
Il comportamento dinamico dei terreni

Laboratorio di Geotecnica

Università degli Studi di Enna “Kore”

Enna, 20-21 giugno 2013



Prove di laboratorio

Tecniche sperimentali e risultati tipici

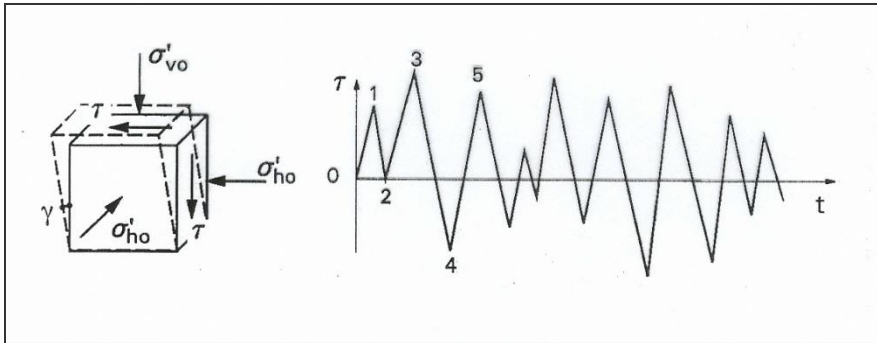
Ernesto Cascone

DICIEAMA - Università di Messina

introduzione

- aspetti fondamentali del comportamento meccanico:
 - rigidezza (iniziale)
 - non linearità (decadimento)
 - capacità di dissipare energia (smorzamento)
- condizioni:
 - cicliche → frequenze: 0.01 – 1 Hz ($T = 100 - 1 \text{ s}$)
numero di cicli: 10-100
 - dinamiche → frequenze: 10 – 100 Hz ($T = 0.1 - 0.01 \text{ s}$)
- modo di deformazione prevalente:
 - taglio semplice (solo onde s)
 - condizioni monodimensionali (propagazione verticale)
- livelli deformativi tipici:
 - $\epsilon < 10^{-4}$ ($= 10^{-2} \% = 0.01 \%$)


terreni sotto azioni variabili nel tempo

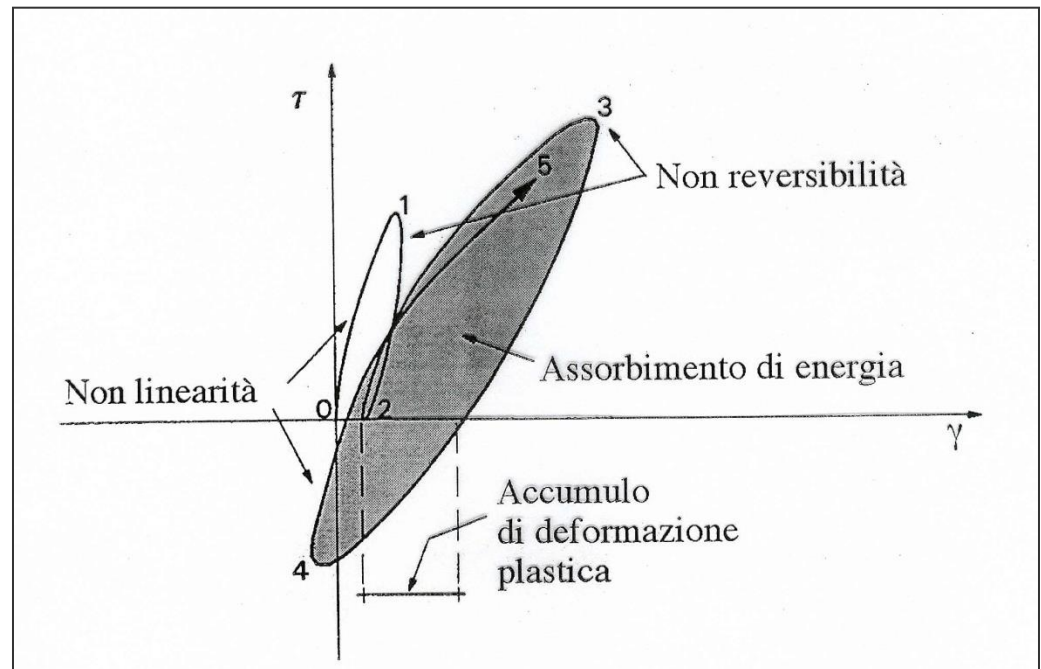


stati di interesse:

- taglio semplice (per le tensioni)
- distorsionale (per le deformazioni)

comportamento osservato:

