



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale e tecniche di intervento su edifici in muratura in zona sismica

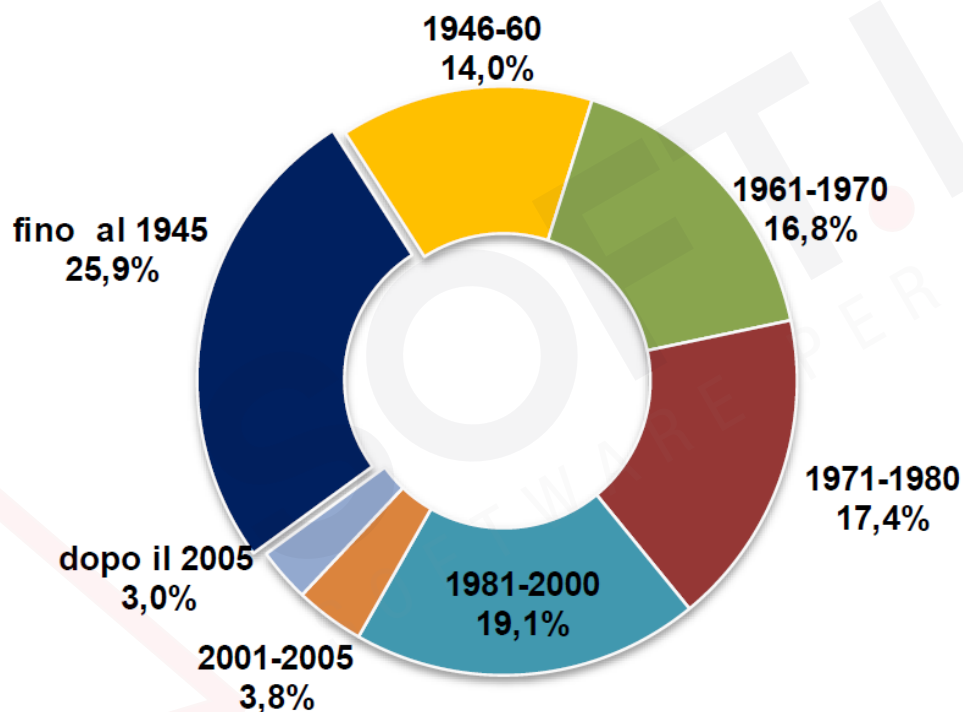
Prof. Ing. Enzo Martinelli



- ✓ Introduzione
- ✓ Aspetti normativi
- ✓ Tecniche di intervento
- ✓ Metodologie di analisi
- ✓ Conclusioni

Introduzione

Patrimonio edilizio italiano: epoca di costruzione/1

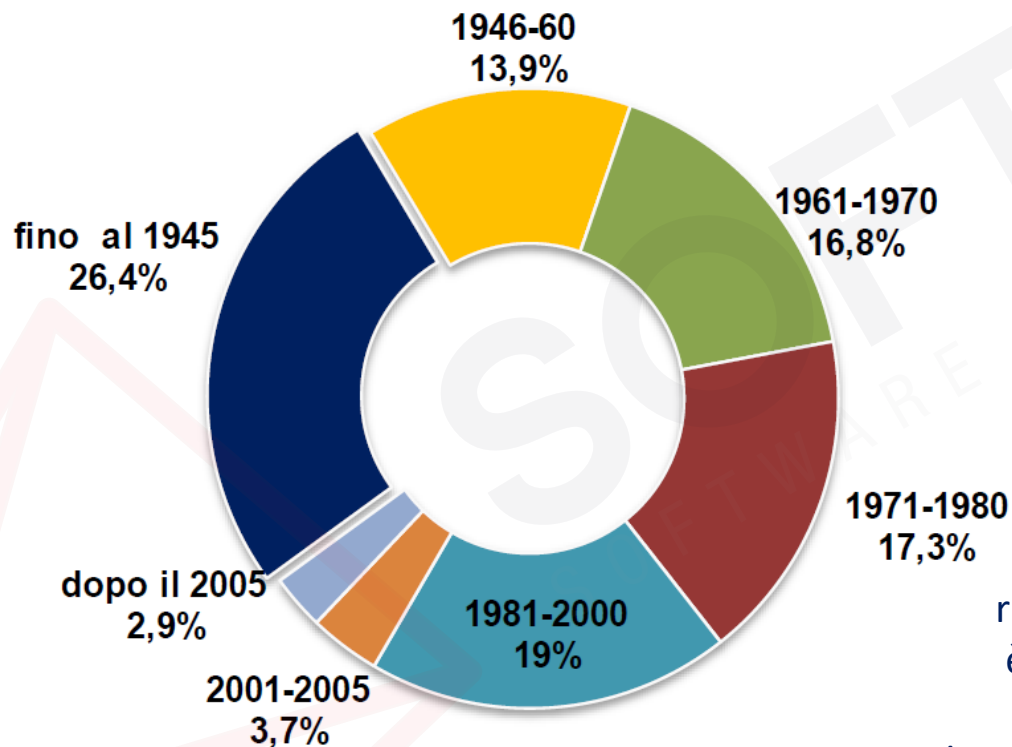


Elaborazione Ance su dati Censimento Istat 2011

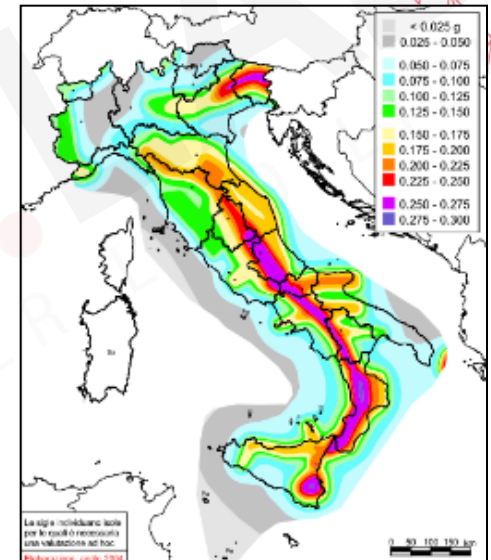
Lo stock edilizio residenziale italiano è costituito da **12.2 milioni di edifici** (per 31.2 milioni di abitazioni).

Introduzione

Patrimonio edilizio italiano: epoca di costruzione/1



Elaborazione Ance su dati Censimento Istat 2011

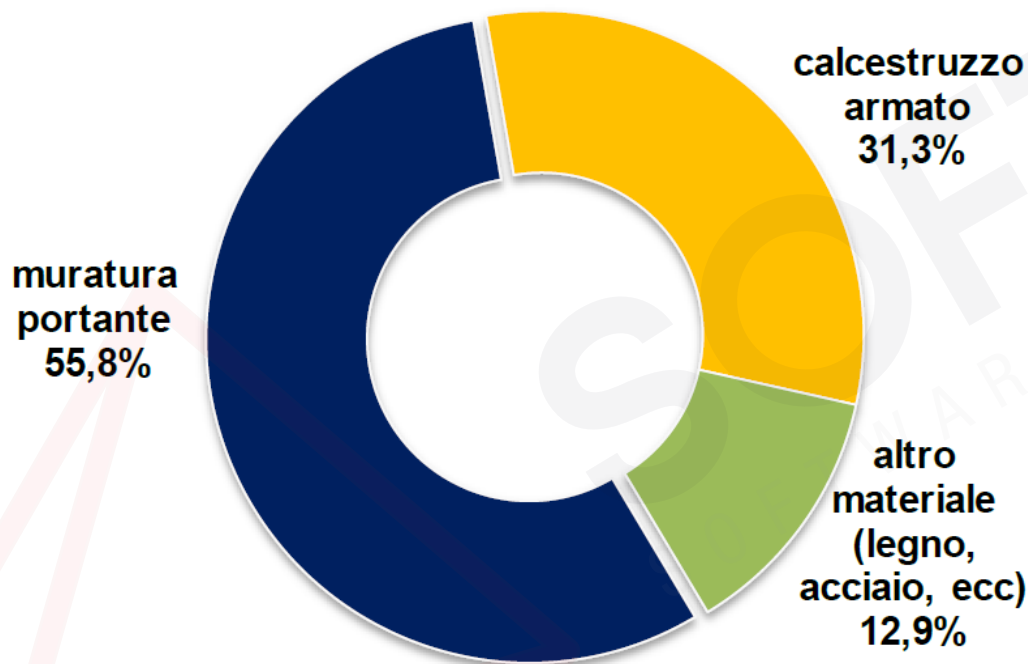


Lo stock edilizio presente in comuni ricadenti in Zona 1, 2 o 3 (circa 5800) è costituito da 11.1 milioni di edifici.

L'88.4% degli edifici è ad uso abitativo: si tratta di circa 9.3 milioni di immobili.

Introduzione

Patrimonio edilizio italiano: tipologia costruttiva



Elaborazione Ance su dati Censimento Istat 2011

Circa **5.3 milioni di edifici residenziali** ricadenti in zone sismiche 1, 2 o 3 sono costituiti da strutture in muratura.

Introduzione

Patrimonio edilizio italiano: aspetti qualitativi

Muratura

fino al 1945: muratura di buona qualità e buona concezione;

1945-80: edifici con prima evoluzione normativa Post Belice (1968);

1981-00: edifici con seconda evoluzione normativa Post Irpinia (1981 e 1987);

> 2000: edifici con terza evoluzione normativa (1996, 2003).

fino al 1945: edifici spesso misti con calcestruzzo comunque di buona qualità;

1945-80: particolarmente vulnerabili;

1981-00: edifici con prima evoluzione normativa (1974);

> 2000: edifici con seconda evoluzione normativa (1996-2003).

Cemento armato

(ANCE, 2017)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Introduzione

Danni prodotti da eventi sismici: Irpinia (1980)



Zaccaria (2015)

Introduzione

Danni prodotti da eventi sismici: L'Aquila (2009)



Introduzione

Danni prodotti da eventi sismici: Italia centrale (2016)



Aspetti normativi

Materiali/1

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es,: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

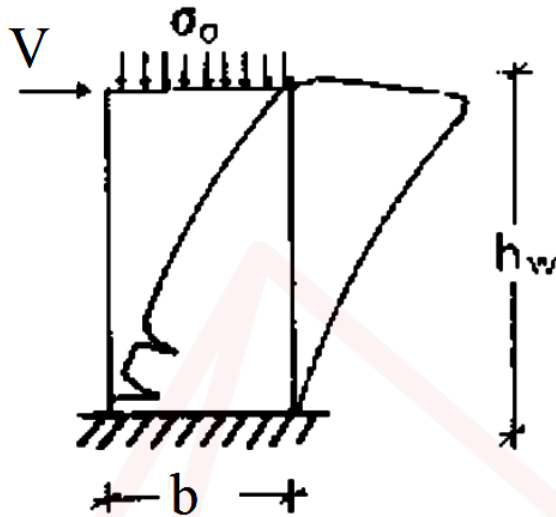
M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.



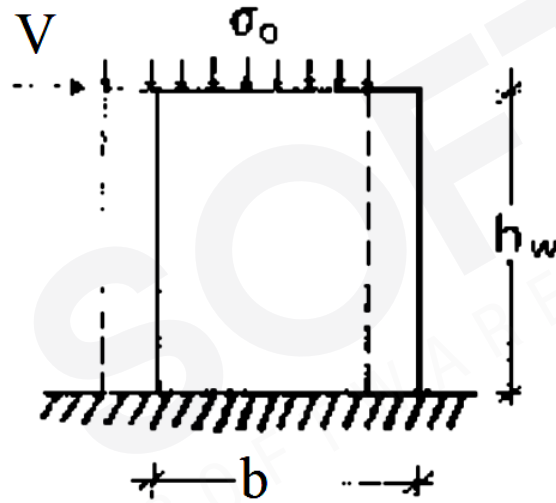
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

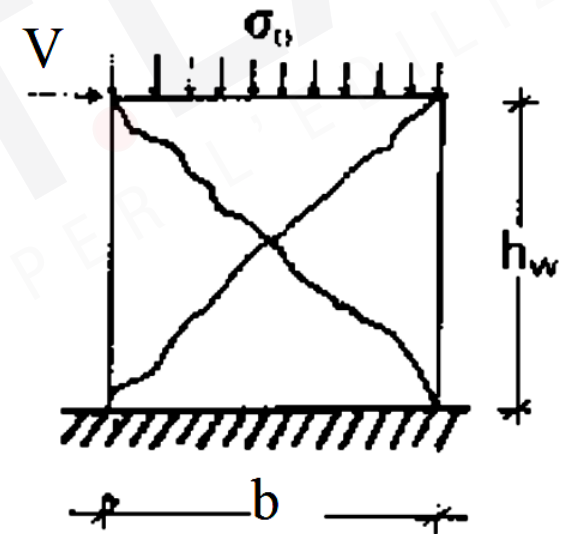
Meccanismi di crisi e modelli di capacità/1



a) Rottura per flessione



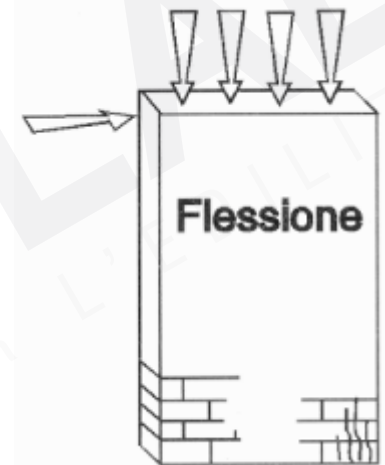
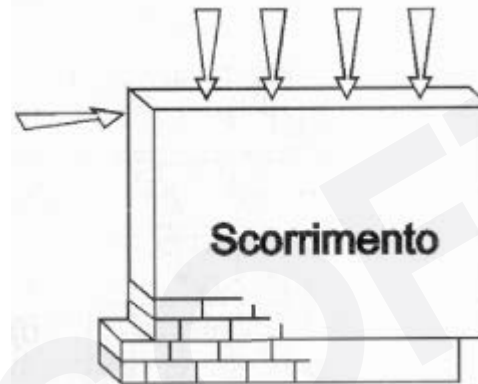
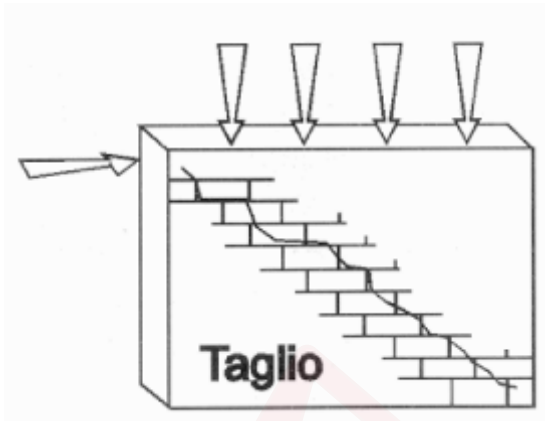
b) Rottura per scorrimento



c) Rottura per fessurazione diagonale

Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

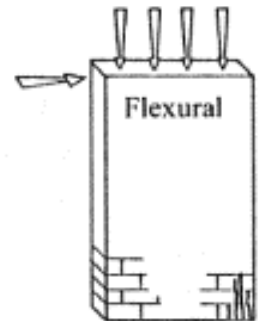
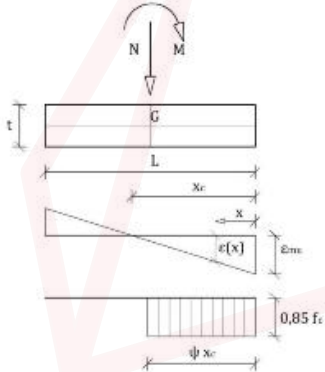
Meccanismi di crisi e modelli di capacità/1



$$M_u = \frac{1}{2} \cdot \sigma \cdot t \cdot L^2 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{0,85 \cdot f_c} \right)$$

$$V_f = \frac{2 \cdot M_u}{h}$$

$$\delta_u = 0.010 \cdot h$$





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

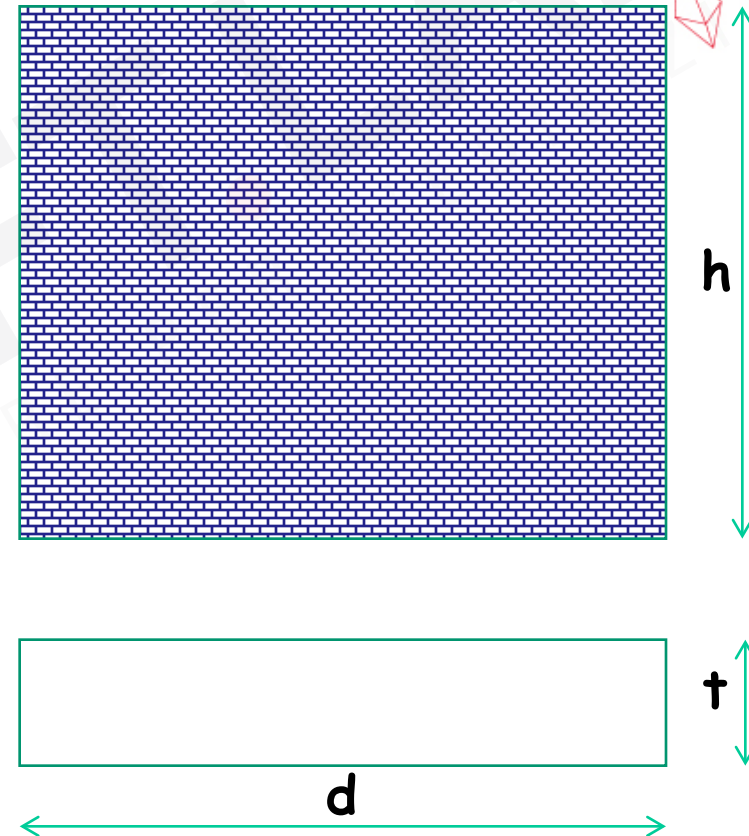
Meccanismi di crisi e modelli di capacità

$$M_{Rd} = \frac{N_{Ed} d}{2} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{Ed}}{0.85 \cdot f_{md}} \right)$$

Dati Geometrici

h=	1200	mm
d=	800	mm
t=	250	mm

$f_{md} = 6,94$ MPa





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

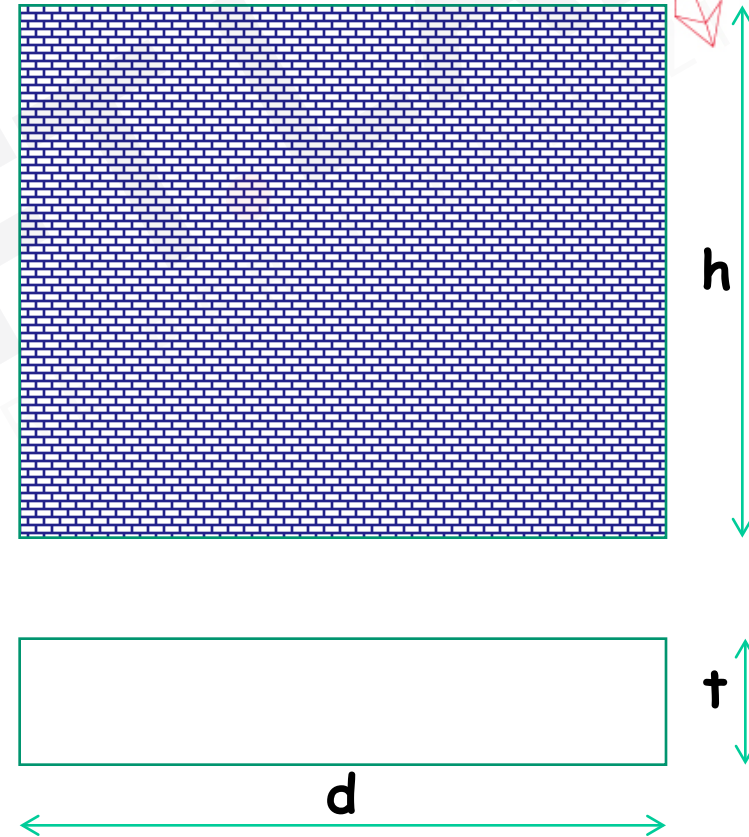
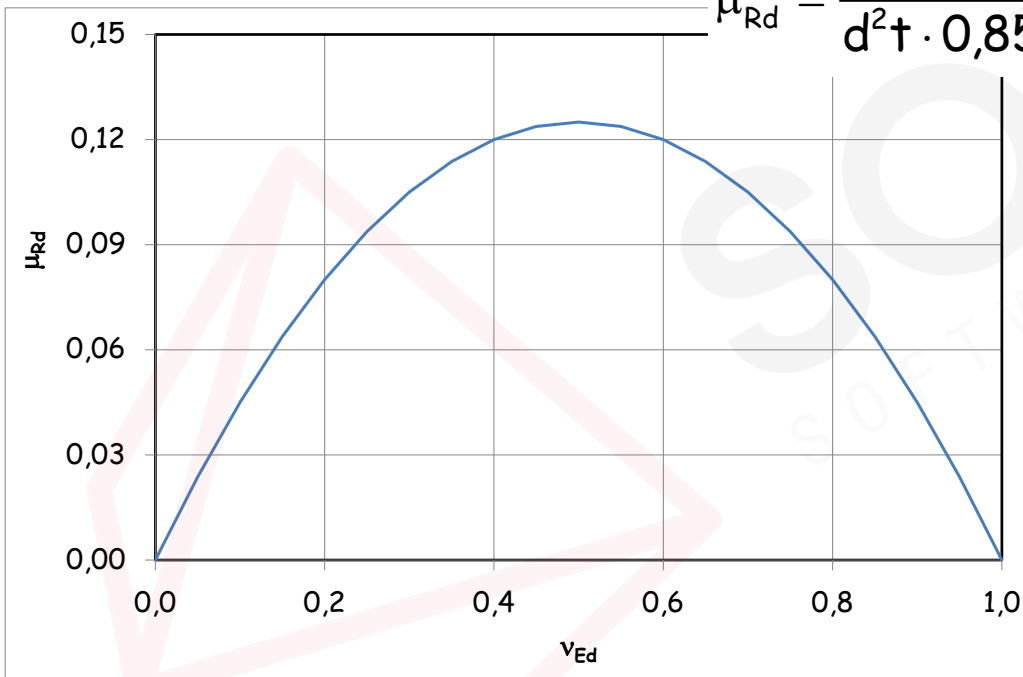
Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità

$$\mu_{Rd} = \frac{v}{2} \cdot (1 - v)$$

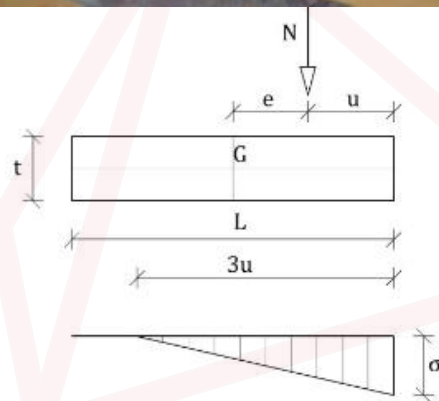
$$v_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{d \cdot t \cdot 0,85 f_{md}}$$

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Rd}}{d^2 \cdot t \cdot 0,85 f_{md}}$$



Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità/2



$$f_{vd} = f_{vd0} + \mu \cdot \sigma' \quad \sigma' = \frac{N}{t \cdot D'}$$

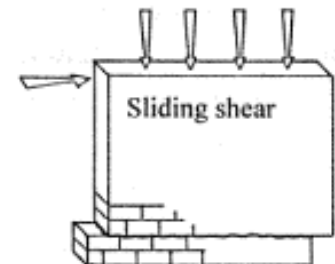
se: $e < L / 6$

$$D' = L$$

se: $e > L / 6$

$$D' = 3u = 3 \cdot \left(\frac{L}{2} - e \right)$$

$$\delta_u = 0.005 \cdot h$$





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità/3

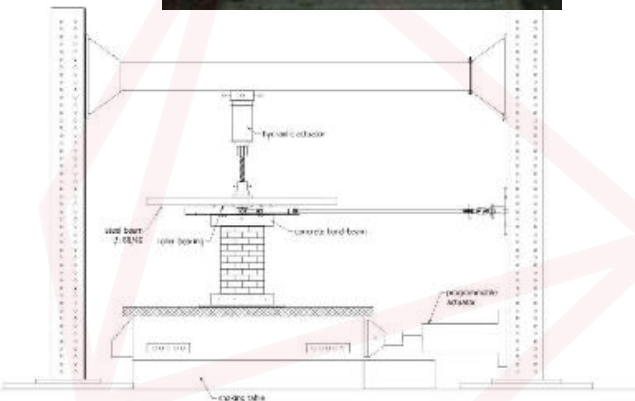
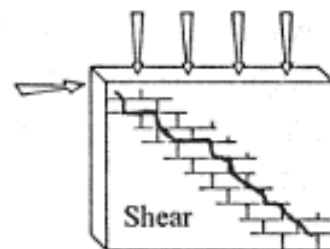


$$b = \frac{h}{L}$$

$$\sigma = \frac{N}{L \cdot t}$$

$$V_{ds} = L \cdot t \cdot \frac{1,5 \cdot \tau_{0,d}}{b} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma}{1,5 \cdot \tau_{0,d}}}$$

$$\delta_u = 0.005 \cdot h$$

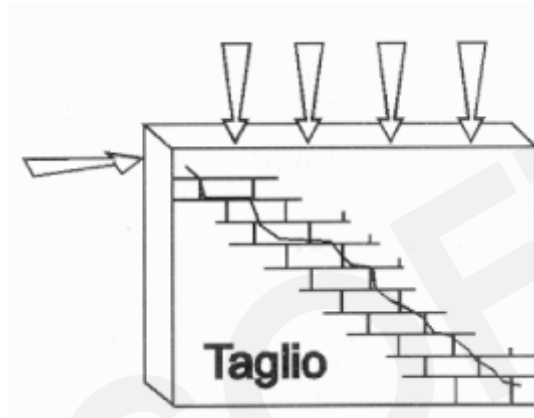
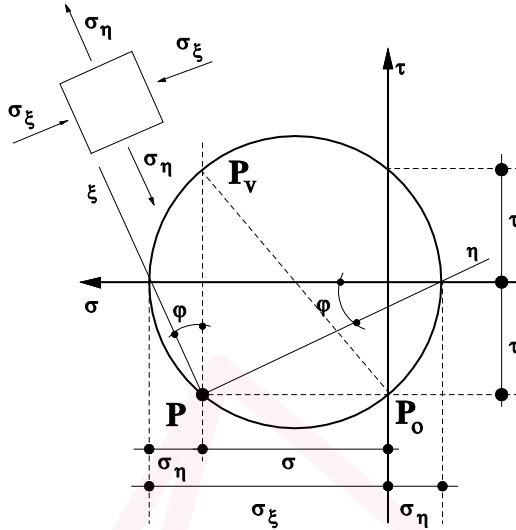




