



**Prove in situ e di laboratorio per la
caratterizzazione meccanica delle murature**

***Luciano Galano
Pisa, 16 maggio 2006***

ARGOMENTI TRATTATI

1

Analizzare alcuni metodi di prova per la determinazione della resistenza a compressione ed a taglio delle murature

2

Discutere circa l'interpretazione dei risultati delle prove stesse per ottenere i valori caratteristici delle resistenze

Data la grande varietà delle tipologie murarie e delle procedure di prova, qui si intende discutere delle prove su pannelli di pareti esistenti o pannelli di muratura ricostruita in laboratorio a rappresentare tipiche tessiture di costruzioni storiche.

SPUNTO DELLA NORMATIVA

Per le murature esistenti l'Ordinanza 3274 e le successive modifiche forniscono una tabella con valori di riferimento delle resistenze medie a compressione ed a taglio e dei moduli elastici E e G, che devono essere utilizzati per le verifiche sismiche con opportune regole, e possono essere anche utilizzati per la verifica non sismica come utili valori di riferimento (qui E/G è prossimo a 6).

Tipologia di muratura	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kg/m ³)
	min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	60 90	2,0 3,2	690 1050	115 175	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	110 155	3,5 5,1	1020 1440	170 240	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	150 200	5,6 7,4	1500 1980	250 330	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	80 120	2,8 4,2	900 1260	150 210	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	300 400	7,8 9,8	2340 2820	390 470	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	180 280	6,0 9,2	1800 2400	300 400	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI)	380 500	24 32	2800 3600	560 720	15
Muratura in blocchi laterizi forati (perc. foratura < 45%)	460 600	30,0 40,0	3400 4400	680 880	12
Muratura in blocchi laterizi forati, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2580 3300	430 550	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	2200 2800	440 560	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	300 440	18,0 24,0	2700 3500	540 700	14

Parametri meccanici più significativi

Resistenza caratteristica a compressione	→	f_k
Resistenza caratteristica a taglio in assenza di compressione	→	f_{vk0} o τ_k
Modulo elastico longitudinale	→	E
Modulo elastico tangenziale	→	G

I parametri elencati sono riferiti a murature esistenti o ricostruite in laboratorio, caratterizzate dall'assenza di una tessitura regolare; per le murature nuove e per quelle con tessitura regolare, oltre ad essi, sono da determinare anche altri parametri quali, ad esempio, la coesione e l'attrito tra blocco e malta.

NOTA: i parametri su elencati sono anche quelli di più immediato utilizzo per le verifiche e utilizzati nella normativa.

Parametri meccanici più significativi

Actual codes evaluate the shear strength f_{vk} of masonry walls using two groups of equations. A first group is based on the Coulomb type friction failure:

$$f_{vk} = f_{vk0} + \tan(\phi) \sigma_0$$

$\tan(\phi)$ = friction coefficient that varied from 0.3 to 0.8.

f_{vk0} = cohesion

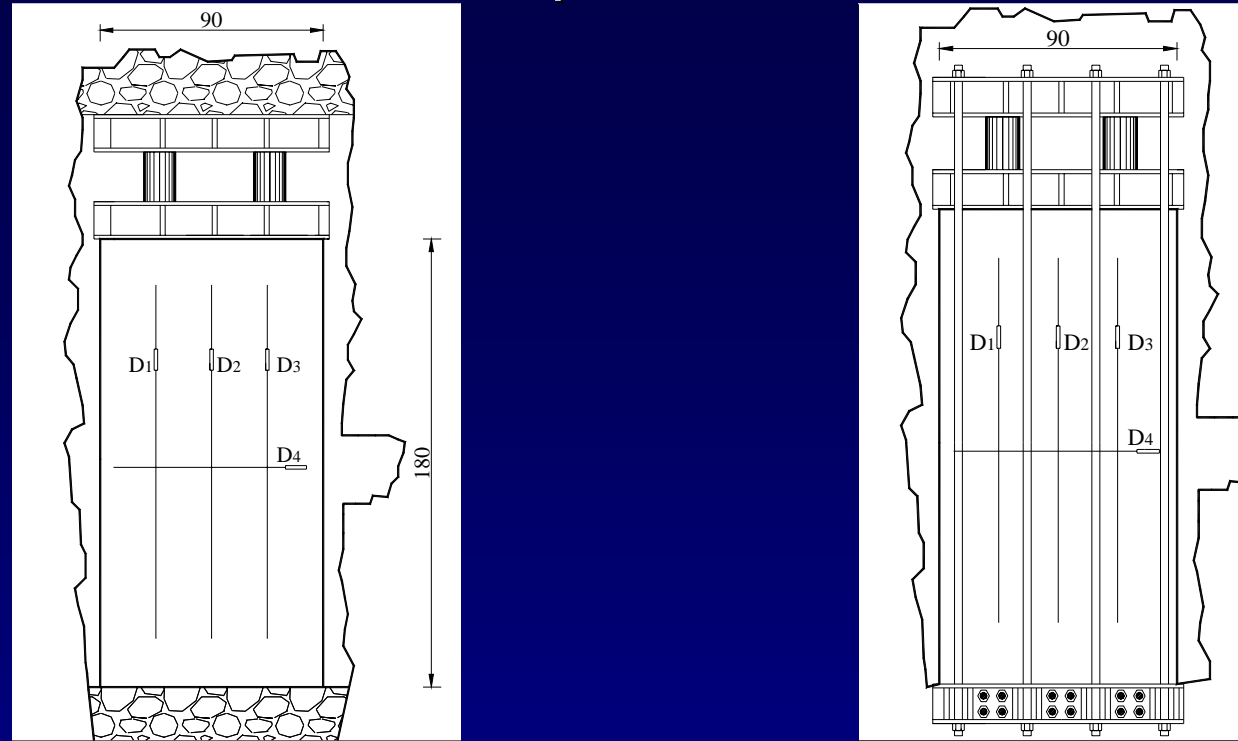
Despite the great variability of $\tan(\phi)$, both actual Italian Standards (1987) and the recommendations of Eurocode 6 adopt the previous equation with $\tan(\phi) = 0.4$. Values of f_{vk0} varies from 0.1 to 0.2 N/mm².

With a second group of equations the shear strength is evaluated as the average shear stress in a panel subjected to a vertical compression and to an horizontal load in its plane. This formulation is the one assumed in the POR method. The shear strength τ_u is defined as:

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

b is a shape factor that takes into account the variability of the shear stresses on the horizontal section of the wall ($\tau_k = f_{wt}/b$). The determination of the parameters τ_k and f_{vk0} for ancient masonry walls should be based on extensive experimental tests for the typology of masonry texture under examination.

Prova di compressione in situ

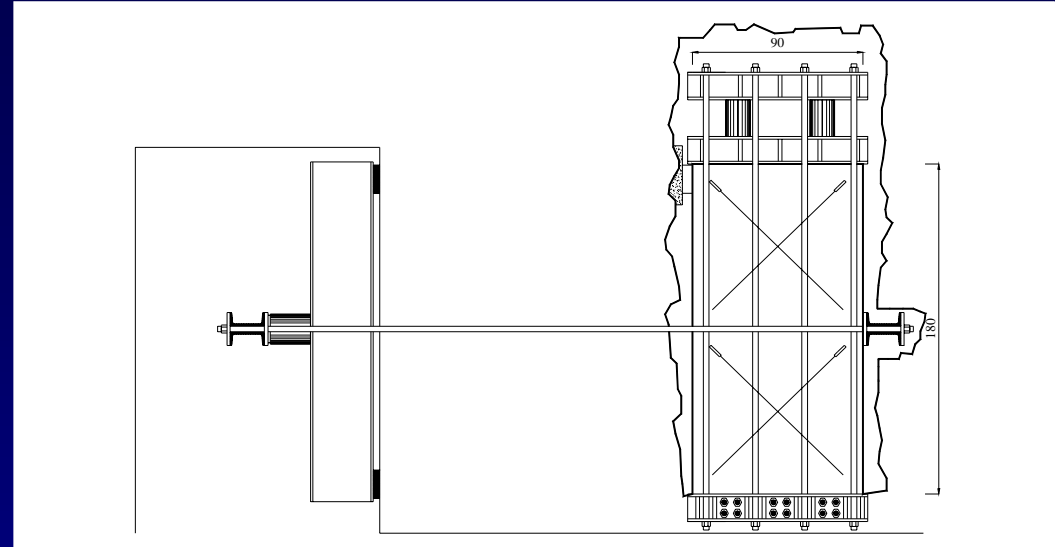
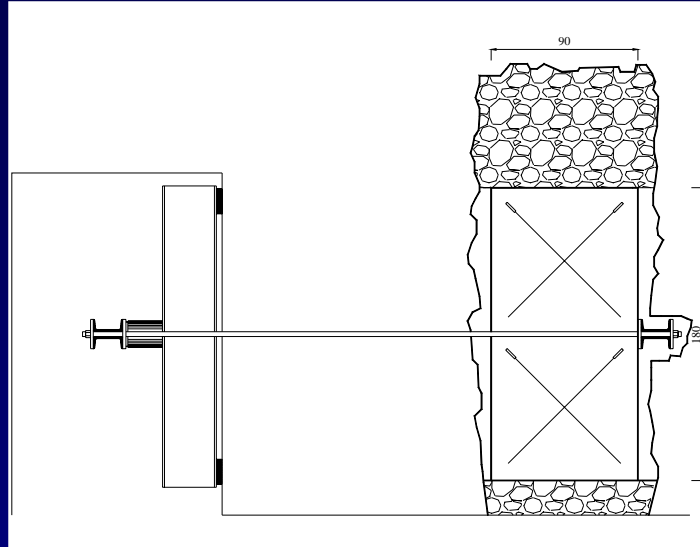


La prova si effettua su pannelli ricavati da pareti murarie in situ o pannelli in laboratorio, ha lo scopo di determinare la resistenza a compressione ed il modulo di elasticità E della muratura (in direzione verticale).

A seconda del carico preesistente sul pannello è possibile sfruttare il contrasto della porzione superiore della parete, oppure è necessario utilizzare un sistema chiuso.

E' codificata in versione laboratorio per piccoli muretti di muratura nuova.

Prova di taglio in situ (Sheppard) e prova di taglio-compressione in situ

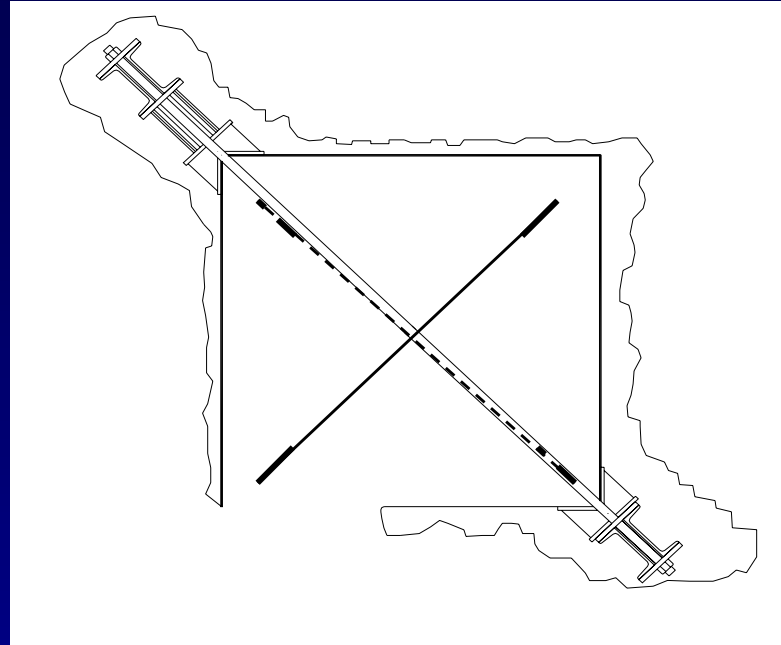


La prova si effettua su pannelli ricavati in pareti murarie in situ, ha lo scopo di determinare la resistenza a taglio ed il modulo di elasticità tangenziale G della muratura (talvolta si ricavano anche informazioni sulla duttilità).

Nella seconda versione della prova si impone al pannello un carico verticale di compressione di valore noto e prefissato all'inizio della prova.

Non è codificata.

Prova di compressione diagonale in situ

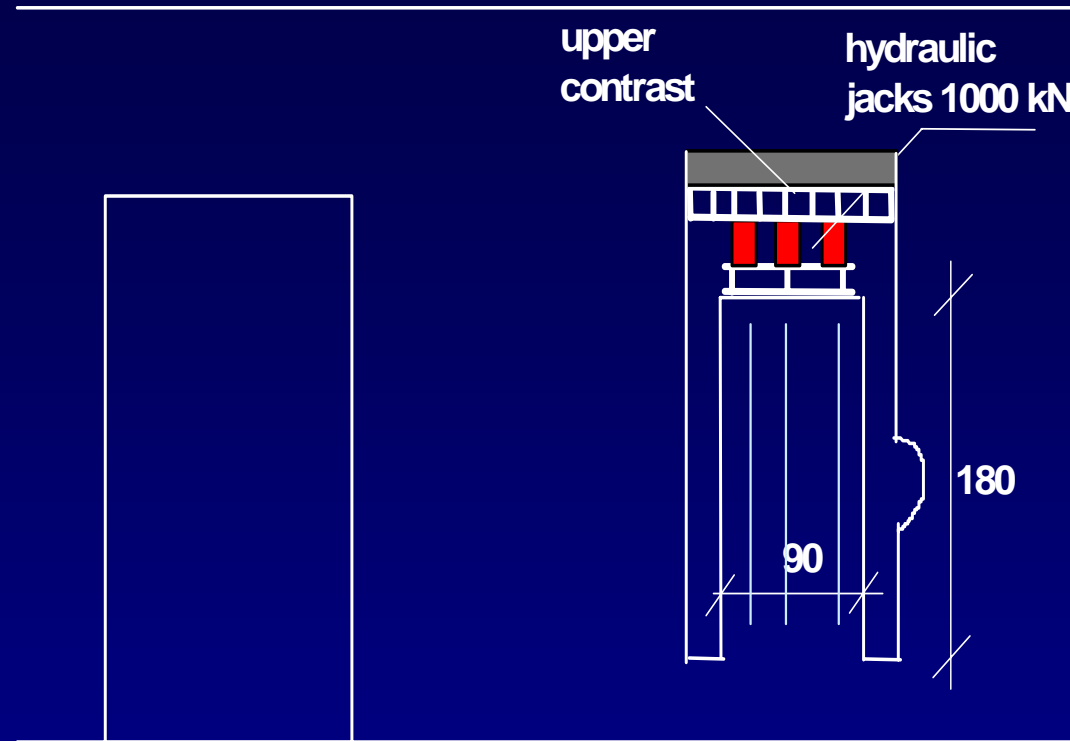


La prova si effettua su pannelli ricavati in pareti murarie in situ, ha lo scopo di determinare la resistenza a taglio ed il modulo di elasticità tangenziale G della muratura.

E' derivata dalla prova di laboratorio codificata dalle specifiche ASTM E 519-81.

E' codificata nella versione di laboratorio.

Prova di compressione in situ

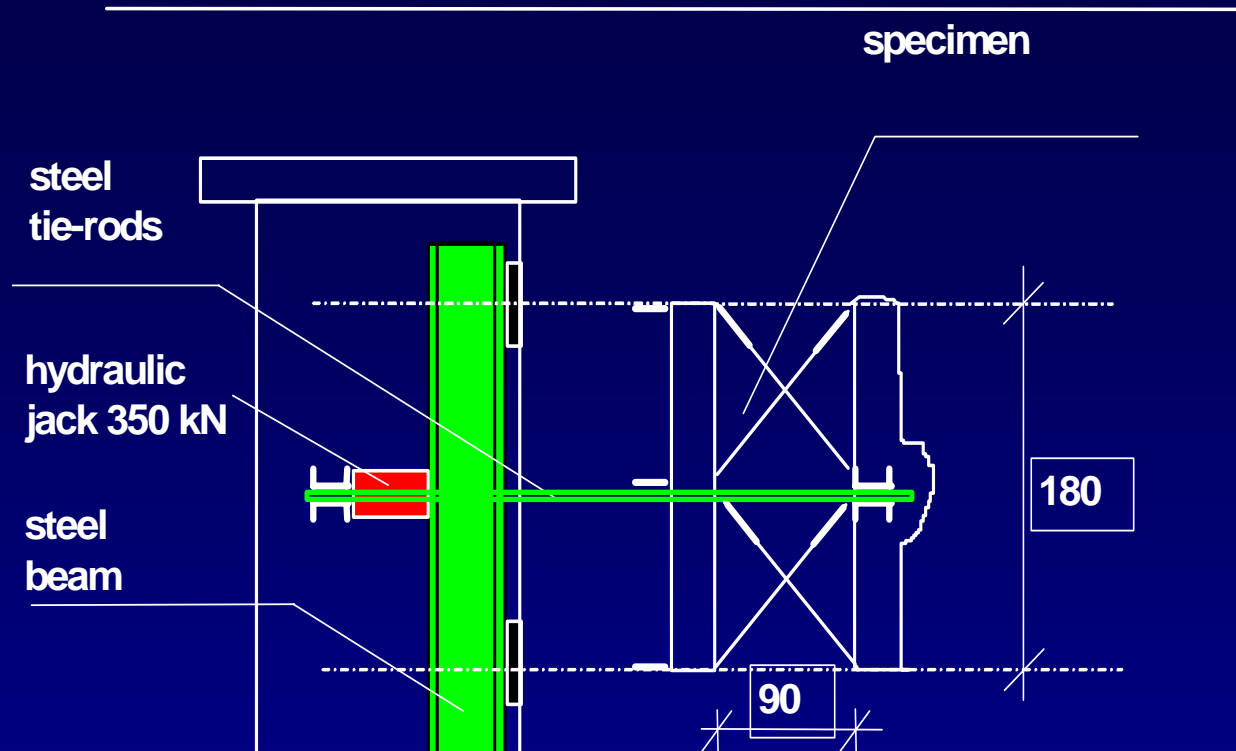


Tipico setup della prova. Questa è la versione con il contrasto fornito dalla parete superiore.

Vantaggi: semplicità di esecuzione.

Svantaggi: durante la prova è possibile danneggiare la parete superiore.

Prova di taglio in situ (Sheppard anni '80)

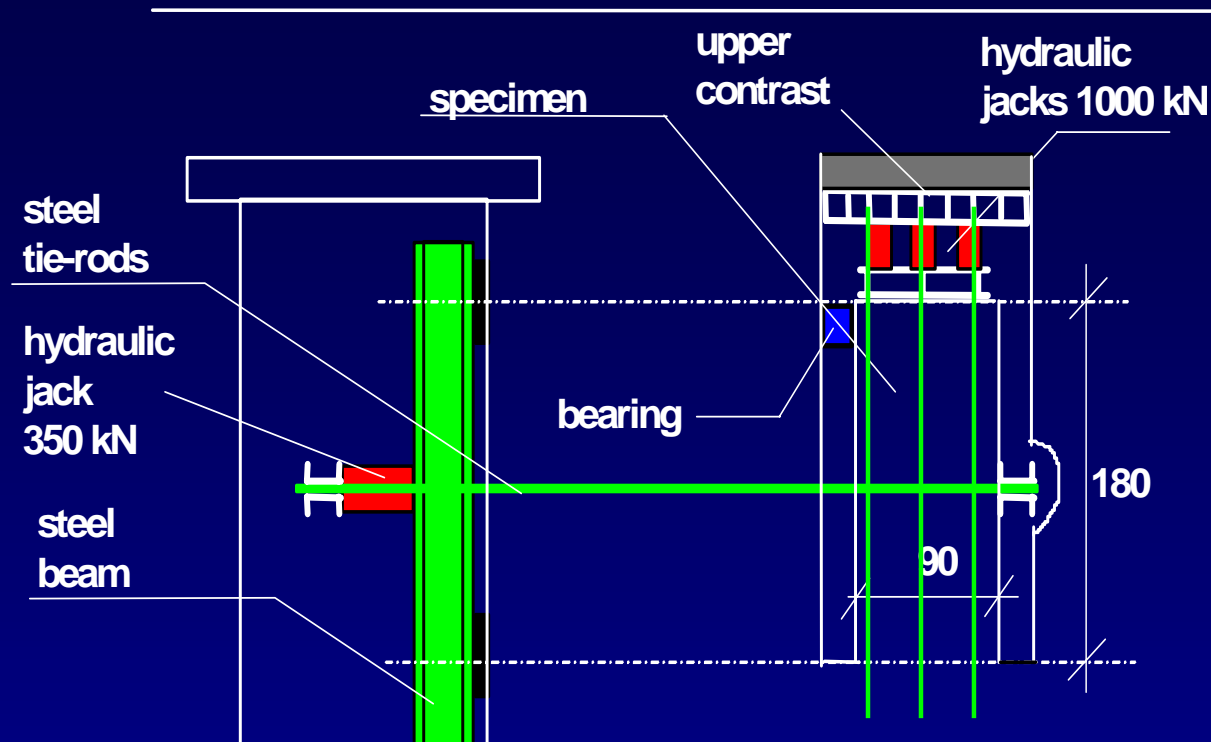


Tipico setup della prova

Vantaggi: semplicità di esecuzione, solo un attuatore.

