZA)**

K_e **Rigidità elastica (RIGIDEZZA)**

$$K_e = \frac{1}{\frac{h^3}{12EI} + \frac{\chi h}{GA}}$$

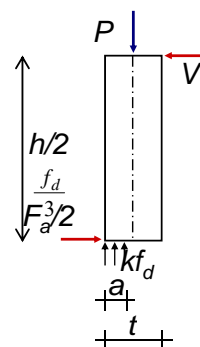
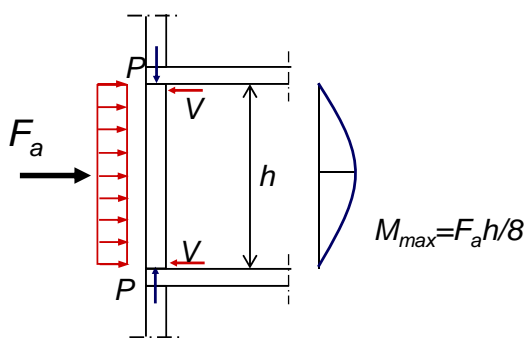
δ_u **Massimo spostamento prima della rottura (DUTTILITA')**

$\delta_u \leq 0.004 h$ per muratura ordinaria $\delta_u \leq 0.006 h$ per muratura armata



MURATURE PRESSOINFLESSE FUORI PIANO

Il momento di collasso della parete per azioni perpendicolari al piano si calcola analogamente al caso di azioni parallele al piano



$$\sigma_o = \frac{P}{bt} \quad k = 0.85$$

$$M_{Rd} = \frac{\sigma_o bt^2}{2} \left(1 - \frac{\sigma_o}{k f_d} \right)$$

In caso di azione assiale piccola, si considera la resistenza a trazione della muratura

Per $\sigma_o \leq \frac{f_d}{3} - \sqrt{\frac{f_d^2}{9} - \frac{f_d f_{x1}}{3}}$



$$M_{Rd} = (f_{x1} + \sigma_o) \frac{bt^2}{6}$$

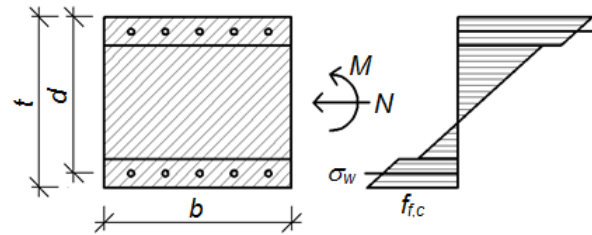
f_{x1} **Resistenza a trazione per flessione della muratura**



MURATURE RINFORZATE A FLESSIONE F.P.

Momento di cracking

$$M_{cr(R)} = \left(\frac{N}{A_{id}} + \frac{|f_{f,c}|}{\alpha_c} \right) \frac{J_{id}}{h/2}$$

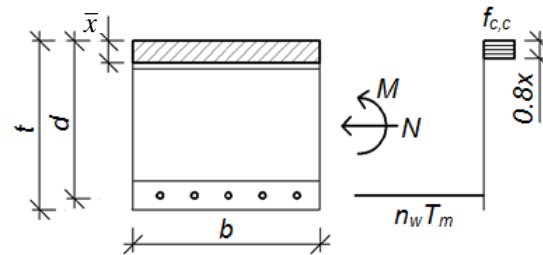


Momento ultimo

$$M_{u(R)} = \bar{x} b f_{c,c} \cdot \left(\frac{t}{2} - \frac{\bar{x}}{2} \right) + n_w T_m \left(d - \frac{t}{2} \right)$$

$$\bar{x} = \frac{N_{tot} - n_w T_m}{b f_{c,c}}$$

$$\bar{x} = 0.8 x$$

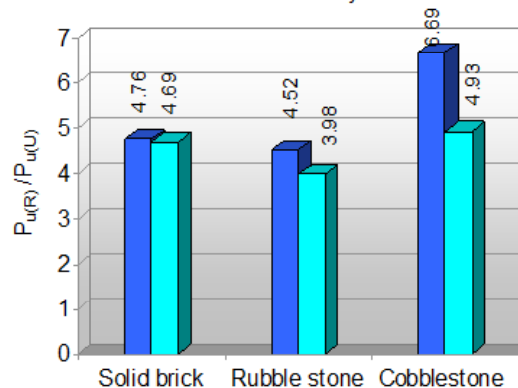
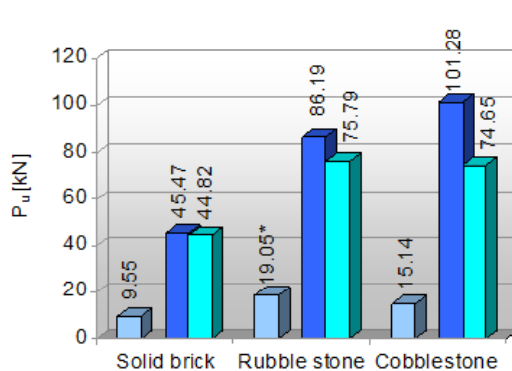


$n_w T_m$ Numero fili rete per resistenza singolo filo



CONFRONTO CON RISULTATI SPERIMENTALI

■ URM: experimental values
 ■ RM: experimental values
 ■ RM: analytical estimations



Sample ID	Onset of cracking			GFRP mesh collapse			Residual resistance		
	$P_{cr,sper}$ [kN]	$P_{cr,calc}$ [kN]	$\Delta_{err}(P_{cr})$ [%]	$P_{u,sper}$ [kN]	$P_{u,calc}$ [kN]	$\Delta_{err}(P_u)$ [%]	$P_{res,sper}$ [kN·m]	$P_{res,calc}$ [kN·m]	$\Delta_{err}(P_{res})$ [%]
BB-1-RM	36.00	38.09	+5.81	45.47	44.82	-1.43	3.45	3.13	-9.19
BR-1-RM	53.08	55.98	+5.46	86.19	75.79	-12.07	11.08	7.64	-31.06
BC-0-RM	66.42	53.00	-20.21	101.28	74.65	-26.30	17.15	7.02	-59.08



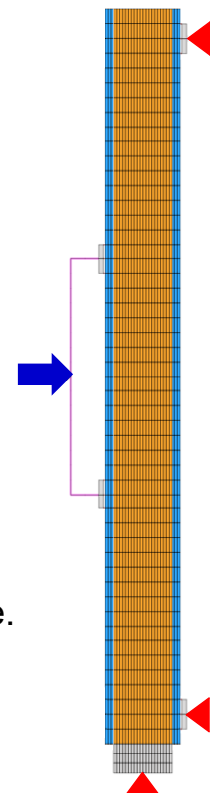
SIMULAZIONI NUMERICHE DI PARETI RINFORZATE SOLLECITATE FUORI PIANO



SIMULAZIONI NUMERICHE

Caratteristiche del modello:

- Modello 2D FEM;
- **Muratura e intonaco: elementi piani a 4 nodi**
- Fili verticali di **rete e connettori**: elementi **monodimensionali** resistenti solo a trazione (truss).
- **Vincoli**: vincoli puntuali alla traslazione orizzontale in corrispondenza dei traversi di contrasto superiore ed inferiore e alla traslazione verticale alla base (*si è tenuto conto dell'attrito orizzontale alla base*).
- **Analisi non-lineare statica a controllo di spostamento** (inflexione). Si è tenuto conto del peso proprio della parete.