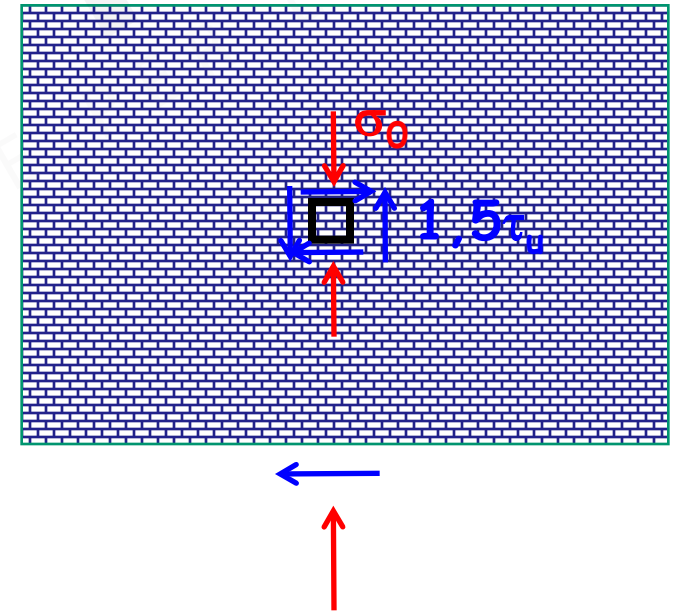
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità



$$V_0 = dt\tau_u \quad N_0 = dt\sigma_0$$



$$\sigma_{\eta} = \left(\frac{\sigma_0}{2} \right) - \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2} \right)^2 + (1.5 \cdot \tau_u)^2} = 1.5 \cdot \tau_k$$



Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità

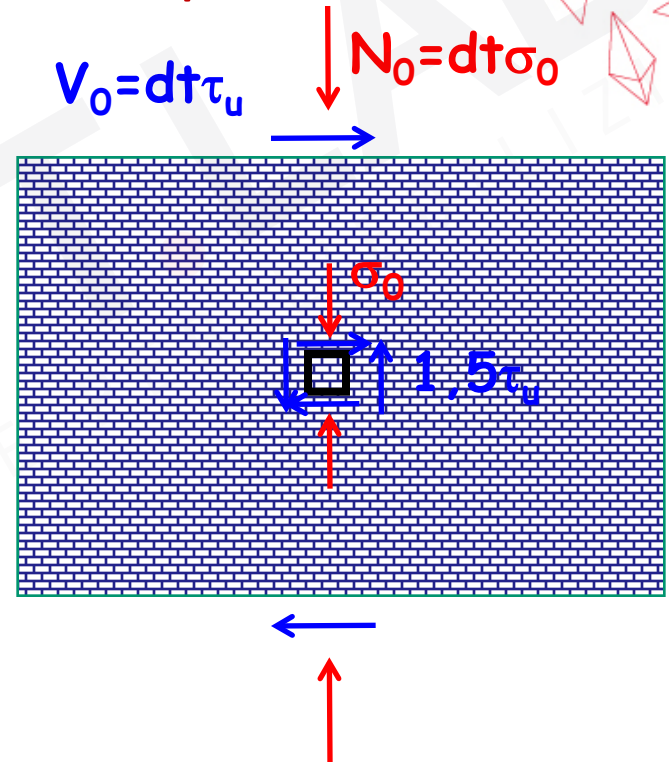
$$\left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1.5 \cdot \tau_u)^2 = \left(\frac{\sigma_0}{2}\right)^2 + (1.5 \cdot \tau_k)^2 + 1.5 \cdot \tau_k \cdot \sigma_0$$

$$(1.5 \cdot \tau_u)^2 = (1.5 \cdot \tau_k)^2 + 1.5 \cdot \tau_k \cdot \sigma_0$$

$$\tau_u = \sqrt{(\tau_k)^2 + \frac{1}{1.5} \cdot \tau_k \cdot \sigma_0}$$

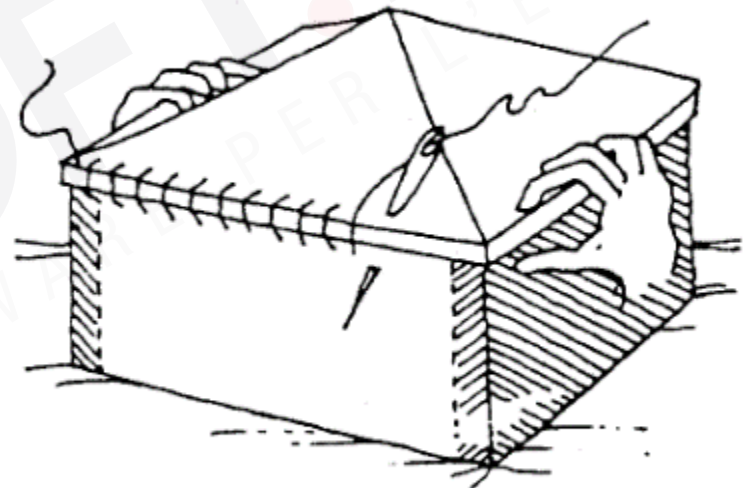
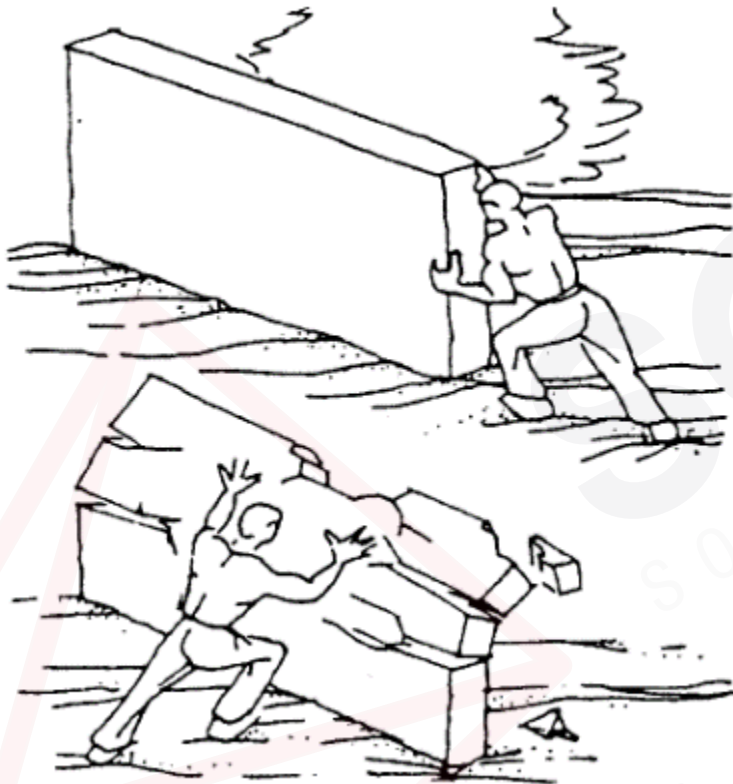
$$\tau_u = \tau_k \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \cdot \tau_k}}$$

$$V_{Rms} = \tau_u dt$$



Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità: fuori piano/1



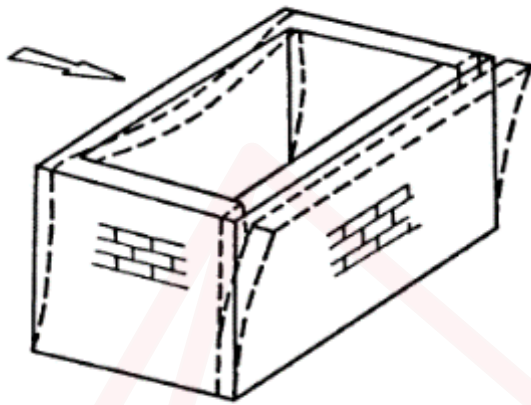
Touliatos (1996)



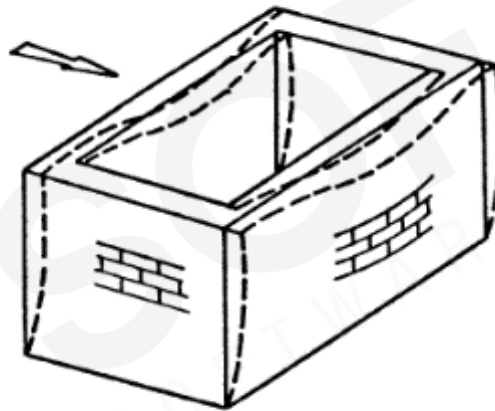
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

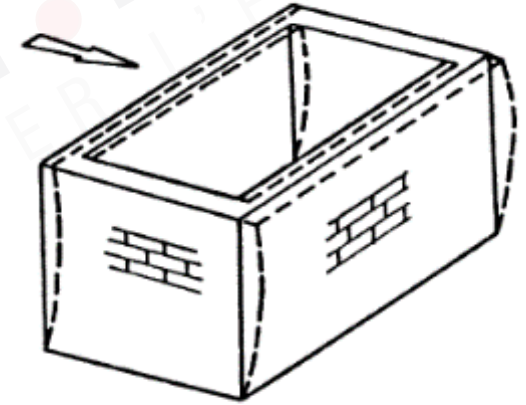
Meccanismi di crisi e modelli di capacità: fuori piano/2



a) con solaio deformabile
e senza cordolo



b) con cordolo e con
solaio deformabile



c) con cordolo e con
solaio rigido

Touliatos (1996)

Aspetti normativi

Valutazione della sicurezza/1

ζ_E : rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura (legata a PGA_C) e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione sul medesimo suolo e con le medesime caratteristiche (proporzionale a PGA_D) :

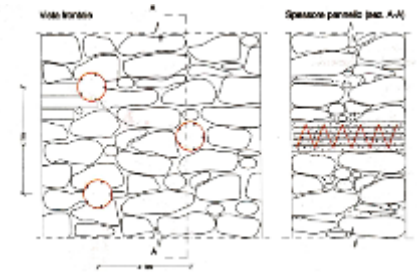
$$\zeta_E = \frac{PGA_C}{PGA_D}$$

$\zeta_{v,i}$: rapporto tra il valore massimo del sovraccarico verticale variabile sopportabile dalla parte i-esima della costruzione e il valore del sovraccarico verticale variabile che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione.

Tecniche di intervento

Soluzioni tradizionali (Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP)

- ✓ Consolidamento con iniezioni di miscele leganti;
- ✓ Consolidamento con intonaco armato;
- ✓ Consolidamento con diatoni artificiali o tirantini antiespulsivi;
- ✓ Consolidamento con ristilatura armata e connessione dei paramenti.



Tecniche di intervento

Soluzioni innovative

- ✓ Consolidamento con sistemi reticolati in acciaio;
- ✓ Consolidamento con materiali compositi a matrice polimerica (FRP);
- ✓ Consolidamento con materiali compositi a matrice cementizia (FRCM o TRM)





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

Materiali/2

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonacoarmato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (***)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadriati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

(*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscele leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a-posteriori (riscontri sperimentali attraverso prove soniche o similari).

(**) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

(***) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione f_m superiore a 2 N/mm². In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a $f_m^{0,35}$ (f_m in N/mm²).

(****) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

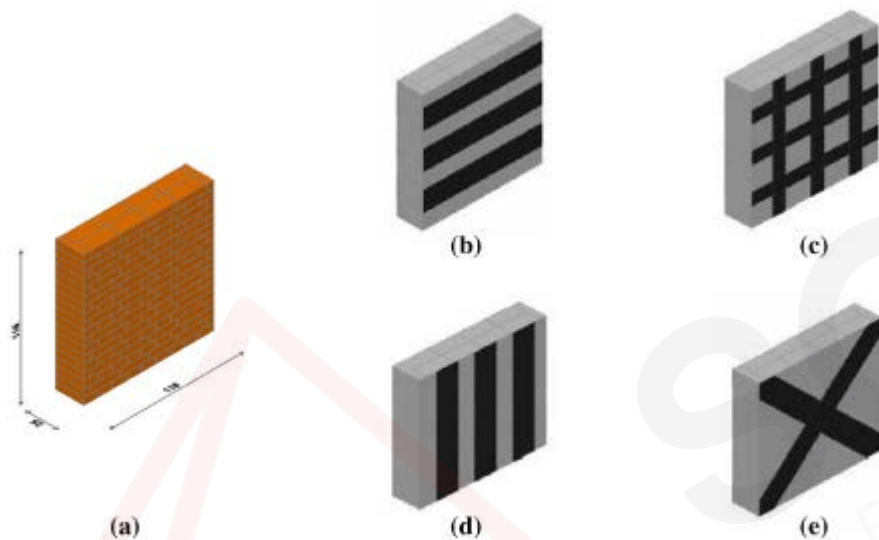
M.II.TT. (2019), Circolare 21.01.2019, n. 7 C.S.LL.PP.



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP



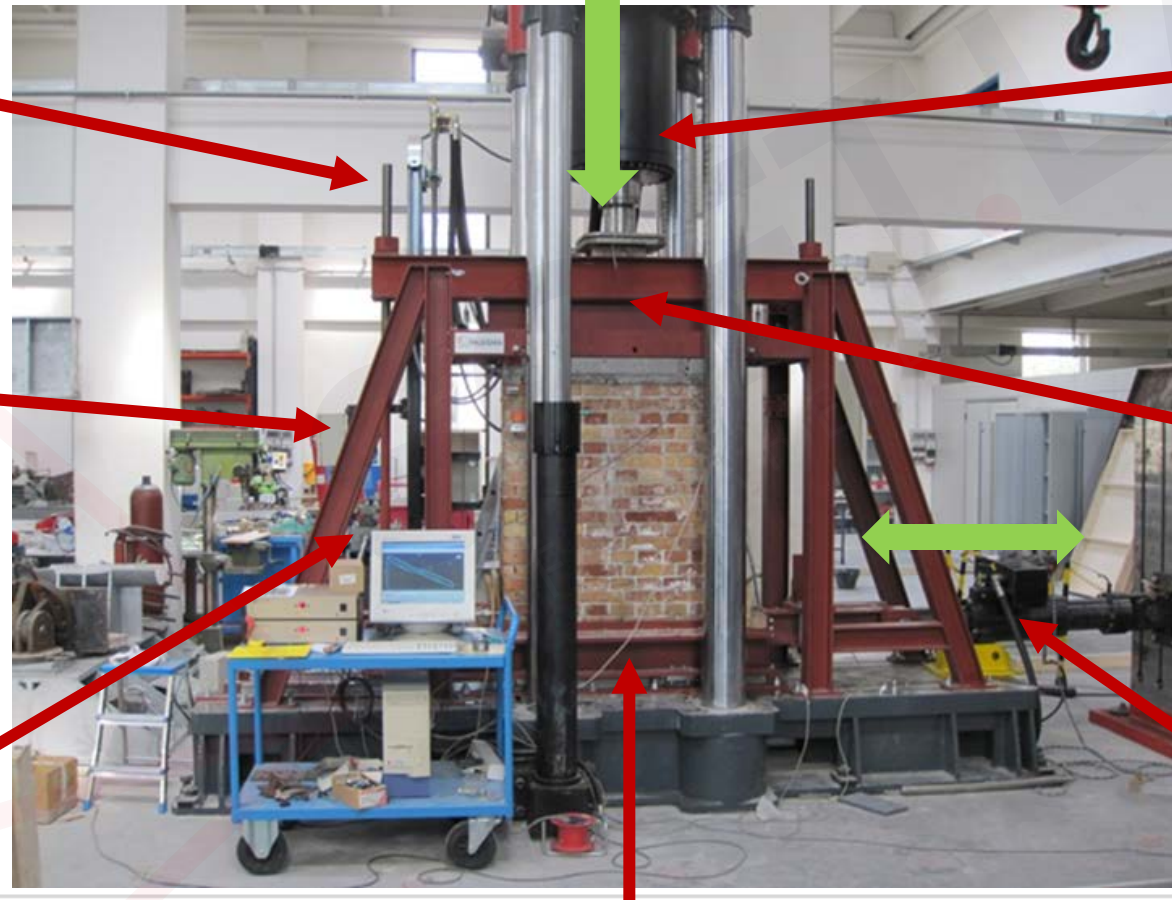
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino non rinforzato



Pendolo di collegamento
slitta-traversa

Attuatore verticale
per il carico di
compressione

Telaio ausiliario
di contrasto per
la base
superiore del
provino

Doppia traversa
rigida per
distribuire
uniformemente il
carico verticale

Strumentazione di
controllo e
monitoraggio

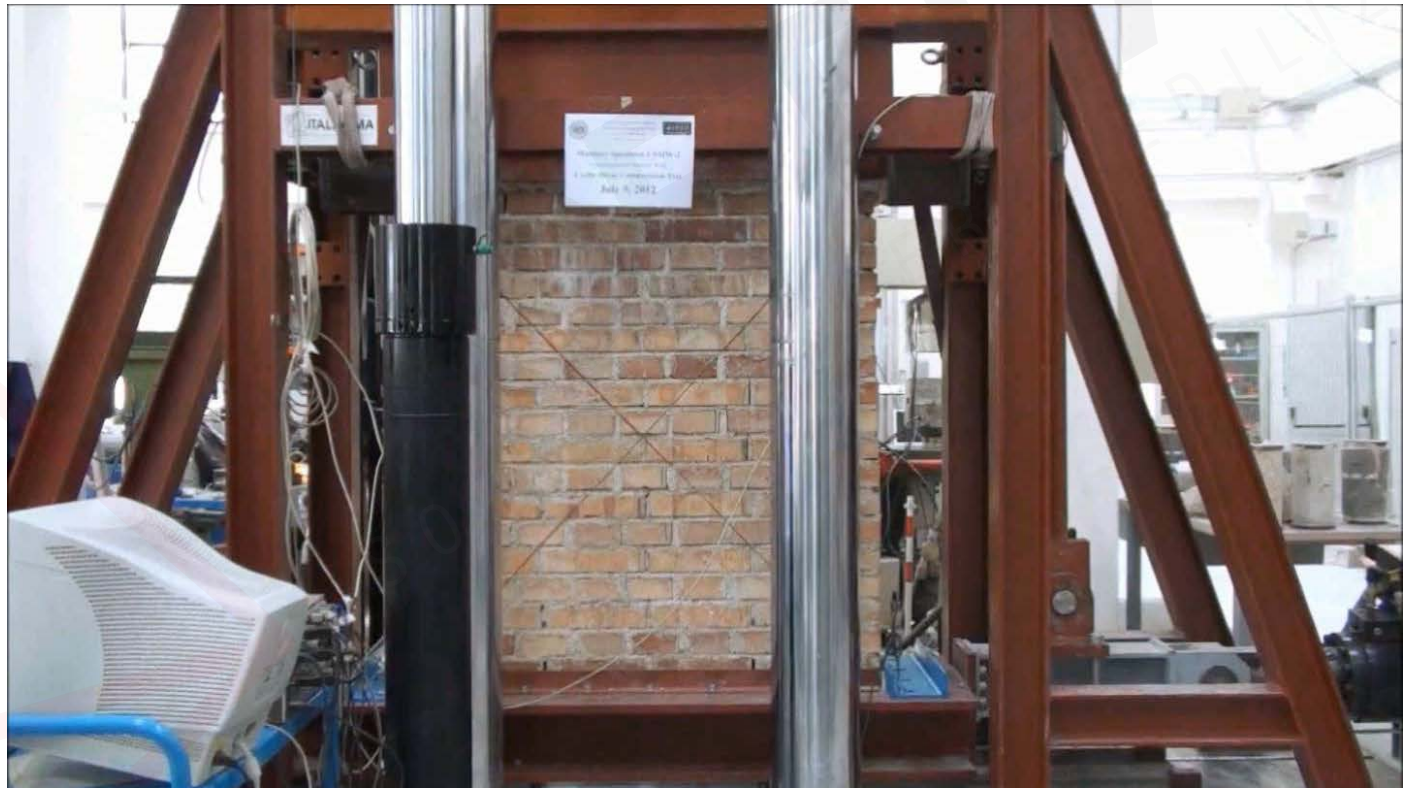
Attuatore
orizzontale
per la forza di
taglio

Martinelli & al (2016)

Slitta per lo spostamento orizzontale
della base inferiore del provino

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino non rinforzato



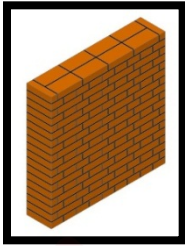
Martinelli & al (2016)



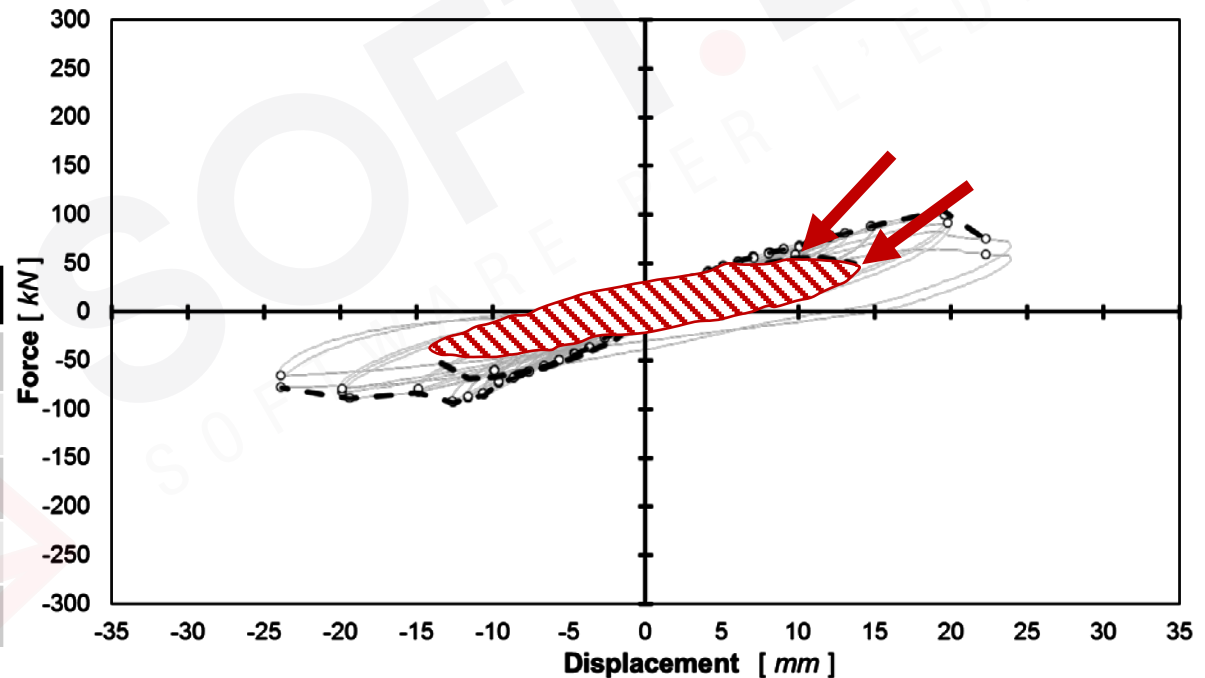
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino non rinforzato



Provino	US #1	US #2	US #3
F_{max} [kN]	102.7	56.1	93.1
d_{max} [mm]	16.0	12.0	13.0
F_u [kN]	81.9	44.8	77.9
d_u [mm]	18.0	14.0	24.0
E [kJ]	16.6	8.27	16.0



Martinelli & al (2016)

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo verticale



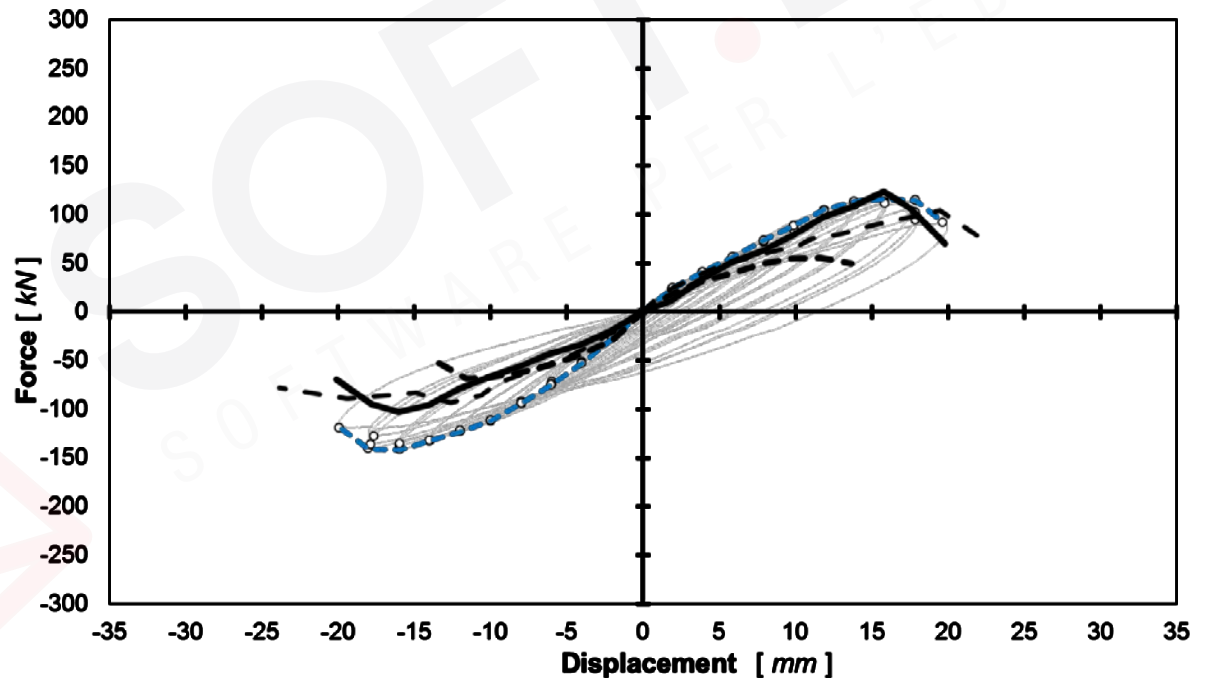
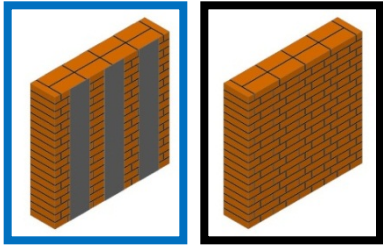
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo verticale