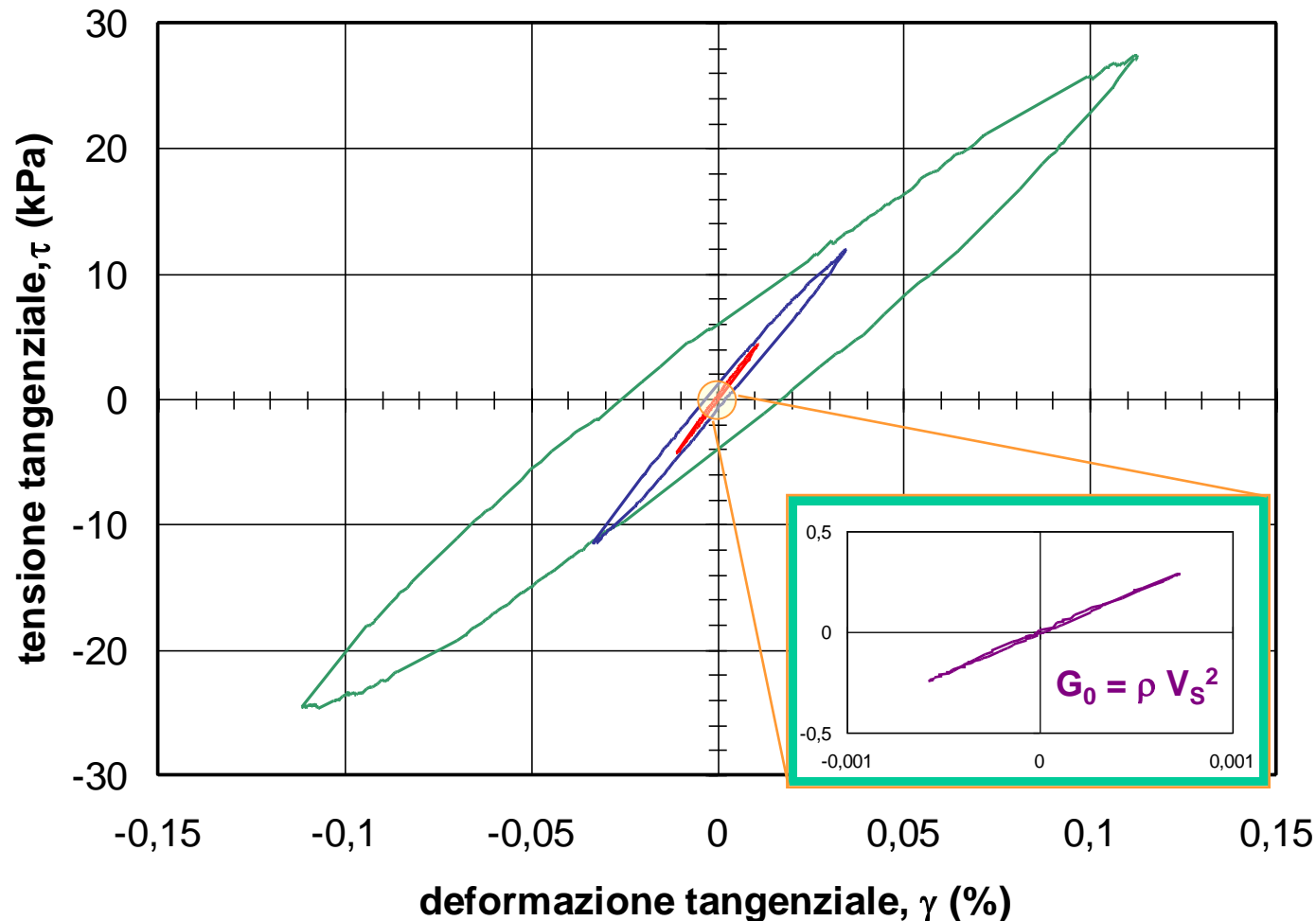
- non linearità
 - non reversibilità
- 
- dissipazione di energia
 - deformazioni residue