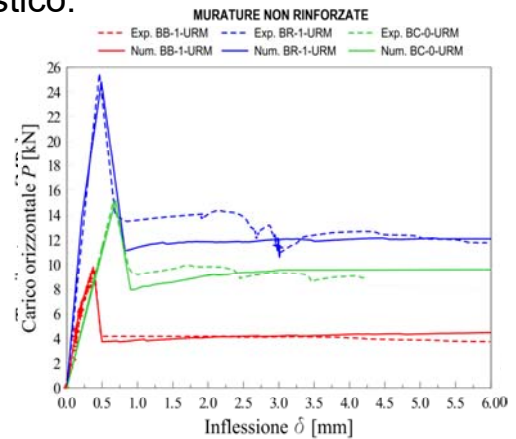
SIMULAZIONI NUMERICHE

Caratteristiche dei materiali:

- Materiali omogenei e isotropi;
- Acciaio: comportamento elastico, $E = 210000 \text{ MPa}$, $\nu=0.3$
- Muratura: $\nu=0.25$

- modello a fessurazione diffusa (*Smear crack*)
- criterio di resistenza *Total strain crack*
- resistenza a compressione e modulo elastico: prove sperimentali di compressione, comportamento elasto-plastico
- resistenza e comportamento a trazione: prove sperimentali di flessione su campioni non rinforzati

	w	E	$f_{c,m}$	$f_{t,m}$
Mattoni	18 kN/m ³	5060 MPa	9.3 MPa	0.29MPa
Pietra	21 kN/m ³	2610 MPa	4.9 MPa	0.33MPa
Ciottoli	19 kN/m ³	1570 MPa	1.3 MPa	0.22MPa



SIMULAZIONI NUMERICHE

Caratteristiche dei materiali:

- Rete GFRP: comportamento fragile calibrato sulla base di prove sperimentali su fili di rete;
- Intonaco: $\nu=0.20$ - modello a fessurazione diffusa (*Smear crack*),
- - criterio di resistenza *Total strain crack*
- resistenze e modulo elastico: prove sperimentali su cilindri di malta



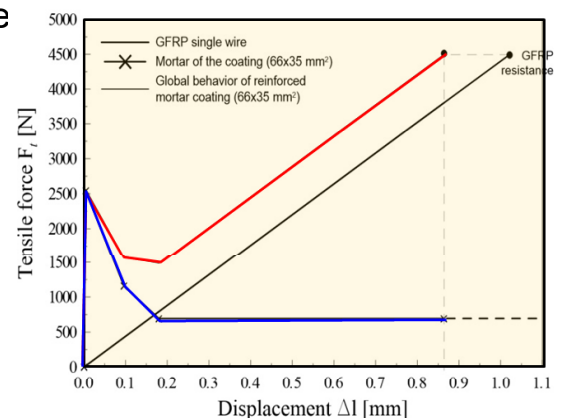
- criterio di rottura a trazione test di trazione (*effetto tension stiffening*)

$$w = 20 \text{ kN/m}^3$$

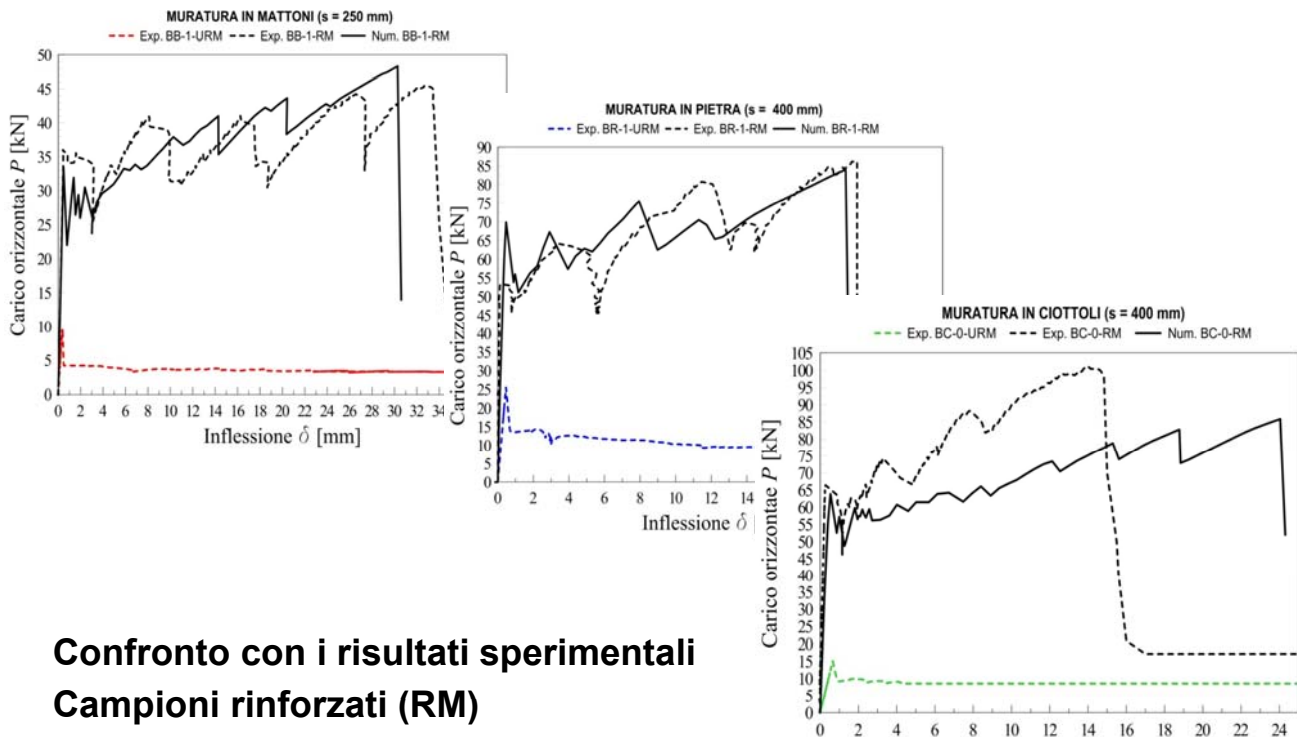
$$E = 14430 \text{ MPa}$$

$$f_{c,c} = 6.3 \text{ MPa}$$

$$f_{t,c} = 1.1 \text{ MPa}$$



SIMULAZIONI NUMERICHE



Confronto con i risultati sperimentali Campioni rinforzati (RM)



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste

- DCMS - CTU Prague



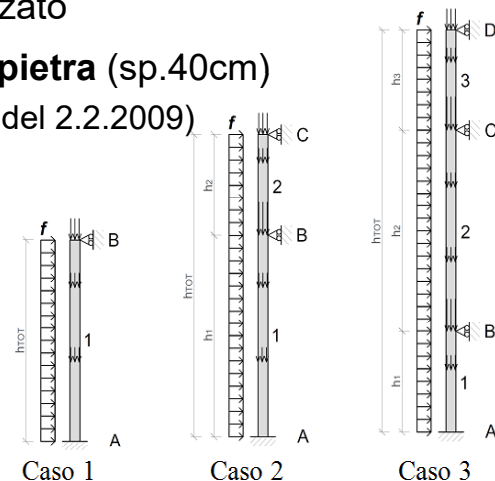
63

STUDIO DI CASI REALI

Caratteristiche delle pareti:

- 3 configurazioni (Caso 1, 2 e 3)
- Valutazione del contributo di compressione verticale dato dai pesi propri e dagli orizzontamenti (solai di piano 7.2 kN/m², copertura 4.8 kN/m²)
- Confronto tra caso non rinforzato e rinforzato
- Tipologie murarie: **mattoni** (sp. 38cm) e **pietra** (sp.40cm)
(resistenze: Tabella C8A.2.1, Circolare n. 617 del 2.2.2009)