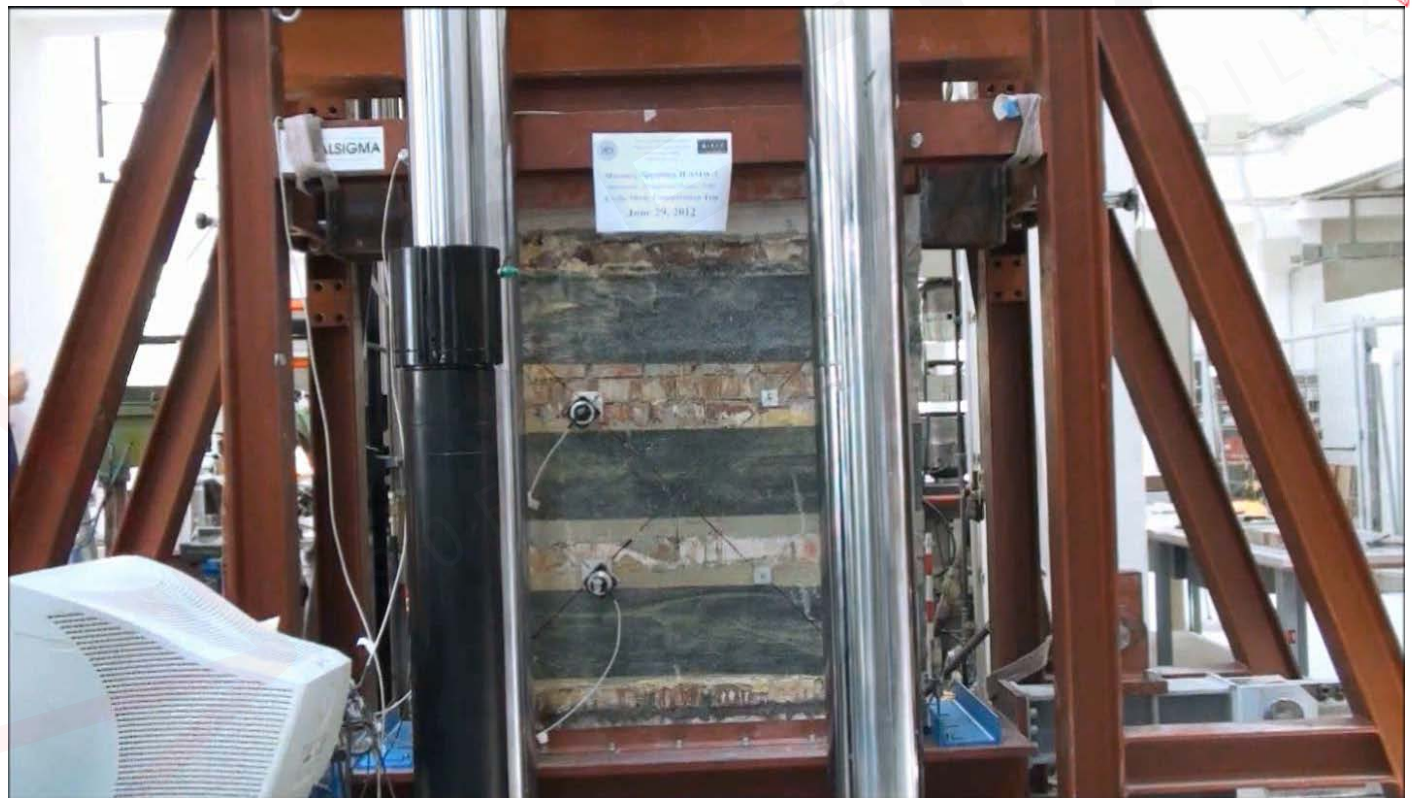


Provino	V #1	V #2
$F_{\max}$ [kN]	100.6	116.5
$d_{\max}$ [mm]	20.0	16.0
F_u [kN]	79.7	91.9
d_u [mm]	22.0	20.0
E [kJ]	23.7	19.2

Martinelli & al (2016)

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo orizzontale



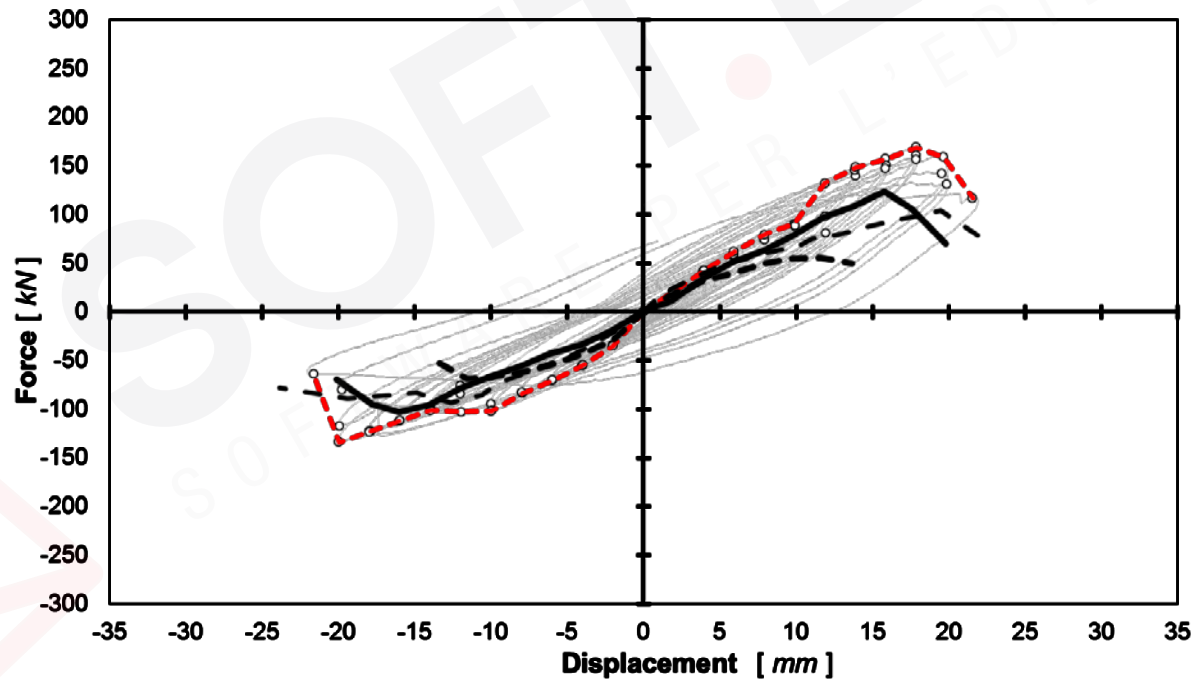
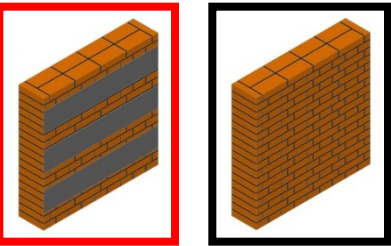
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo orizzontale



Provino	H #1	H #2
F_{max} [kN]	120.4	133.8
d_{max} [mm]	18.0	20.0
F_u [kN]	95.9	117.7
d_u [mm]	22.0	22.0
E [kJ]	30.3	28.1

Martinelli & al (2016)

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo a griglia



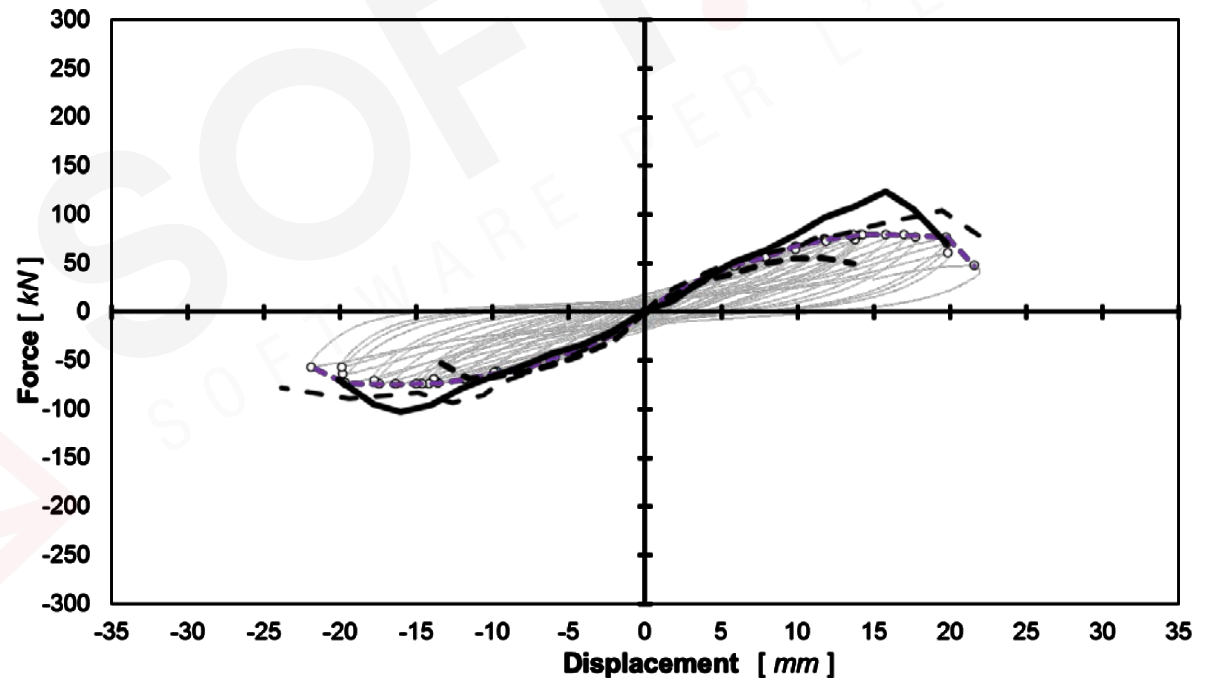
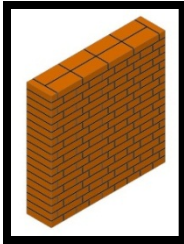
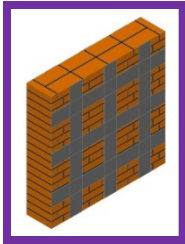
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo a griglia



Provino	G #1	G #2
$F_{\max}$ [kN]	126.8	74.2
$d_{\max}$ [mm]	16.0	16.0
F_u [kN]	100.3	57.1
d_u [mm]	22.0	20.0
E [kJ]	26.2	15.8

Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo diagonale



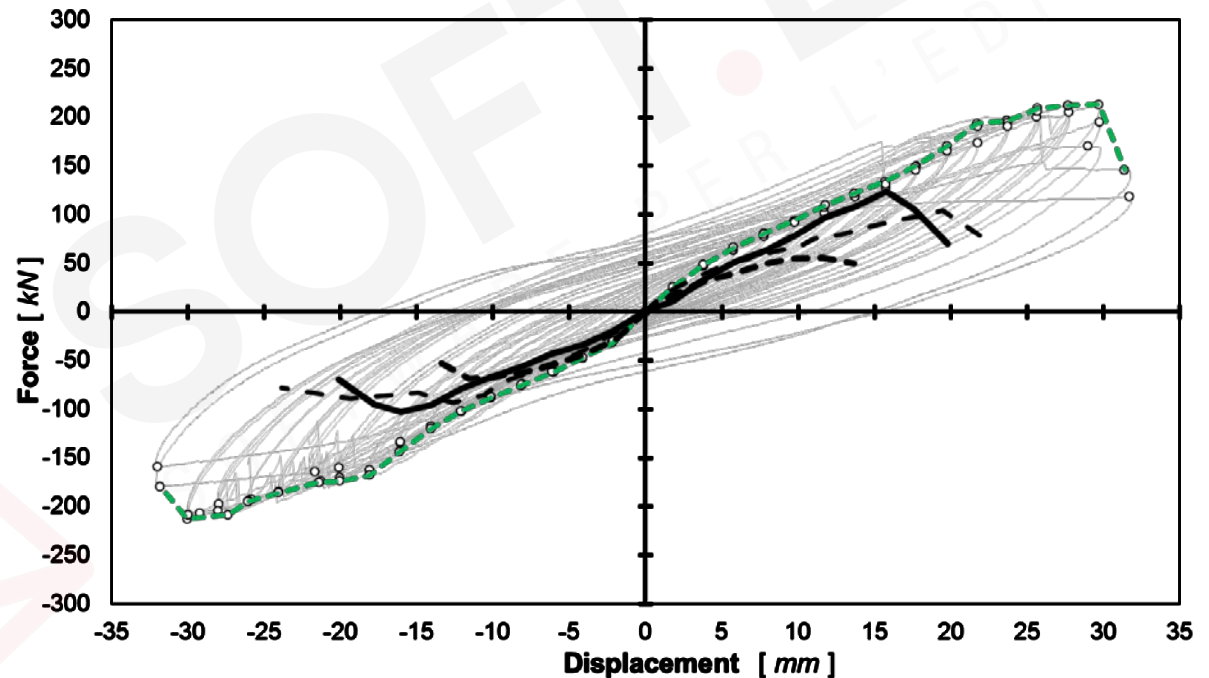
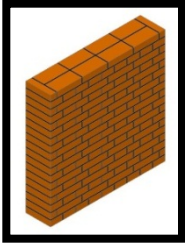
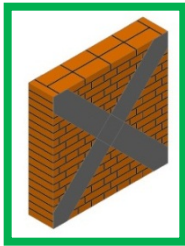
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: provino con rinforzo diagonale



Provino

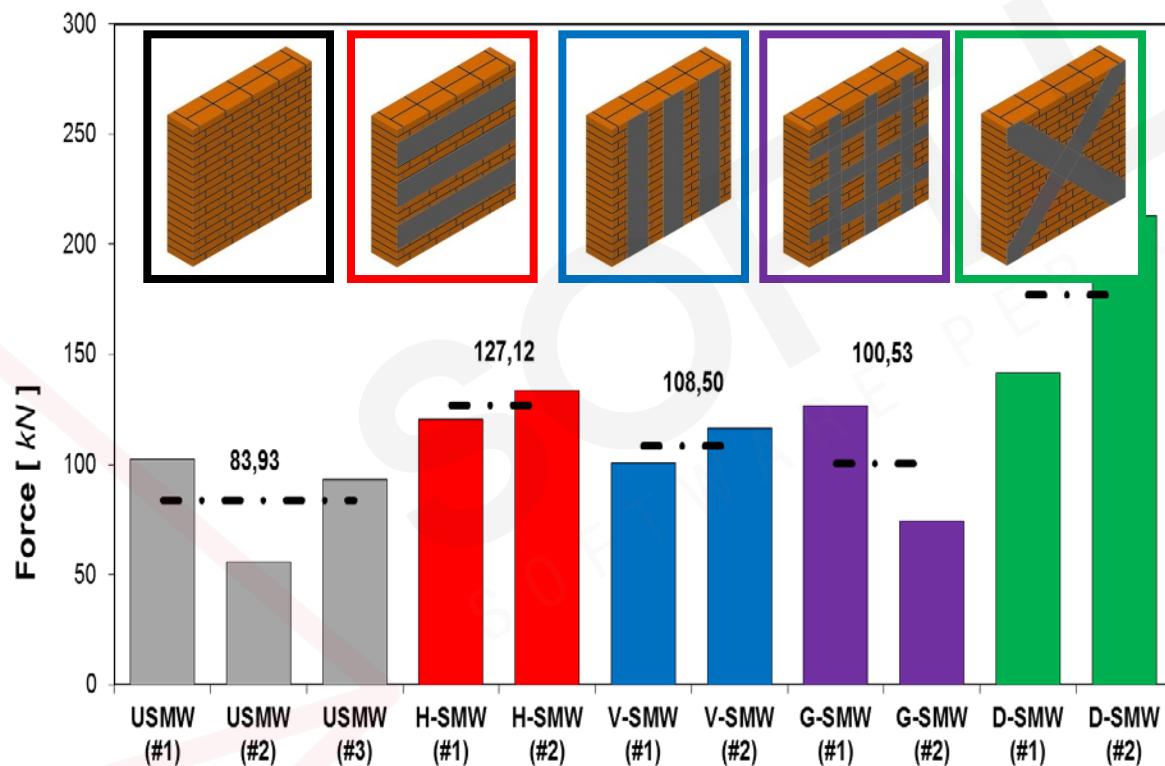
F_{max} [kN]	141.7	212.8
d_{max} [mm]	24.0	30.0
F_u [kN]	88.2	169.9
d_u [mm]	26.0	32.0
E [kJ]	51.6	94.14

Martinelli & al (2016)



Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: confronti (resistenza)



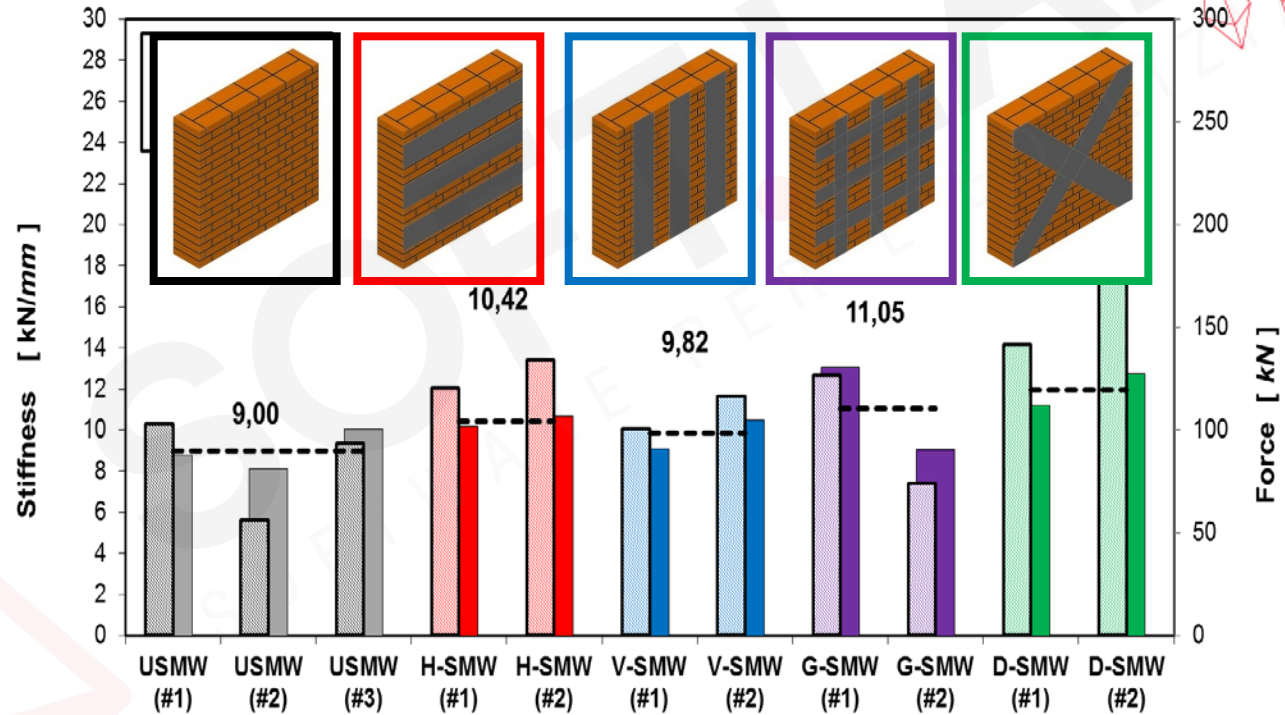
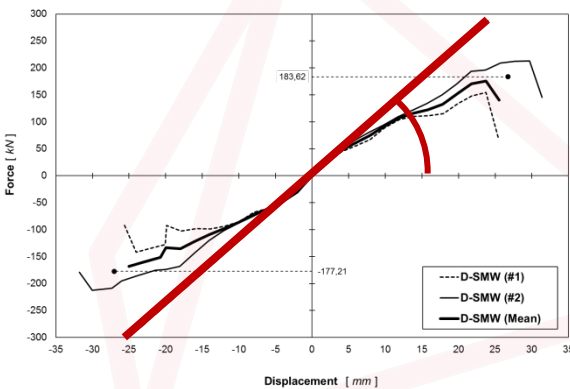
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

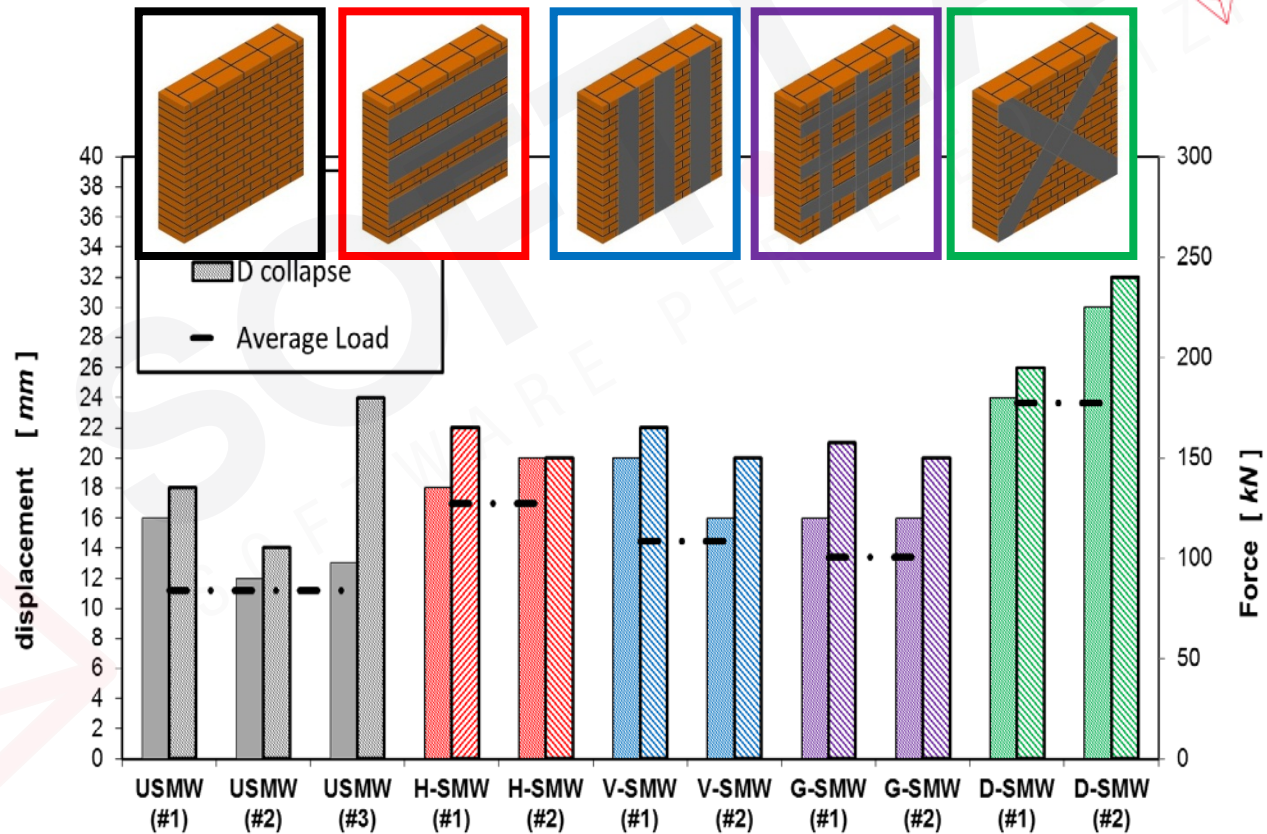
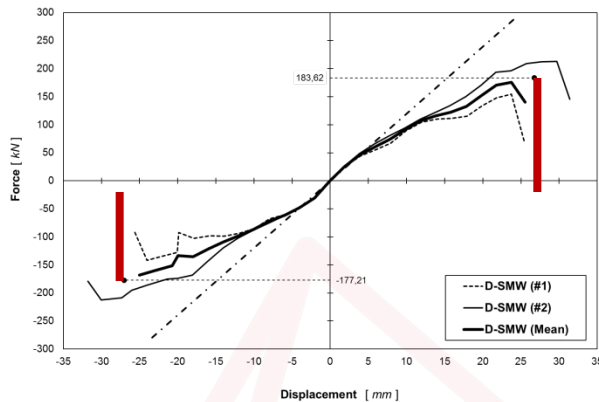
Rinforzo a taglio con C-FRP: confronti (rigidezza)



Martinelli & al (2016)

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: confronti (cap. di spostamento)



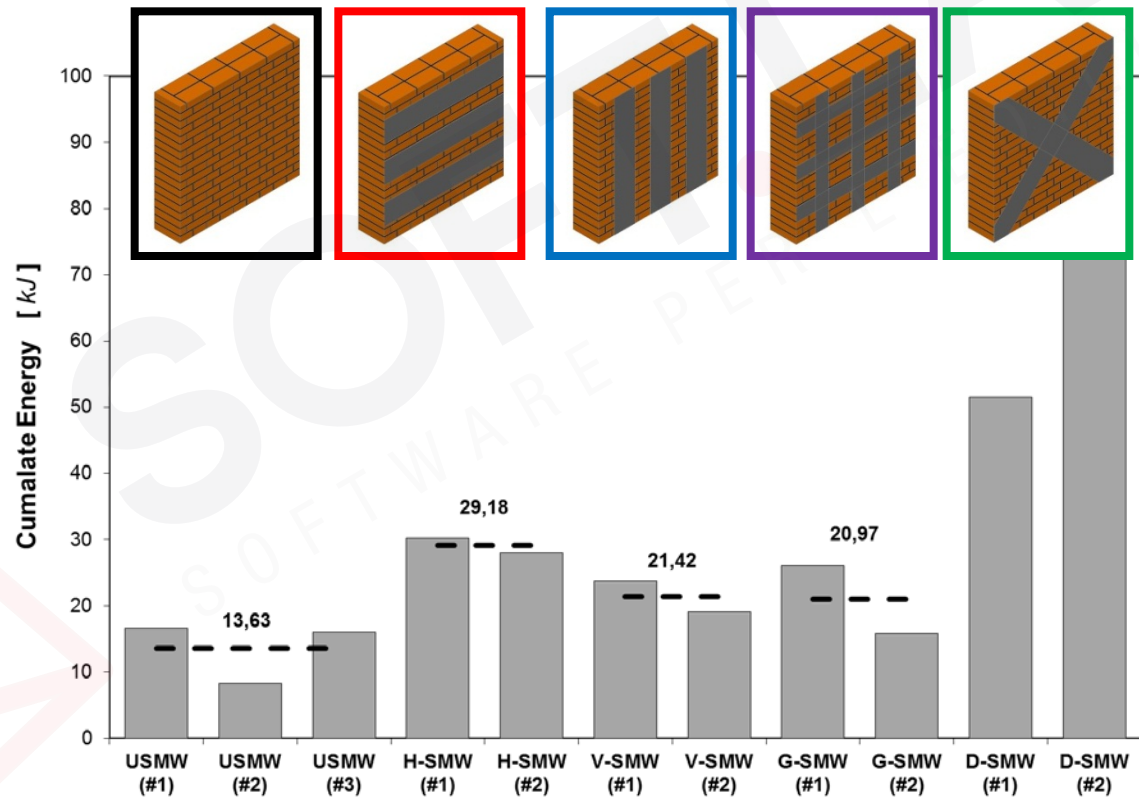
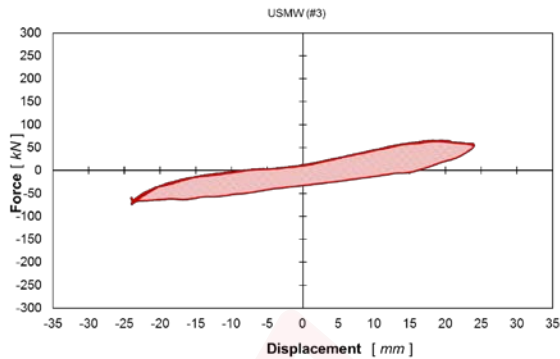
Martinelli & al (2016)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con C-FRP: confronti (energia)



Martinelli & al (2016)

Tecniche di intervento

Rinforzo di elementi in muratura con FRP: riferimenti

**Istruzioni
per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo
di Interventi di Consolidamento Statico
mediante l'utilizzo di
Compositi Fibrorinforzati**

Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie



CNT DT 200R1 (2013)



Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità

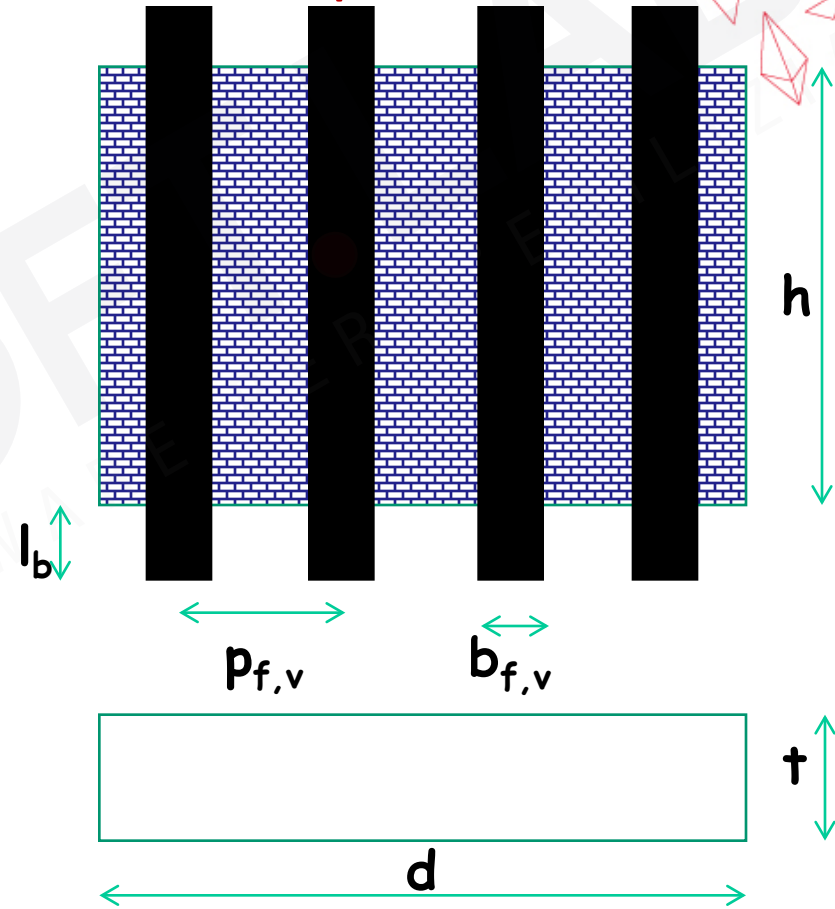
$$f_{f,d} = \min(f_{fu,d}, f_{f,dd})$$

Strappo della lamina

$$f_{fu,d} = \eta_a \frac{f_{fu}}{\gamma_f}$$

Delaminazione d'estremità

$$f_{f,dd} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fd}}{t_f}} & l_b \geq l_e \\ \frac{1}{\gamma_{f,d}} \sqrt{\frac{2E_f \Gamma_{Fd}}{t_f}} \cdot \frac{l_b}{l_e} \cdot \left(2 - \frac{l_b}{l_e}\right) & l_b < l_e \end{cases}$$



Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità: rinforzo con FRP

$$\sigma_f(x_k, x) = E_f \cdot \max\{\varepsilon_f(x_k, x); 0\}$$

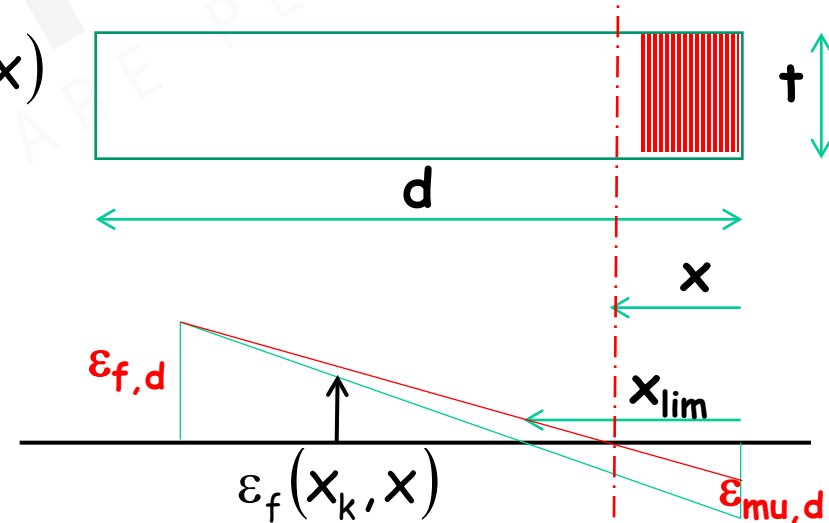
$$x \leq x_{lim} \rightarrow \varepsilon_f(x_k, x) = \frac{\varepsilon_{f,d}}{x_n - x} \cdot (x_k - x)$$

$$x > x_{lim} \rightarrow \varepsilon_f(x_k, x) = \frac{\varepsilon_{mu,d}}{x_n - x} \cdot (x_k - x)$$

$$N_{Rd}(x) = 0,85f_{cm}t \cdot \psi x - 2 \cdot \sum_{k=1}^n E_f b_f t_f \sigma_f(x_k, x)$$

$$M_{Rd}(x) \approx 0,85f_{cm}t \cdot \psi x \cdot \left(\frac{d}{2} - \frac{\psi x}{2} \right) +$$

$$+ 2 \cdot \sum_{k=1}^n E_f b_f t_f \sigma_f(x_k, x) \cdot \left(\frac{d}{2} - x_k \right)$$

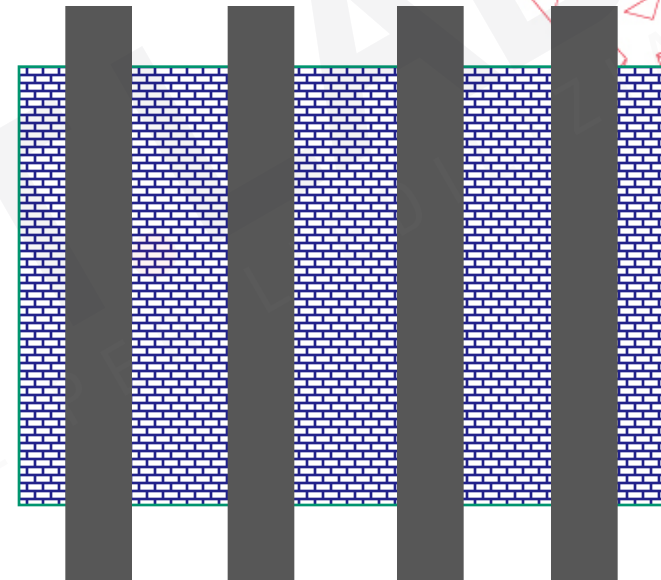
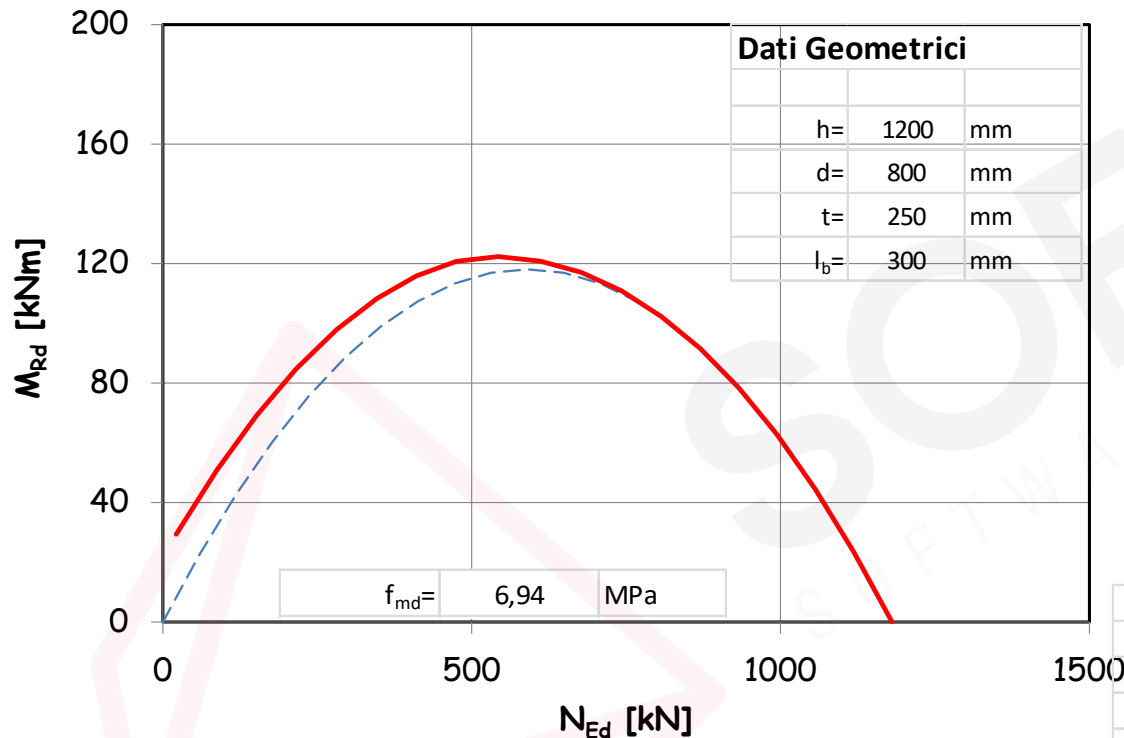




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Aspetti normativi

Meccanismi di crisi e modelli di capacità: rinforzo con FRP



$b_f =$	100	mm	$b_{brick} =$	250	mm		
$t_f =$	0,167	mm	$\varepsilon_{fu} =$	0,015		$\varepsilon_{mu,d} =$	0,0040
$E_f =$	230000	MPa					
$k_G =$	0,108		$\Gamma_{fd} =$	0,134	N/mm	$\varepsilon_{fu,d} =$	0,0106
$k_b =$	1,36		$l_e =$	150,0	mm	$\varepsilon_{fd,d} =$	0,0026
$s_u =$	0,3	mm	$f_{fdd} =$	607,08	MPa	$\varepsilon_{f,d} =$	0,0026
$\psi =$	0,8		$f_{fdd,2} =$	607,08	MPa		



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM

Fiber-Reinforced Cementitious Matrix

(FRCM)

Textile-Reinforced Mortars

(TRM)

Textile Reinforced Concrete

(TRM)

Fabric Reinforced Mortar

(FRM)

Inorganic Matrix-Grid Composites

(IMG)



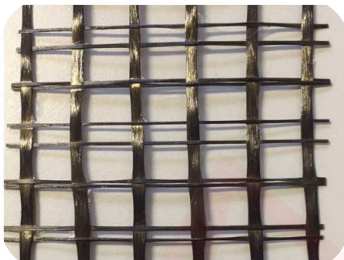
Vantaggi

- Permeabilità al vapore
- Compatibilità con il substrato
- Resistenza al fuoco
- Reversibilità
- Tempi e costi di installazione

Ferrara & al (2019)

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM



Tradizionali:

- Carbonio
- Vetro
- PBO
- Basalto



A base di fibre vegetali

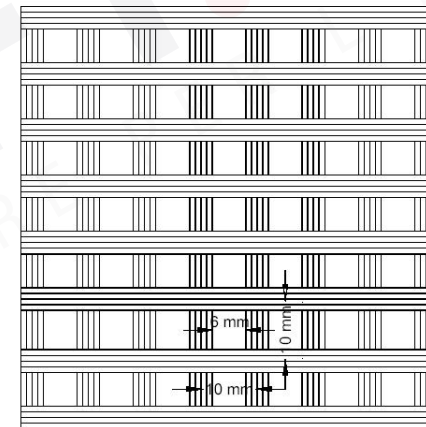
- Iuta
- Sisal
- Canapa
- Lino
- Coir
- Curaua



Ferrara & al (2019)

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM : tessuto in carbonio



Faella & al (2010)

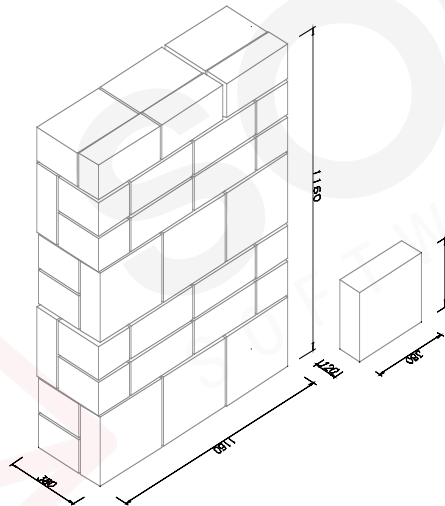
Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in carbonio



Designation E 519 – 02

Standard Test Method for
Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages



Faella & al (2010)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM : tessuto in carbonio



Resistenza a compressione [MPa]	38
Res. a trazione (flessione) [MPa]	7.5
Modulo di Young [MPa]	15000



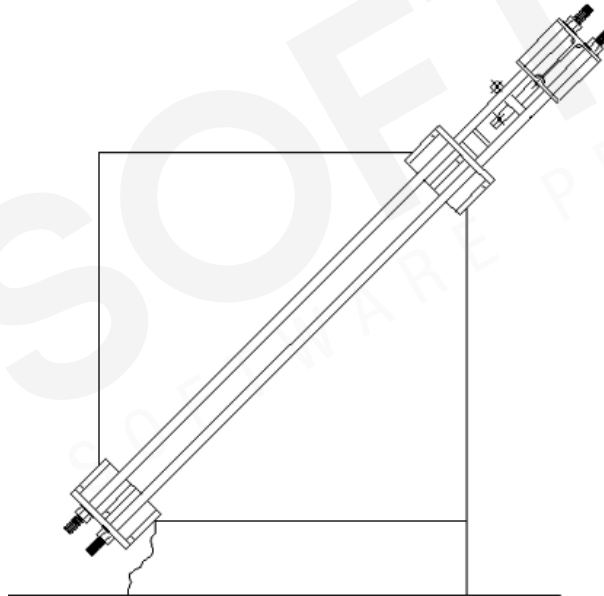


SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in carbonio

Tiranti





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in carbonio

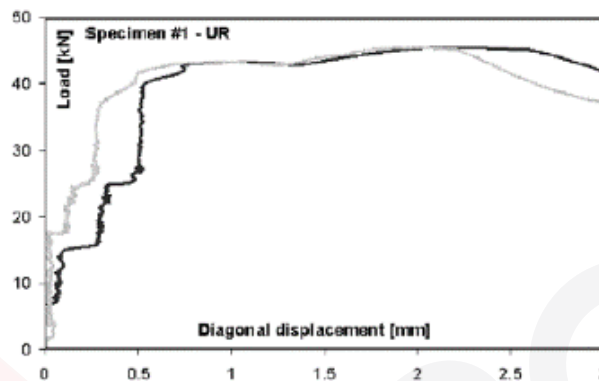




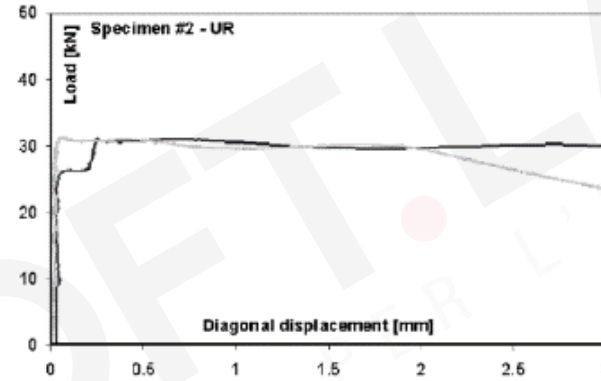
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

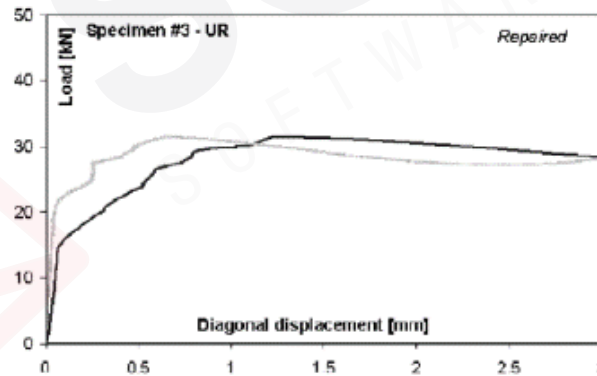
Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in carbonio



a) specimen #1;



b) specimen #2;



c) specimen #3;



Faella & al (2010)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in carbonio

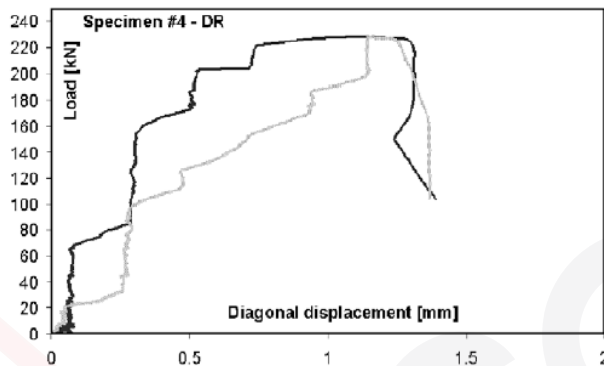




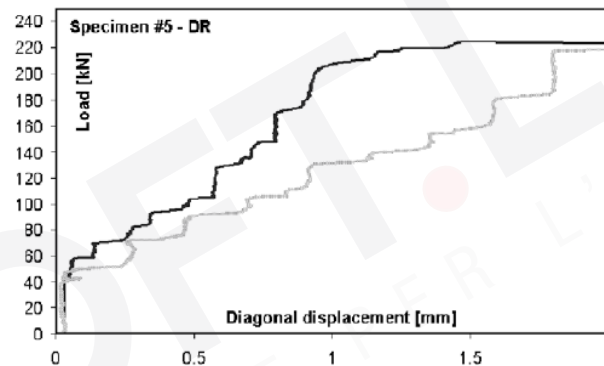
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

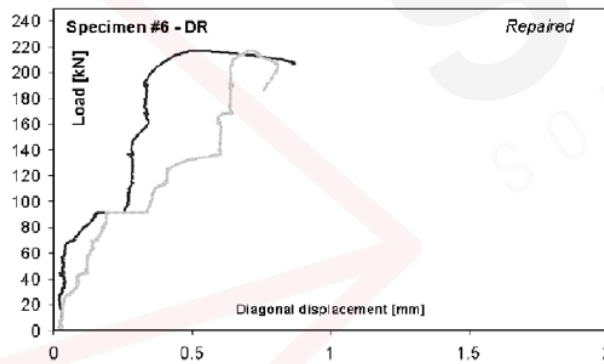
Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in carbonio



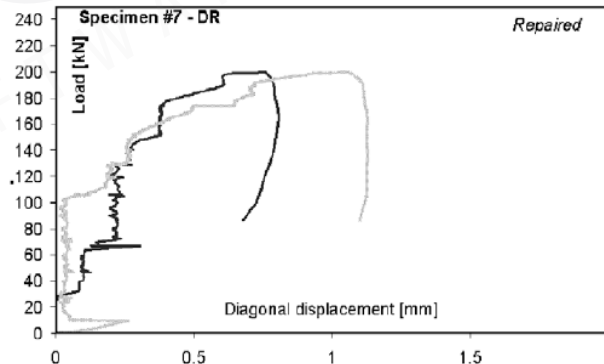
a) specimen #4;



b) specimen #5;



c) specimen #6;



d) specimen #7;



Faella & al (2010)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)

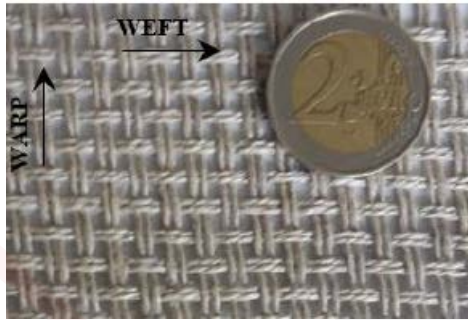




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Tensile strength 354 MPa

Strain to failure 3.85 %

Young's Modulus 9.4 GPa



Flexural strength 3.13 MPa

Compression strength 11.13 MPa

Ferrara & al (2019)



Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

Sequenza di applicazione



Ferrara & al (2019)



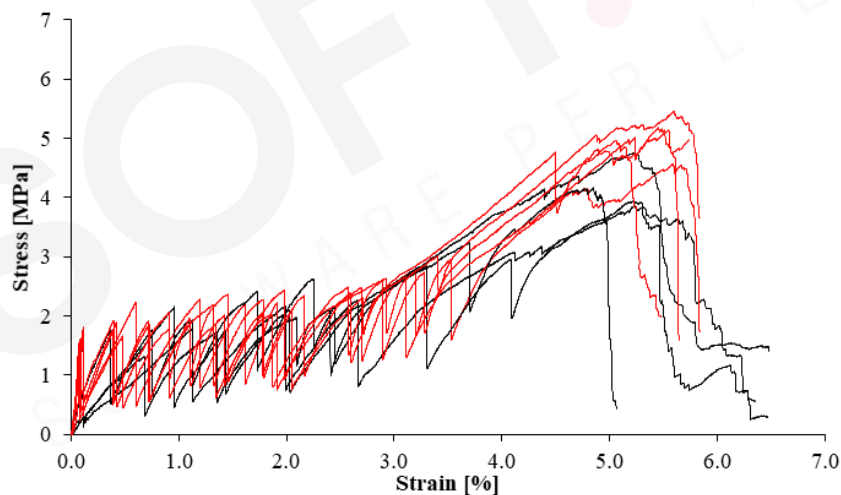


SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

FLAX-TRM: Comportamento a trazione



DISCUSSION

Ferrara & al (2019)



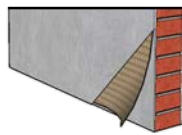


SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

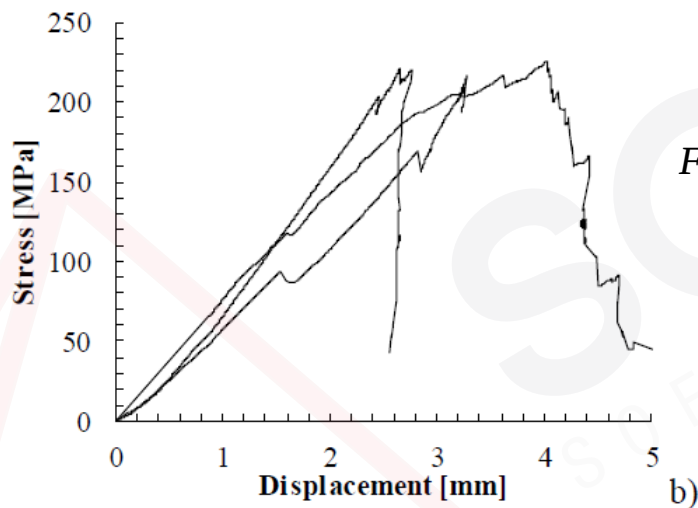
Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

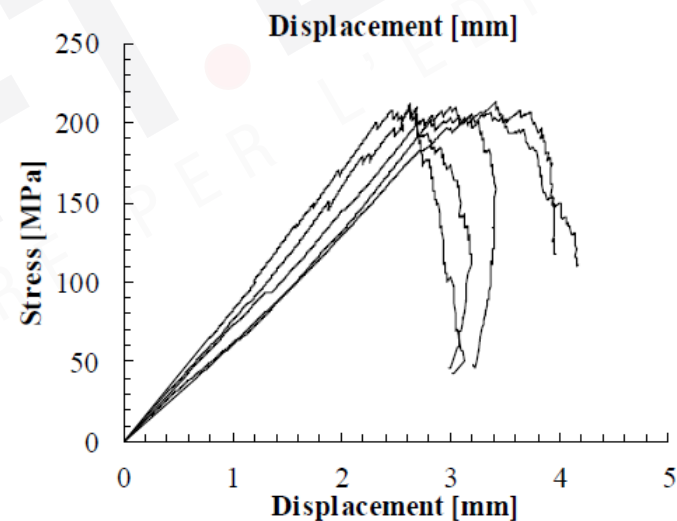
FLAX-TRM: adesione al supporto in muratura



$F_{max}: 1353 \text{ N}$



$F_{max}: 2572 \text{ N}$



Ferrara & al (2019)



Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

FLAX-TRM: adesione al supporto in muratura



Ferrara & al (2019)



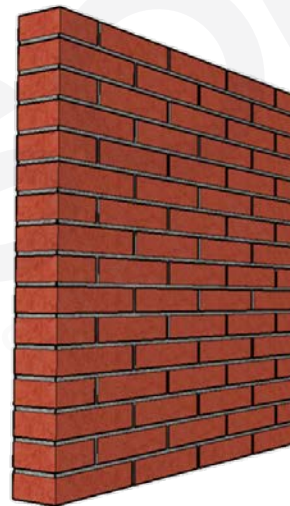


SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

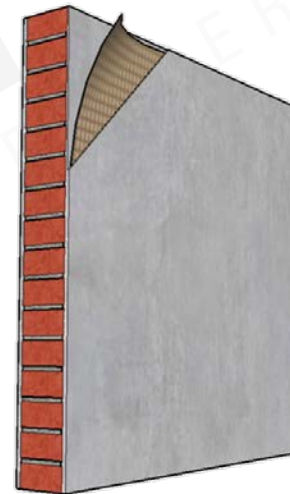
Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

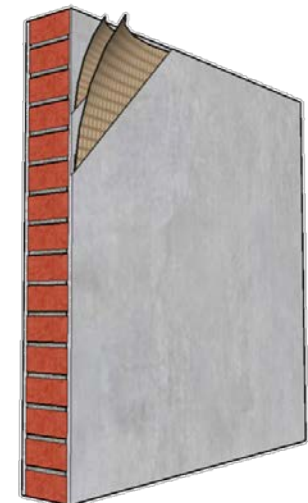
		<u>Volumetric % reinf.</u>	<u>Thickness of the reinf.</u>
2 Reinforcing configurations	1 Flax textile ply (1F-TRM)	2.04 %	2F-TRM 5 mm
	2 Flax textile plies (2F-TRM)	2.55 %	Strengthened 8 mm



3 x USW



3 x SW-1F



3 x SW-2F

Ferrara & al (2019)