Svantaggi: durante la prova la tensione verticale è incognita
la prova è possibile solo se la pressione verticale
media sul pannello è alta.

Prova di taglio-compressione in situ



Tipico setup della prova. Il ritegno superiore in colore blu è un attuatore per la misura della reazione orizzontale in sommità.

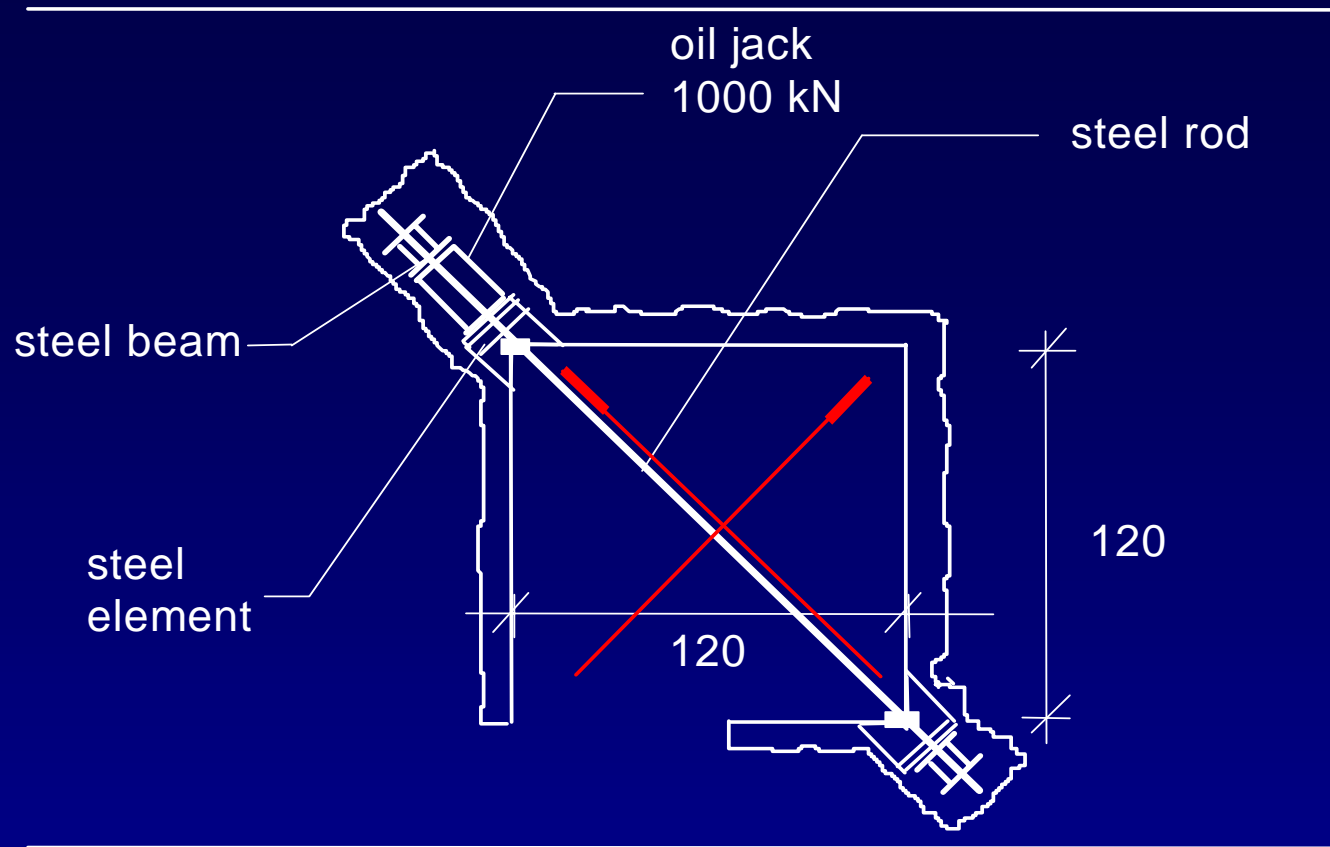
Vantaggi:

*lo schema può essere usato anche nei casi in cui la tensione verticale di confinamento è bassa
la tensione verticale è nota durante la prova
lo schema si può impiegare anche per la compressione.*

Svantaggi:

*Sono necessari più attuatori idraulici
l'esecuzione della prova è complessa
è difficile la predizione del comportamento della parte superiore del pannello durante la prova
l'interpretazione dei risultati è non sempre agevole.*

Prova di compressione diagonale in situ



Tipico setup della prova. Si nota la maggiore semplicità di questo schema rispetto al precedente.

Vantaggi: *semplicità di esecuzione, solo un attuatore.*

Svantaggi: *necessità di sostenere il pannello nella posizione di prova particolare cura per non disturbare il pannello.*

Esperienze degli Autori



1990:

7 prove di compressione diagonale di laboratorio su murature ricostruite con materiali provenienti da demolizioni di costruzioni tipiche dell'edilizia fiorentina

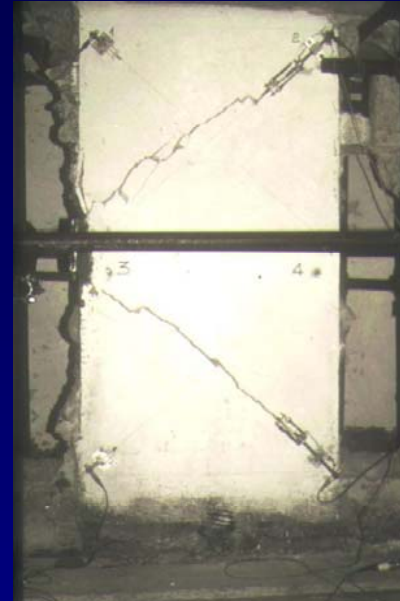
Esperienze degli Autori



A



B



C



D

1992 (Convenzioni di Ricerca Prof. Andrea Chiarugi):

3 prove di compressione in situ e 4 prove di taglio-compressione in situ nel Monastero di S. Orsola a Firenze, A e B

3 prove di taglio in situ (Sheppard) in un edificio da demolire, a Firenze, C

2 prove di taglio in situ (Sheppard) a Pontremoli in Lunigiana, D

Esperienze degli Autori

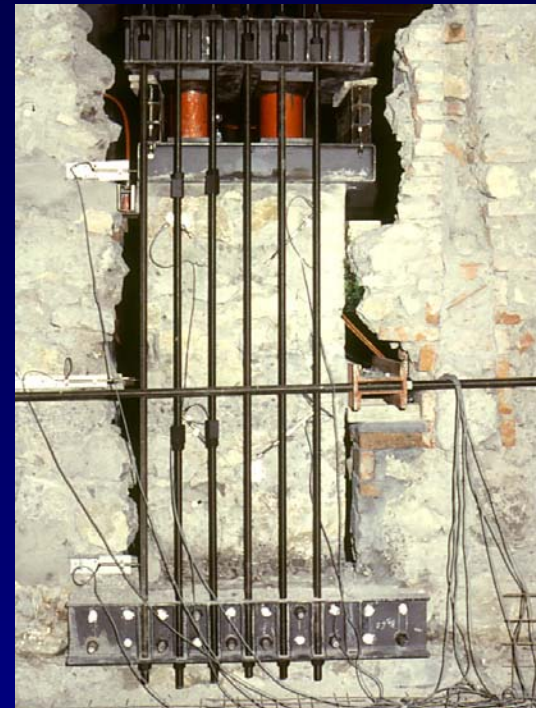


1997-1998:

9 prove di compressione in situ, 6 prove di compressione diagonale in situ e 7 prove di taglio-compressione in situ in edifici di edilizia rurale della Garfagnana e della Lunigiana

Nella foto è visibile il Palazzo comunale di Pieve Fosciana

Esperienze degli Autori



1997-1998:

Sono visibili alcune tessiture e sezioni tipiche di questi pannelli



Esperienze degli Autori



1997-1998:

Alcuni metodi per il taglio dei pannelli: sega circolare o filo diamantato.

I due metodi hanno vantaggi e svantaggi reciproci

Esperienze degli Autori



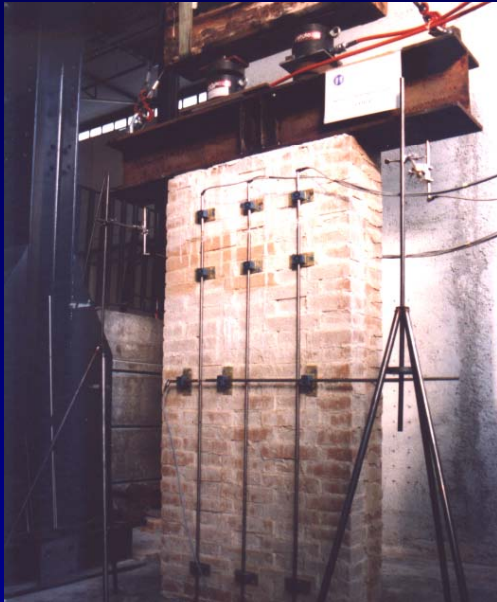
1999:

6 prove di compressione in situ, 12 prove di compressione diagonale in situ e 6 prove di taglio-compressione in situ in edifici di edilizia rurale in Umbria (in collaborazione con Perugia, Prof. A. Borri). La metodologia di preparazione dei pannelli è simile alla precedente campagna sperimentale

Esperienze degli Autori

2004

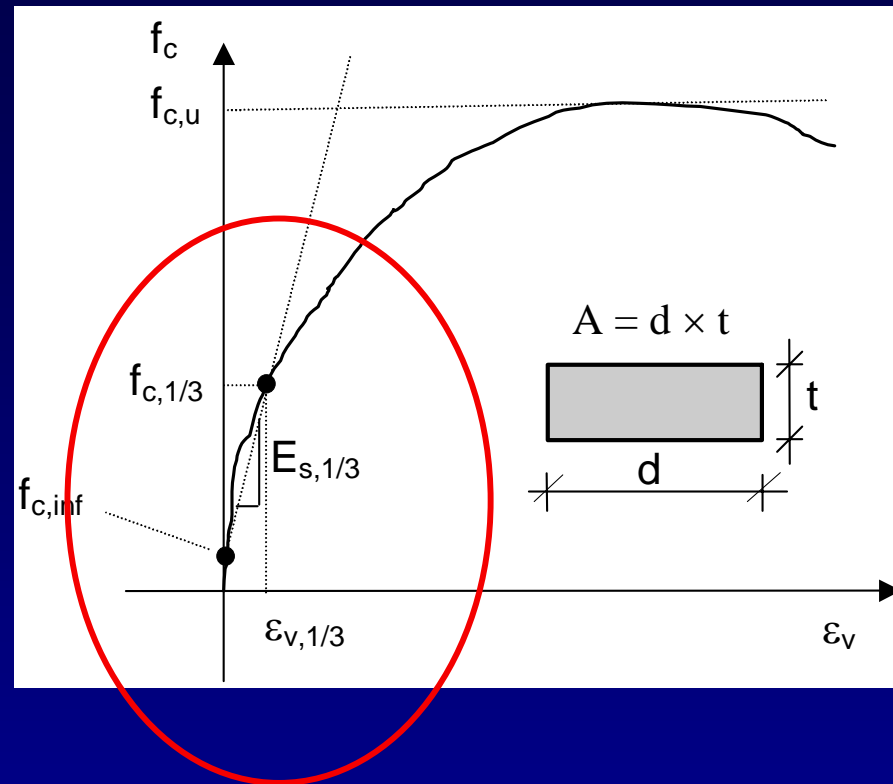
9 prove di compressione diagonale in situ su pannelli di edifici in Toscana (Lucca, Arezzo)



2000 e anni successivi

Prove su grandi pannelli in muratura di laterizio in laboratorio (Perugia, Prof. A. Borri) con procedure analoghe a quelle utilizzate in situ

Prova di compressione monotona a collasso



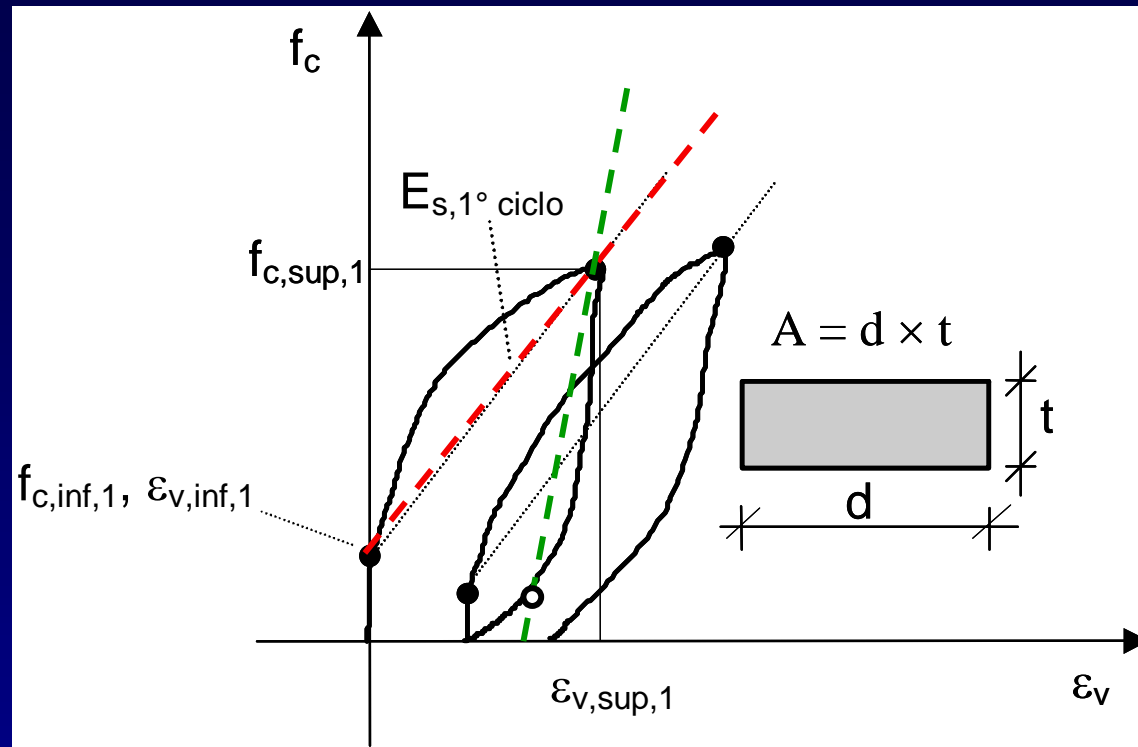
Interpretazione

Problema 1: calcolo della f_k dal risultato della singola prova $f_{c,u}$ (0.7 ?)

Problema 2: definizione del modulo elastico E (secante a 1/3 ?)

$$E_{s,1/3} = \frac{f_{c,1/3} - f_{c,inf}}{\varepsilon_{v,1/3}} \quad f_{c,u} = \frac{F_{max}}{A}$$

Prova di compressione ciclica (solo modulo)



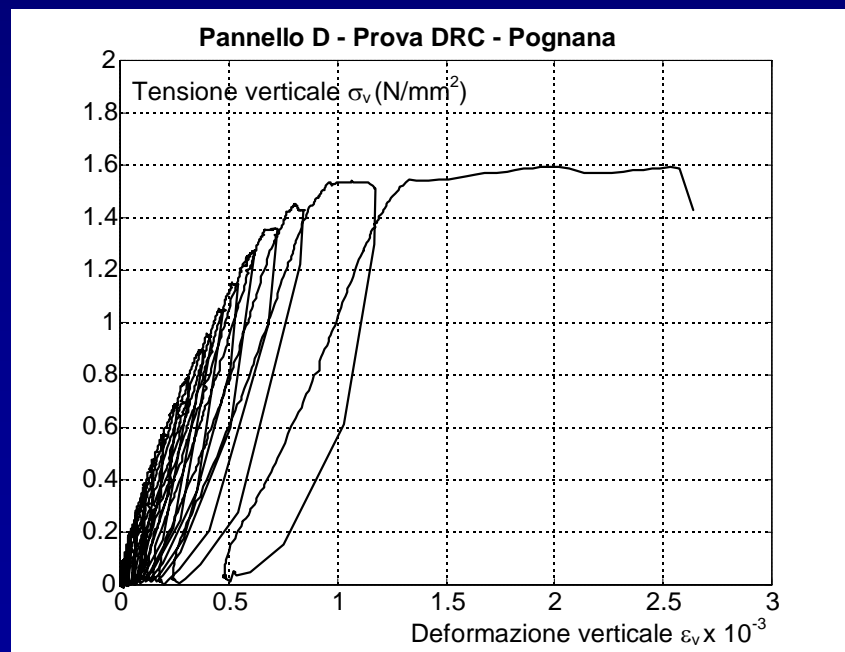
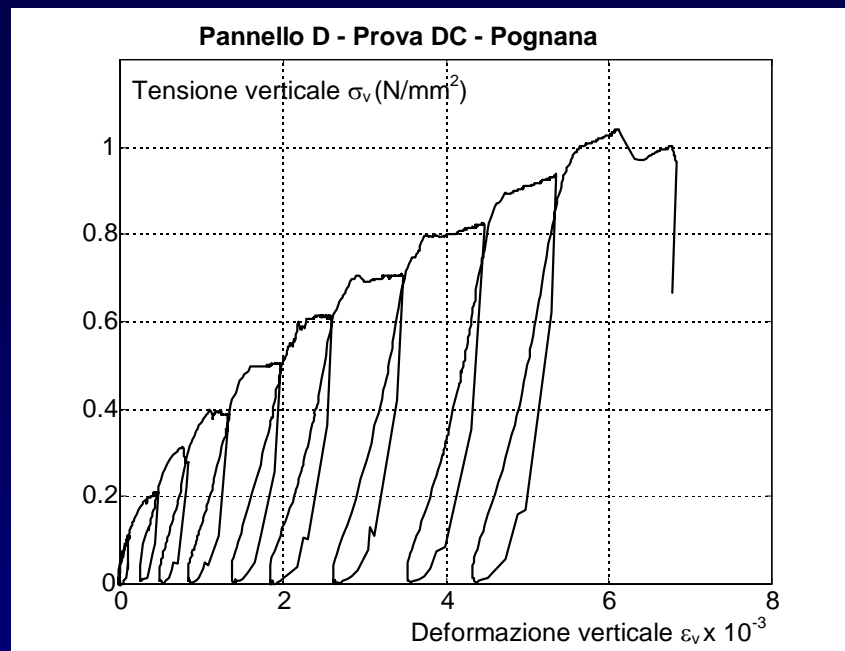
Interpretazione

Problema 1: definizione del modulo elastico E del ciclo (carico o scarico?)