Tipologia muraria	E_m [MPa]	$f_{c,m}$ [MPa]	$f_{t,m}$ [MPa]
Mattoni pieni	1800	1.8	0.12
Pietra	1035	0.75	0.09



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste

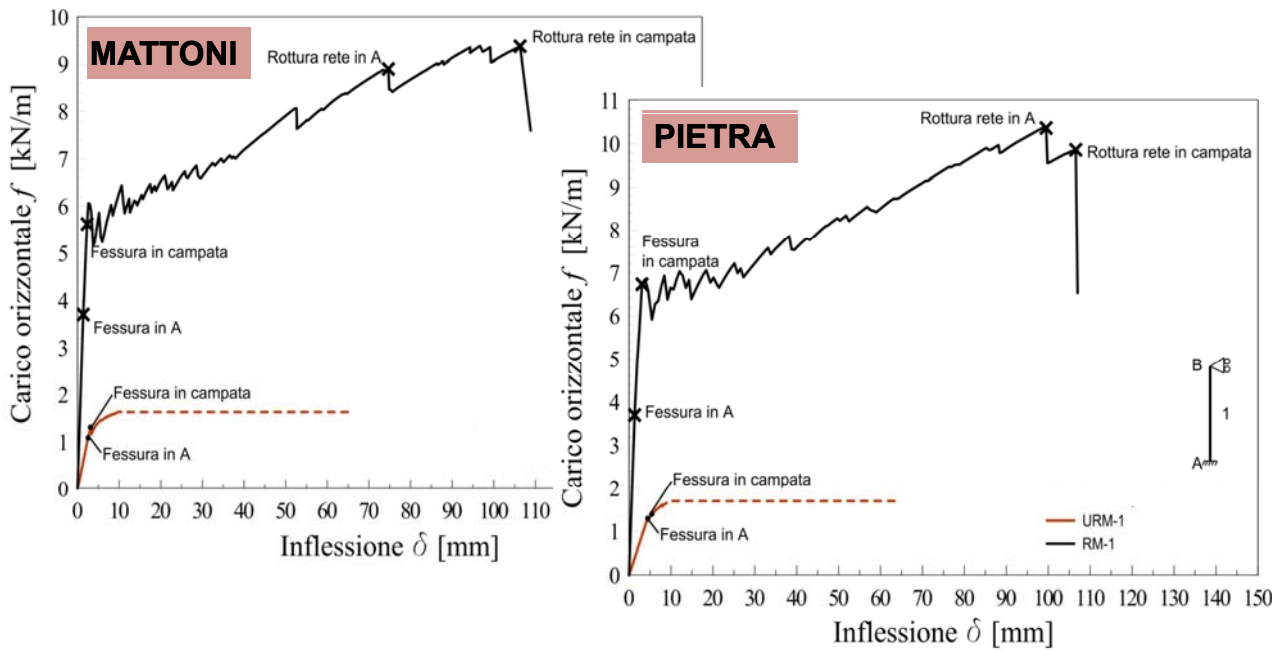
- DCMS - CTU Prague



64

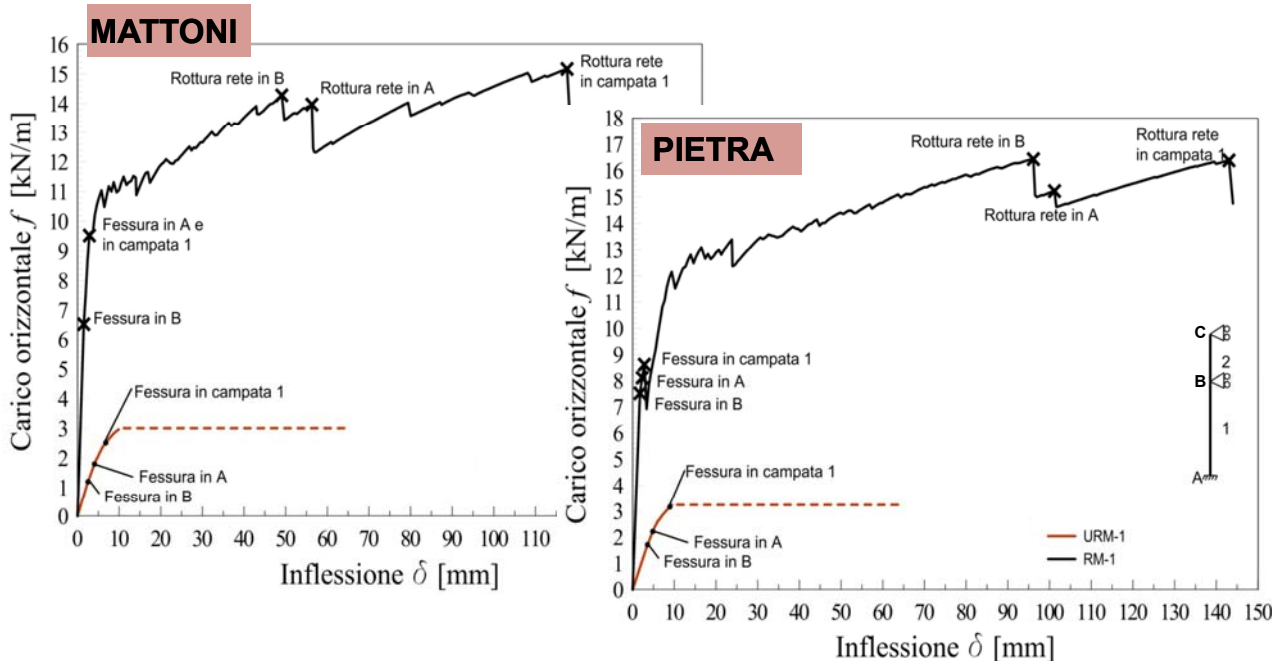
STUDIO DI CASI REALI

Risultati numerici – Caso 1



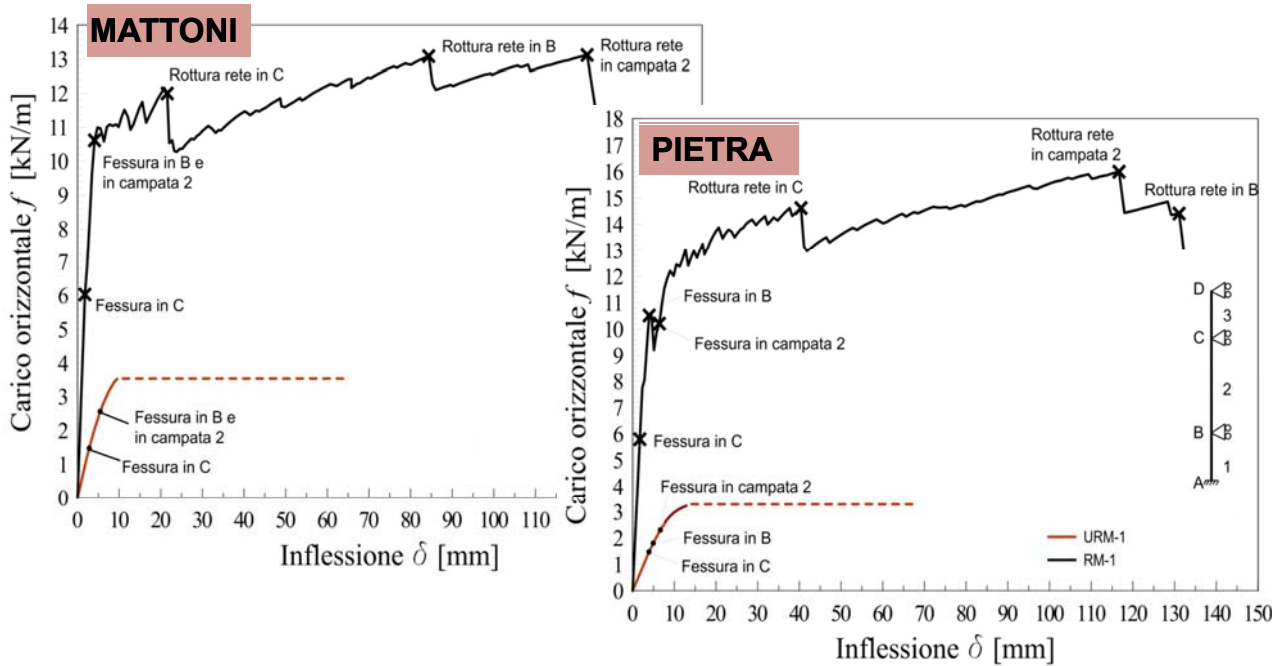
STUDIO DI CASI REALI

Risultati numerici – Caso 2



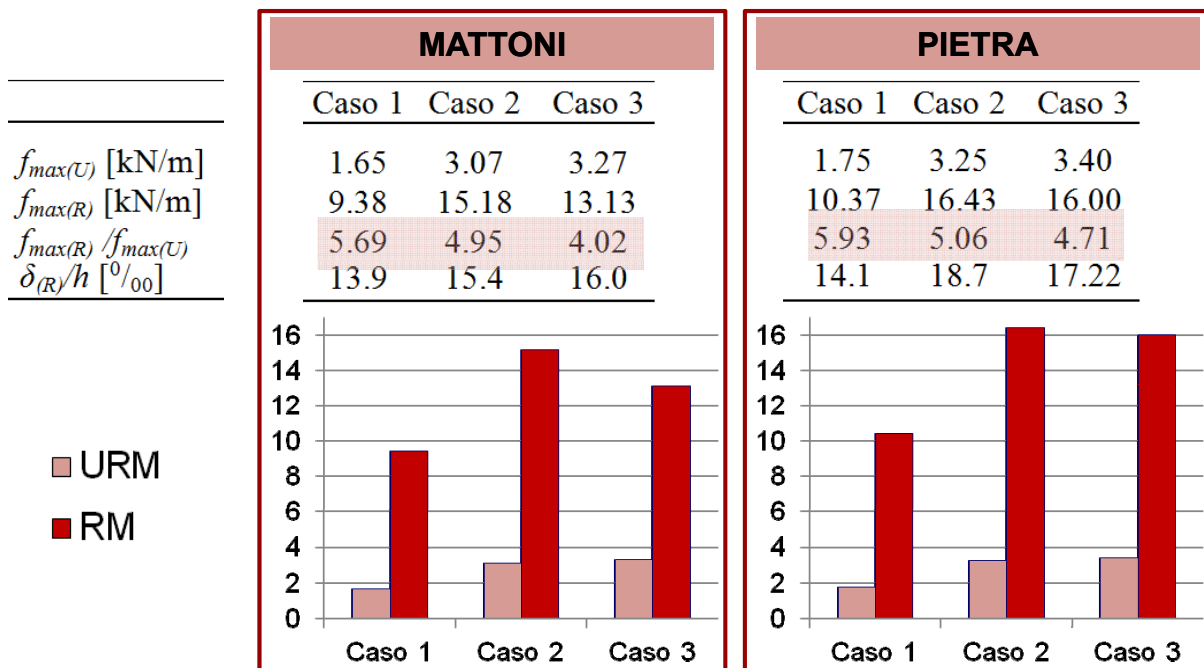
STUDIO DI CASI REALI

Risultati numerici – Caso 3



STUDIO DI CASI REALI

Risultati numerici



ANALISI PUSH OVER DI EDIFICI IN MURATURA RINFORZATI CON L'INTONACO ARMATO



Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste - DCMS - CTU Prague



69

MODELLI NUMERICI

Caratteristiche strutture:

- ✓ Edifici in muratura regolari a **due piani**;
- ✓ Dimensione in pianta 39x12 m², altezza interpiano 3.80 m;
- ✓ **Pareti** assunte **efficacemente collegate ai solai** mediante cordoli in calcestruzzo armato;
- ✓ **Solai** con **sufficiente rigidezza nel proprio piano**;
- ✓ Sono stati considerati due diversi tipi di muratura:
 - **Mattoni pieni** in laterizio, 380 mm
 - **Pietra grossolanamente squadrata**, 400 mm



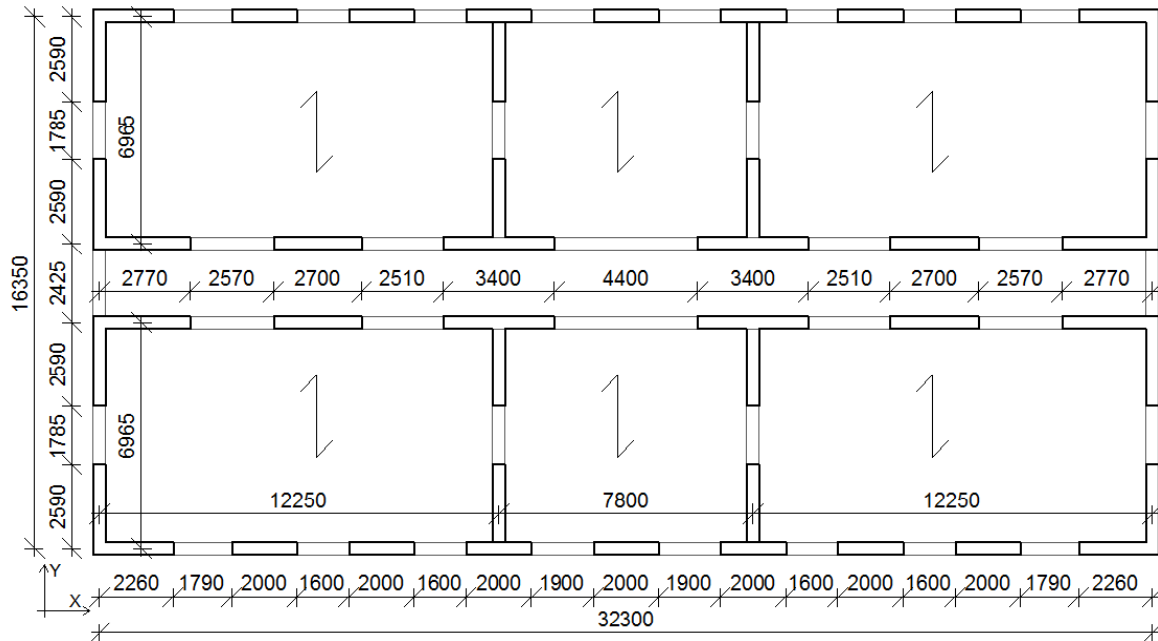
Prof. Ing. Natalino Gattesco
Dipartimento di Ingegneria e Architettura - Università di Trieste - DCMS - CTU Prague