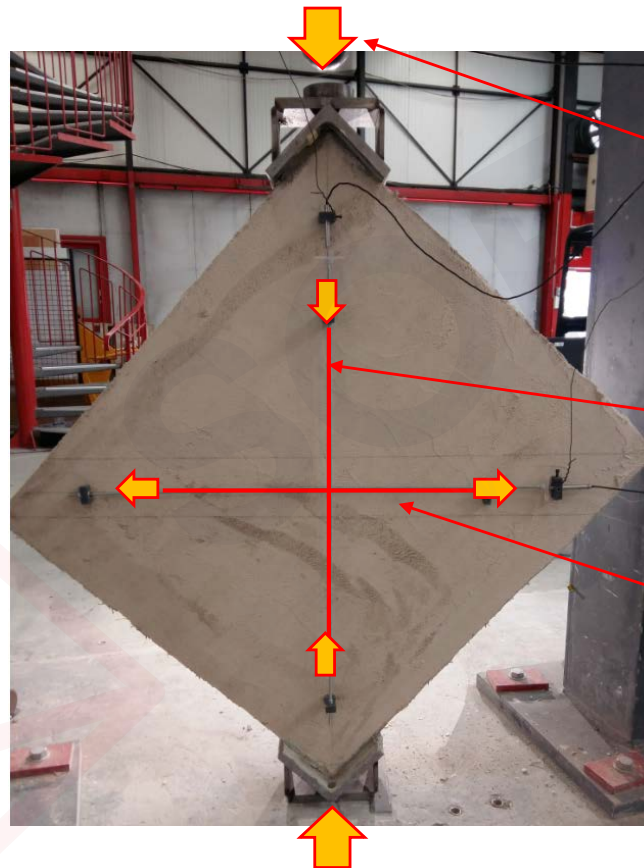




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Applied Load

Shortening on the
vertical axis
 $LVDT_{vert}$

Elongation on the
horizontal axis
 $LVDT_{horiz}$

Ferrara & al (2019)

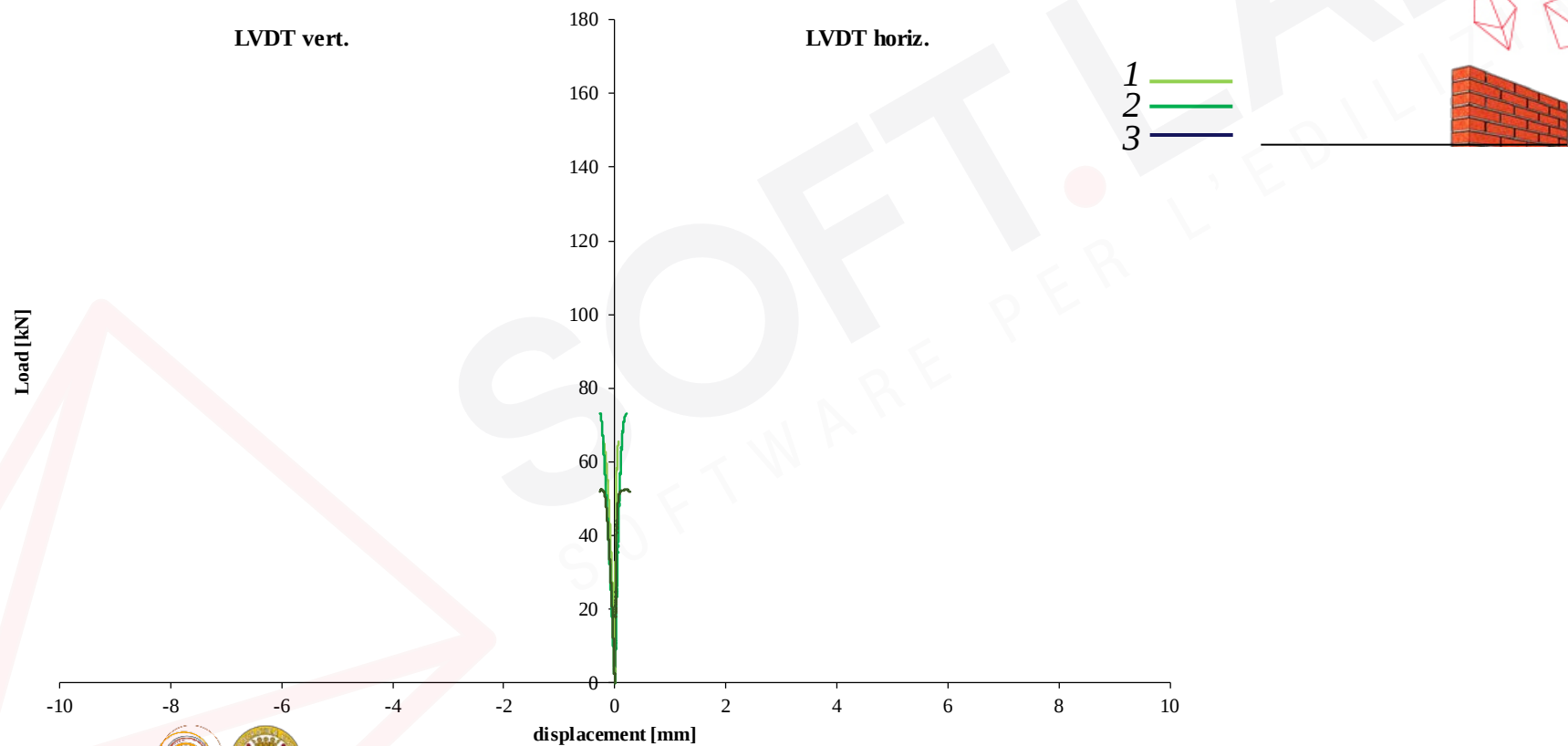




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)

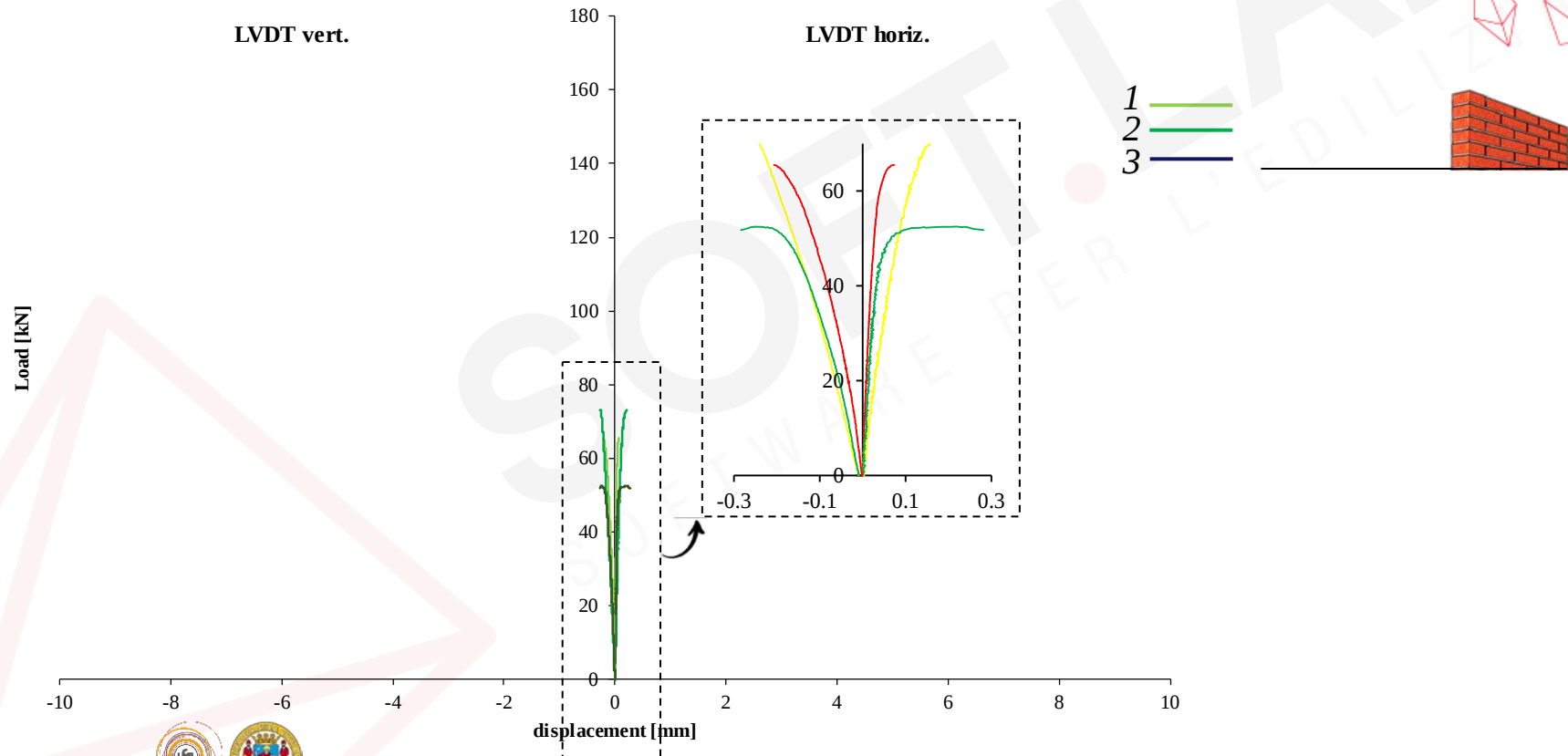




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)

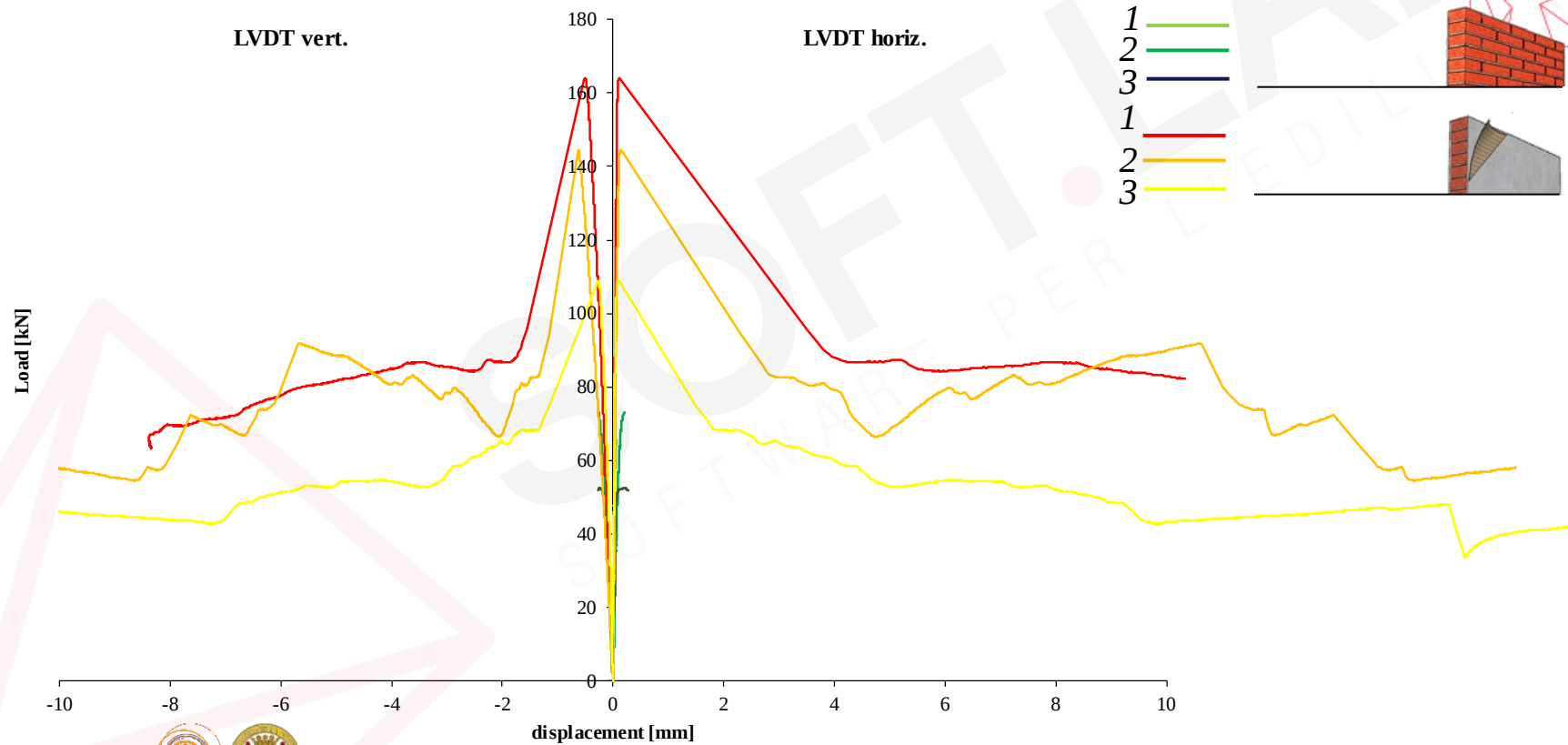




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)

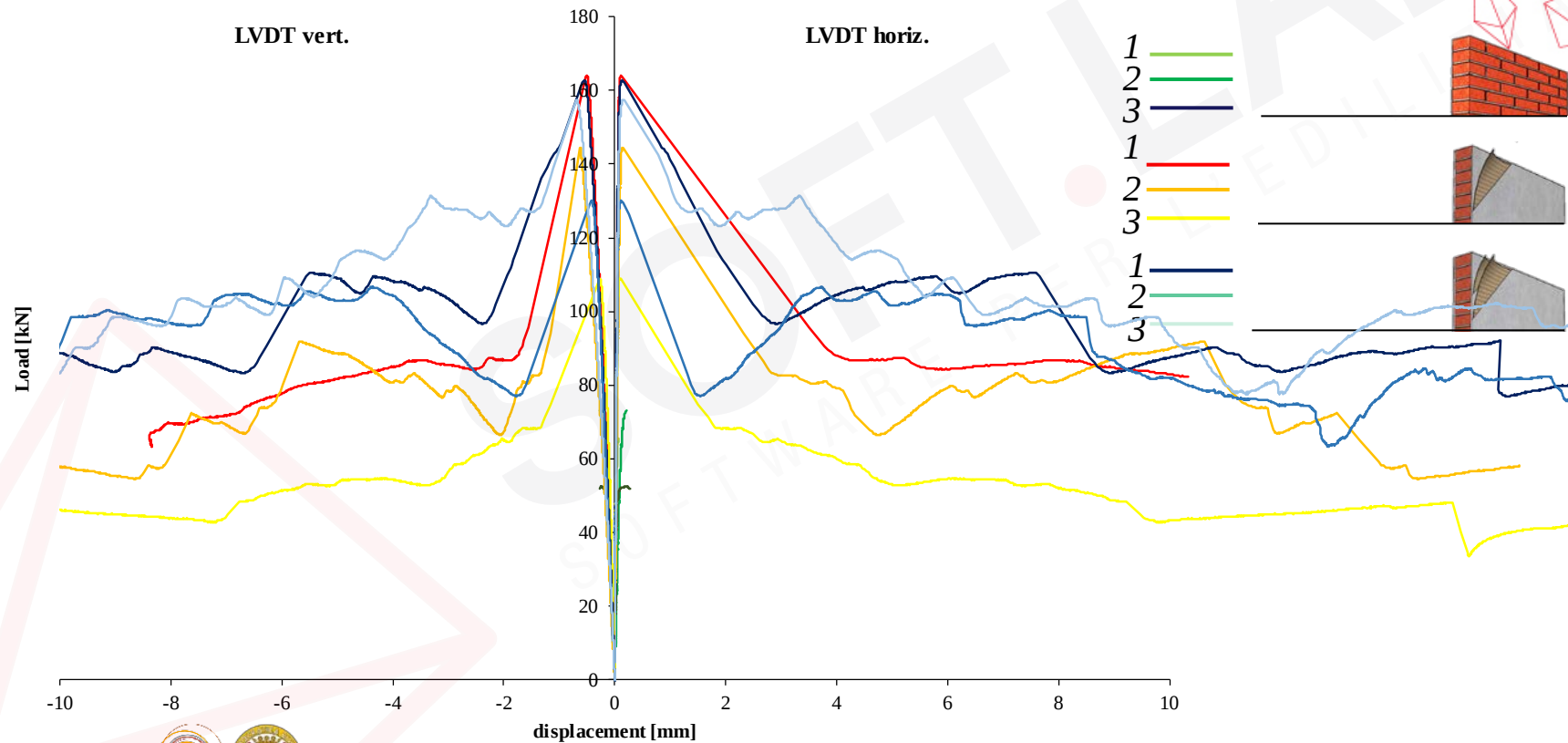




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

Unreinforced



Ferrara & al (2019)



www.soft.lab.it

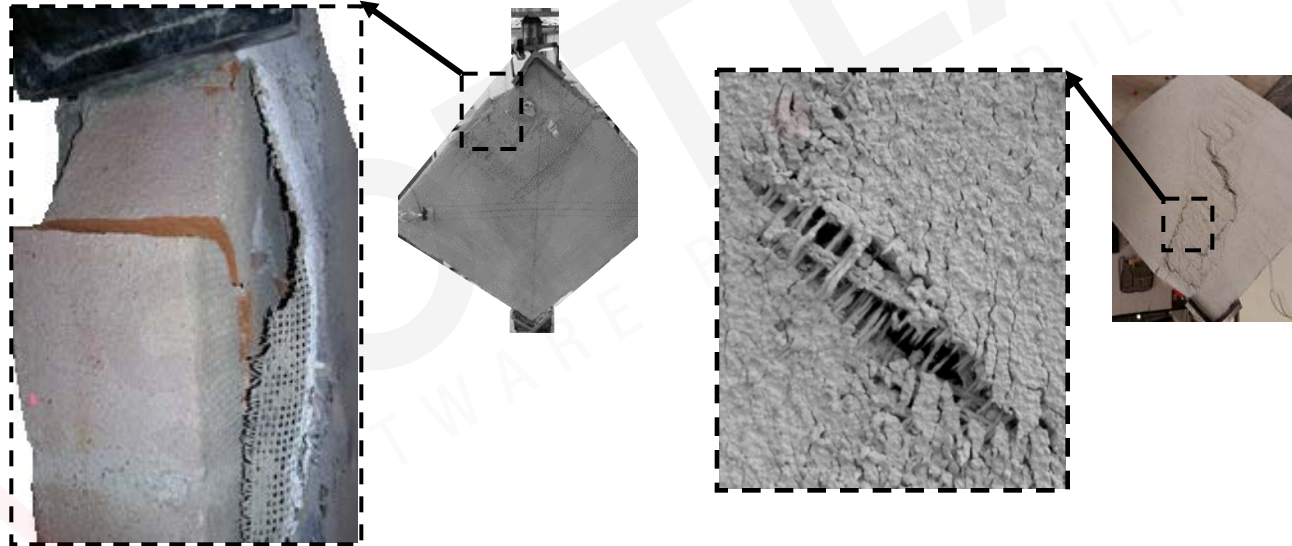


SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

1 textile layer



Ferrara & al (2019)



www.soft.lab.it



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



2 textile layers



Ferrara & al (2019)



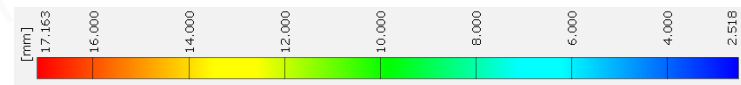
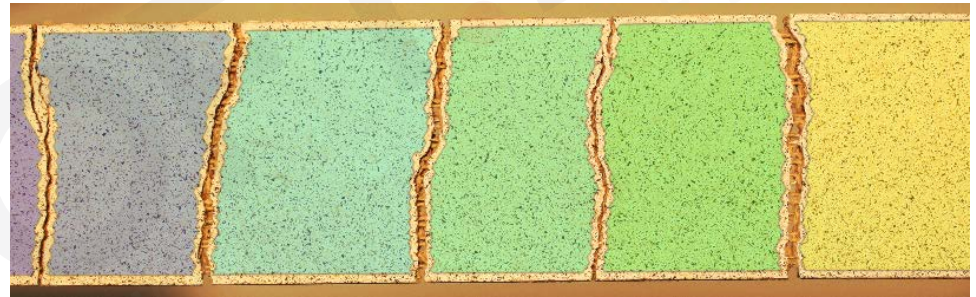
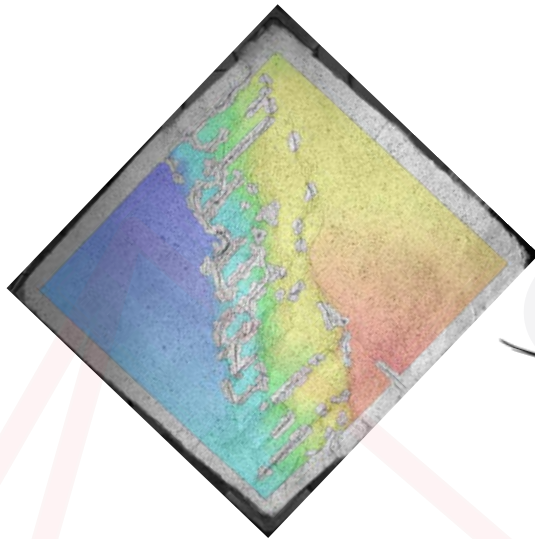
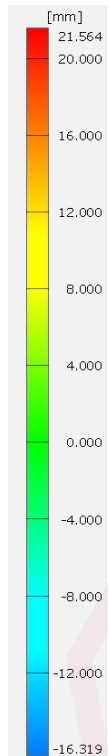
www.soft.lab.it



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

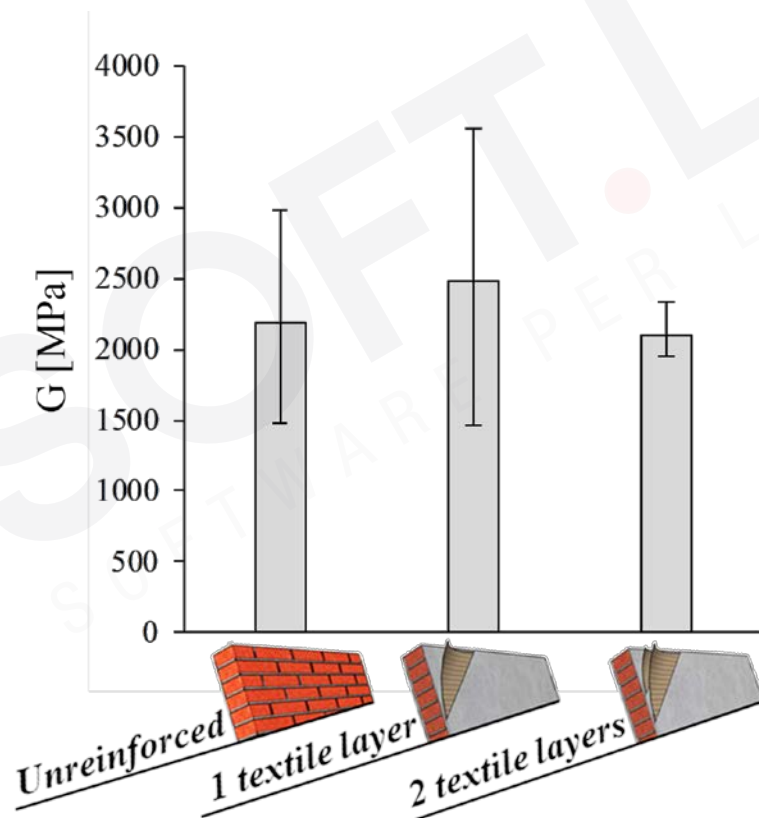
Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino

ASTM E 519-02

$$S_s = \frac{0.707P}{A_n}$$

$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g}$$

$$G = \frac{S_s}{\gamma}$$



Ferrara & al (2019)

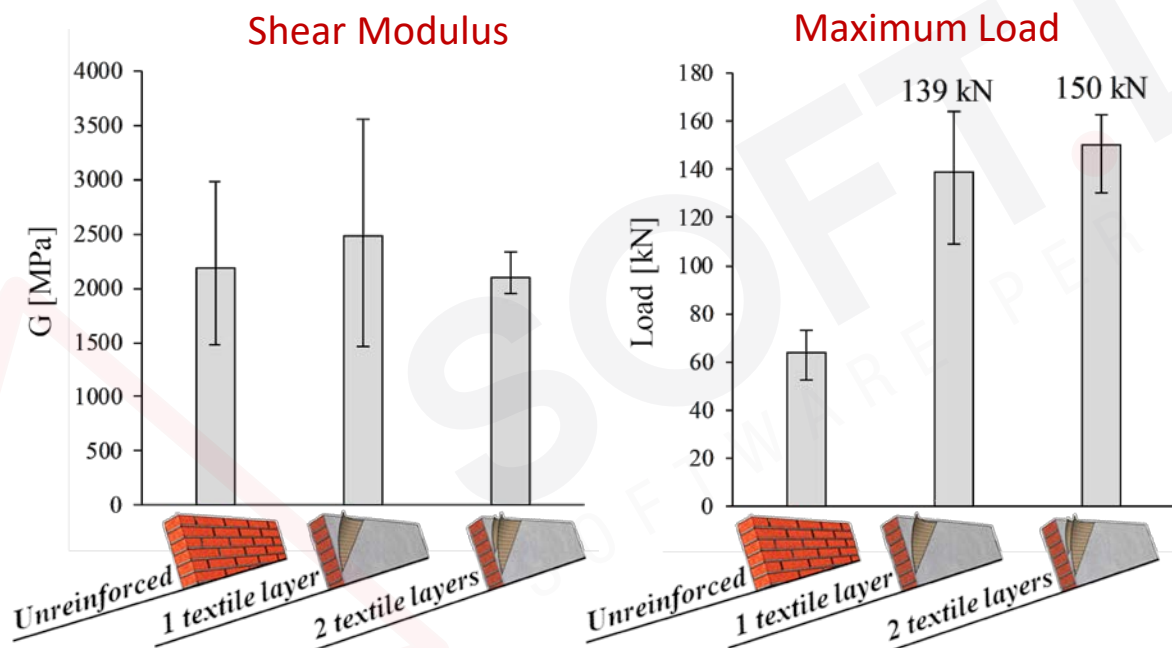




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)

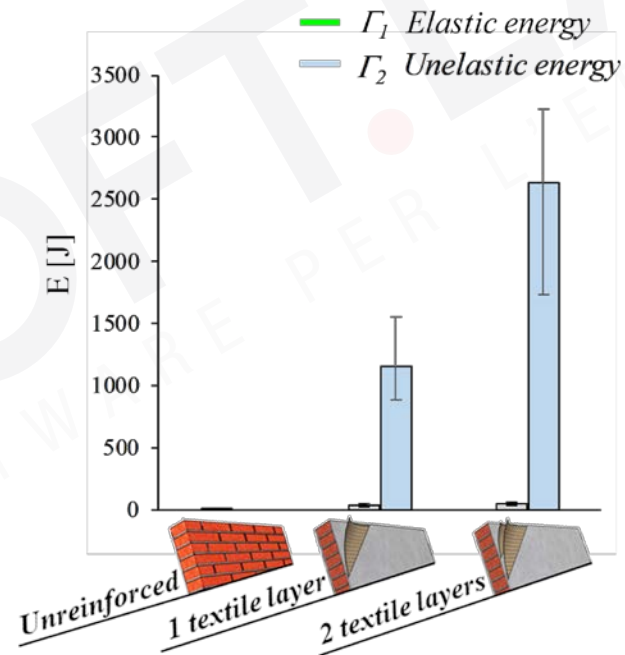
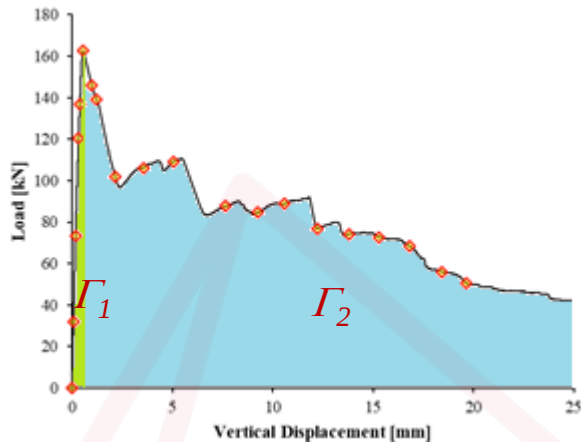