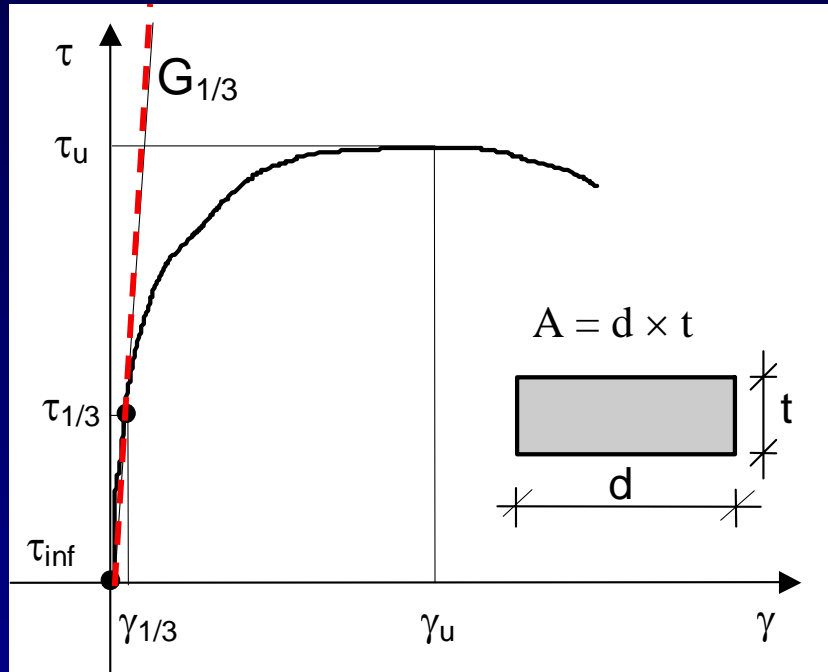
Problema 2: definizione dei livelli di tensione del ciclo o dei cicli

$$E_s = \frac{f_{c,sup} - f_{c,inf}}{\varepsilon_{v,sup} - \varepsilon_{v,inf}}$$

Prova di compressione: esempi



Prova di compressione diagonale

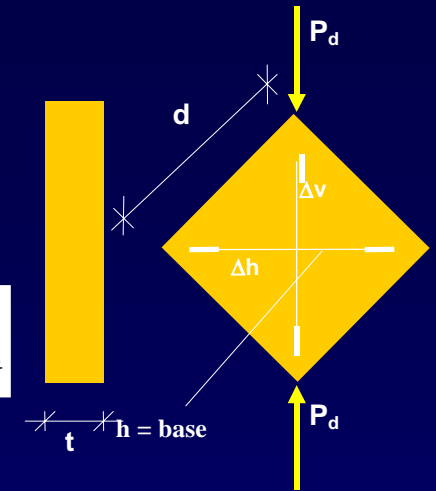


$$\gamma = |\varepsilon_c| + \varepsilon_t$$

$$\tau_u = \frac{P_{d,u}}{A\sqrt{2}}$$

$$\sigma_I = \frac{P_{d,u}}{2A}$$

$$G_{1/3} = \frac{\tau_{1/3} - \tau_{inf}}{\gamma_{1/3}}$$



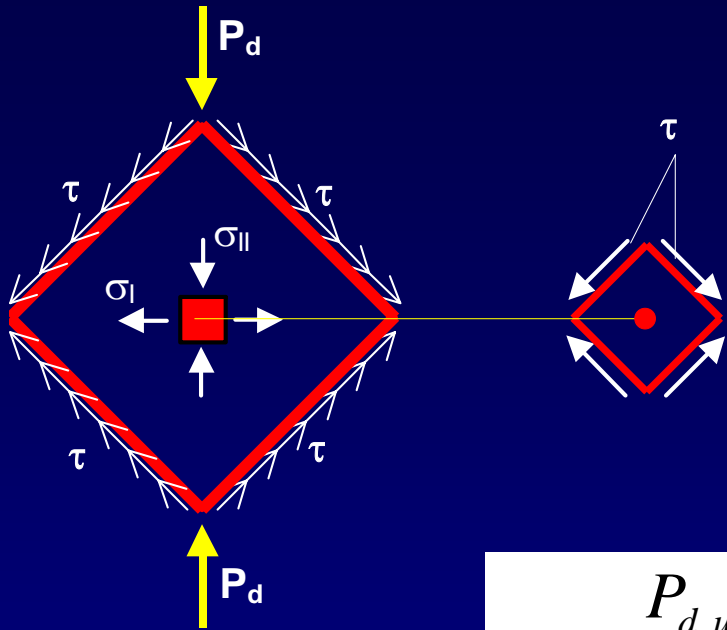
Interpretazione

Problema 1: velocità di applicazione del carico (?)

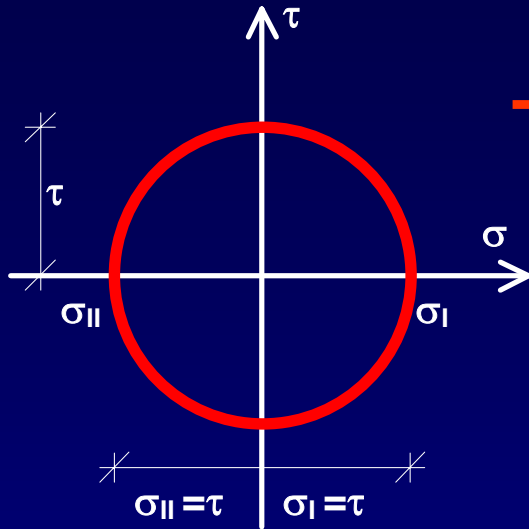
Problema 2: la prova fornisce una resistenza a trazione o a taglio (?)

Problema 3: definizione del livello di tensione per il calcolo di G

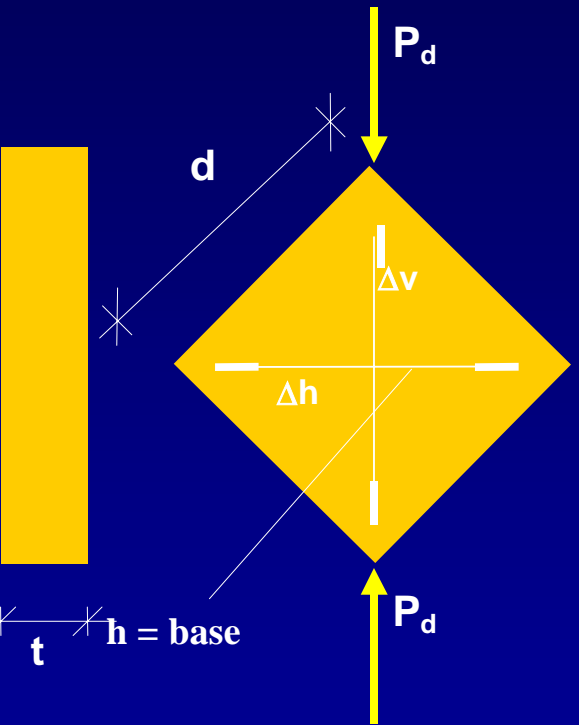
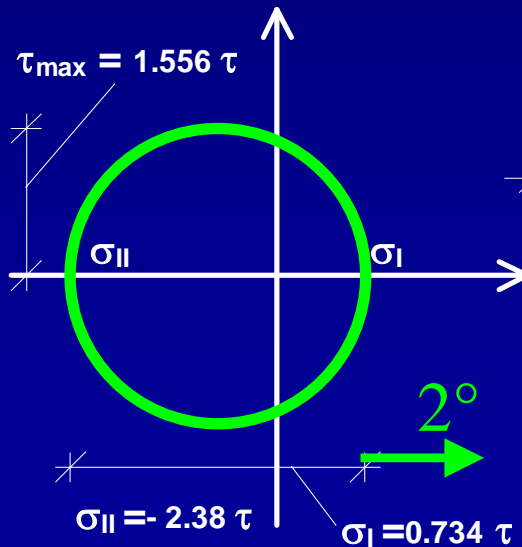
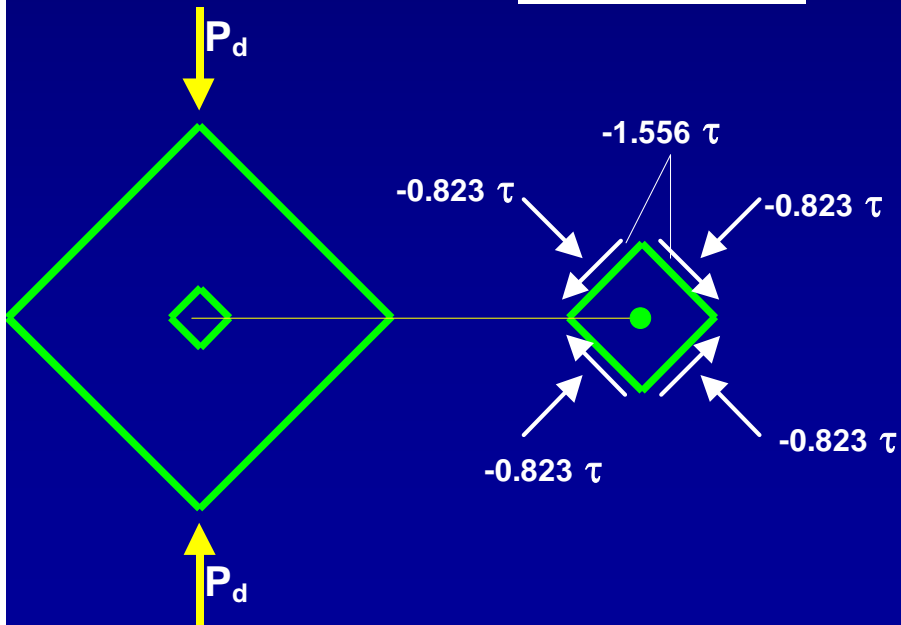
Prova di compressione diagonale



$$\tau_u = \frac{P_{d,u}}{A\sqrt{2}}$$

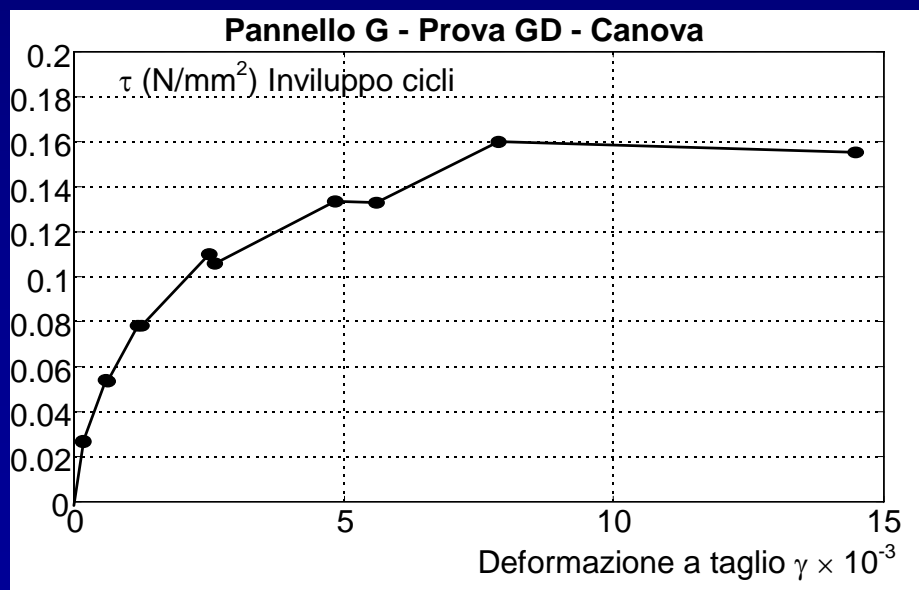
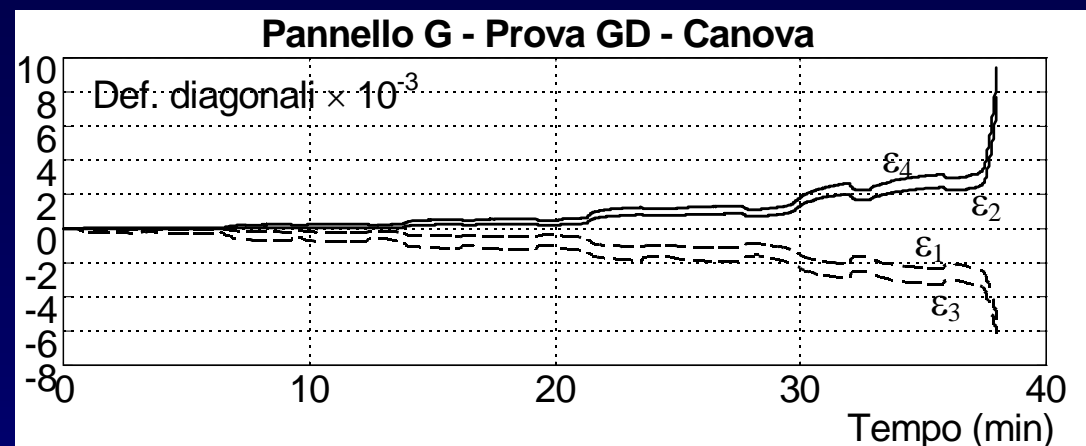
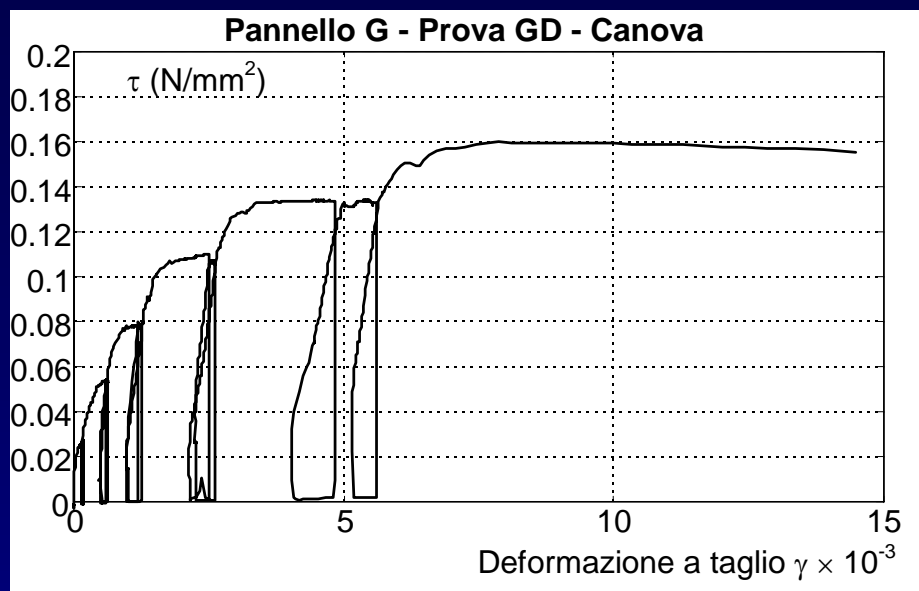


$$\tau_u = \sigma_I = \tau_k = \frac{P_{d,u}}{A\sqrt{2}}$$

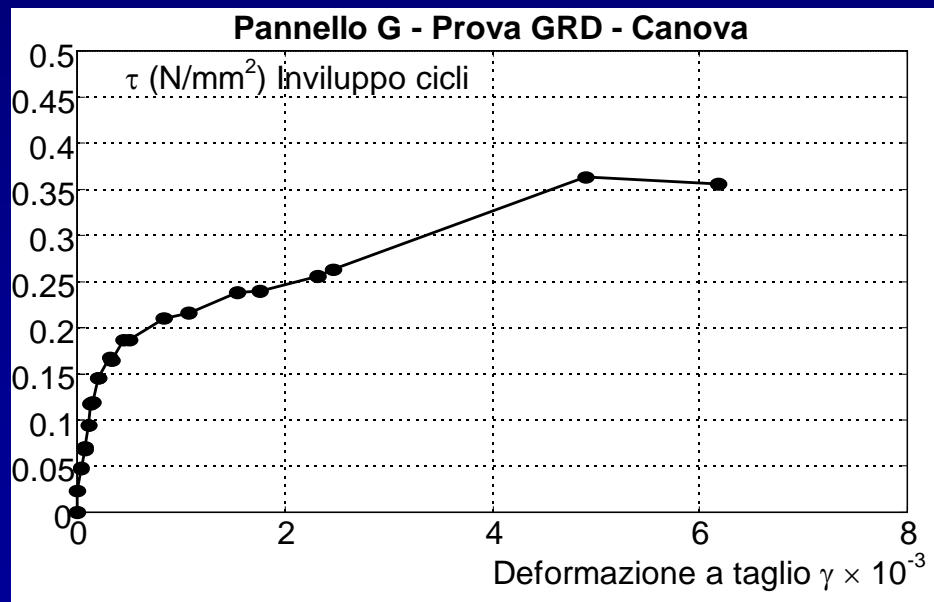
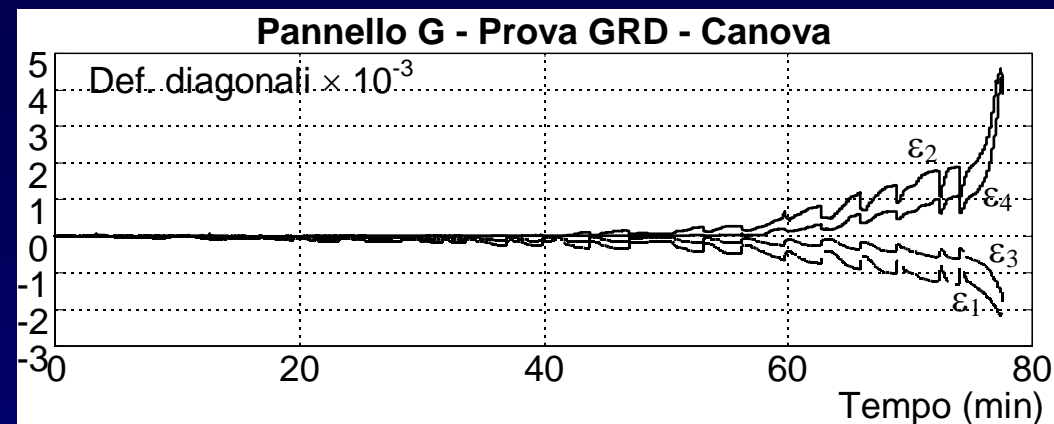
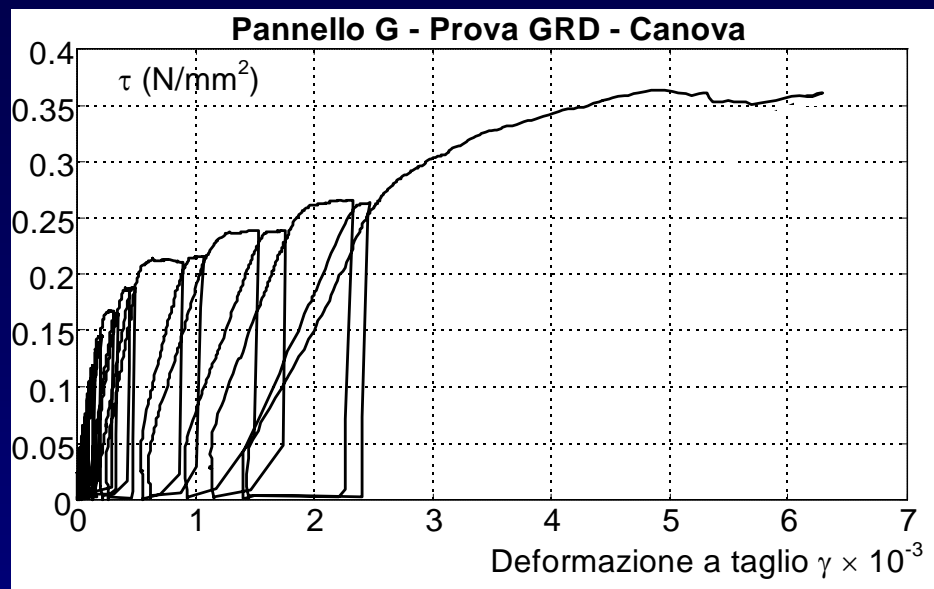


$$\sigma_I = 0.734\tau_u = \tau_k = \frac{P_{d,u}}{2A}$$

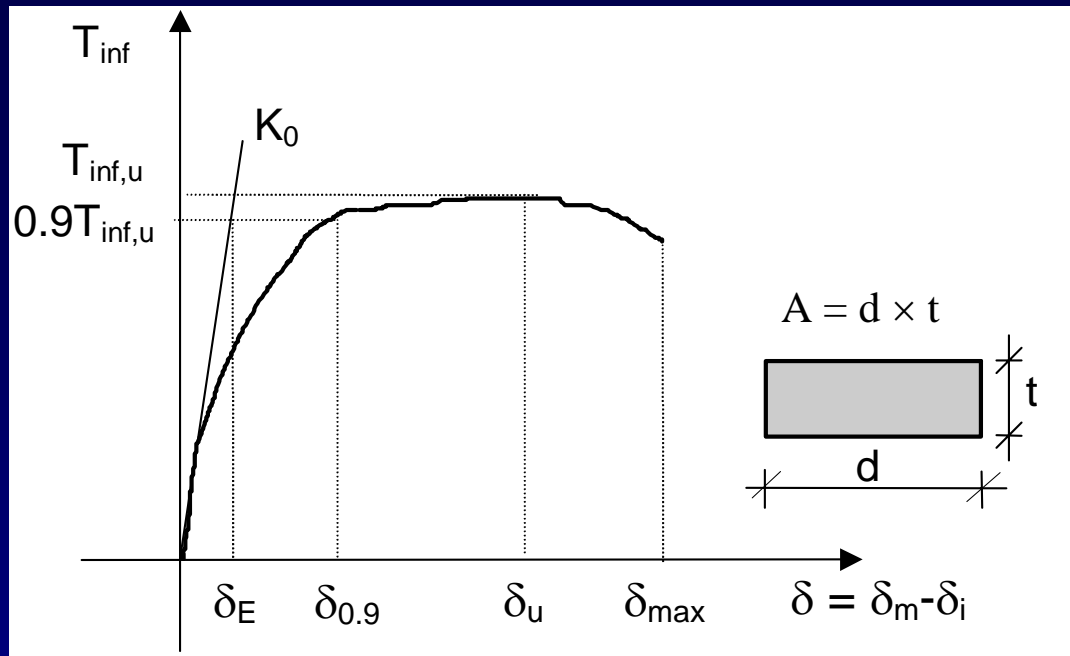
Prova di compressione diagonale: esempio



Prova di compressione diagonale: esempio



Prove di taglio e di taglio-compressione



$$\sigma_0 = \frac{P_v}{A}$$

$$T_{inf,u} = \frac{F_u}{2}$$

$$\tau_u = \frac{F_u}{2A}$$

$$T_{inf,u} = F_u - R_{sup,u}$$

$$\tau_u = \frac{T_{inf,u}}{A}$$

$$\sigma_I = \sigma_0 \left[-\frac{1}{2} + \sqrt{\left(b \frac{\tau_u}{\sigma_0} \right)^2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\tau_k = \frac{\sigma_I}{b}$$

Interpretazione

Problema 1: velocità di applicazione del carico (?)