70

MODELLI NUMERICI

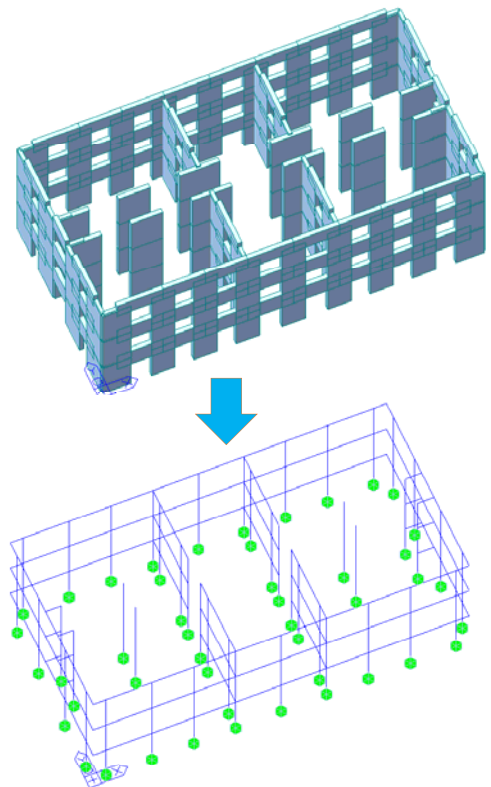
Caratteristiche strutturali:



MODELLI NUMERICI

Modellazione:

- ✓ Modello 3D a **Telaio Equivalente**: murature forate formate da **macro elementi trave** per le **fasce** e per i **maschi**, collegati da elementi rigidi (nodi);
- ✓ **Maschi**: altezza efficace valutata con la regola di Dolce (1989); **fasce**: lunghezza efficace pari alla luce netta delle aperture;
- ✓ **Risposta non-lineare** della struttura concentrata in **cerniere plastiche**
 - Cerniere plastiche ai **nodi di estremità** delle travi per la flessione nel piano;
 - Cerniera plastica centrale per il taglio nel piano;
- ✓ **Diaframmi rigidi** nel loro piano.



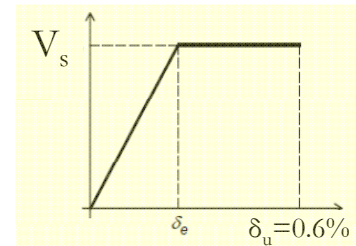
MODELLI NUMERICI

Caratteristiche cerniere plastiche:

MURATURA NON RINFORZATA

✓ Resistenza a taglio fasce

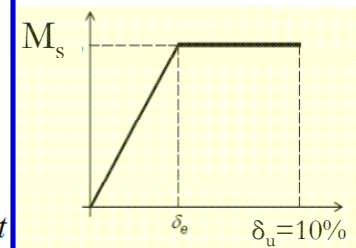
$$V_S = h \cdot t \cdot \frac{f_{v0}}{\gamma_M}$$



✓ Resistenza a flessione fasce

tenendo conto del contributo del cordolo (H_p)

$$M_S = \frac{H_p \cdot h_S}{2} \cdot \left(1 - \frac{H_p}{0.85 \cdot f_{hd} \cdot h_S \cdot t} \right) \quad H_p \leq 0.4 f_{hd} h_S t$$



Proprietà meccaniche in accordo con la "Circolare 2 febbraio 2009, n. 617".

MODELLI NUMERICI

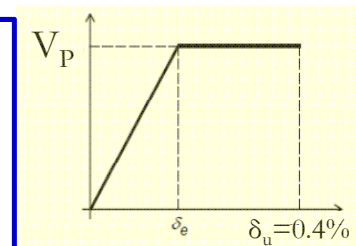
Caratteristiche cerniere plastiche:

MURATURA NON RINFORZATA

✓ Resistenza a taglio maschi

tenendo conto dell'azione assiale p (Turnsek-Cacovich)

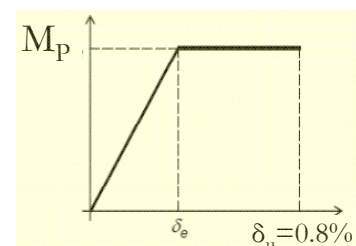
$$V_P = b_P \cdot t \cdot \frac{1.5 f_{v,0}}{\alpha} \sqrt{1 + \frac{p}{1.5 f_{v,0}}} \quad \alpha = \begin{cases} 1.5 & 1.5 \leq l_P/b_P \\ l_P/b_P & 1 \leq l_P/b_P \leq 1.5 \\ 1.0 & l_P/b_P \leq 1.0 \end{cases}$$



✓ Resistenza a pressoflessione maschi

tenendo conto dell'azione assiale p

$$M_P = \frac{p \cdot b_P^2 \cdot t}{2} \cdot \left(1 - \frac{p}{0.85 \cdot f_c} \right)$$



Proprietà meccaniche in accordo con la "Circolare 2 febbraio 2009, n. 617".

MODELLI NUMERICI

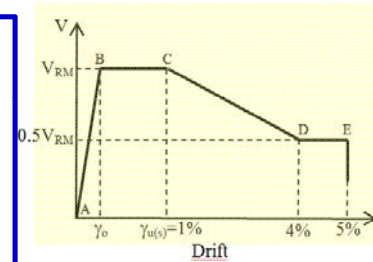
Caratteristiche cerniere plastiche:

MURATURA RINFORZATA

✓ Resistenza a taglio fasce

Resistenza a taglio $f_{v,0}$ e deformazione massima a taglio ricavate da prove di compressione diagonale (Gattesco e Boem, 2015)

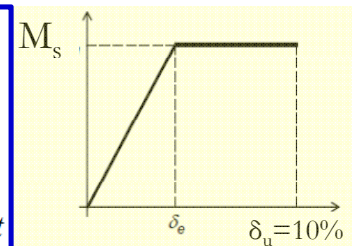
$$V_S = h \cdot t \cdot \frac{f_{v0}}{\gamma_M}$$



✓ Resistenza a flessione fasce

tenendo conto del contributo del cordolo (H_p)

$$M_S = \frac{H_p \cdot h_S}{2} \cdot \left(1 - \frac{H_p}{0.85 \cdot f_{hd} \cdot h_S \cdot t} \right) \quad H_p \leq 0.4 f_{hd} h_S t$$



MODELLI NUMERICI

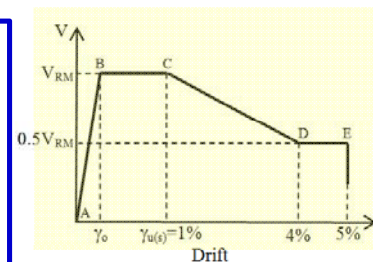
Caratteristiche cerniere plastiche:

MURATURA RINFORZATA

✓ Resistenza a taglio maschi

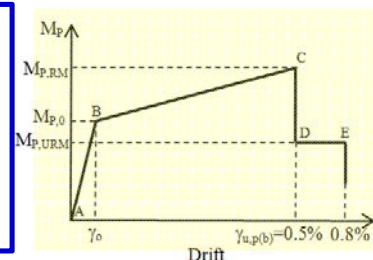
Resistenza a taglio $f_{v,0}$ e deformazione massima a taglio ricavate da prove di compressione diagonale (Gattesco e Boem, 2015)

$$V_S = h \cdot t \cdot \frac{f_{v0}}{\gamma_M}$$



✓ Resistenza a pressoflessione maschi

Comportamento non lineare a pressoflessione
 Momento di cracking ($M_{p,0}$) e momento ultimo ($M_{p,RM}$) valutati analiticamente dalle resistenze di muratura, malta e rete in GFRP.