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo a taglio con FRCM: tessuto in lino



Ferrara & al (2019)





SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Tecniche di intervento

Rinforzo di elementi in muratura con FRCM

Istruzioni
per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo
di Interventi di Consolidamento Statico
mediante l'utilizzo di
Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica



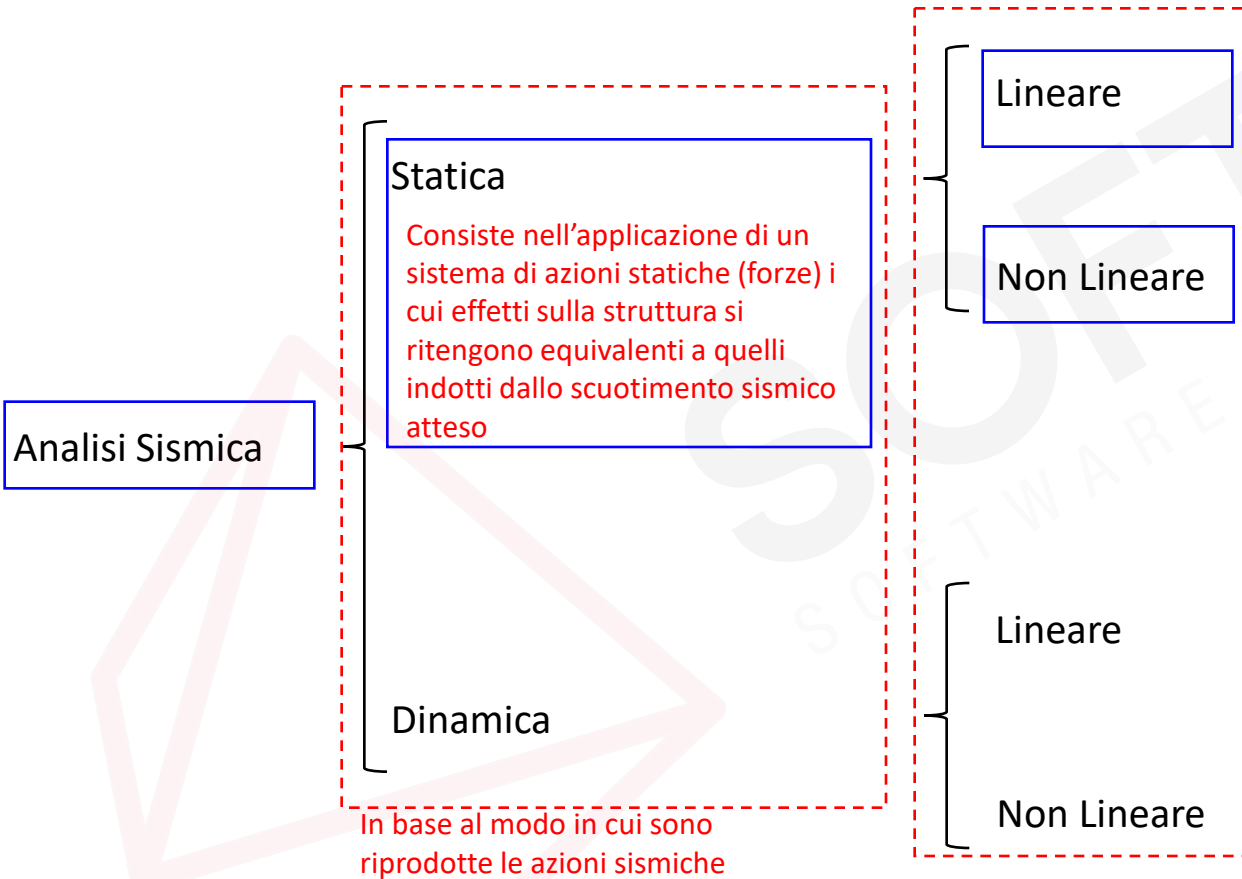
CNR DT 215 (2018)



www.soft.lab.it

Analisi strutturale

Metodologie di analisi strutturale

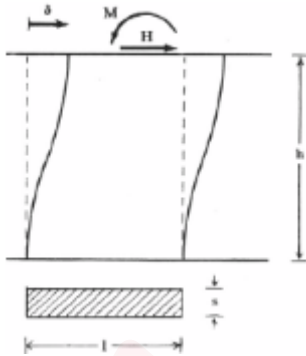




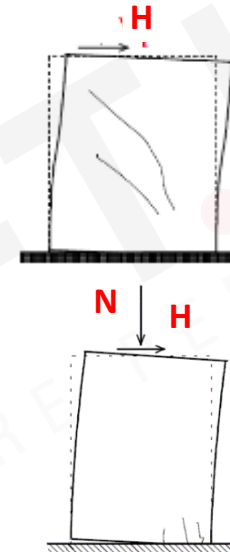
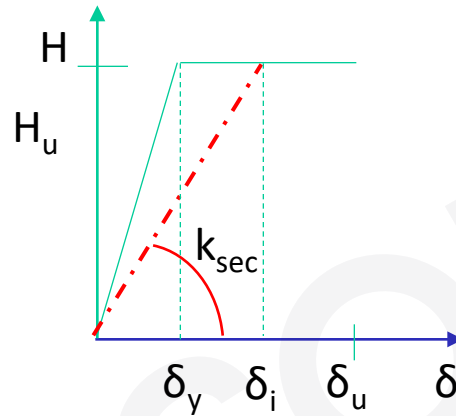
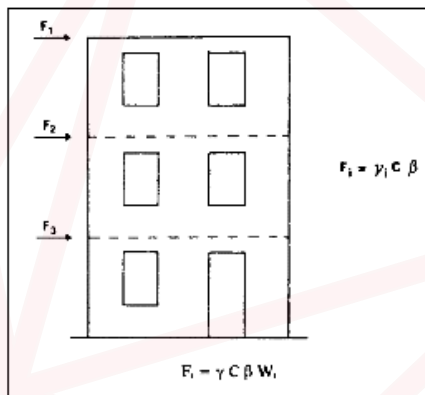
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Approcci a macro-elementi

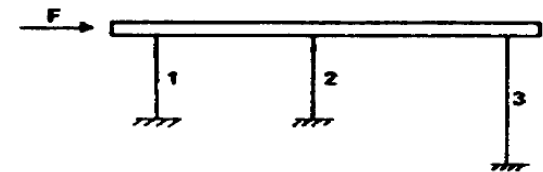
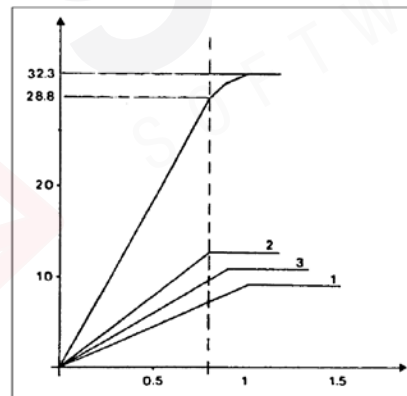


$$\frac{1}{K_0} = \frac{1}{K_M} + \frac{1}{K_T} = \frac{h^3}{12EI} + \frac{\chi h}{GA}$$



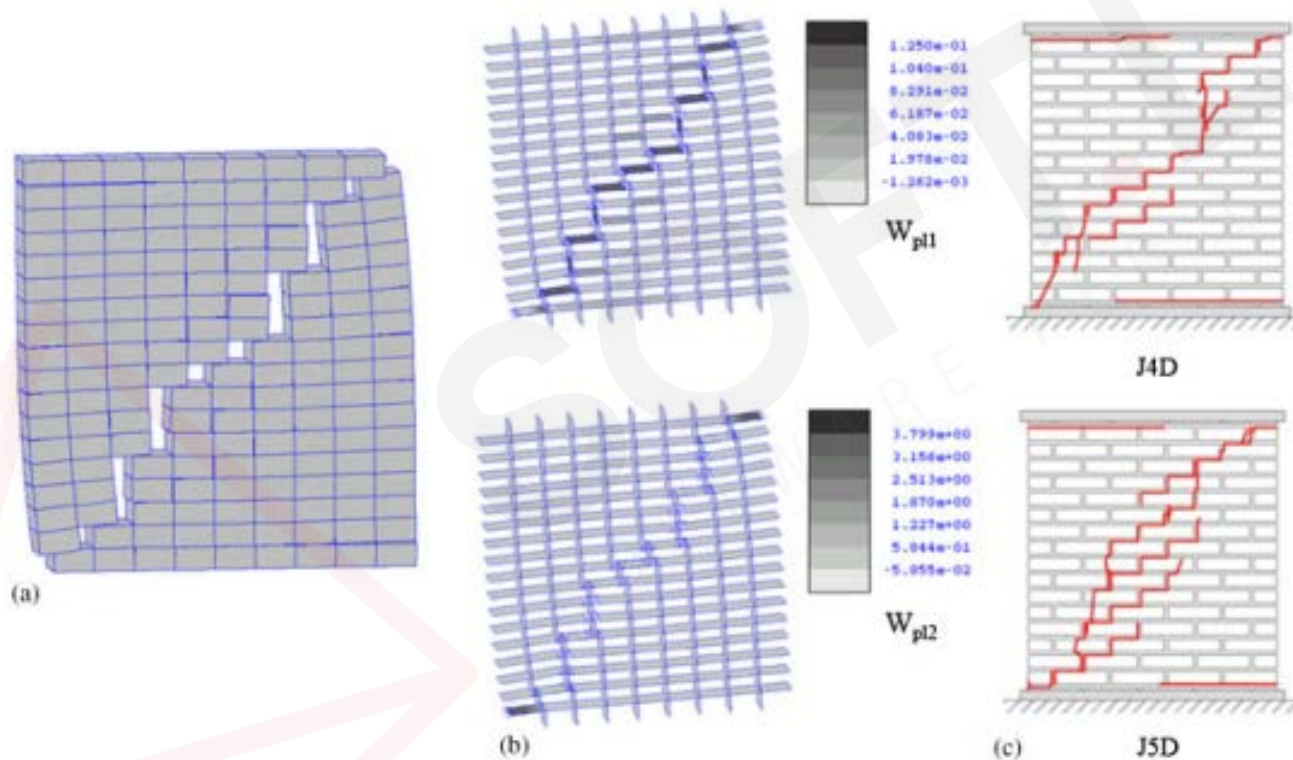
$$H_{u,s} = \frac{C_R A f_t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}}$$

$$H_{u,f} = (\sigma_0 t l^2) \frac{\left(1 - \frac{\sigma_0}{f_c}\right)}{h}$$



Analisi strutturale

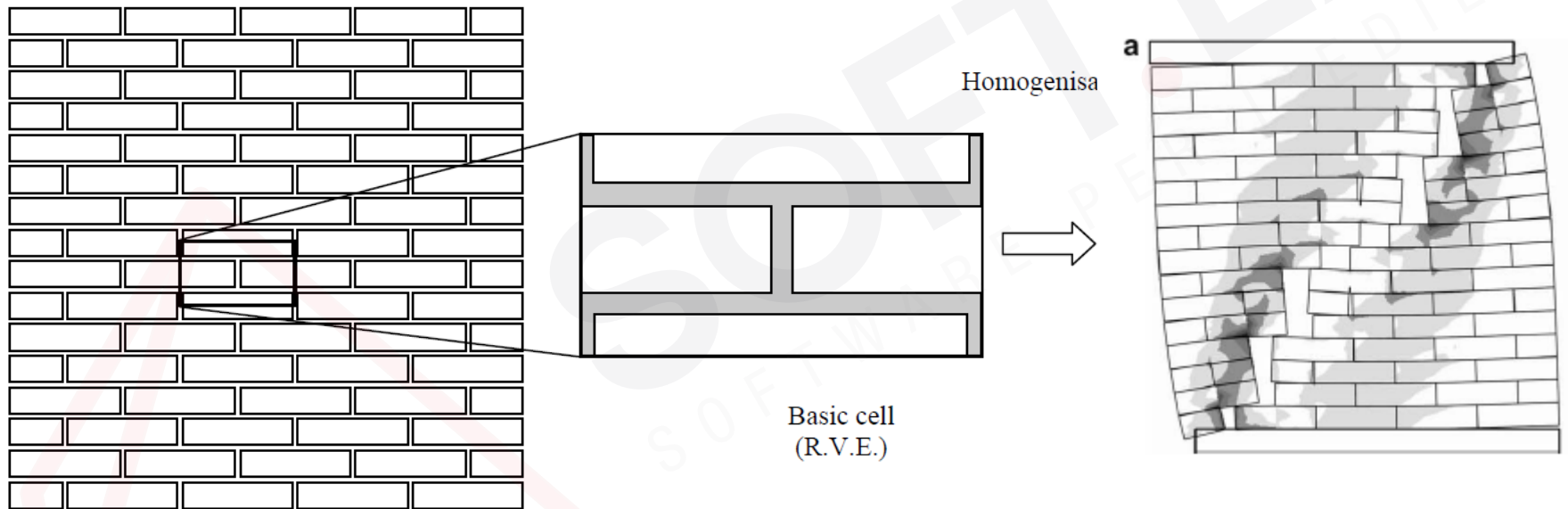
Approcci micro-meccanici



Macorini & Izzuddin (2010)

Analisi strutturale

Approcci micro-meccanici



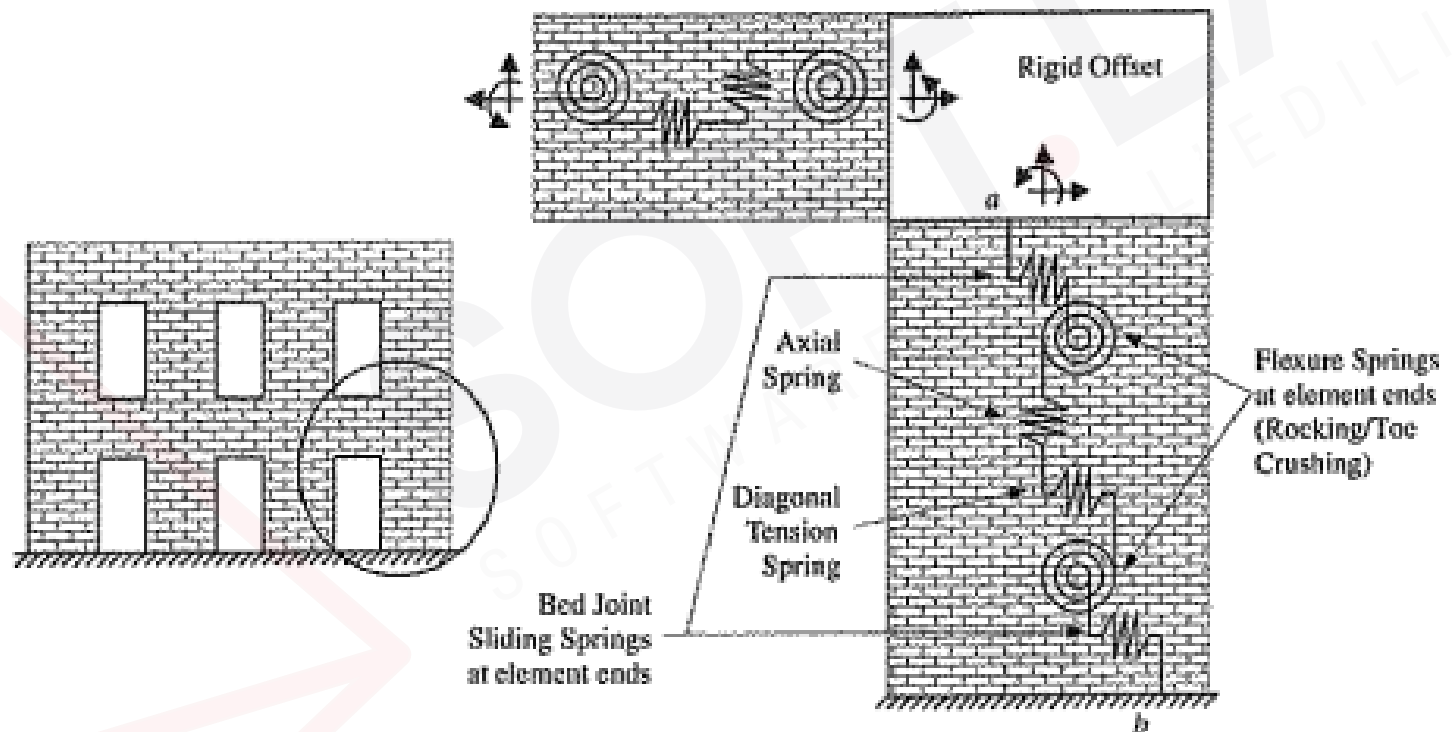
Zucchini & Lourenço (2009)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Approcci a macro elementi



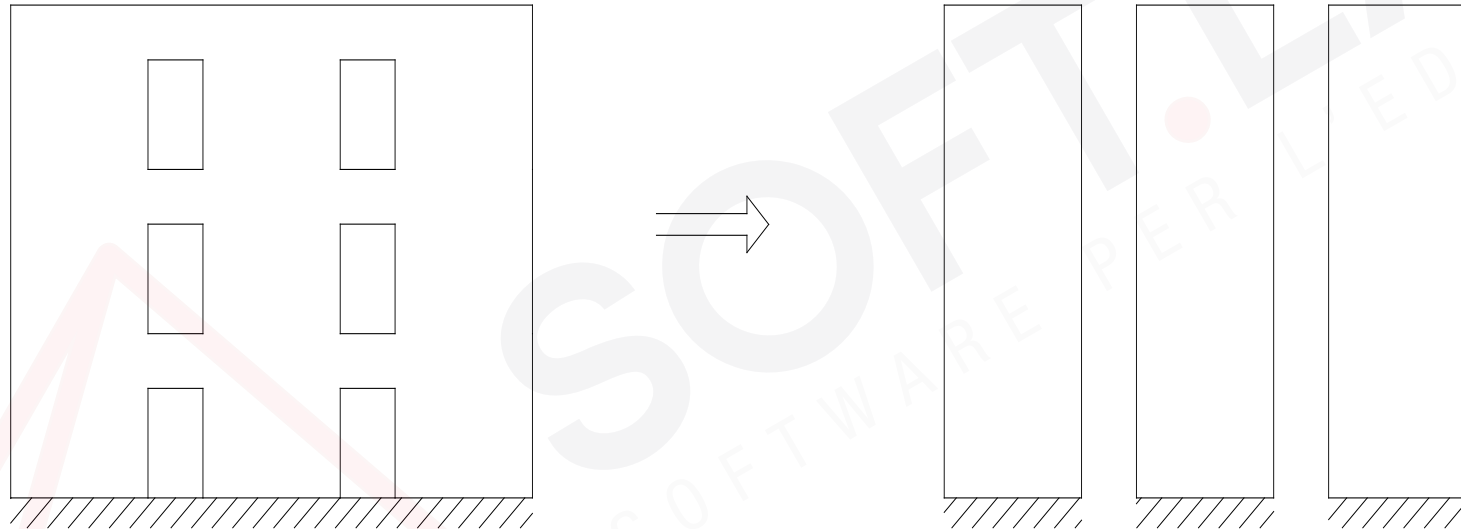
Chen & al (2009)



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Approcci a macro-elementi



Rigidità estensionale nulla

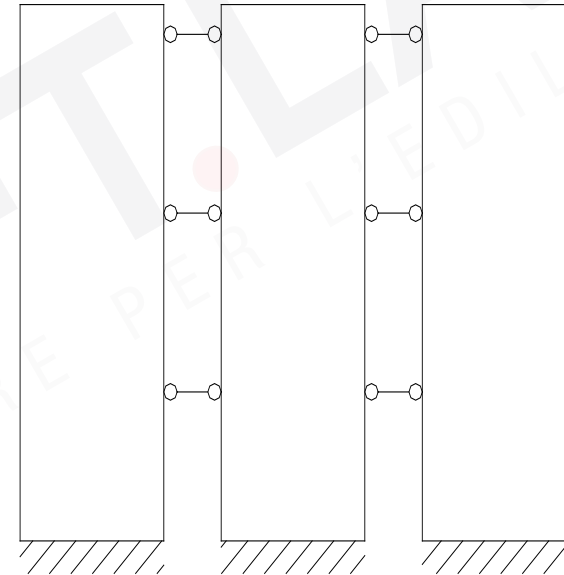
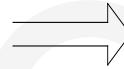
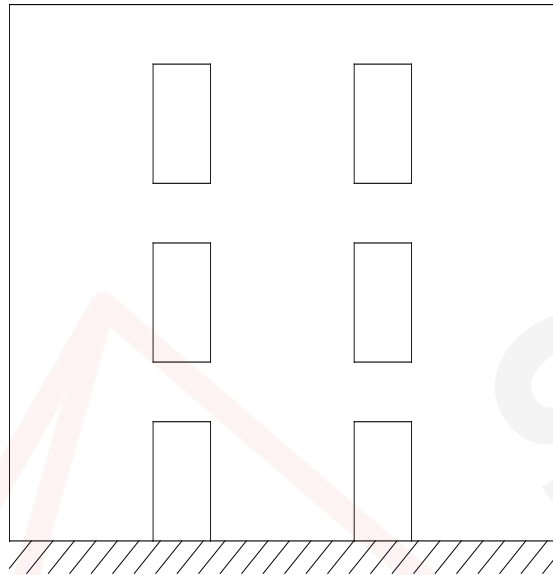
Rigidità flessionale nulla



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Approcci a macro-elementi

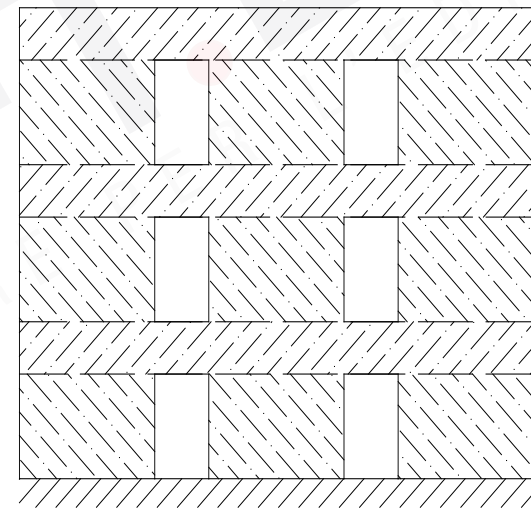
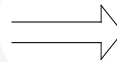
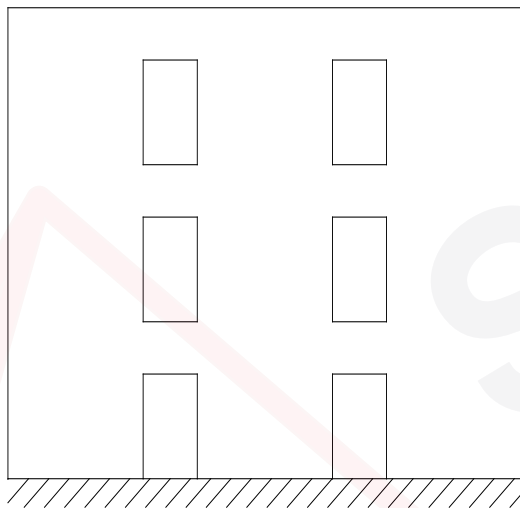