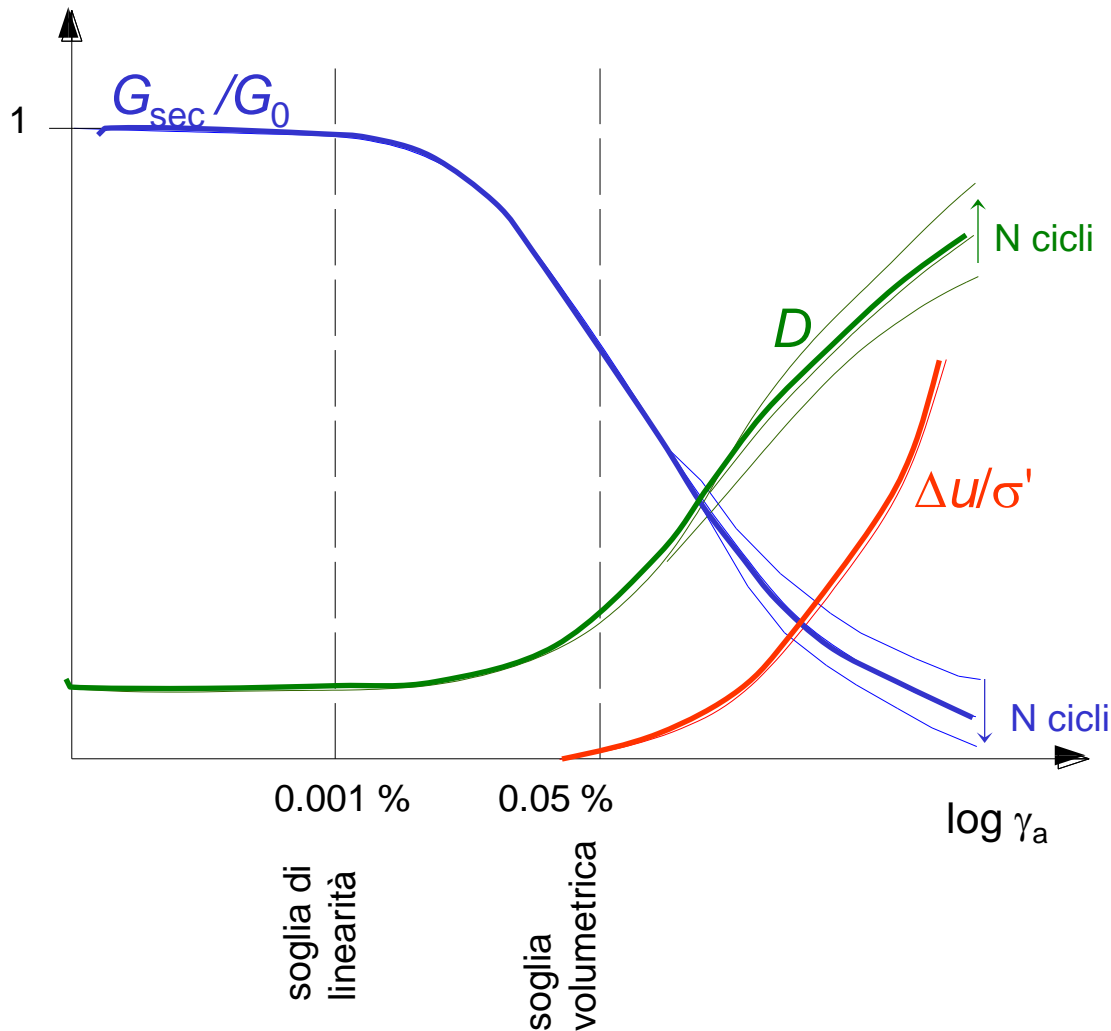
Evidenza sperimentale della natura del legame τ - γ

All'aumentare del livello di sollecitazione, il ciclo tensione-deformazione:

- si inclina sempre di più \rightarrow la non linearità si accentua
- si allarga progressivamente \rightarrow la dissipazione di energia aumenta