Problema 2: la prova fornisce una resistenza a trazione o a taglio (?)

Problema 3: modello di calcolo di τ_k (valore di b ?)

Problema 4: definizione del livello di tensione e del metodo per il calcolo di G

$$\frac{1}{K_0} = \frac{\delta_E}{0.9T_{iu}} = \frac{1.2h_{inf}}{GA} \left[1 + \frac{G}{1.2E} \left(\frac{h_{inf}}{d} \right)^2 \right]$$

Prove di taglio e di taglio-compressione

Criterio di *Turnsek-Cacovic*: rottura per taglio con fessurazione diagonale al centro del pannello per $\sigma_I = f_{wt}$

$$\sigma_0 = \frac{P_v}{A}$$

$$T_{inf,u} = F_u - R_{sup,u}$$

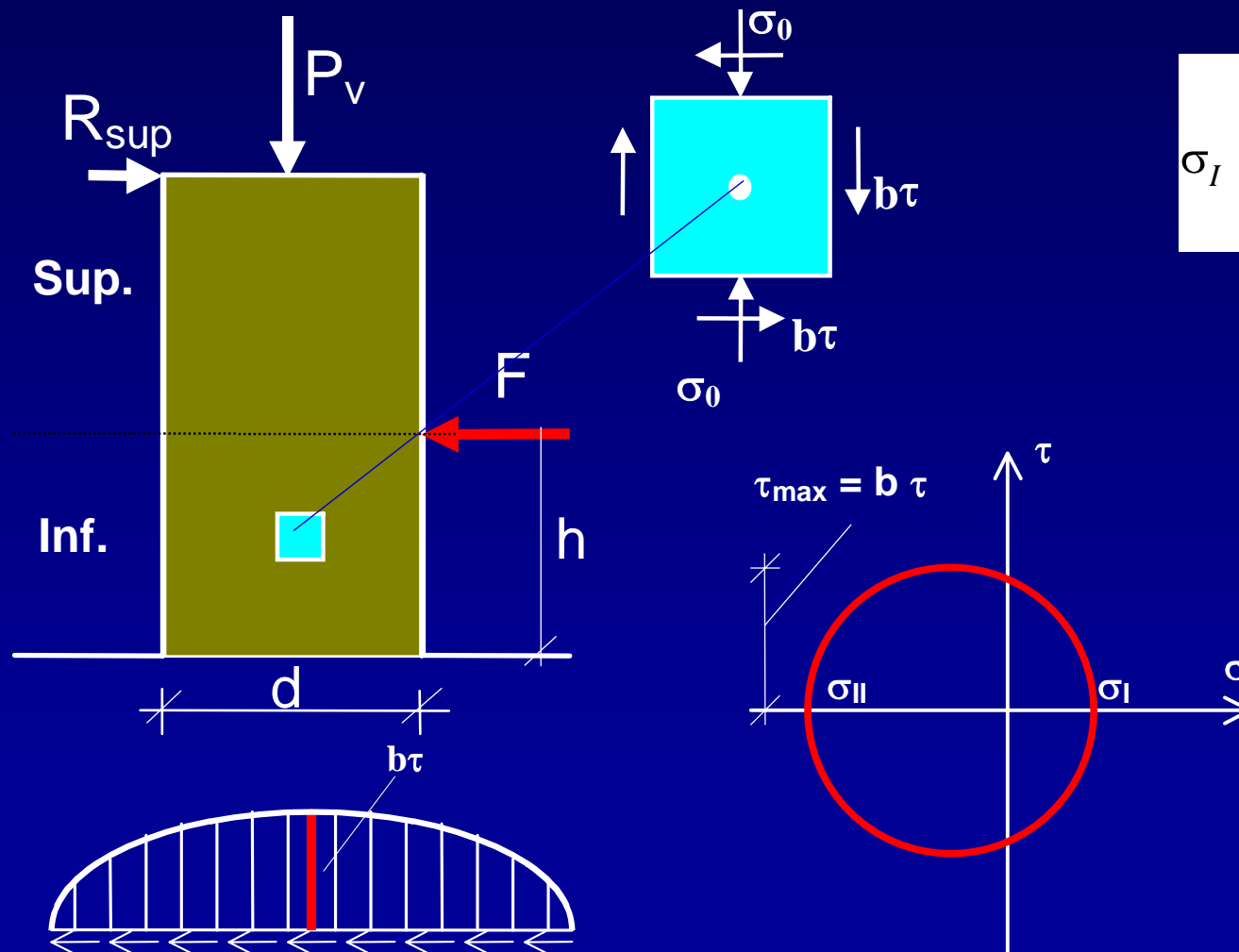
$$\tau_u = \frac{T_{inf,u}}{A}$$

$$\sigma_I = \sigma_0 \left[-\frac{1}{2} + \sqrt{\left(b \frac{\tau_u}{\sigma_0} \right)^2 + \frac{1}{4}} \right]$$

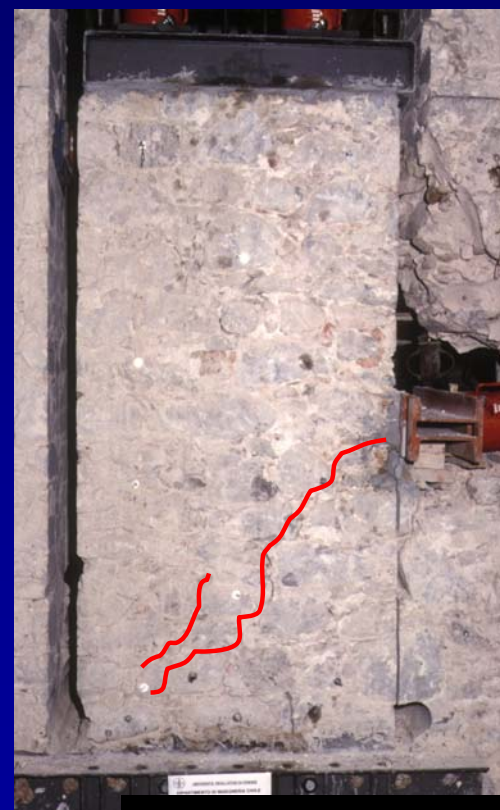
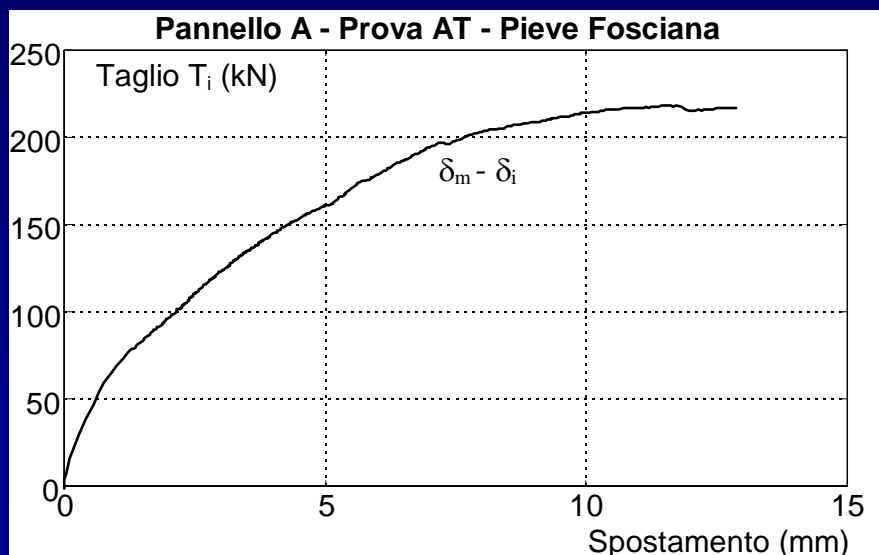
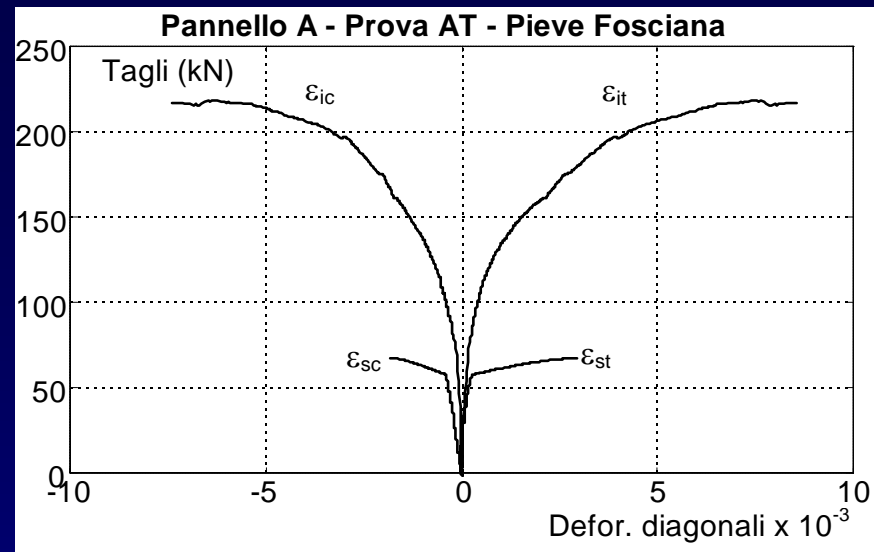
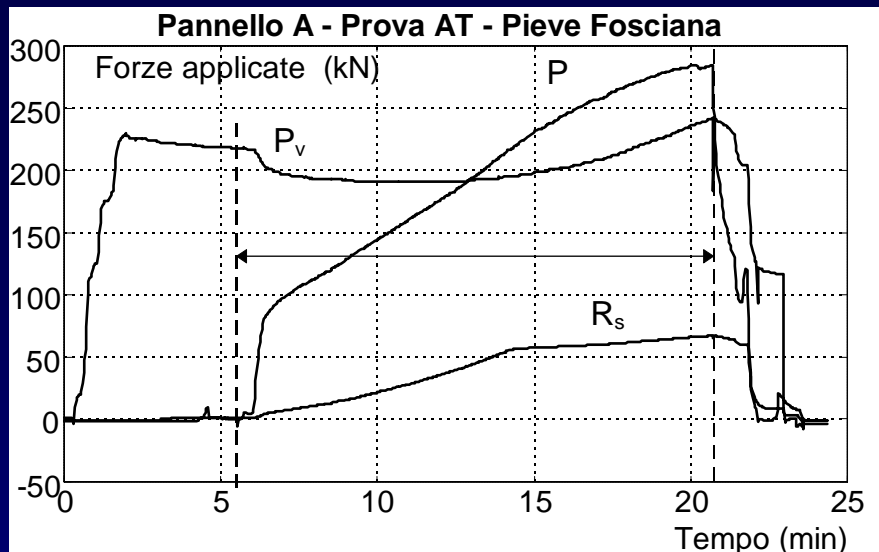
$$\tau_k = \frac{\sigma_I}{b}$$

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

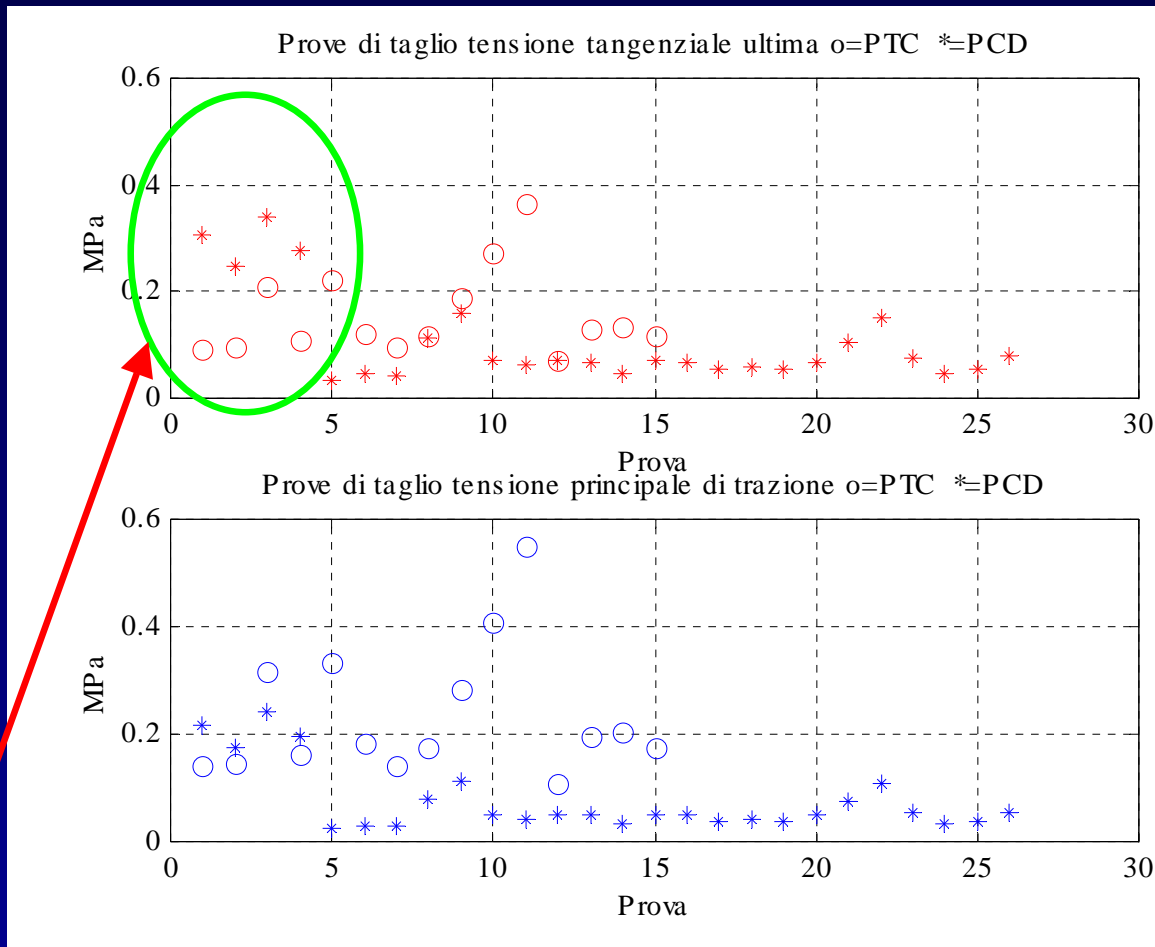
(metodo POR, $b=1.5$)



Prove di taglio e di taglio-compressione: esempio



Confronti tra le tensioni tangenziali caratteristiche Prove PS, PTC e PCD



$$\tau_k = \frac{P_{d,u}}{A\sqrt{2}}$$

$$\sigma_I = \sigma_0 \left[-\frac{1}{2} + \sqrt{\left(b \frac{\tau_u}{\sigma_0} \right)^2 + \frac{1}{4}} \right]$$

$$\tau_k = \frac{\sigma_I}{b}$$

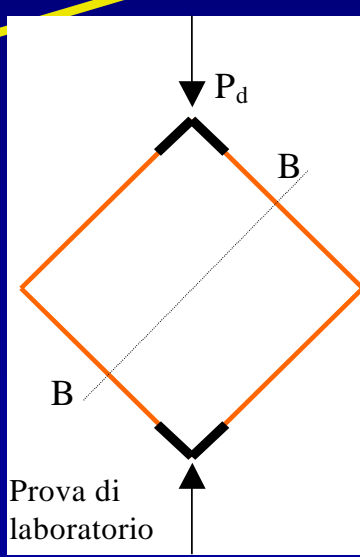
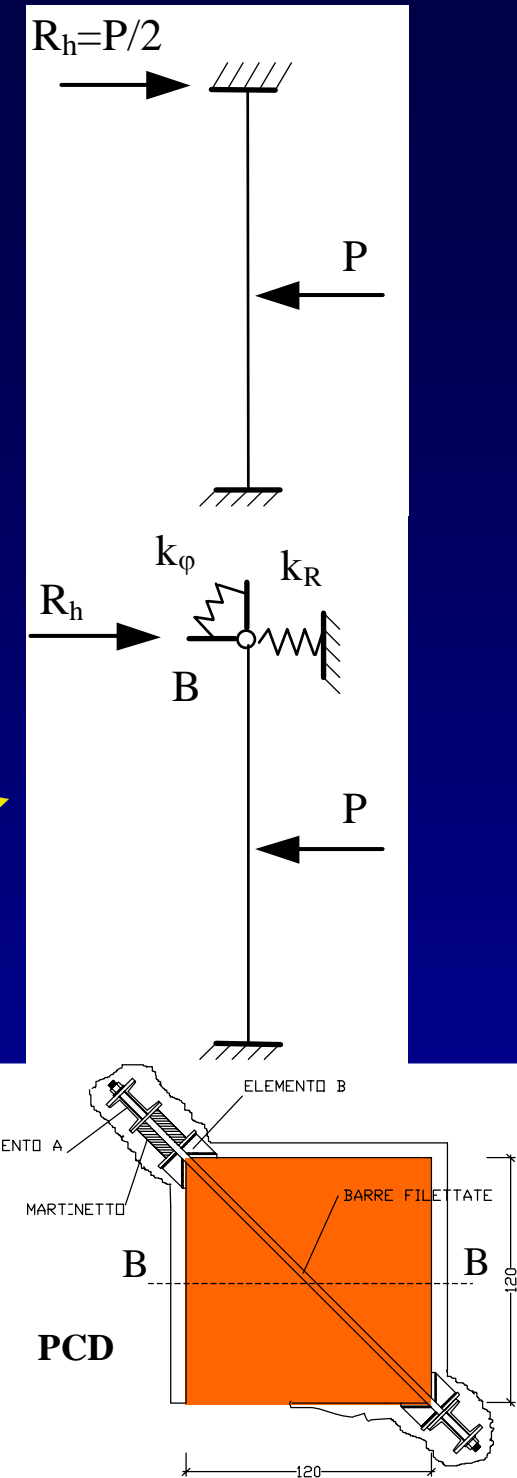
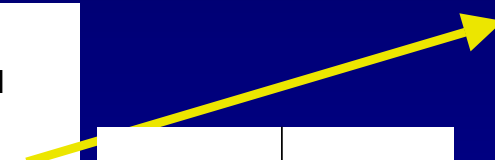
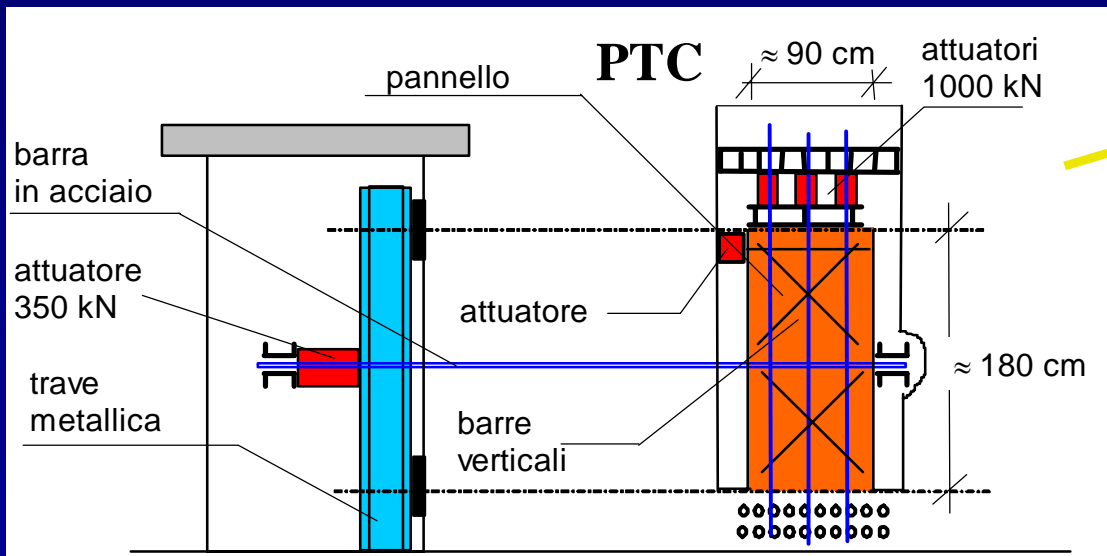
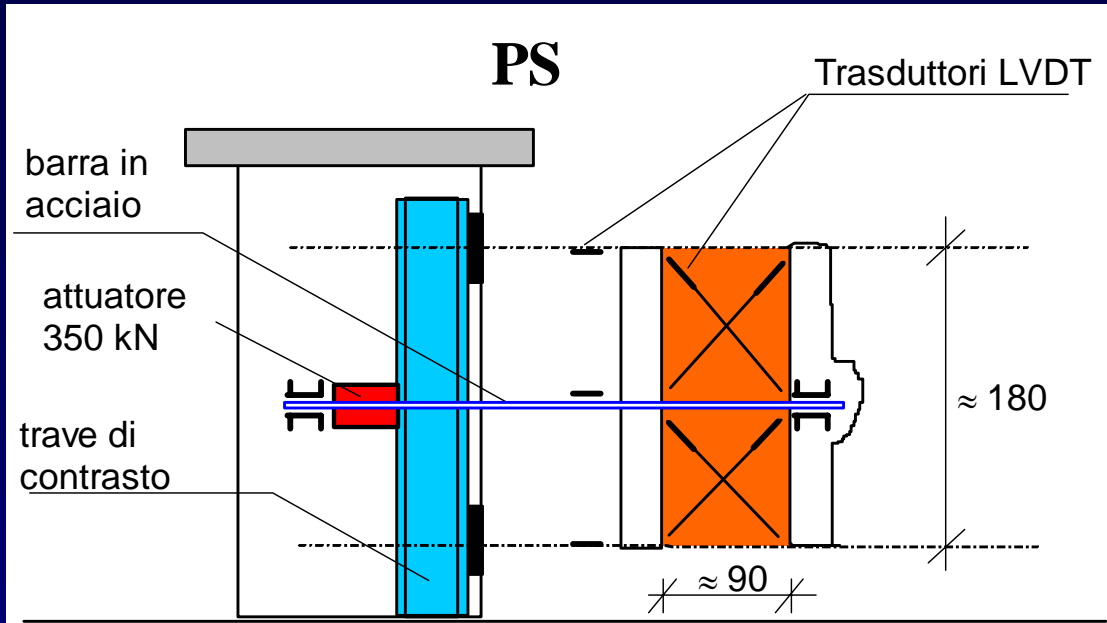
$$\sigma_I = \frac{P_{d,u}}{2A}$$