Rigidezza estensionale

Rigidezza flessionale nulla

Analisi strutturale

Approcci a macro-elementi



Rigidezza estensionale

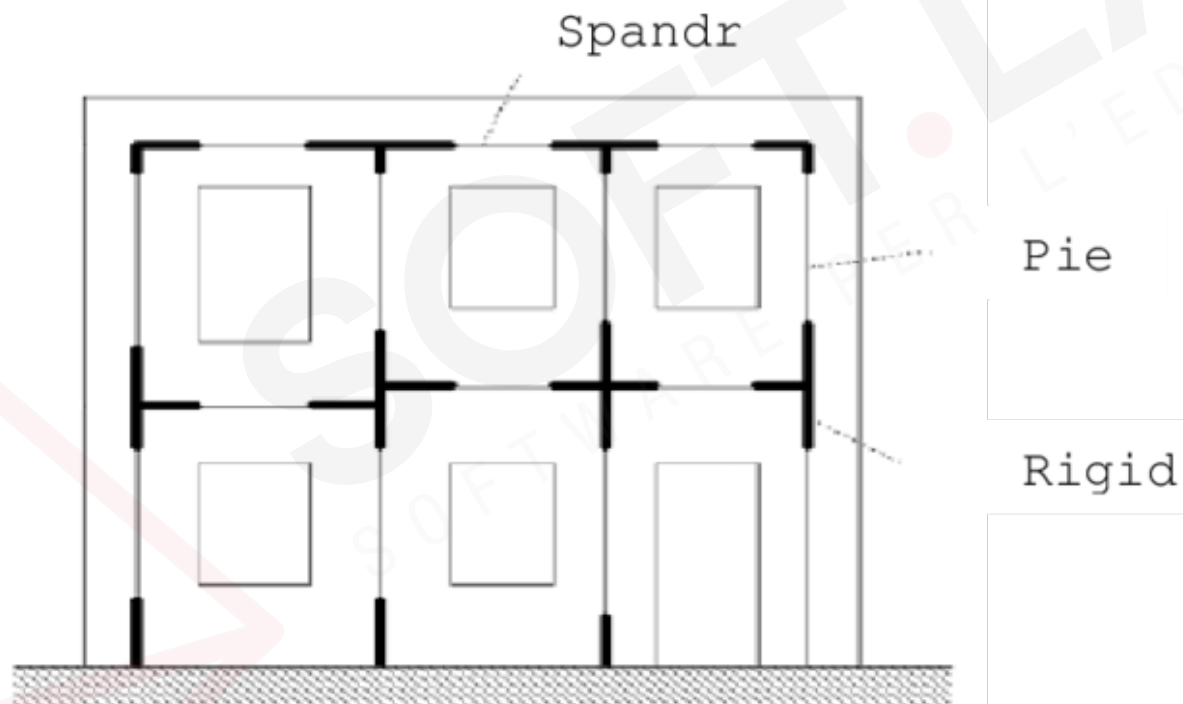
Rigidezza flessionale



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

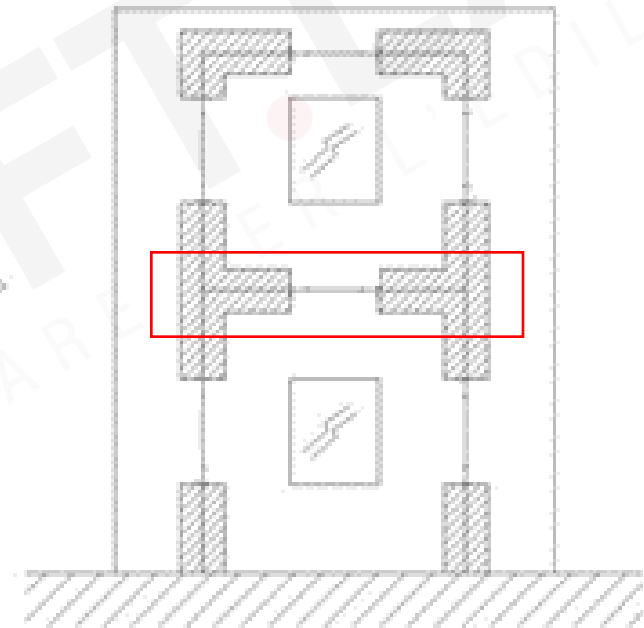
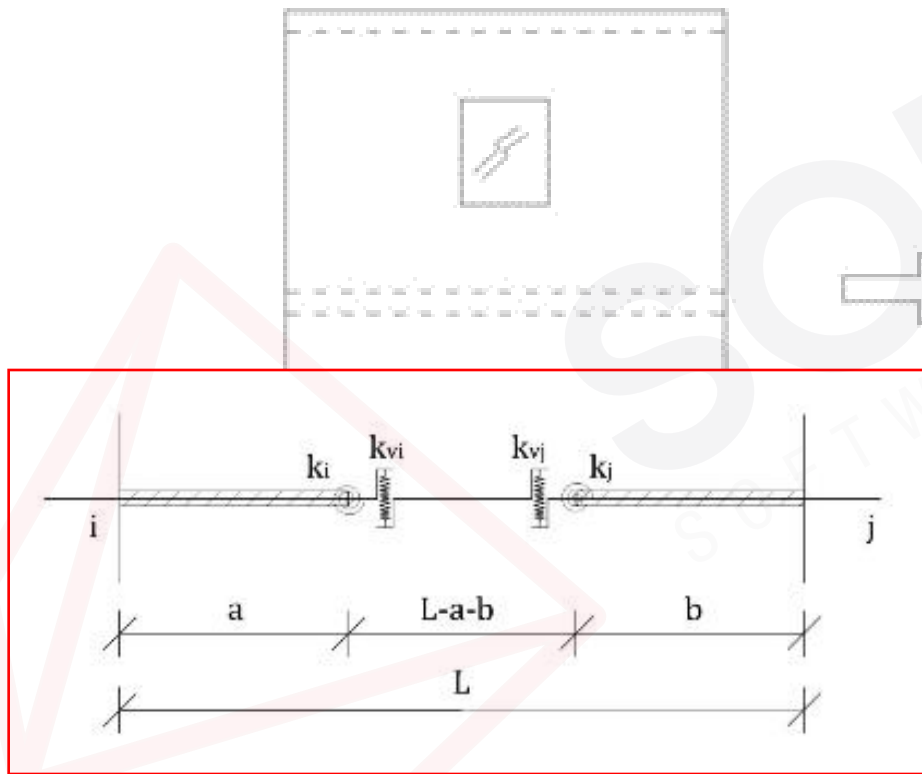
Modello a telaio equivalente: assunzioni



www.soft.lab.it

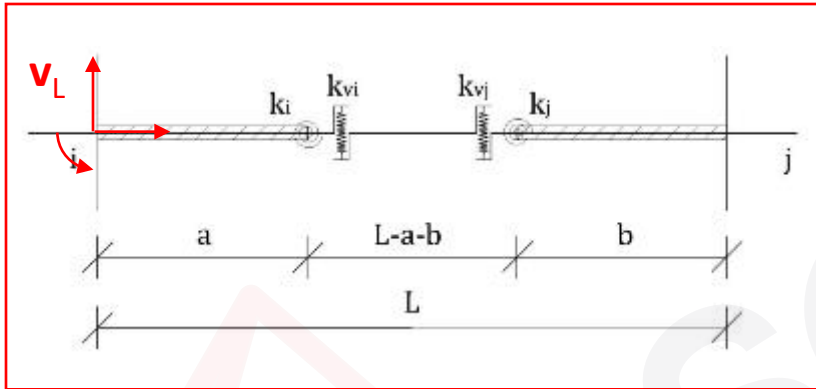
Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



Definizione della matrice di trasformazione:

$$\underline{v}' = \begin{bmatrix} u'_i \\ v'_i \\ \varphi'_i \\ u'_j \\ v'_j \\ \varphi'_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & r_i \cdot L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -r_j \cdot L \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ \varphi_i \\ u_j \\ v_j \\ \varphi_j \end{bmatrix}$$

Fattori di deformabilità:

$$\alpha_{ij} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \frac{1}{k_i} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} + \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

$$\alpha_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{3 \cdot EI} + \frac{1}{k_j} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} + \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

$$\beta_{ji} = \frac{L \cdot (1 - r_i - r_j)}{6 \cdot EI} + \frac{2}{[L \cdot (1 - r_i - r_j)]^2} \cdot \frac{1}{k_v} - \frac{\chi}{GA \cdot L}$$

Relazione della parte deformabile: $\underline{f}' = \underline{K}' \cdot \underline{v}' + \underline{f}'_0$

Forma simbolica: $\underline{v}' = \underline{T} \cdot \underline{v}$

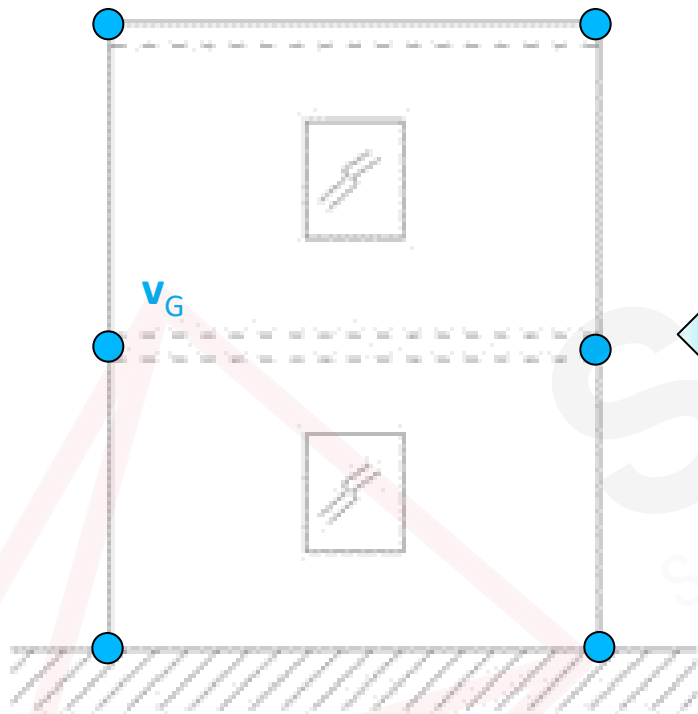
Relazione di tutto il frame: $\underline{f} = \underline{K} \cdot \underline{v} + \underline{f}_0 + \underline{f}''_0$



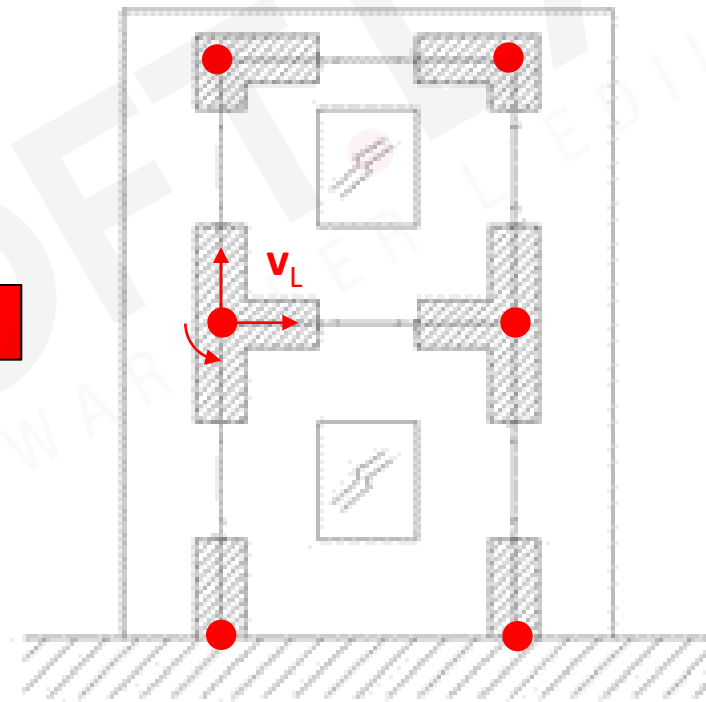
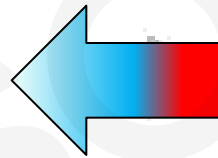
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



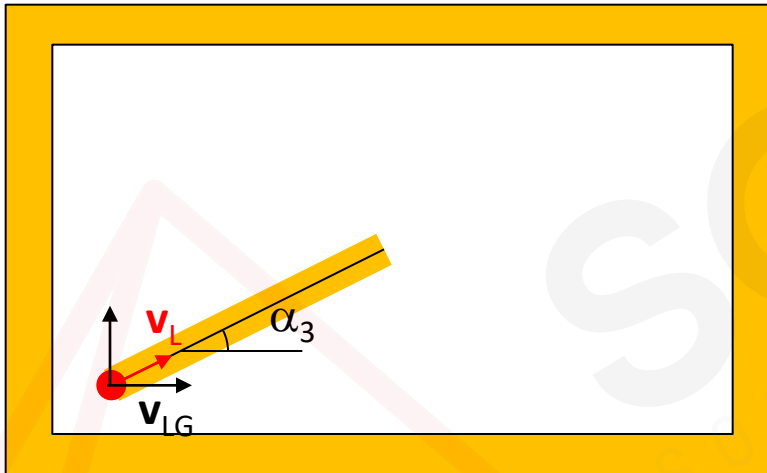
5 DoF



3 DoF

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



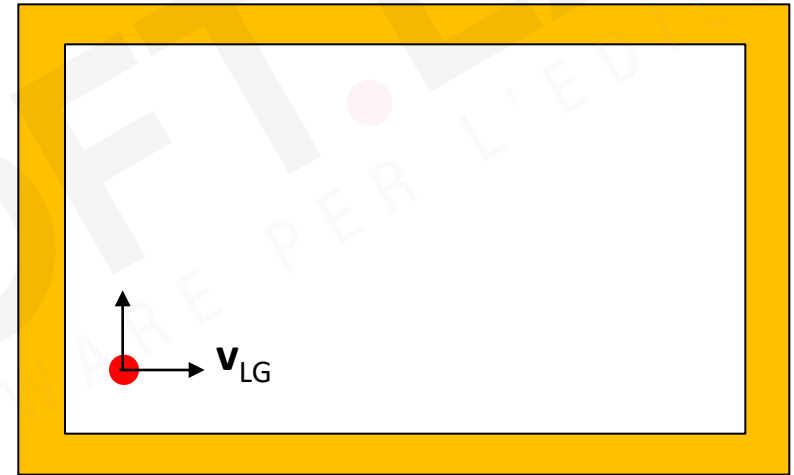
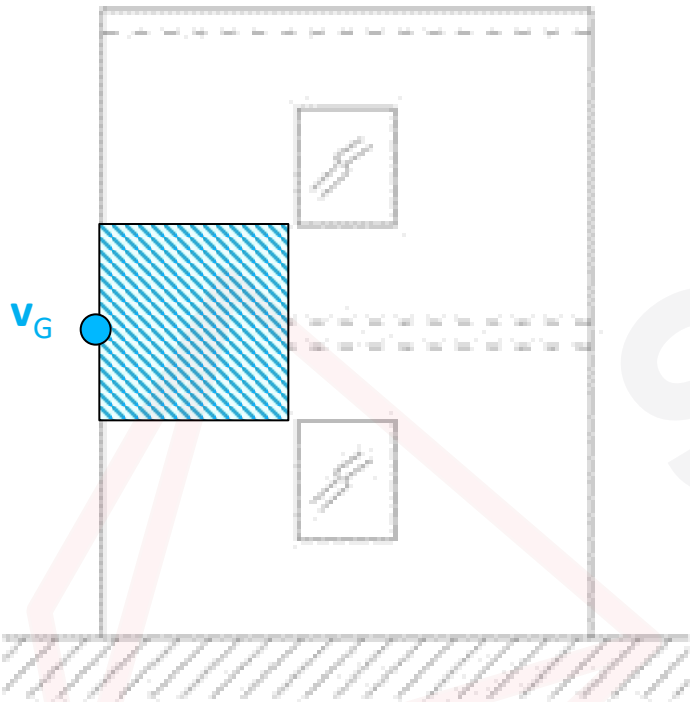
$$\mathbf{v}_L = \mathbf{L}\mathbf{G}_1 \mathbf{v}_{LG}$$



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



$$\mathbf{v}_{LG} = \mathbf{LG}_2 \mathbf{v}_G$$

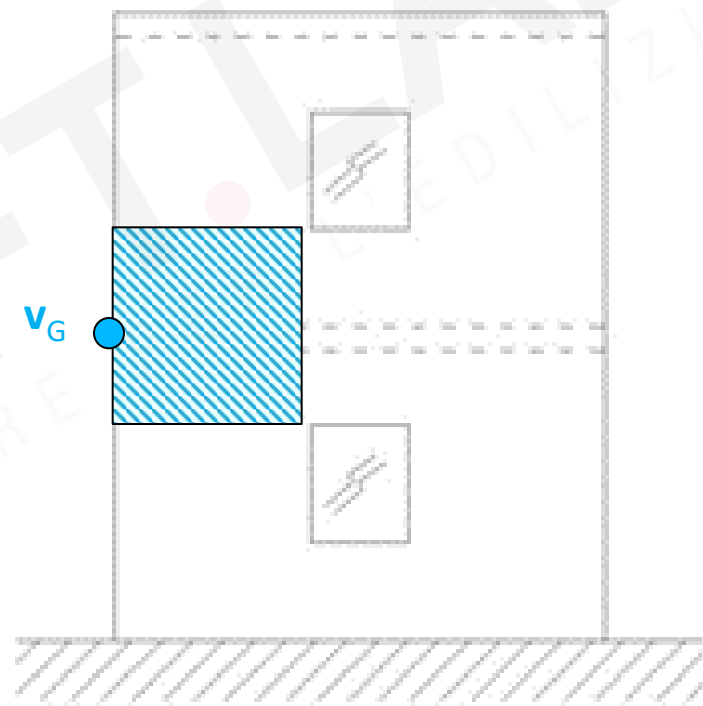
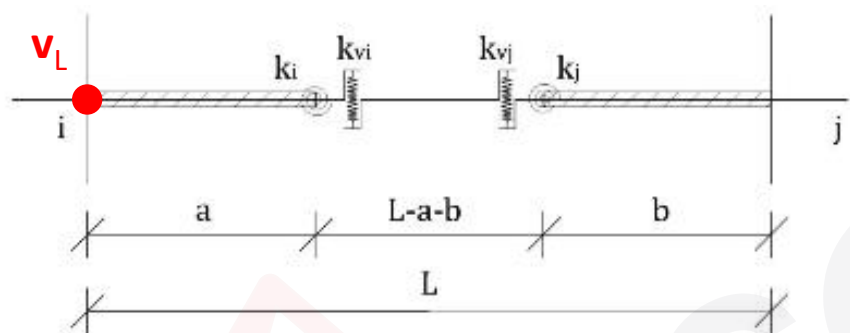
 **esis** s.r.l.
Tecnologie Emergenti a Servizio dell'Ingegneria Strutturale

SpinOff



Analisi strutturale

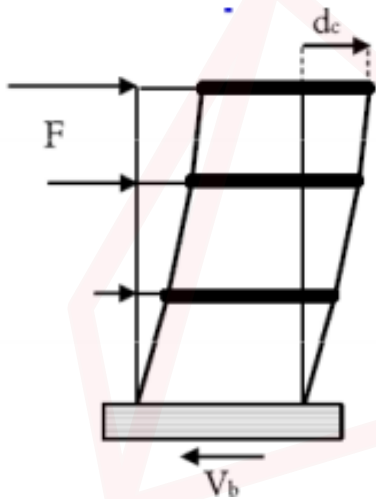
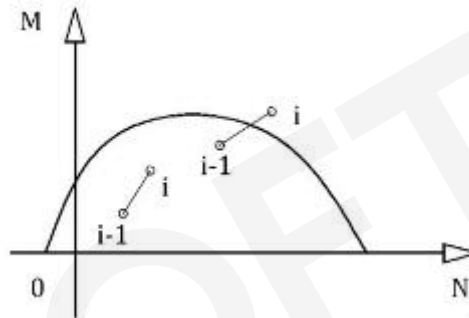
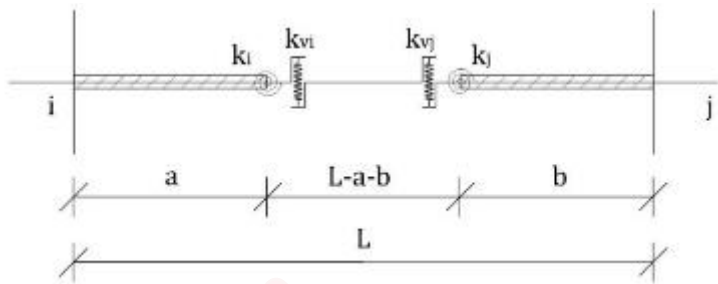
Modello a telaio equivalente: formulazione



$$\underline{F} = \underline{\underline{K}} \cdot \underline{s} + \underline{F}_0$$

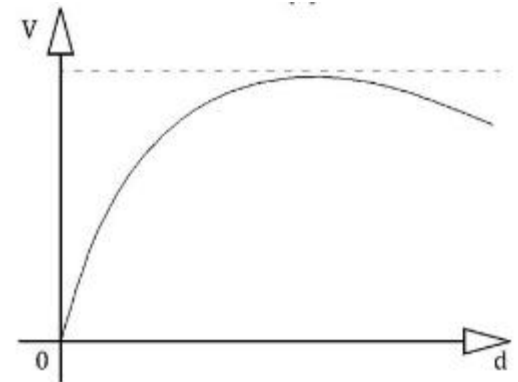
Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



Analisi statica non lineare
(incrementale-iterativa)

- Predizione elastica;
- Correzione plastica.

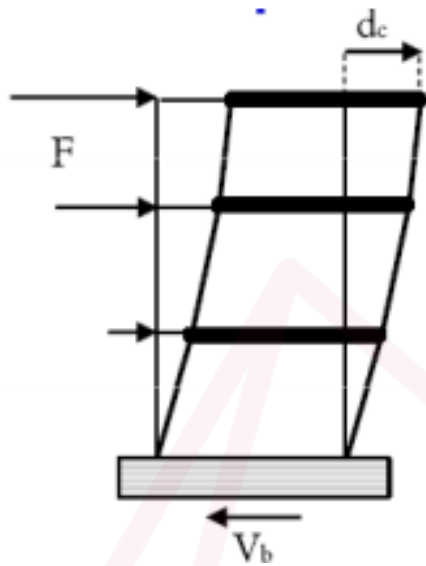




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

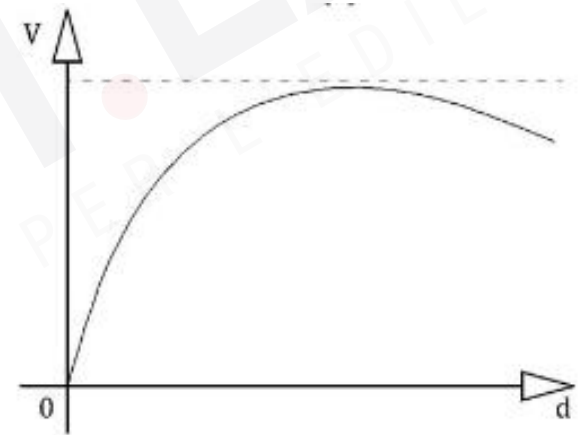
Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: formulazione



Analisi statica non lineare
(incrementale-iterativa)

- Predizione elastica;
- Correzione plastica.



esis s.r.l.
Tecnologie Emergenti a Servizio dell'Ingegneria Strutturale

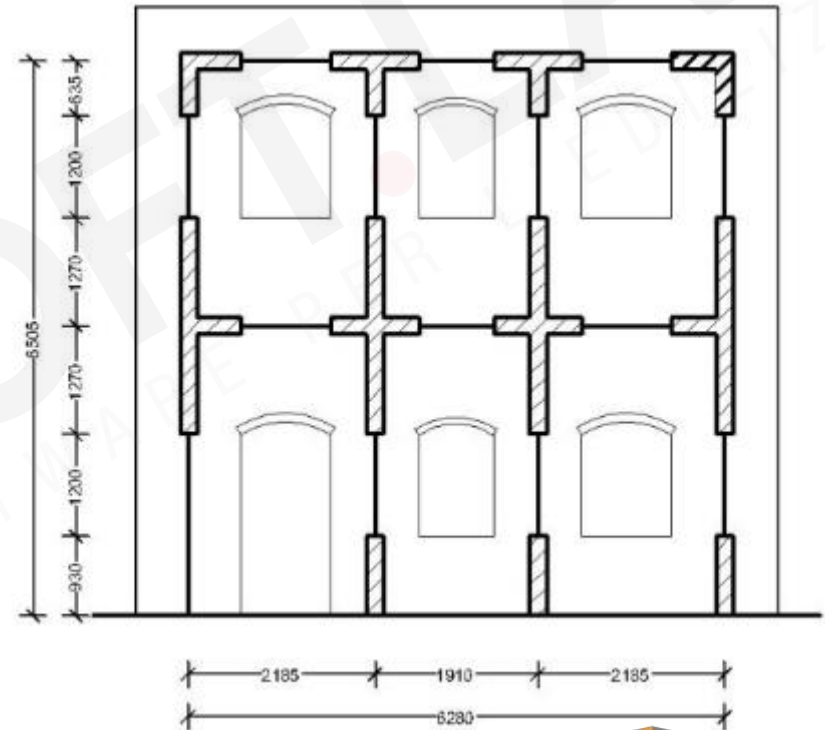
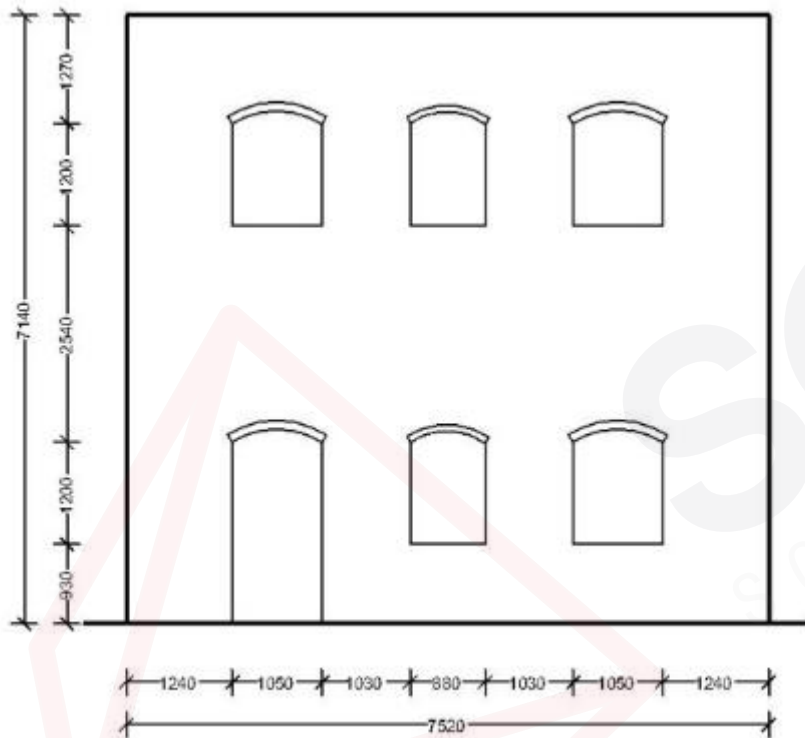
SpinOff



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: validazione



Li & al (2006)

esis s.r.l.
Tecnologie Emergenti a Servizio dell'Ingegneria Strutturale

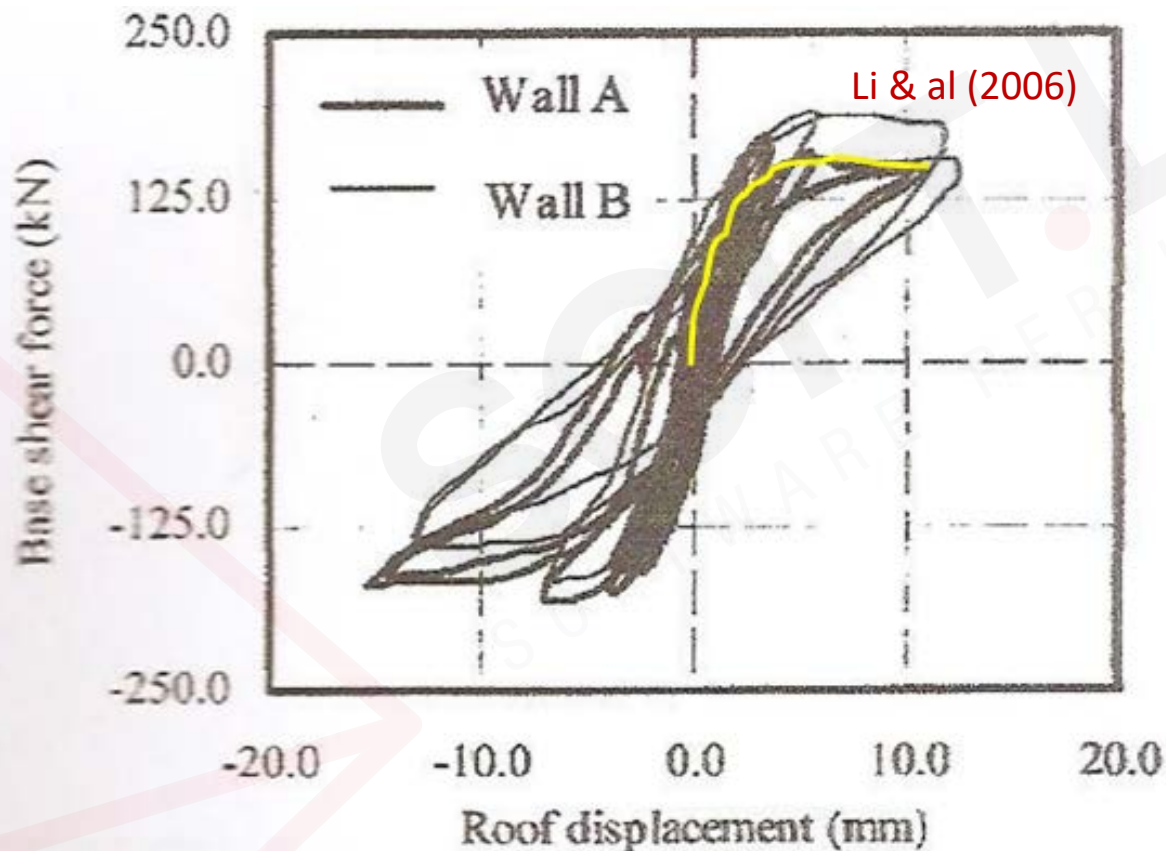
SpinOff



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: validazione



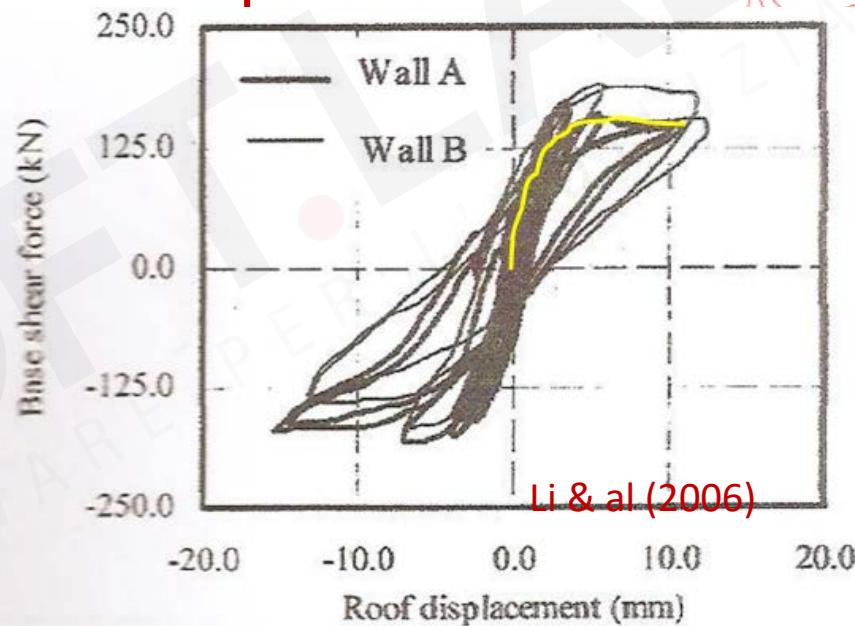
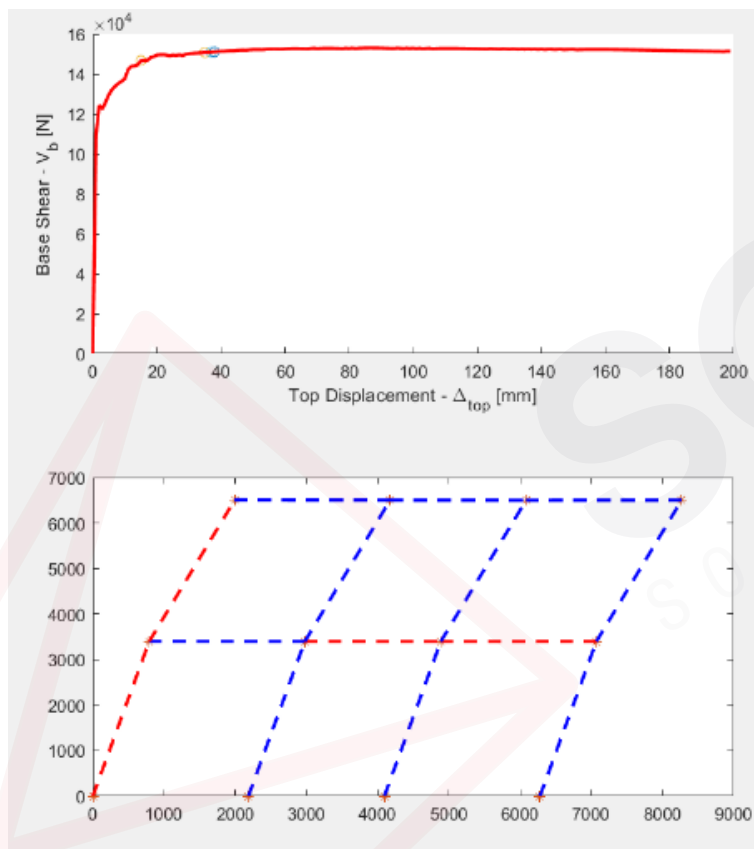
—
involuppo dei dati
sperimentali.