la rigidezza secante e lo smorzamento dipendono dall'ampiezza della deformazione



$$\gamma < \gamma_l$$

comportamento lineare

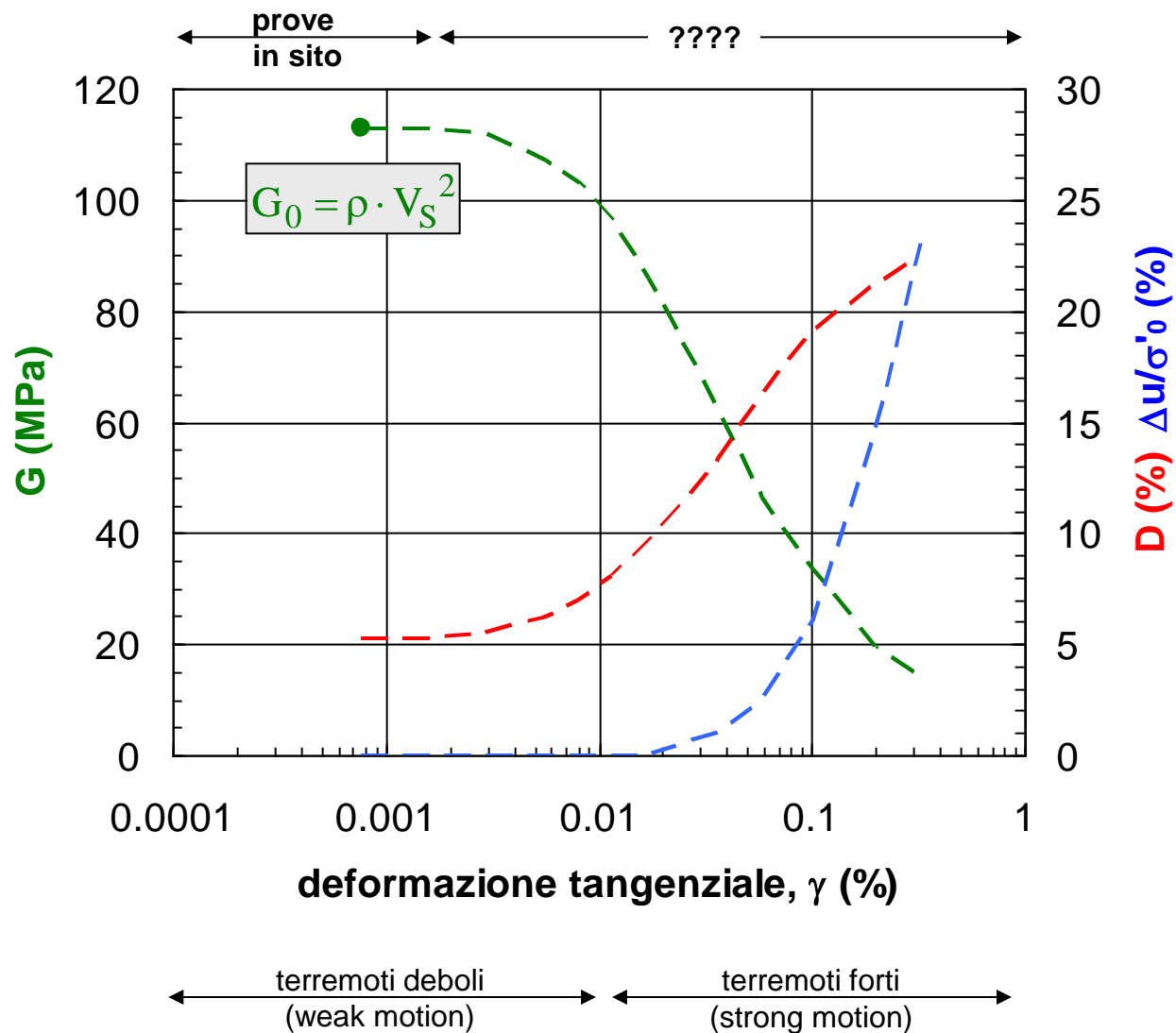
$$\gamma_l < \gamma < \gamma_v$$

comportamento isteretico:
 G diminuisce, D aumenta
senza degradazione
(comportamento indipendente
da numero cicli N)