$$\sigma_I = \sigma_0 \left[-\frac{1}{2} + \sqrt{\left(b \frac{\tau_u}{\sigma_0} \right)^2 + \frac{1}{4}} \right]$$

Si nota che le prove PS e PTC forniscono con l'usuale schema di interpretazione valori superiori della tensione tangenziale caratteristica rispetto ai valori della tensione tangenziale media fornita dalla PCD (valori in rosso).

Il confronto tra le tensioni principali di trazione non è proponibile dato il significato diverso che le due grandezze misurate assumono nelle due prove (valori in blu).

Analisi delle prove di taglio



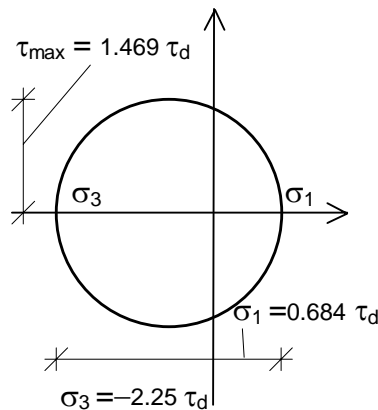
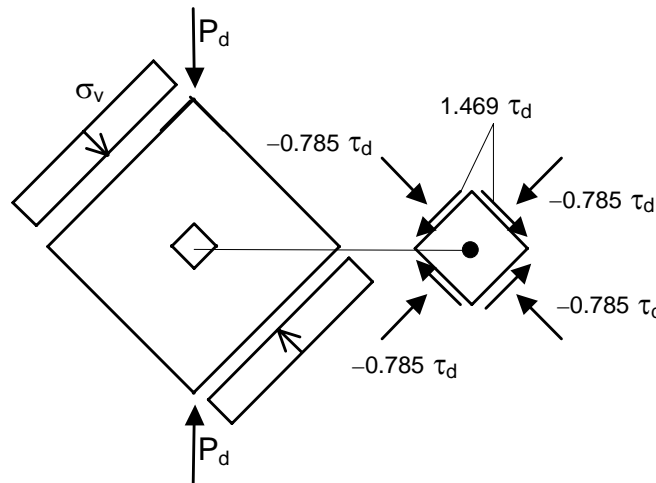
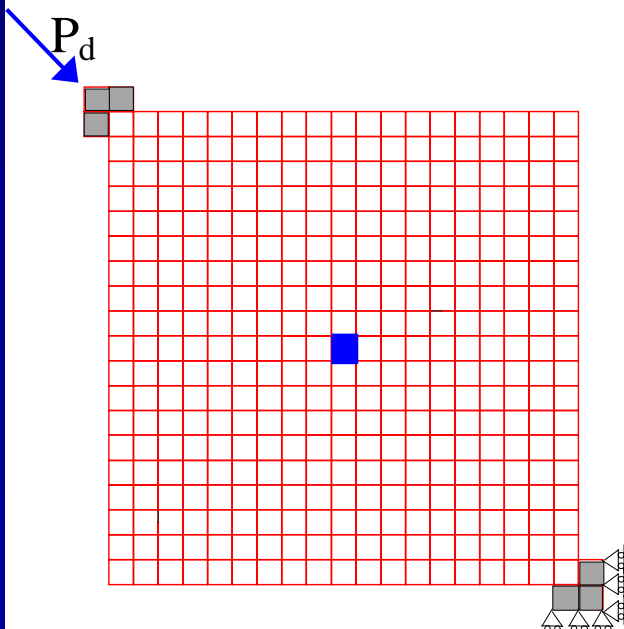
Analisi delle prove di taglio in campo elastico lineare (PCD)

Le 3 prove sono state modellate agli elementi finiti utilizzando elementi a 9 nodi in stato piano di tensione, nell'ipotesi di comportamento elastico lineare ed isotropo del materiale con modulo elastico unitario e coeff. di Poisson 0.25. E' stato considerato un pannello quadrato di dimensioni e spessore unitari.

Prova PCD:

carico diagonale applicato $P_d = (2)^{1/2}$

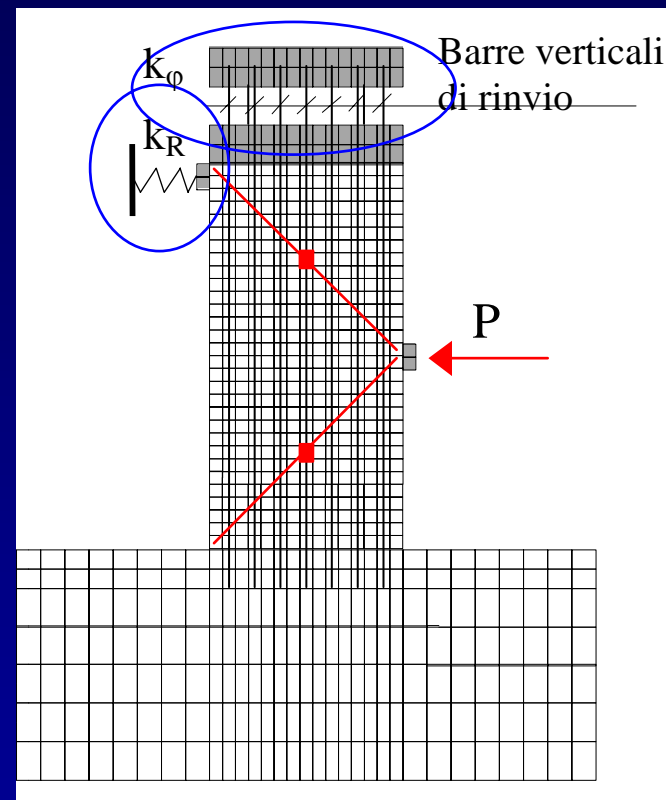
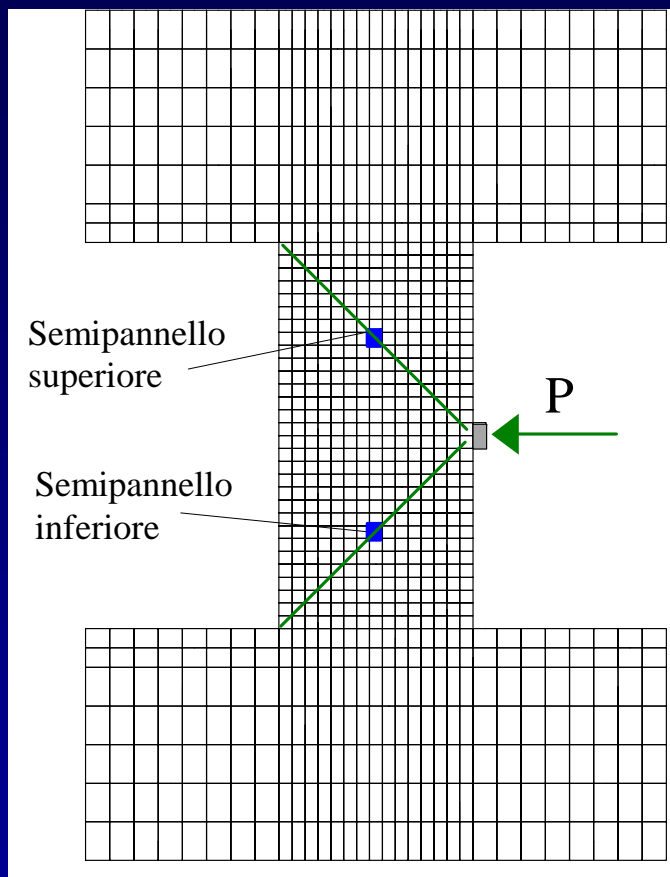
$$\sigma_0 = -\frac{P_d}{\sqrt{2}A} \quad \tau_d = \frac{P_d}{\sqrt{2}A} \quad (\text{uguali a -1 ed 1 nel caso in esame}).$$



$$\sigma_3 = -0.785 \tau_d + \frac{\sigma_v}{2} - \sqrt{(1.469 \tau_d)^2 + \frac{\sigma_v^2}{4}}$$

$$\sigma_1 = -0.785 \tau_d + \frac{\sigma_v}{2} + \sqrt{(1.469 \tau_d)^2 + \frac{\sigma_v^2}{4}}$$

Analisi delle prove di taglio in campo lineare (PS e PTC)



Analisi delle prove di taglio in campo lineare (PS e PTC)

Prova PS:

tensioni medie applicate $\sigma_0 (< 0)$ e $\tau_S = P/(2A)$.
(ipotesi di uguale ripartizione dell'azione orizzontale P tra i due semipannelli).

Rapporto $r = |\sigma_0|/\tau_S = \{0.25 - 0.50 - 1.0 - 2.0 - 4.0\}$

Prova PTC:

tensioni medie applicate $\sigma_0 (< 0)$ e $\tau_S = P/(2A)$.

Rapporti $r = |\sigma_0|/\tau_S = \{0.25 - 0.50 - 1.0 - 2.0 - 4.0\}$

Ulteriori variabili considerate:

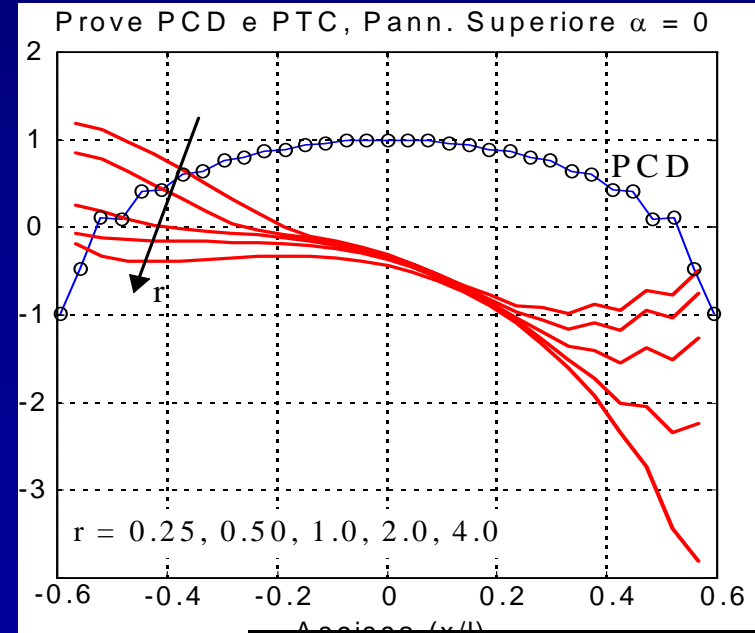
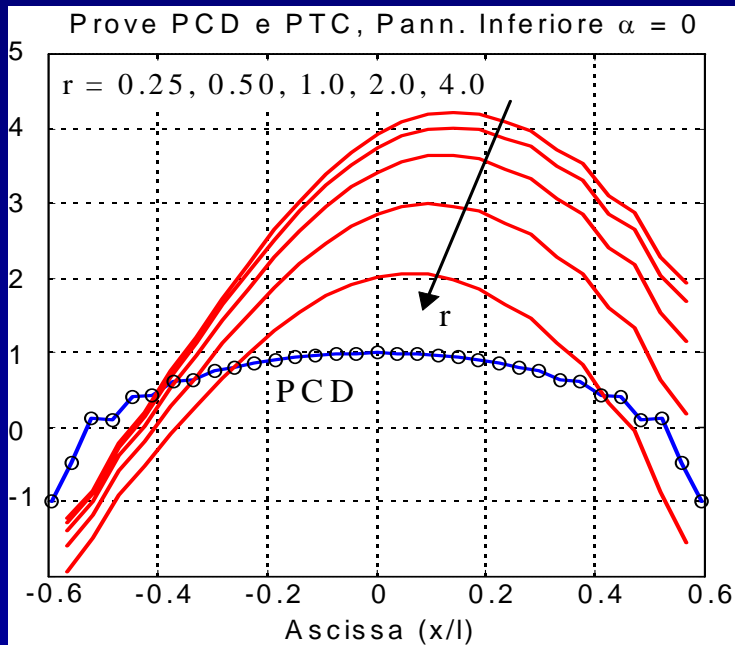
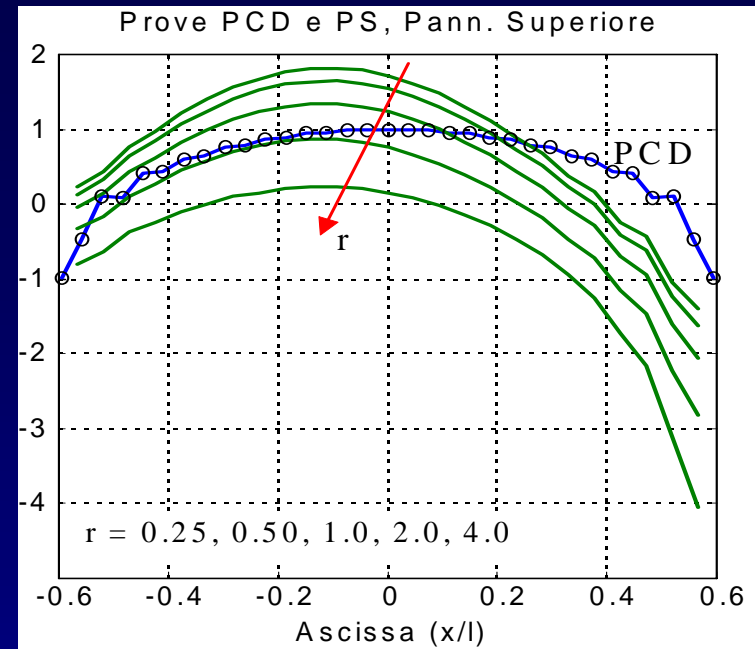
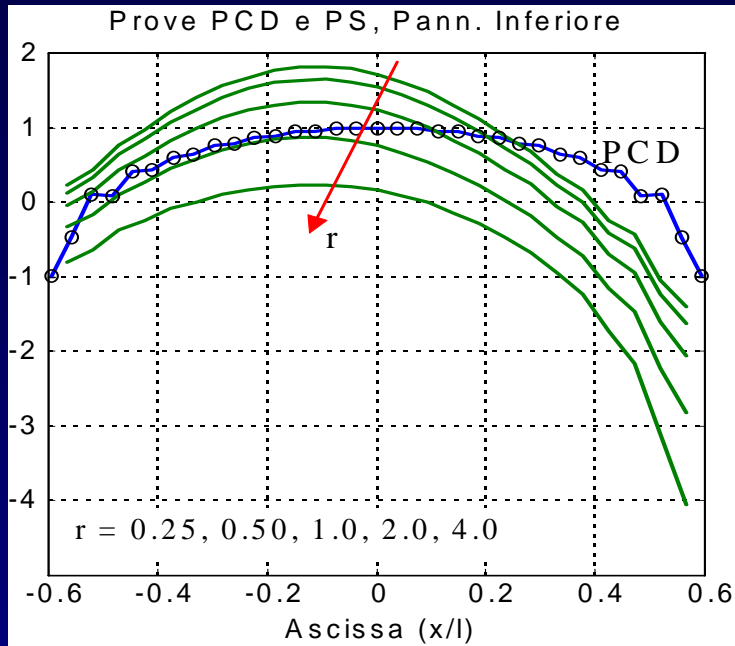
$\alpha = k_R/k_p$ tra la rigidezza del ritegno e quella equivalente di un semipannello calcolata con schema alla POR (nel caso in esame $k_p=1/4$),

$\beta = A/A_b$ tra l'area della sezione del pannello e l'area delle 7 barre verticali.

Ipotesi: criterio di collasso al centro dei semipannelli per raggiungimento della resistenza a trazione, supposta di $f_{wt} = 0.684$ (prova diagonale PCD col carico P_d di collasso).