MODELLI NUMERICI

Caratteristiche

cerniere plastiche :

	Solid brick		Rubble stone	
	URM	RM	URM	RM
Masonry				
E_m [MPa]	1500	3780	1500	3415
G_m [MPa]	600	1510	600	1366
γ_m [kN/m ³]	18	21	21	24
$f_{c,m}$ [MPa]	3.2	3.2	2.6	2.6
$f_{hc,m}$ [MPa]	1.6	1.6	1.3	1.3
$f_{v,0}$ [MPa]	0.076	0.187	0.056	0.161
Piers				
$\gamma_{u,p(s)}$ [%]	0.4	1(4)	0.4	1(4)
$\gamma_{u,p(b)}$ [%]	0.8	0.5(0.8)	0.8	0.5(0.8)
Spandrels				
H_p [kN]	145	145	145	145
$\gamma_{u,s(s)}$ [%]	0.6	1 (4)	0.6	1 (4)
$\gamma_{u,s(b)}$ [%]	10	10	10	10



ANALISI NUMERICHE

- ✓ **Due diverse distribuzioni** di forze orizzontali (proporzionali al primo modo -S- e proporzionali alle masse -M-)
- ✓ **Due direzioni principali** dell'azione sismica (X e Y)
- ✓ Determinazione **curve di capacità** (relazione tra il taglio alla base F_b e lo spostamento del punto di controllo s_b , assunto come il baricentro del piano di copertura dell'edificio).
- ✓ Calcolo **periodo fondamentale di vibrazione**, massa efficace, rigidezza iniziale (FEMA 440), **resistenza a taglio e capacità di spostamento**

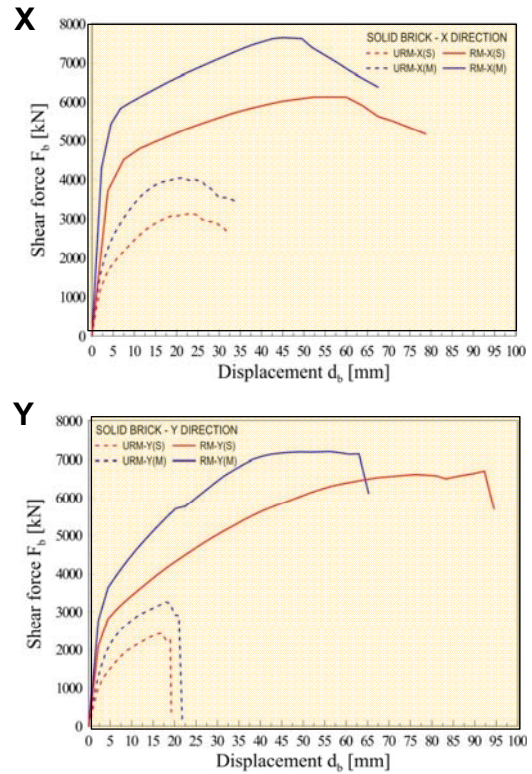
		$T_{(x)}$ [s]	Trans. modal mass X [%]	$T_{(y)}$ [s]	Trans. modal mass Y [%]
Solid brick	URM	0.255	87.1	0.302	85.1
	RM	0.170	86.8	0.212	83.8
Rubble stone	URM	0.265	87.0	0.314	85.0
	RM	0.230	86.8	0.185	83.8



RISULTATI

Mattoni pieni, 380mm:

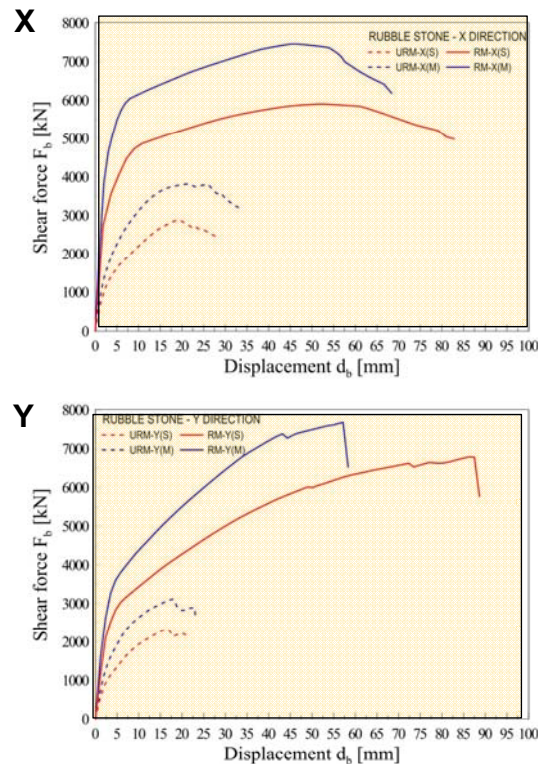
		Solid brick				
		X (S)	X (M)	Y (S)	Y (M)	
URM	F_{max}	[kN]	3128	4042	2432	3257
	s_u	[mm]	32	34	19	22
	$a_{g,max}$	[g]	0.201	0.296	0.132	0.225
RM-I	F_{max}	[kN]	6126	7644	6702	7199
	s_u	[mm]	79	68	95	65
	$a_{g,max}$	[g]	0.442	0.621	0.436	0.560
$a_{g,max}(R)/a_{g,max}(U)$		[-]	2.2	2.1	3.3	2.5



RISULTATI

Pietra, 400mm:

		Rubble stone				
		X (S)	X (M)	Y (S)	Y (M)	
URM	F_{max}	[kN]	2879	3815	2317	3114
	s_u	[mm]	28	33	21	23
	$a_{g,max}$	[g]	0.159	0.276	0.125	0.218
RM-I	F_{max}	[kN]	5905	7455	6788	7680
	s_u	[mm]	83	68	89	58
	$a_{g,max}$	[g]	0.453	0.627	0.454	0.527
$a_{g,max}(R)/a_{g,max}(U)$		[-]	2.8	2.3	3.6	2.4



STUDIO NUMERICO SULL'EFFICACIA DEL RINFORZO DI VOLTE IN MURATURA



VOLTE IN MURATURA

Elevata vulnerabilità sismica di volte non rinforzate in
muratura

Evitare il collasso fragile



EFFICACIA

Tutela del patrimonio storico
(affreschi, decorazioni, ecc.)



COMPATIBILITA'



Chiesa dei Cappuccini di Urbino



Affreschi di Galleria Farnese



VOLTE IN MURATURA A BOTTE

Tipologie:

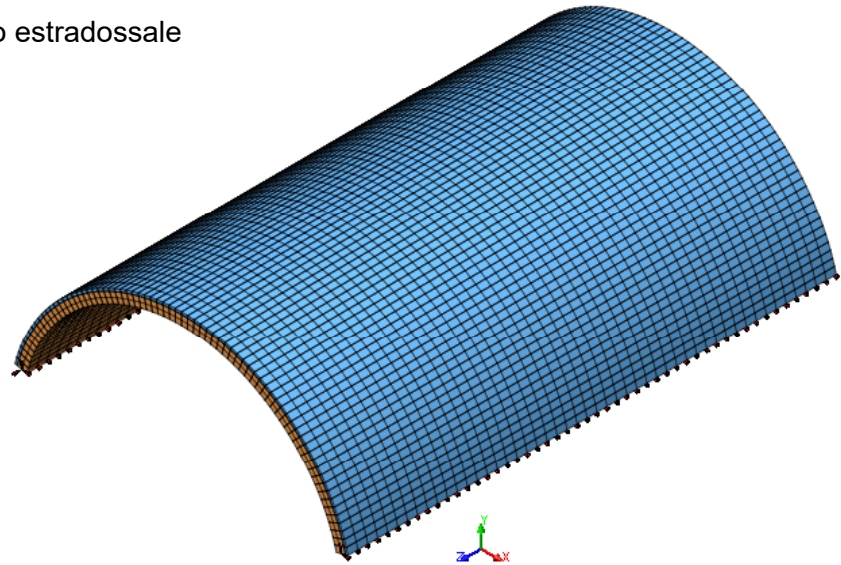
- Volte non rinforzate
- Volte rinforzate con intonaco estradossale armato con rete in GFRP