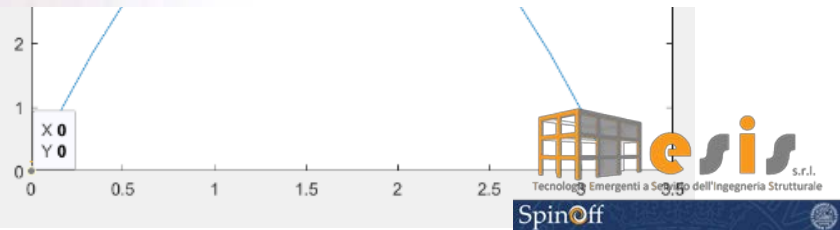
SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: esempio di analisi

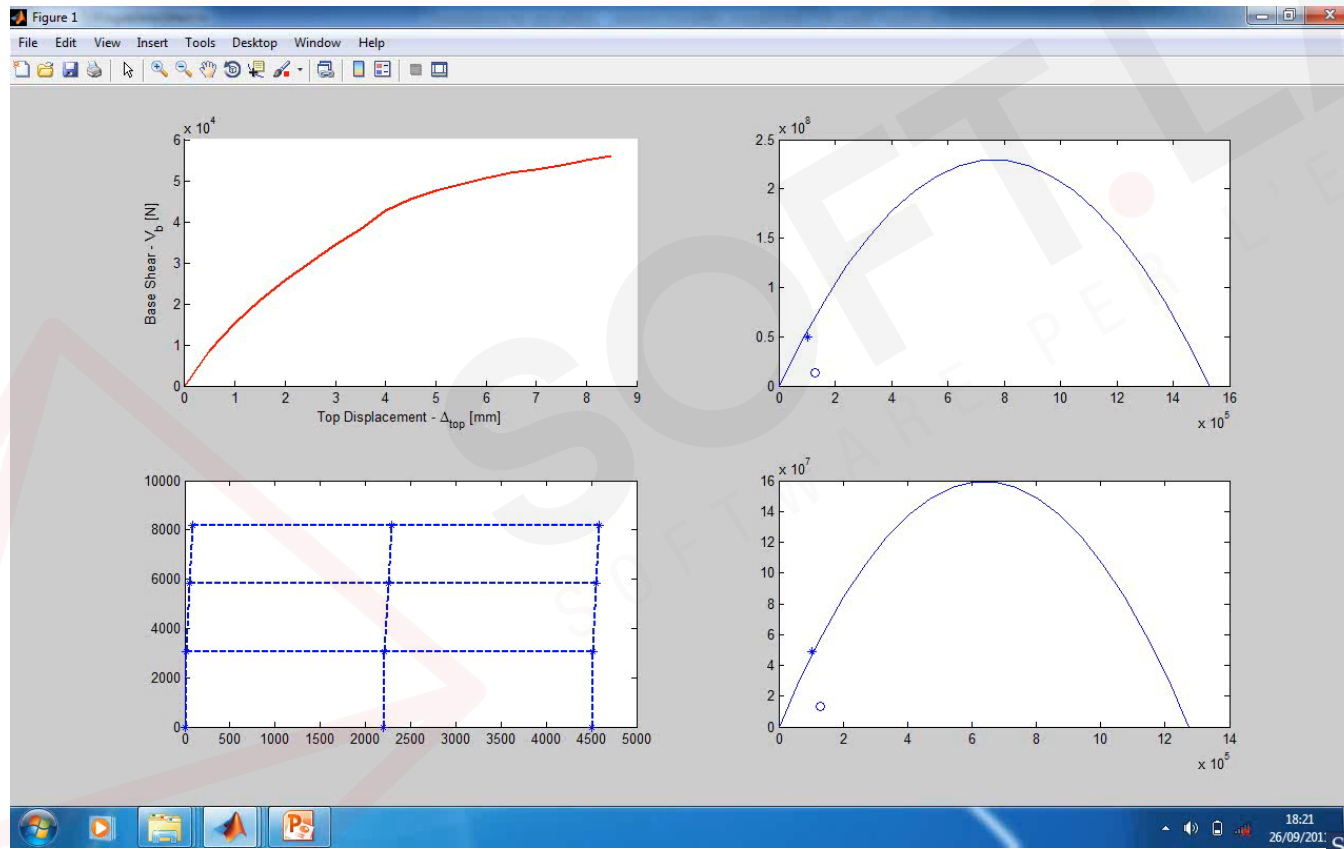


Li & al (2006)



Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: esempio di analisi

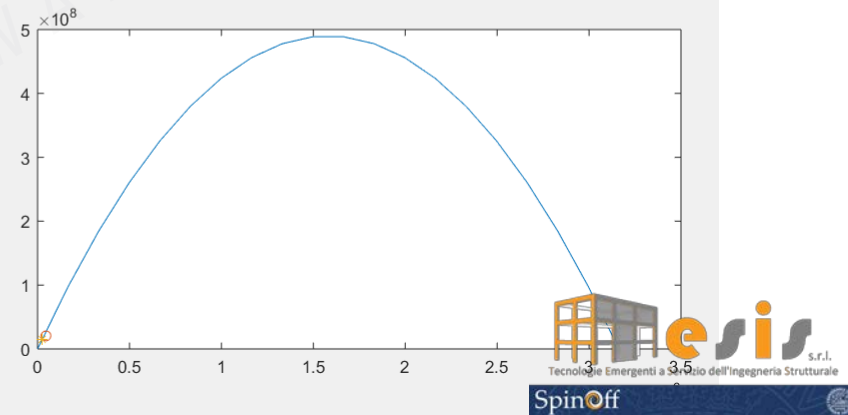
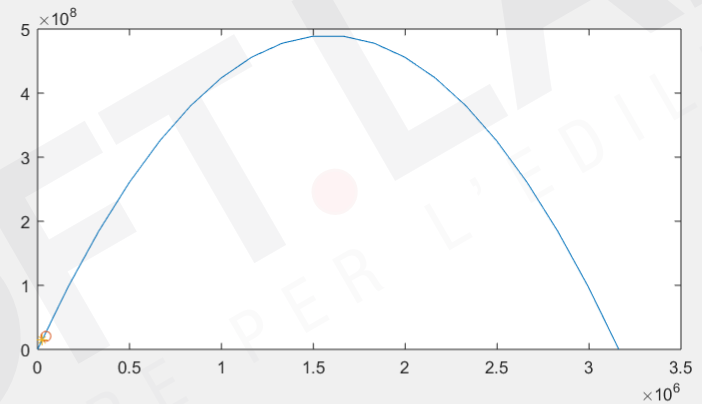
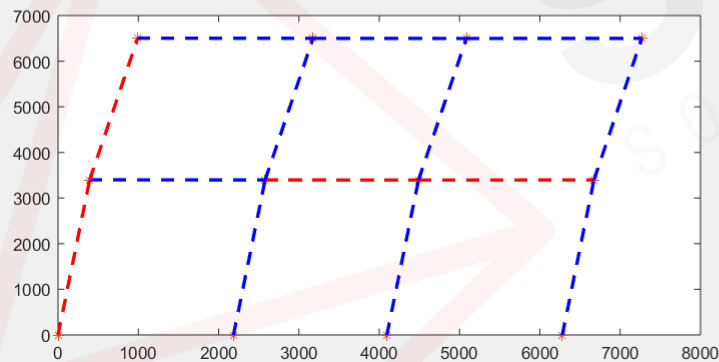
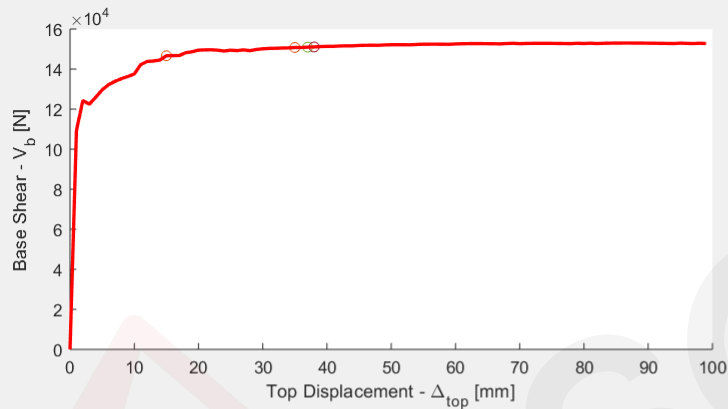




SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

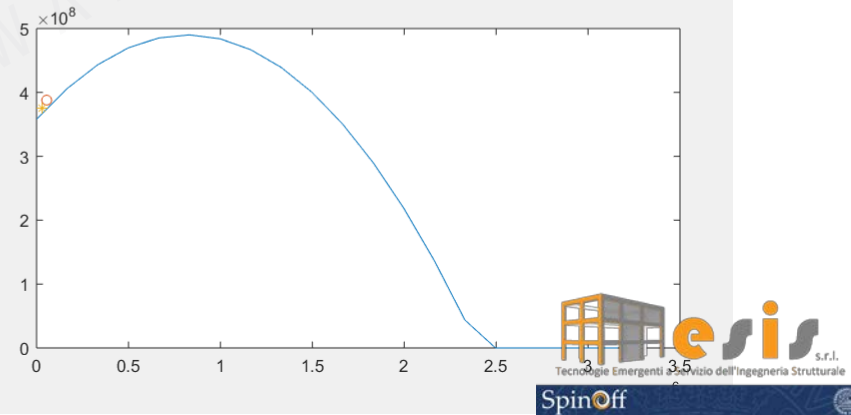
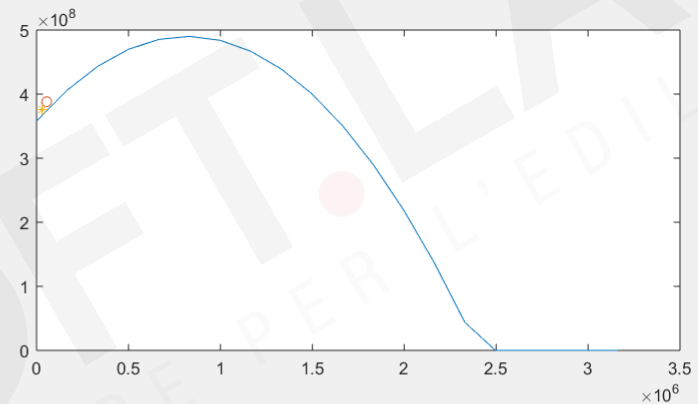
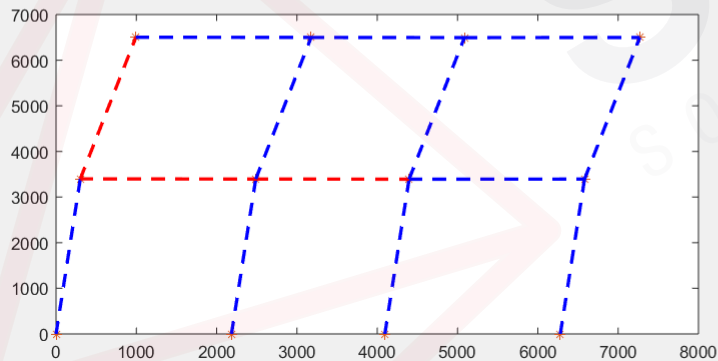
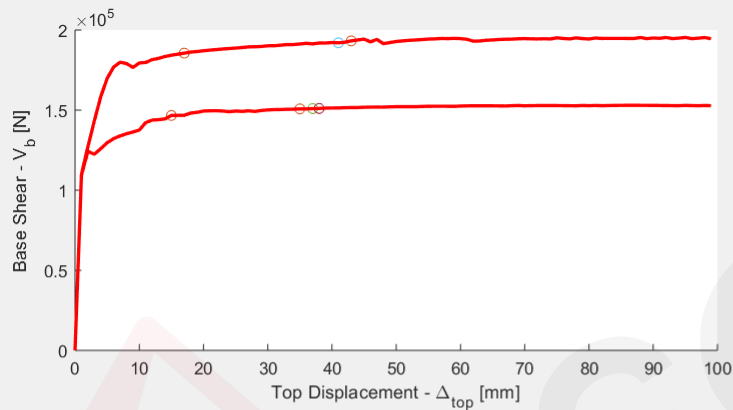
Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: effetto dell'intervento/0



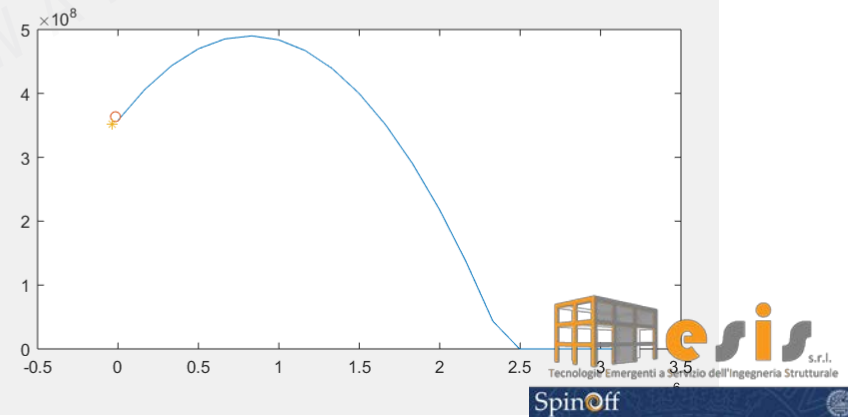
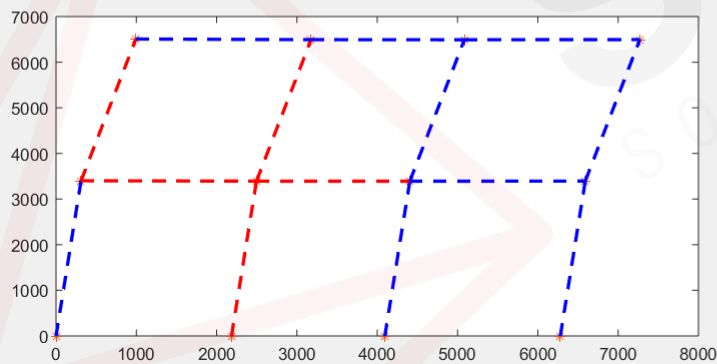
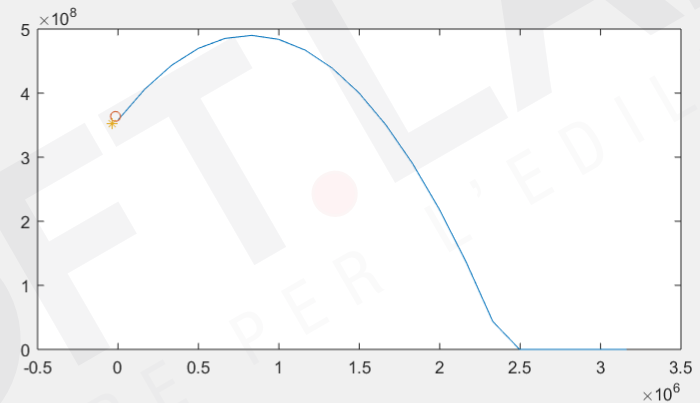
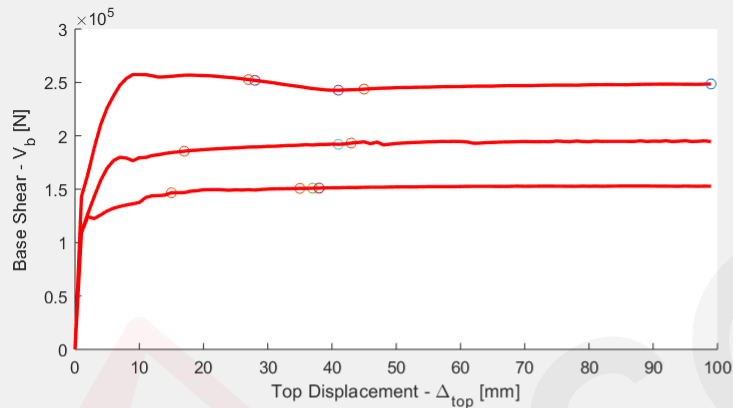
Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: effetto dell'intervento/1



Analisi strutturale

Modello a telaio equivalente: effetto dell'intervento/2



Analisi strutturale

Analisi sismica e valutazione della sicurezza

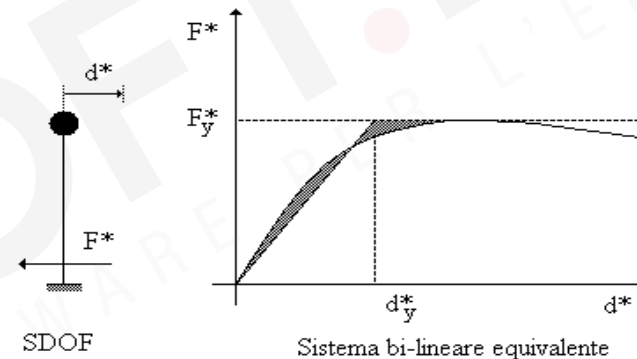
Curva Capacità MDOF ($T_b - d_{top}$)



$$\Gamma = \frac{\sum m_i \Phi_i}{\sum m_i \Phi_i^2}$$



Curva Capacità SDOF ($T_b^* - d_{top}^*$)
Sistema bilineare equivalente



$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{F_y^*}}$$

Periodo elastico del Sistema bilineare equivalente

$$F^* = \frac{F}{\Gamma}$$

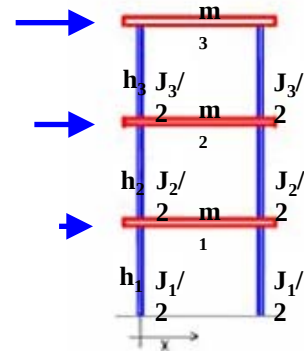
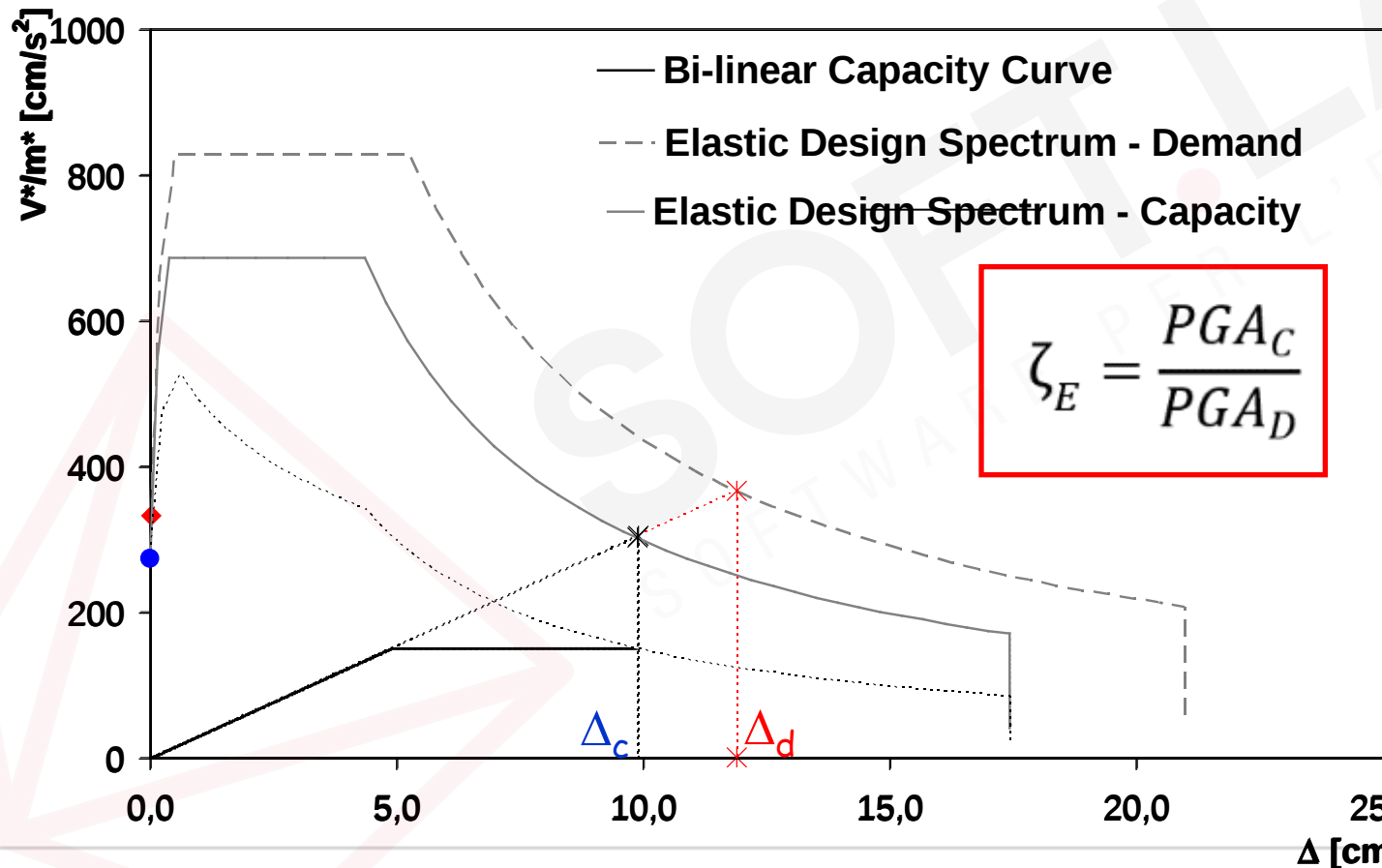
$$\Delta^* = \frac{\Delta}{\Gamma}$$



SOFT.LAB
SOFTWARE PER L'EDILIZIA

Analisi strutturale

Valutazione della sicurezza



Bibliografia

- ✓ Faella C., **Martinelli E.**, Nigro E., Paciello S. (2010), *Shear Capacity of Masonry Walls Externally Strengthened by a Cement-Based Composite Material: an Experimental Campaign*, Construction and Building Materials 24(1), 84-93 (doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.019);
- ✓ Faella C., **Martinelli E.**, Paciello S., Camorani G., Aiello M.A., Micelli F., Nigro E. (2011), *Masonry columns confined by Composite materials: experimental investigation*, Composites Part B, 42(4), 692-704 (doi:10.1016/j.compositesb.2011.02.001);
- ✓ Faella C., **Martinelli E.**, Camorani G., Aiello M.A., Micelli F., Nigro E. (2011), *Masonry columns confined by Composite materials: design formulae*, Composites Part B, 42(4), 705-716 (doi:10.1016/j.compositesb.2011.02.024);
- ✓ Faella C., Camorani G., **Martinelli E.**, Paciello S.O., Perri F. (2012), *Bond behaviour of FRP strips glued on masonry: Experimental investigation and empirical formulation*, Construction and Building Materials, 31, 353-363 (doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.100);
- ✓ **Martinelli E.**, Perri F., Sguazzo C., Faella, C. (2016), *Cyclic shear-compression tests on masonry walls strengthened with alternative configurations of CFRP strips*, Bulletin of Earthquake Engineering, 14(6), 1695-1720 (doi: 10.1007/s10518-016-9895-6);
- ✓ Ferrara G., Caggegi C., Gabor A., **Martinelli E.** (2019), *Shear strengthening of masonry walls with Flax Textile Reinforced Mortar composite systems*, Proc. of the 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, 27-29 August 2019 in Potsdam (DE).

Grazie per l'attenzione



SOFT.LAB

SOFTWARE PER L'EDILIZIA

info@soft.lab.it

+39.0824.874.392

e.martinelli@tesis-srl.eu



www.soft.lab.it