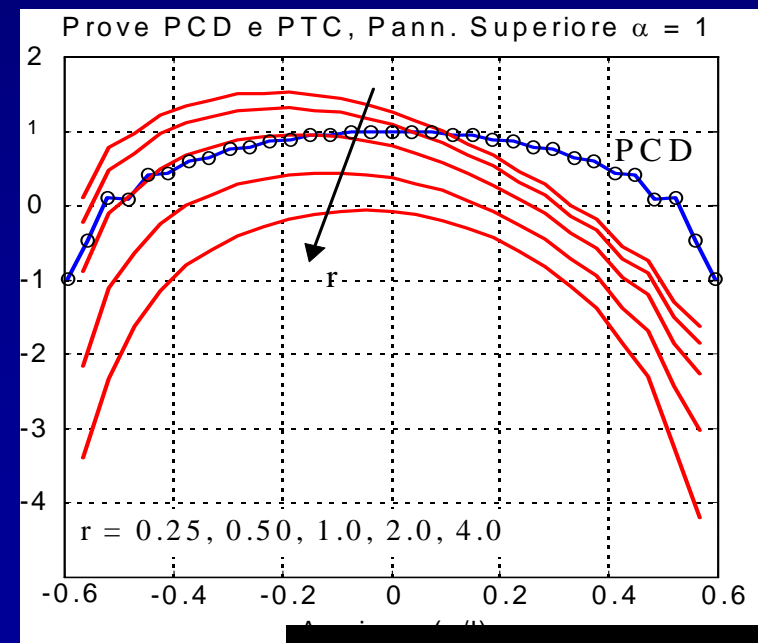
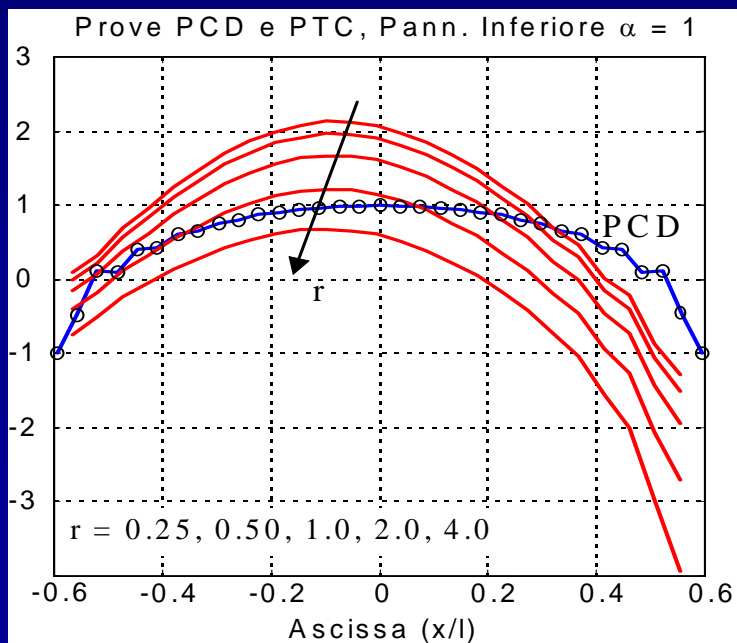
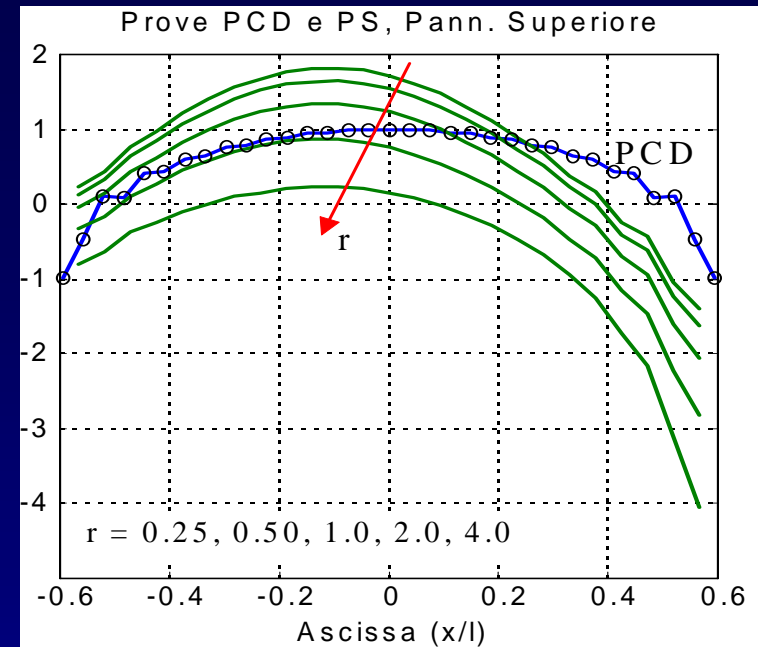
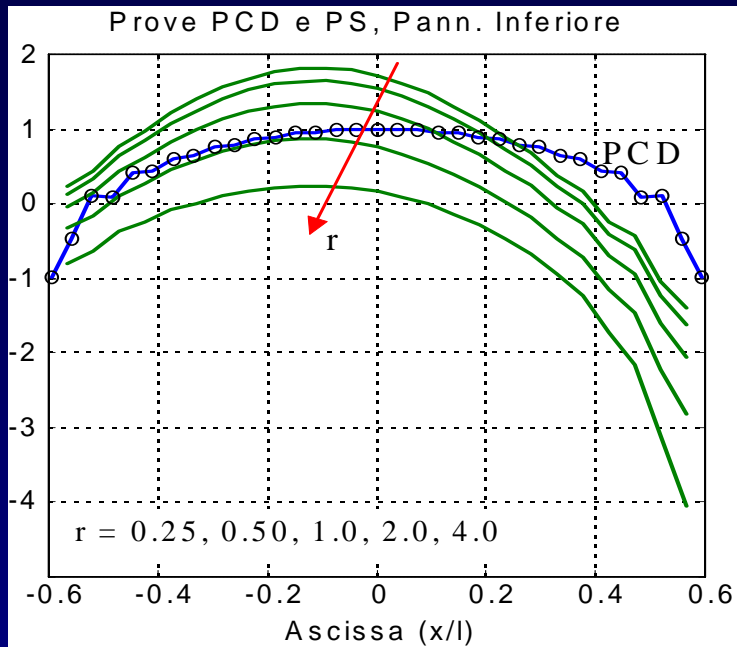
Analisi delle prove di taglio in campo lineare ($\beta=50$)

Tensioni principali di trazione norm. $\times (r/f_{wt})$

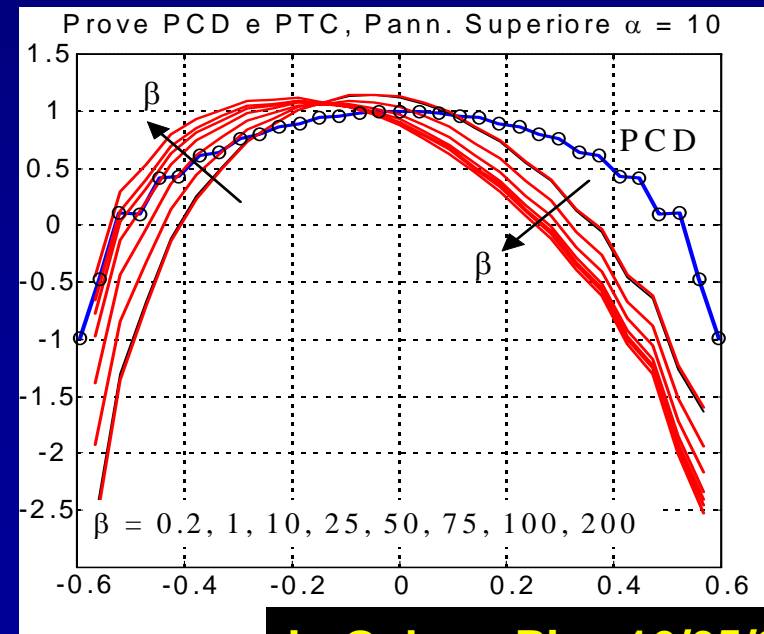
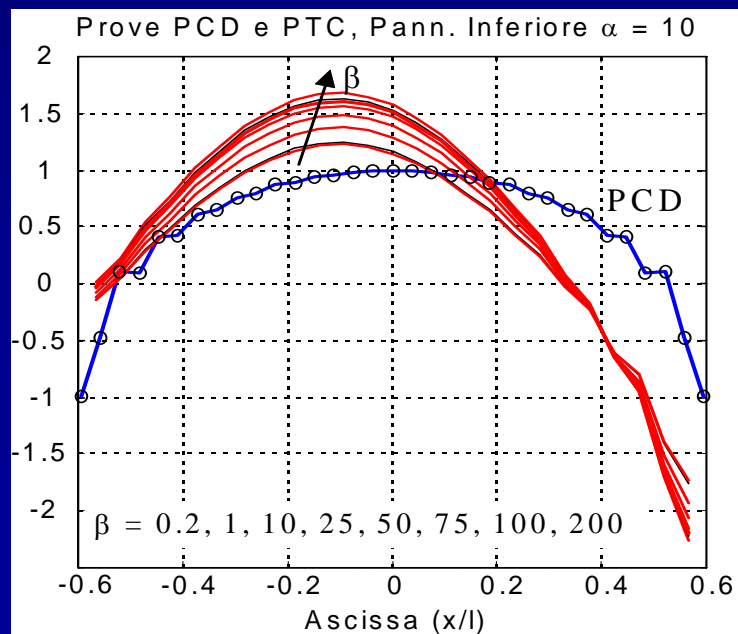
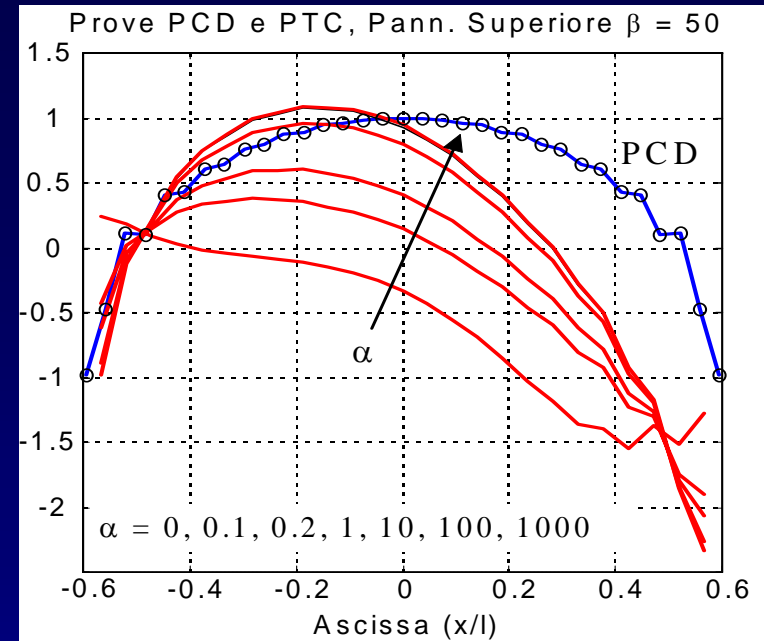
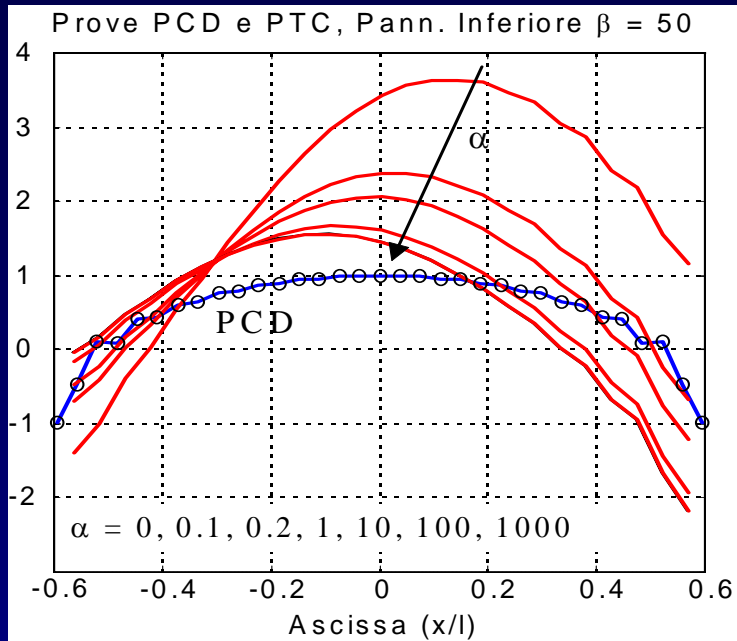


Analisi delle prove di taglio in campo lineare ($\beta=50$)

Tensioni principali di trazione norm. $\times (r/f_{wt})$



Analisi delle prove di taglio in campo lineare ($r=1$) Tensioni principali di trazione norm. $\times (r/f_{wt})$



Analisi delle prove di taglio in campo lineare

Il confronto tra i 3 schemi di prova si basa sul raggiungimento di un determinato stato limite. Tra i criteri più diffusi per i materiali murari, spesso assunto come vero e proprio criterio di collasso, vi è quello del raggiungimento puntuale di un valore limite per le tensioni principali di trazione σ_1 o di compressione σ_3 .

Il confronto tra PCD e PS indica che la prima fornisce un andamento della tensione σ_1 più uniforme lungo la diagonale, con valori prossimi al valore limite anche nelle zone adiacenti al centro del pannello; ciò è indice di una rottura quasi fragile, con il carico di fessurazione P_d che rappresenta un valore di poco inferiore a quello di collasso. L'evidenza sperimentale conferma tale analisi.

L'andamento di σ_1 nella prova PS indica un maggiore gradiente, è asimmetrico lungo la diagonale, e nel caso dello stesso rapporto $r = 1$ della prova PCD, fornisce un valore normalizzato della tensione σ_1 di 1.2376 (semipannello inferiore), superiore al valore 1 della PCD. I massimi valori di σ_1 non si verificano al centro della diagonale ma sono spostati verso le zone del pannello ammorsate con la parete (per $r = 1$ il massimo di σ_1 vale 1.3431). La prova PS fa quindi prevedere un certo incremento del carico P oltre la prima fessurazione fino al collasso, incremento non quantificabile con l'analisi elastica.

Analisi delle prove di taglio in campo lineare

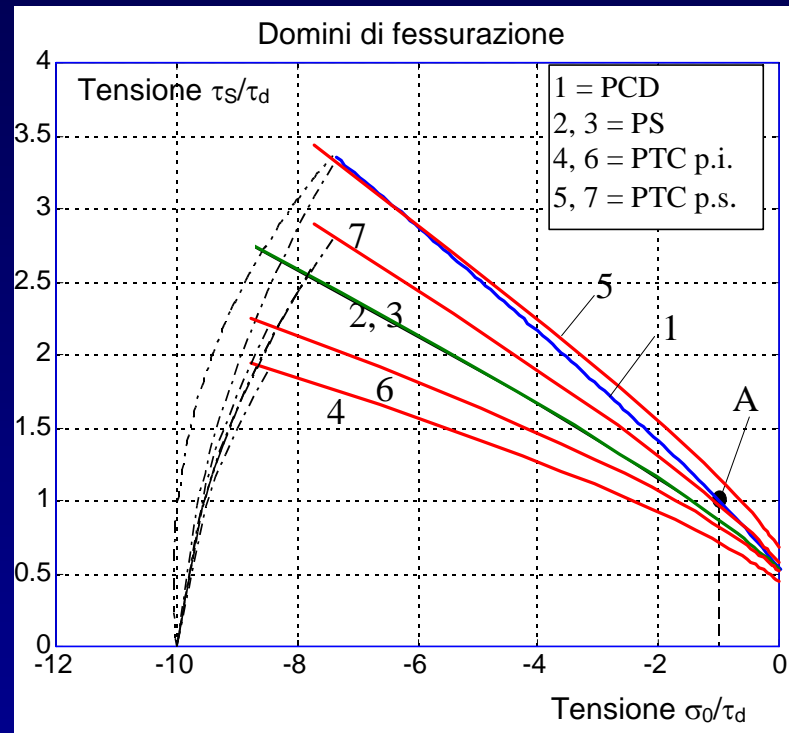
Notevolmente diverso è il risultato della prova modificata PTC. Ciò è evidente nel caso $\alpha = 0$ (comportamento a mensola) in cui, per $r = 1$, il semipannello inferiore presenta una σ_1 di 3.4233 (valore massimo di 3.6364), mentre per il semipannello superiore, al centro, sia ha $\sigma_1 = -0.3381$, di compressione. Questa dissimmetria si riduce, ma resta evidente, anche assumendo $\alpha = 1$, nel qual caso si hanno valori di σ_1 di 1.6103 e 0.7964 nei due semipannelli. La dissimmetria nella ripartizione del carico P è stata rilevata anche sperimentalmente. A scopo riassuntivo la Tabella riporta le tensioni σ_1 al centro dei pannelli ($x = 0$), normalizzate, come indicato, rispetto a f_{wt} ad al rapporto r .

**Tensioni principali di trazione al centro dei pannelli σ_1
normalizzate con il fattore r/f_{wt} . ($\beta=50$)**

$r =$ $ \sigma_0 /\tau_s$	Prova PCD	Prova PS Inf.	Prova PS Sup.	Prova PTC Inf. ($\alpha = 0$)	Prova PTC Sup. ($\alpha = 0$)	Prova PTC Inf. ($\alpha = 1$)	Prova PTC Sup. ($\alpha = 1$)
0.25	/	1.7168	1.7161	3.9222	-0.3128	2.0735	1.2671
0.50	/	1.5441	1.5431	3.7484	-0.3217	1.9067	1.0935
1.00 →	1.00	1.2376	1.2361	3.4233	-0.3381	1.6103	0.7964
2.00	/	0.7605	0.7575	2.8584	-0.3702	1.1509	0.3709
4.00	/	0.1628	0.1562	2.0221	-0.4341	0.6028	-0.0848

Analisi delle prove di taglio in campo lineare

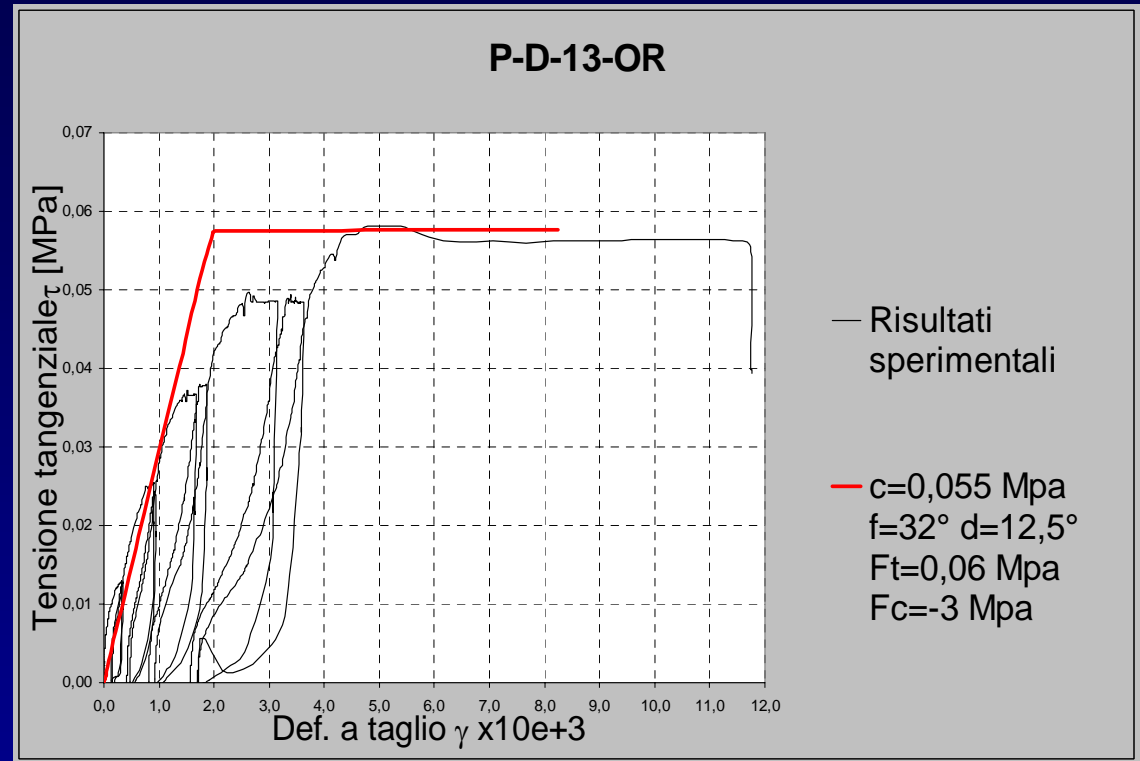
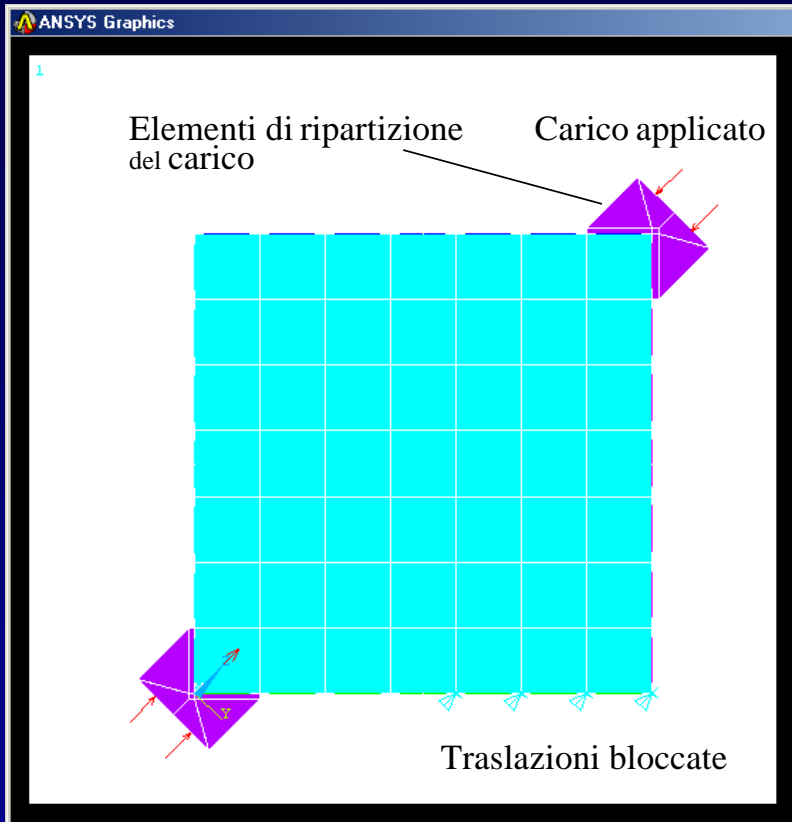
Qui sono rappresentati, per le 3 prove ed i due semipannelli, i domini delle tensioni medie applicate che producono il raggiungimento dello stato limite di prima fessurazione al centro (*assumendo $f_{wt} = 0.684$, $\tau_d = 1$*), date dalle curve continue e le analoghe tensioni che producono lo stato limite di schiacciamento (avendo assunto una resistenza a compressione pari a 10 volte f_{wt}) ($\alpha=1$, $\beta=50$).