Sottoposte a

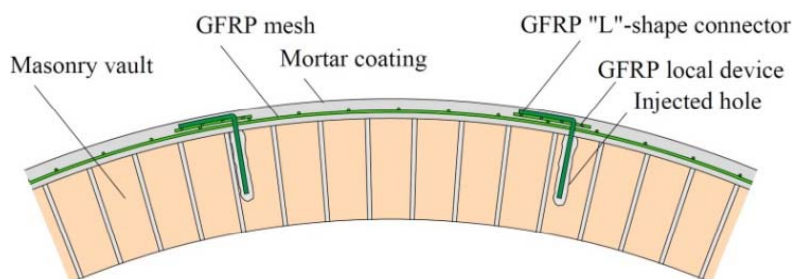
- Carichi verticali
- Carichi orizzontali in direzione trasversale

Caratteristiche geometriche:

- freccia/raggio = 1.00
- freccia/raggio = 0.75
- freccia/raggio = 0.60



TECNICA DI RINFORZO



Applicazione di **30-35 mm intonaco** all'**estradosso** della volta, **rinforzato con rete in GFRP** (Glass Fiber Reinforced Polymer).

Connettori in GFRP a forma di L ($8 \times 12 \text{ mm}^2$) sono inseriti in fori nella muratura e iniettati con resina epossidica tixotropica.

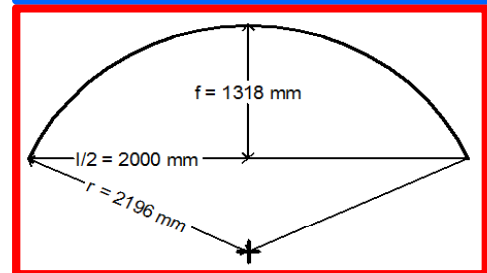
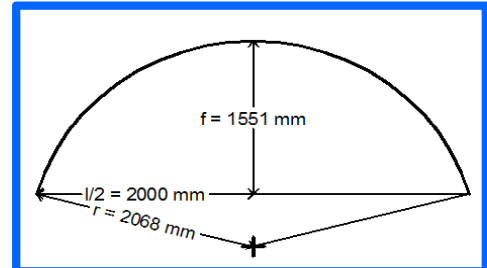
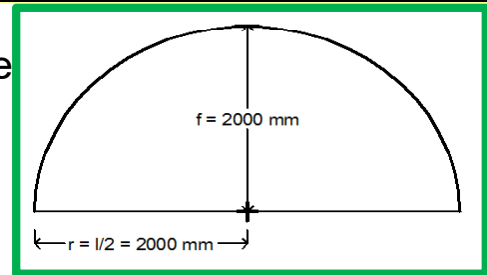
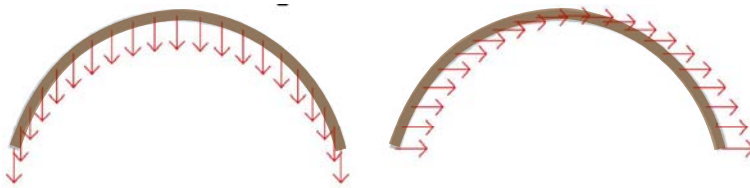


➤ **Simulazioni numeriche** – volte a botte

- Volta in muratura di mattoni (sp.12cm)
- 3 geometrie: $f/r = 1.00, 0.75$ e 0.60
- Configurazioni di carico:

Peso proprio + carico vert. proporzionale

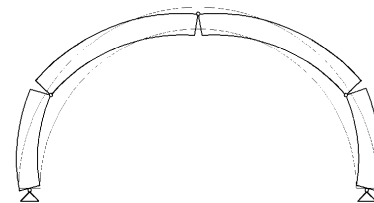
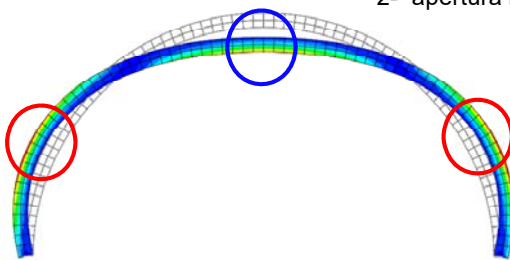
Peso proprio + carico orizzontale proporz.



CARICHI VERTICALI

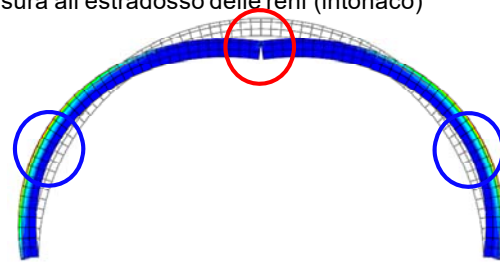
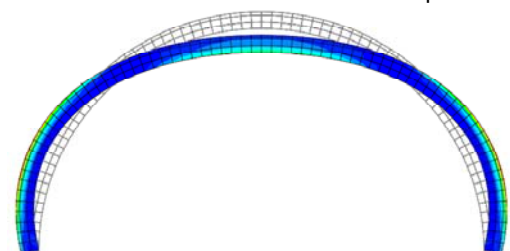
Volte non rinforzate

- 1- apertura fessure all'estradosso delle reni
- 2- apertura fessura all'intradosso della chiave



Volte rinforzate

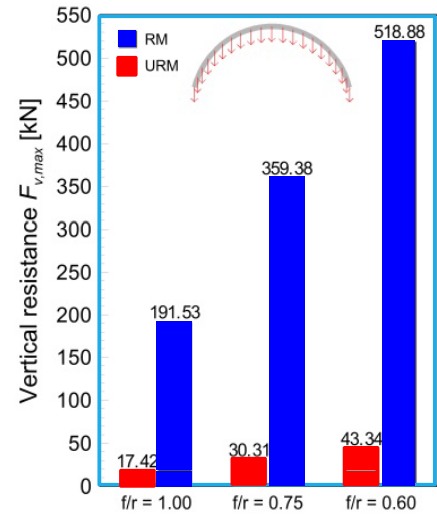
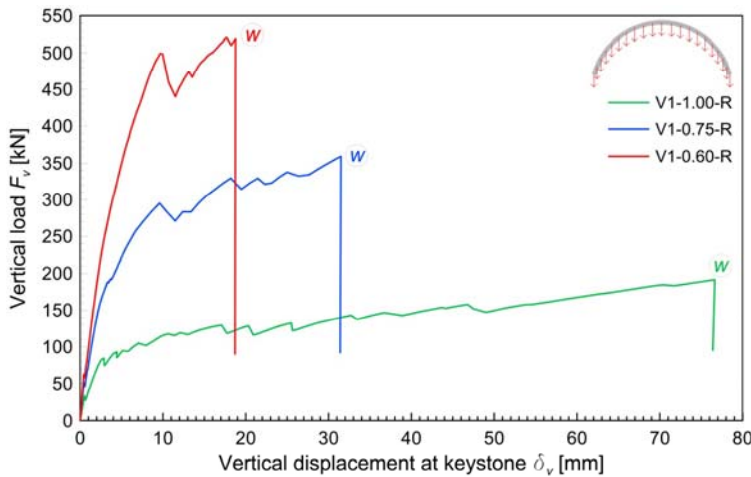
- 1- apertura fessura all'intradosso della chiave (muratura)
- 2- apertura fessura all'estradosso delle reni (intonaco)