Tensioni tangenziali medie limiti in assenza di tensione normale nelle diverse prove

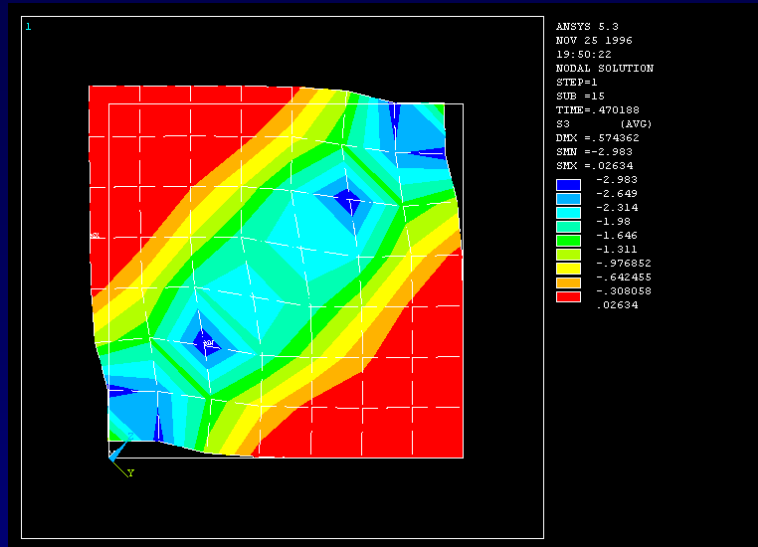
$ \sigma_0 /\tau_d=0$	Prova PCD (1)	Prova PS Inf. (2)	Prova PS Sup. (3)	Prova PTC Inf. (4)	Prova PTC Sup.(5)	Prova PTC Inf.(6)	Prova PTC Sup.(7)
$\tau_s/\tau_d \rightarrow$	0.5398	0.5260	0.5260	0.4441	0.6863	0.5130	0.5798
	1.00	0.974	0.974	0.823	1.271	0.950	1.074

Analisi delle prove di taglio in campo non lineare (Ansys)

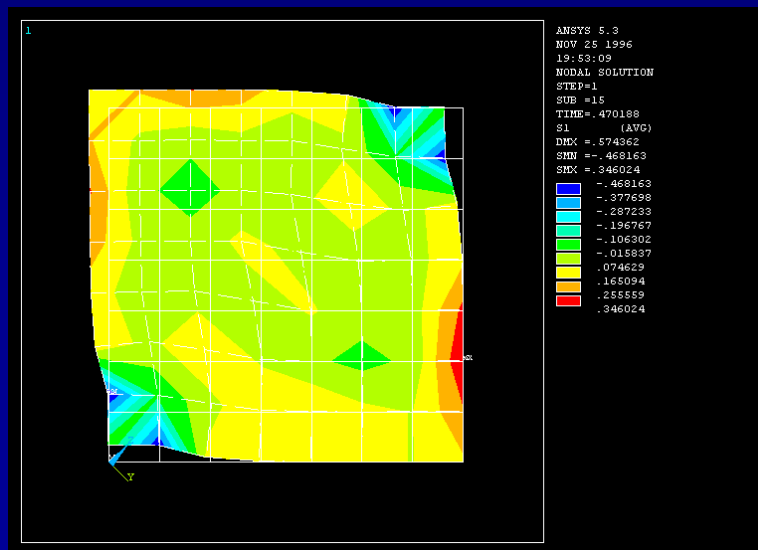


Prova di compressione diagonale

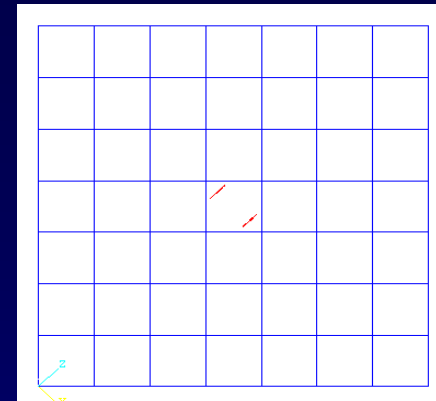
Analisi delle prove di taglio in campo non lineare (Ansys)



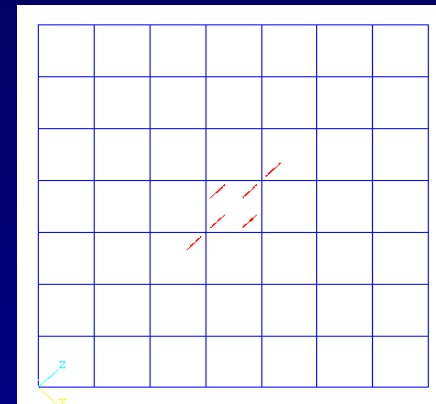
Tensioni principali di compressione



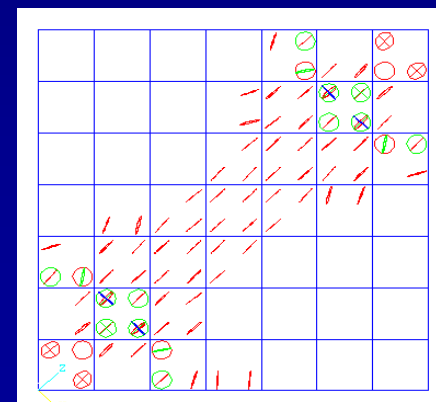
Tensioni principali di trazione



$P_d = 46.5 \text{ kN}$

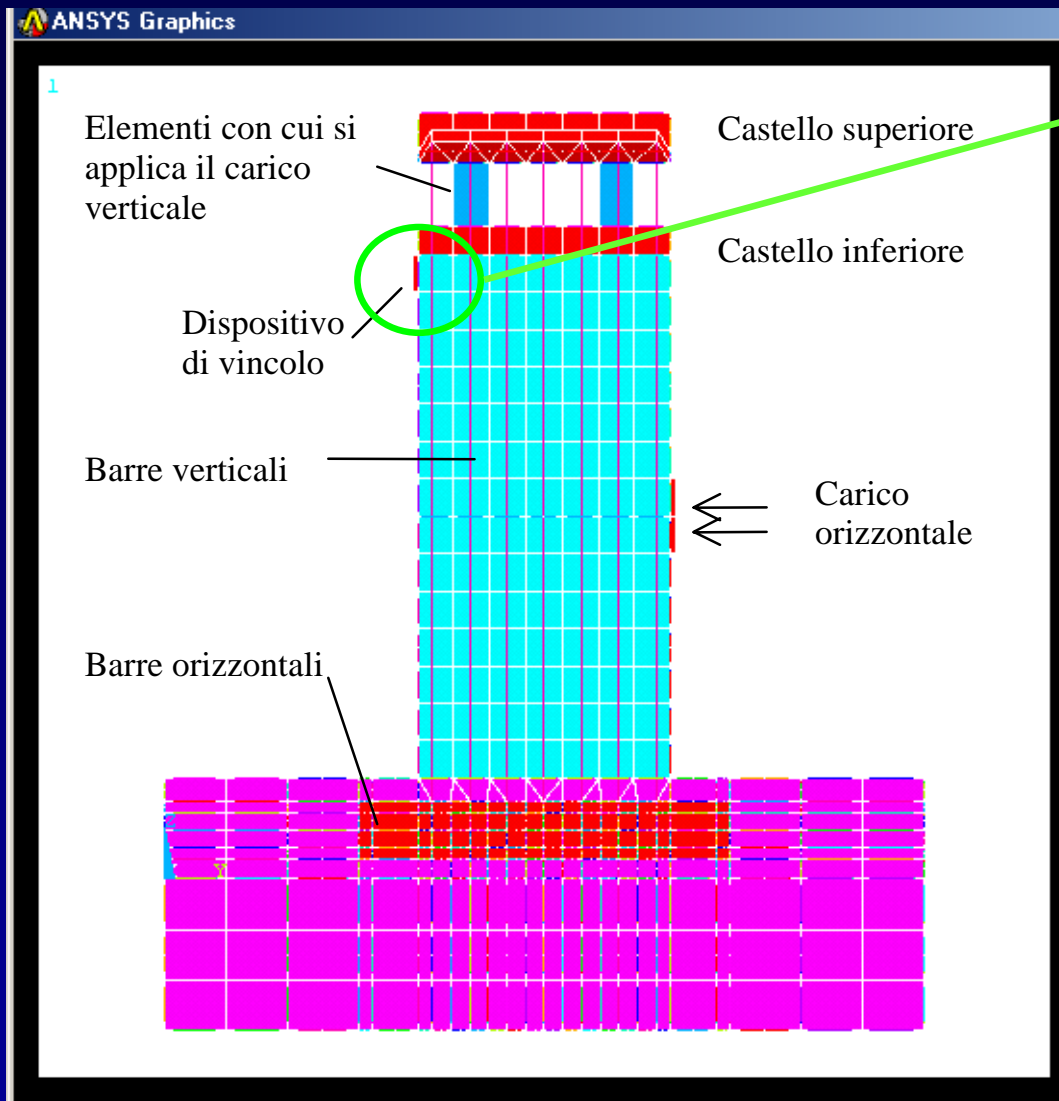


$P_d = 46.9 \text{ kN}$



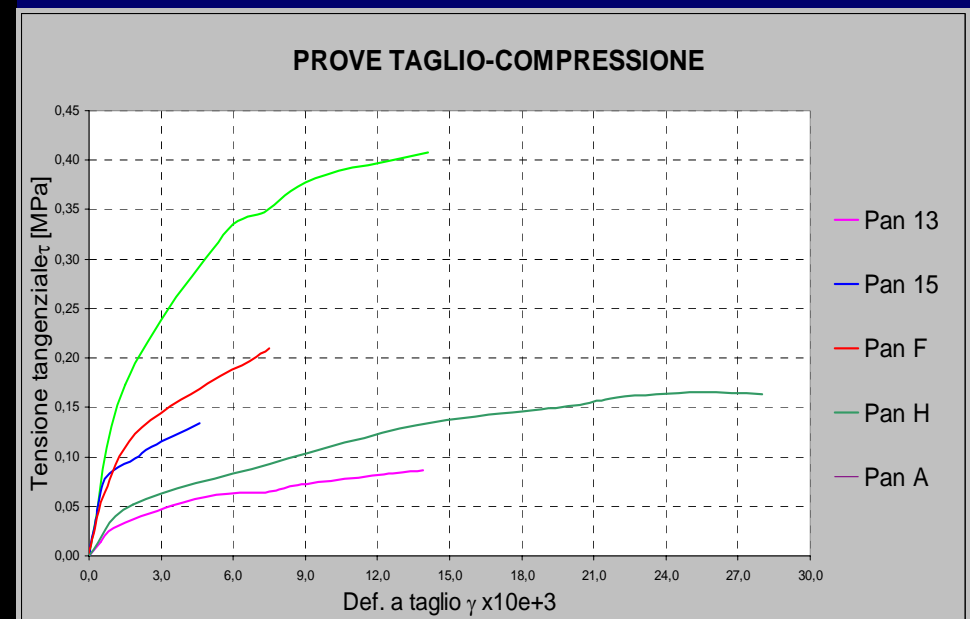
$P_{du} = 47.1 \text{ kN}$
 $\gamma = 8.23 \%$

Analisi delle prove di taglio in campo non lineare (Ansys)



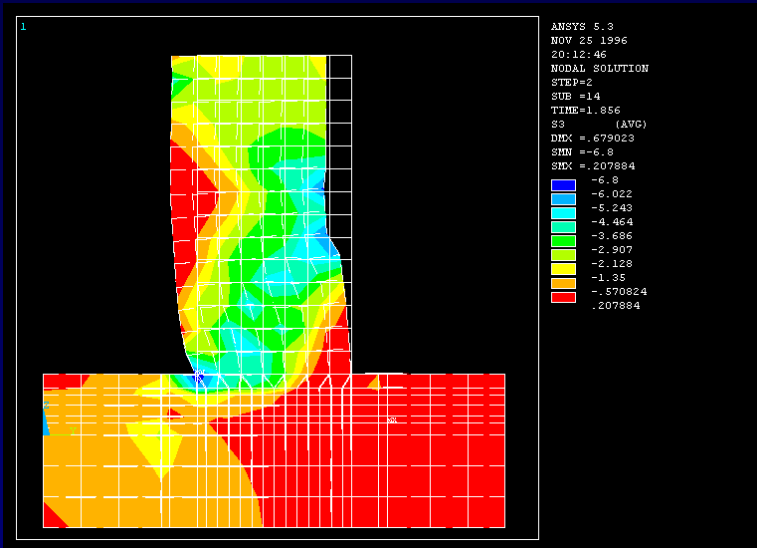
Appoggio cedevole elasticamente

$$K_t = \frac{R_s}{\delta_s}$$

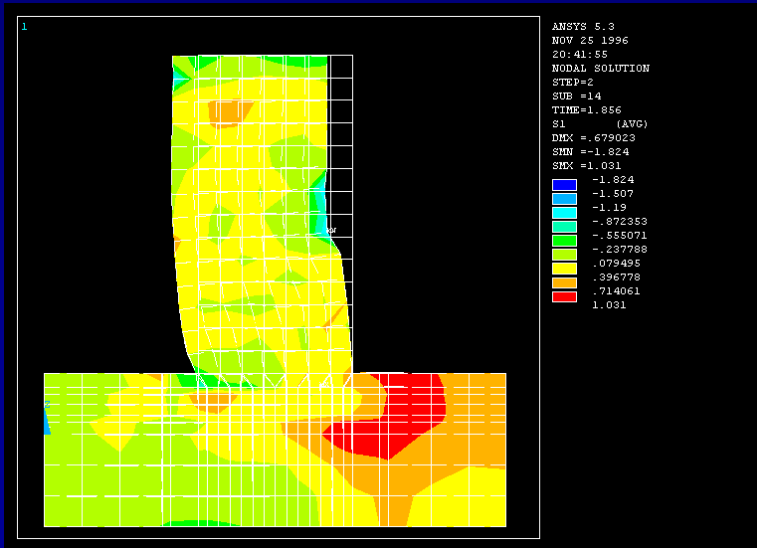


Prova di taglio-compressione

Analisi delle prove di taglio in campo non lineare (Ansys)

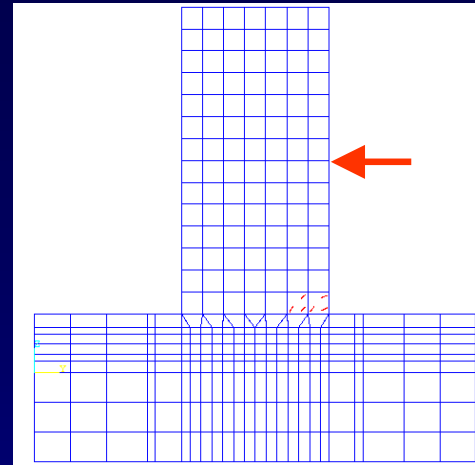


Tensioni principali di compressione

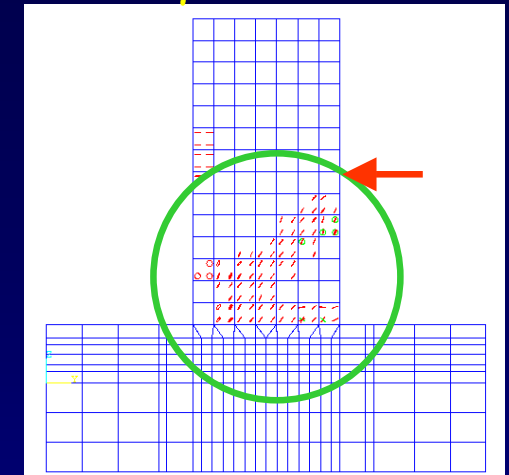


Tensioni principali di compressione

P = 40 kN

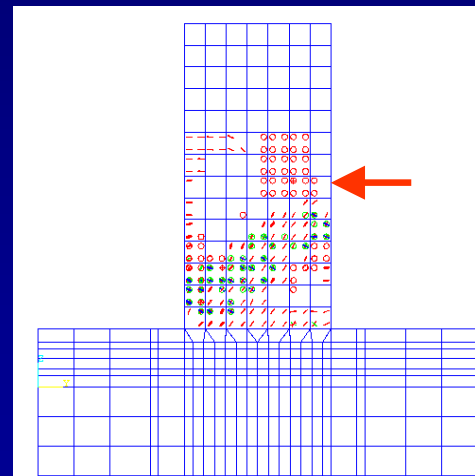


P = 60 kN
 $\gamma = 2.75 \%$

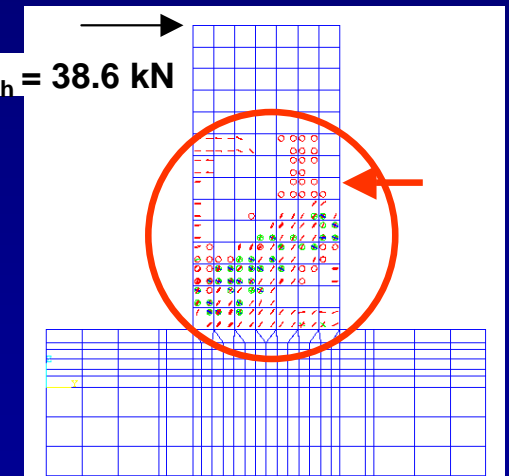


P_u = 94 kN
 $\gamma = 7.0 \%$

P = 90 kN

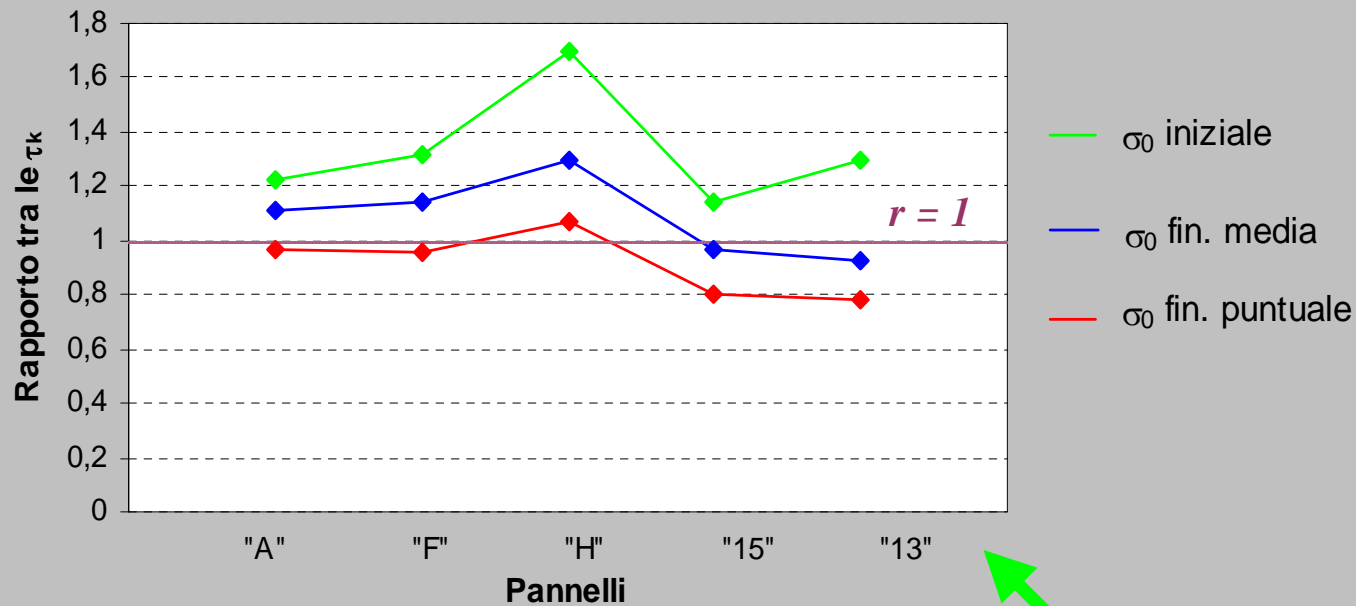


R_h = 38.6 kN



Si osserva una diversa evoluzione del quadro fessurativo che, nella prova PTC, è connessa ad un incremento di carico oltre il livello corrispondente al danno osservato a collasso nella prova PCD