➤ Risultati simulazioni numeriche – carico verticale

$$\alpha_v = \frac{F_{v, \max} - W}{W}$$

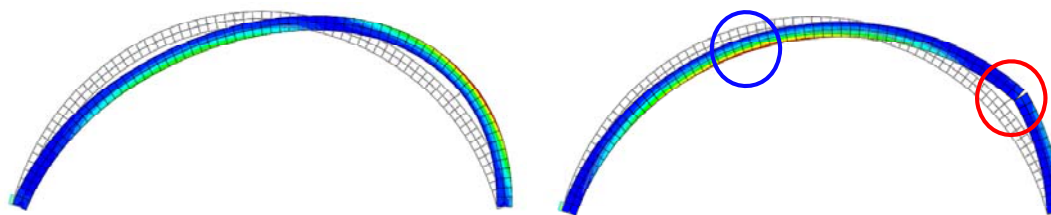
URM	f/r = 1.00	f/r = 0.75	f/r = 0.60	RM	f/r = 1.00	f/r = 0.75	f/r = 0.60
F_v [kN]	17.42	30.31	43.34	F_v [kN]	191.53	359.38	518.88
W [kN]	14.65	12.93	12.04	W [kN]	19.17	16.93	15.23
α_v [-]	0.19	1.34	2.60	α_v [-]	8.99	20.23	33.07



CARICHI ORIZZONTALI

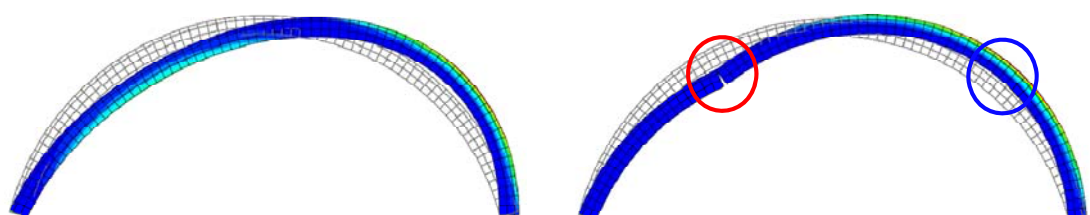
Volte non rinforzate

- 1- apertura fessura all'estradosso di una delle reni
- 2- apertura fessura all'intradosso della seconda delle due reni



Volte rinforzate

- 1- apertura fessura all'intradosso di una delle reni (muratura)
- 2- apertura fessura all'estradosso della seconda delle due reni (intonaco)

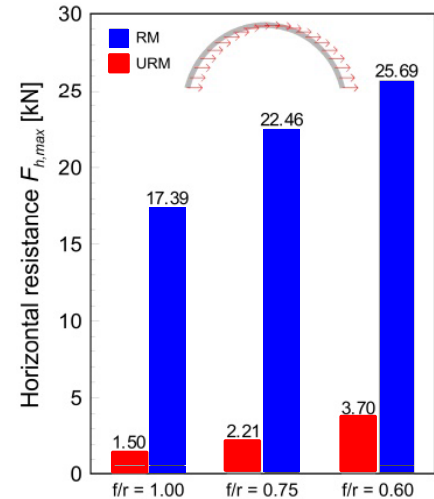
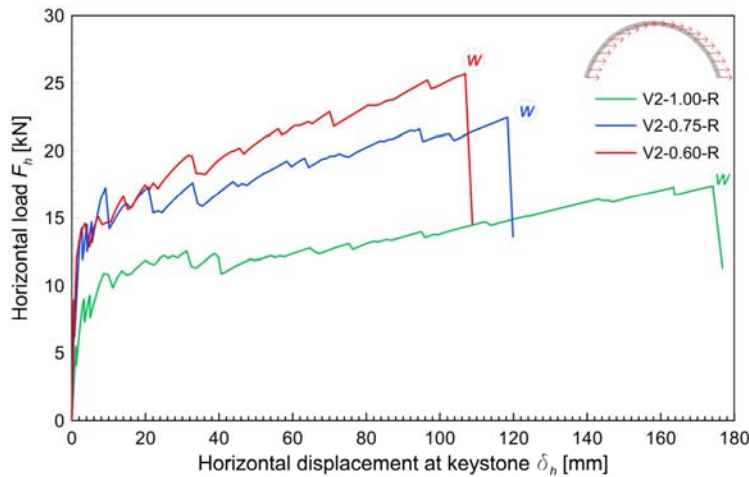


➤ Risultati simulazioni numeriche – carico orizzontale

$$\alpha_h = \frac{F_{h,max}}{W}$$

URM	f/r = 1.00	f/r = 0.75	f/r = 0.60
F_h [kN]	1.50	2.21	3.70
W [kN]	14.65	12.93	12.04
α_h [-]	0.10	0.17	0.31

RM	f/r = 1.00	f/r = 0.75	f/r = 0.60
F_h [kN]	17.39	22.46	25.69
W [kN]	19.17	16.93	15.23
α_h [-]	0.91	1.33	1.69



➤ Campagna sperimentale in corso



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 1

E' stata condotta un'ampia campagna sperimentale su campioni di muratura rinforzati con un intonaco e rete in GFRP

La resistenza diagonale dei campioni rinforzati rispetto a quelli non rinforzati (efficacia della tecnica**) è risultata da 1.6 a 5.0 volte quella dei campioni non rinforzati.**

Alla formazione delle fessure diagonali non si è verificato un brusco calo di resistenza (*campioni non rinforzati*) ma si è ridotta gradualmente, conservando più del 60% del valore di picco ad un'apertura di fessura di circa 5 mm (Elevata energia di frattura**).**



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 2

La rottura dei fili di rete è avvenuta per valori dell'apertura di fessura di 8-10 mm.

L'influenza del tipo di malta da intonaco è modesta sulla resistenza diagonale dei campioni. *Modifica il meccanismo di rottura rendendo meno efficace l'intonaco con maggiore resistenza.*

Le prove di taglio compressione hanno evidenziato l'elevata importanza dei dispositivi di connessione – distacco dell'intonaco per valori elevati della componente assiale.

Dai risultati sperimentali sono state ricavate alcune formule di utilità pratica per calcolare i parametri equivalenti di resistenza e rigidezza da utilizzare nella progettazione.



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 3

I risultati delle prove su **murature soggette a flessione** fuori piano hanno evidenziato significativi incrementi di resistenza >350% e di duttilità (10-15 volte).

La rottura del campione in mattoni non rinforzato si è verificata per valori della freccia di qualche millimetro; la rottura dei campioni rinforzati (rottura fili rete) è avvenuta per valori della freccia di 25-30 mm.

L'analisi di un edificio ha mostrato che il collasso degli edifici non rinforzati è prevalentemente legato al **cedimento per taglio di fasce e maschi**.

Nell'edificio rinforzato si può avere cedimento a taglio delle fasce e successiva rottura a pressoflessione dei maschi (funzionamento a mensola).

Le accelerazioni resistenti dell'edificio rinforzato diventano da 2 a 3 volte quelle dell'edificio non rinforzato.



CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE 4

Lo studio numerico sulle volte ha messo in evidenza come cambiano i meccanismi di rottura nel caso di volte rinforzate con sottile controvolta estradossale in malta di calce e rete in GFRP.

La capacità portante in termini di carico verticale uniformemente distribuito **della volta armata varia da 9 a 33 volte il peso proprio.**

La capacità portante in termini di forze orizzontali uniformemente distribuite varia da **5 a 9 volte quella della volta non armata.**



GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Se vengono rilevati errori o imprecisioni si prega di farlo presente all'autore: gattesco@units.it. Grazie.