Analisi delle prove di taglio in campo non lineare (Ansys)



**i parametri
e su pannelli
CD e 2 prove
prove fino al
le relazioni**

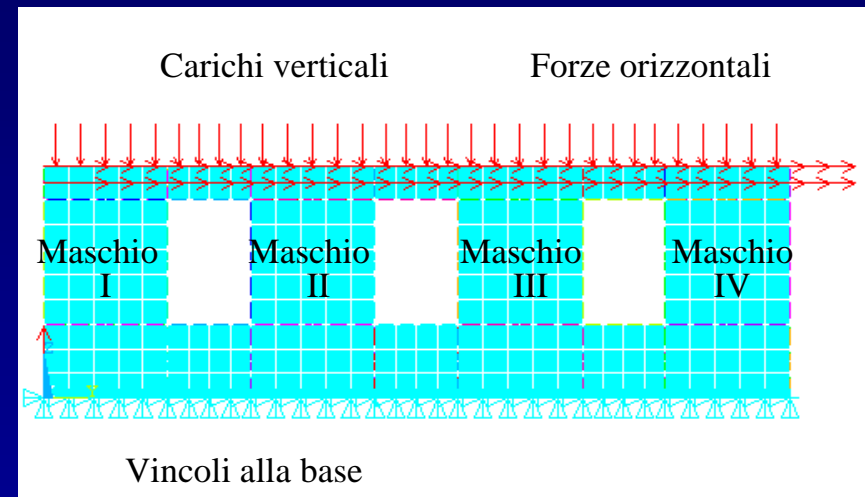
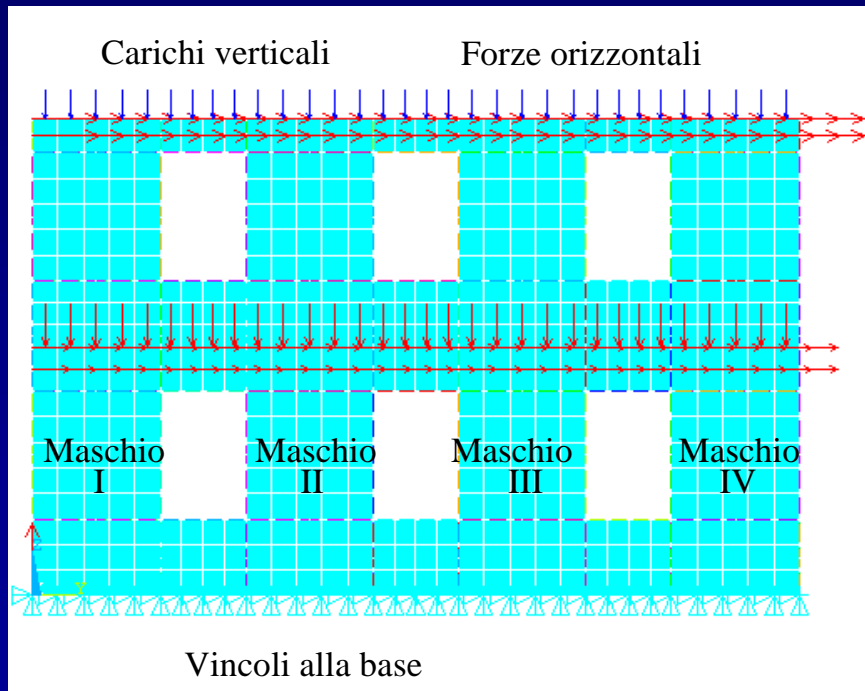
							f_{wt} (MPa)
H (PCD)	100	0.25	0.08	30	12.5	3	0.24
PT15OR (PTC)	450	0.25	0.09	30	10	3	0.11
PD13OR (PCD)	100	0.25	0.055	32	12.5	3	0.08

Prova	$ \sigma_0 $ (Mpa)	τ_u (Mpa)	b	σ_1 (Mpa)	τ_k (Mpa)	$\tau_k(\text{PTC})/\tau_k(\text{PCD})$
A (PTC)	0.44	0.415	1.5	0.440	0.253	1.22
A (PCD)	/	0.240	/	0.170	0.240	
F (PTC)	0.22	0.210	1.5	0.224	0.149	1.32
F (PCD)	/	0.113	/	0.080	0.113	
H (PTC)	0.09	0.165	1.5	0.207	0.138	1.70
H (PCD)	/	0.081	/	0.058	0.081	
PT15OR (PTC)	0.12	0.134	1.5	0.150	0.100	1.14
PT15OR (PCD)	/	0.088	/	0.062	0.088	
PD13OR (PTC)	0.04	0.086	1.5	0.111	0.074	1.28
PD13OR (PCD)	/	0.058	/	0.041	0.058	

Analisi di pareti piane in campo non lineare (Ansys)

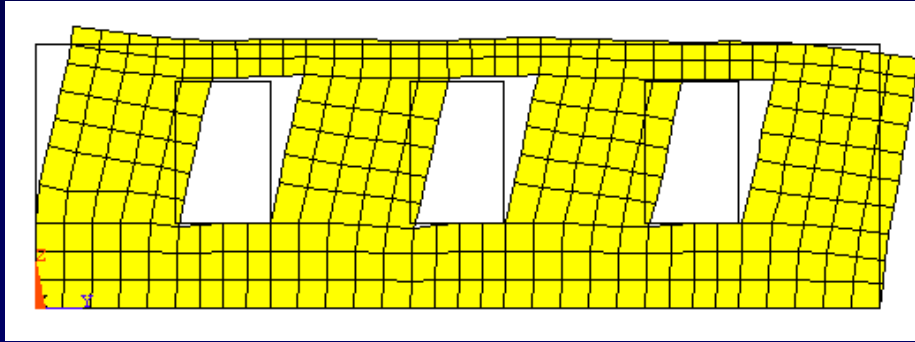
Sono state modellate agli elementi finiti 2 pareti piane con aperture (4 maschi per piano)

- Parametri costitutivi: Prova PT-15-OR
- Dimensioni maschi: 150 x 150 x 50 cm
- Condizioni di vincolo: DIAFF e LIBB
- Forze laterali: Analisi statica equivalente.

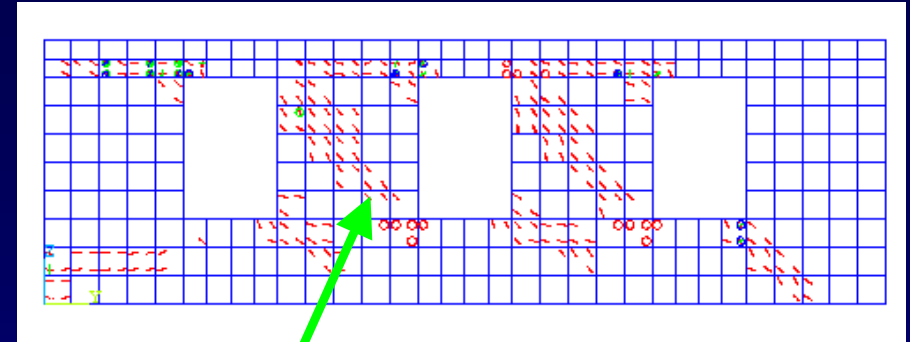


Analisi di pareti piane in campo non lineare (Ansys)

Schema resistente tipo "LIBB"

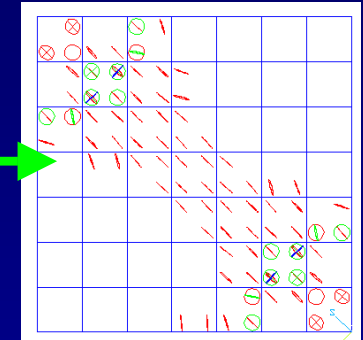


Deformata all'ultimo passo di carico

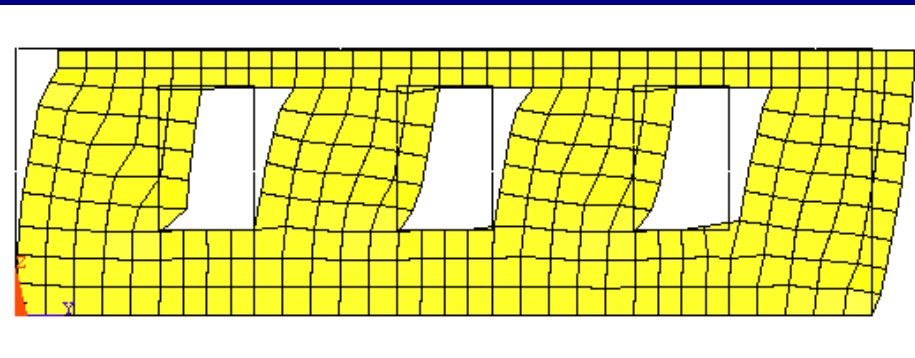


Quadro fessurativo all'ultimo passo di carico

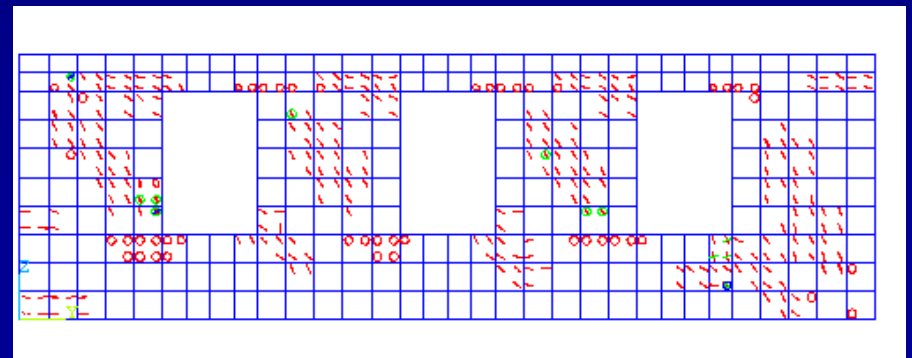
I risultati relativi allo schema di tipo LIBB indicano quadri fessurativi a collasso dei due maschi centrali simili a quelli ottenuti con la prova di compressione diagonale.



Schema resistente tipo "DIAFF"



Deformata all'ultimo passo di carico



Quadro fessurativo all'ultimo passo di carico

Analisi di pareti piane in campo non lineare (Ansys)

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

Parete	σ_0 (MPa)	τ_k (MPa)
LIBB	0.07 (iniziale)	0.050
	0.08 (finale media)	0.049
	0.13 (finale puntuale)	0.036
DIAFF	0.074 (iniziale)	0.072
	0.16 (finale media)	0.050
	0.24 (finale puntuale)	0.040

Prova PCD τ_k (MPa)

Tagli a collasso nei 4 maschi

LIBB	DIAFF
$T_1 = 30.98$ kN	$T_1 = 59.71$ kN
$T_2 = 52.20$ kN	$T_2 = 69.58$ kN
$T_3 = 48.73$ kN	$T_3 = 69.79$ kN
$T_4 = 42.31$ kN	$T_4 = 45.32$ kN

$$\tau_k = \frac{P}{\sqrt{2}A} \longrightarrow 0.088$$

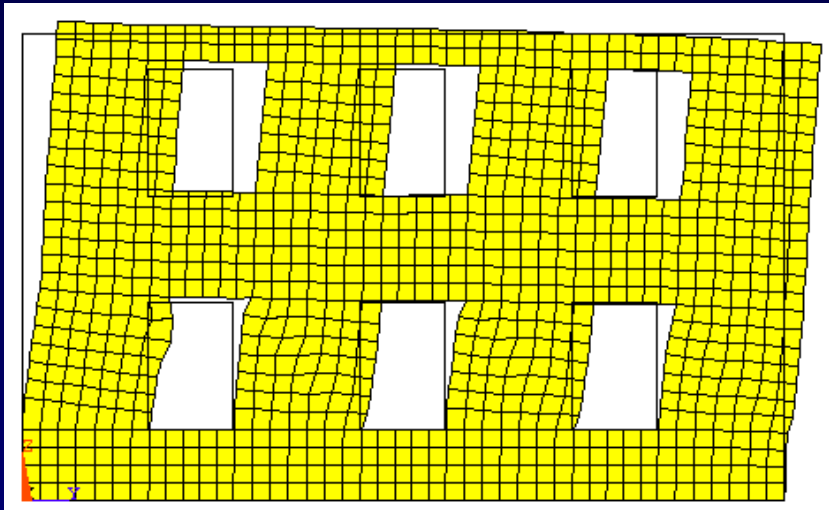
$$\tau_k = \frac{P}{2A} \longrightarrow 0.062$$

$$T_{PCD} = 66.00 \text{ kN}$$

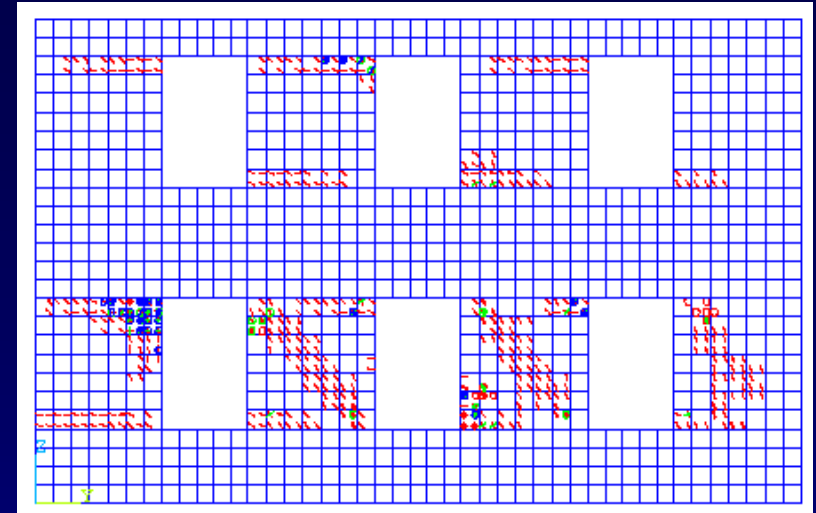
$$T_{PCD} = 46.67 \text{ kN}$$

Analisi di pareti piane in campo non lineare (Ansys)

Schema resistente tipo "LIBB"

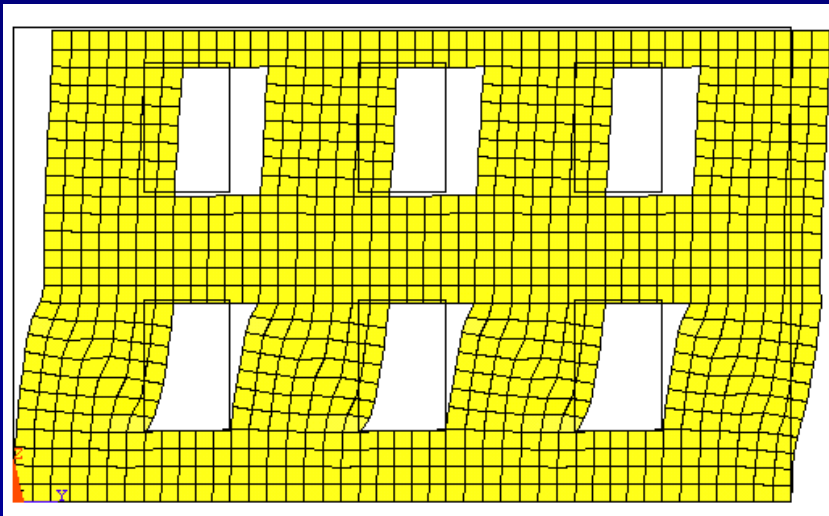


Deformata all'ultimo passo di carico

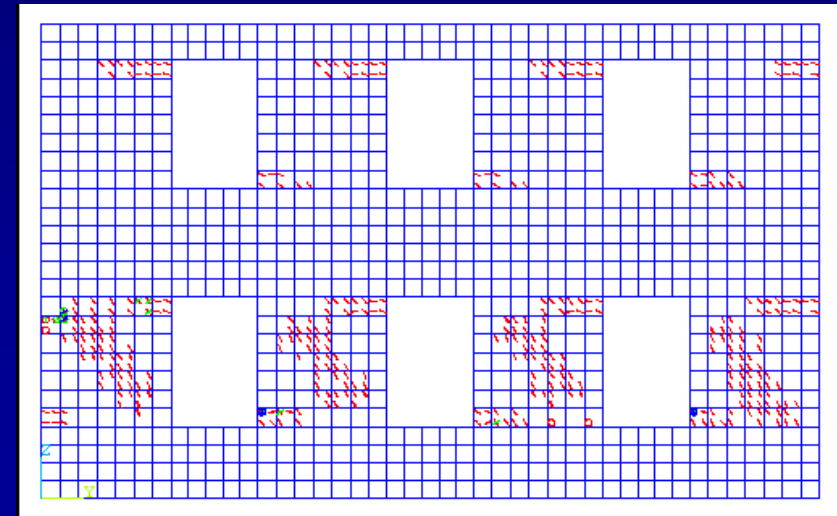


Quadro fessurativo all'ultimo passo di carico

Schema resistente tipo "DIAFF"



Deformata all'ultimo passo di carico



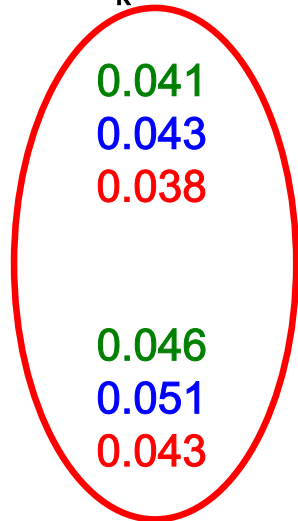
Quadro fessurativo all'ultimo passo di carico

Analisi di pareti piane in campo non lineare (Ansys)

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

Parete	σ_0 (MPa)	τ_k (MPa)
LIBB	0.205 (iniziale)	0.041
	0.194 (finale media)	0.043
	0.230 (finale puntuale)	0.038
DIAFF	0.205 (iniziale)	0.046
	0.156 (finale media)	0.051
	0.210 (finale puntuale)	0.043

Prova PTC (b_1.5)	σ_0 (MPa)	τ_k (MPa)
	0.122	0.10
	0.185	0.085
	0.274	0.071



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

0.122	0.10
0.185	0.085
0.274	0.071

I risultati mostrano che la prova PTC sovrastima la resistenza a taglio della parete

Tagli a collasso nei 4 maschi del primo piano

LIBB	DIAFF
$T_1 = 43.30$ kN	$T_1 = 57.69$ kN
$T_2 = 60.38$ kN	$T_2 = 67.54$ kN
$T_3 = 54.64$ kN	$T_3 = 68.71$ kN
$T_4 = 22.90$ kN	$T_4 = 46.87$ kN

$$T_{PTC} = 115.38 \text{ kN}$$

Alcune considerazioni

1. Alla luce delle analisi e dei risultati delle esperienze appare che la **prova di compressione diagonale** fornisce una misura indiretta della resistenza a trazione della muratura nella direzione ortogonale alla fessurazione. E' invece dubbia l'interpretazione per la misura della resistenza a taglio in assenza di compressione.
2. **La prova di taglio (Sheppard)**, pur non essendo nota l'effettiva tensione di compressione verticale, fornisce una resistenza a taglio che, stabilito il modello di variazione di tale resistenza con il livello della compressione, permette di calcolare la resistenza convenzionale a taglio.
3. **Nella prova di taglio-compressione**, si osserva un comportamento asimmetrico dei due semipannelli, che introduce una ulteriore variabile. Anche questa prova può fornire una misura della resistenza convenzionale a taglio, ponendo attenzione alle condizioni di vincolo in sommità al pannello superiore.
4. **I pannelli (maschi murari) nelle pareti in muratura** hanno condizioni al contorno variabili e difficili da generalizzare in un solo schema.
5. Le analisi sulle pareti piane indicano che la procedura PTC sovrastima la resistenza a taglio della parete con il classico schema interpretativo e che risulta determinante l'incremento della tensione verticale durante la prova.