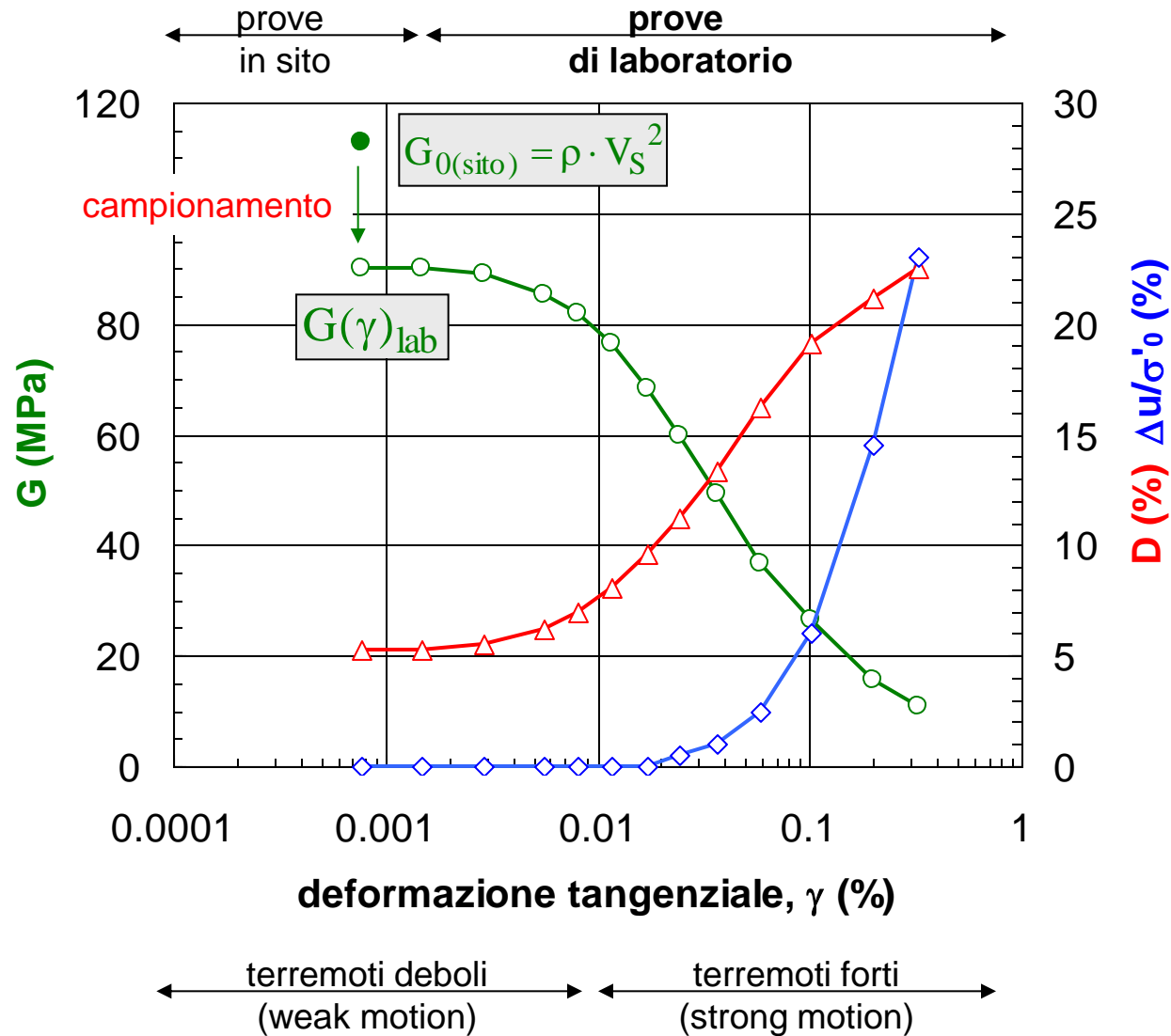
$$\gamma > \gamma_v$$

Degradazione: al crescere del
numero di cicli diminuisce G
e aumenta D

Caratterizzazione geotecnica con prove in sito



Caratterizzazione geotecnica con prove di laboratorio



misura sperimentale dei parametri meccanici

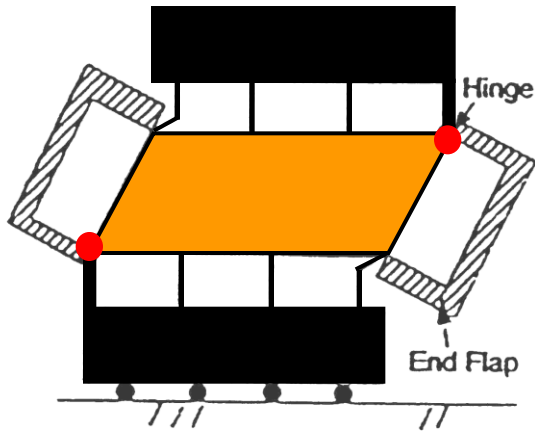
Categorie di prova		Tipo di prova	Stato tensionale	Deformazione γ [%]	Frequenza f [Hz]	Rigidezza	Smorzamento	Resistenza G F
Laboratorio	Cicliche	Triassiale	Simmetria radiale	$>10^{-2}$	0.01-1	$q:\epsilon_a \rightarrow E \rightarrow G$	$W_D/W_S \rightarrow D$	$q/\sigma'_r : N_c$
		Taglio semplice	Simmetria radiale	$>10^{-2}$	0.01-1	$\tau:\gamma \rightarrow G$		$\tau/\sigma'_v : N_c$
		Taglio torsionale	Simmetria radiale o triax vero	$10^{-4}-1$	0.01-1	$\tau:\gamma \rightarrow G_0, G$		
	Dinamiche	Colonna risonante	Simmetria radiale o triax vero	$10^{-4}-1$	>10	$f_r \rightarrow G_0, G$	H.p., R.f. $\rightarrow D$	
		Trasduttori piezoceramici	Simmetria radiale	$<10^{-3}$	>100	$V_S \rightarrow G_0$	-	

Legenda: V_s = velocità onde di taglio;
 f_r = frequenza di risonanza;
 H.p. = metodo della larghezza di banda;
 R.f. = metodo del decremento logaritmico

prova CSS: apparecchiature

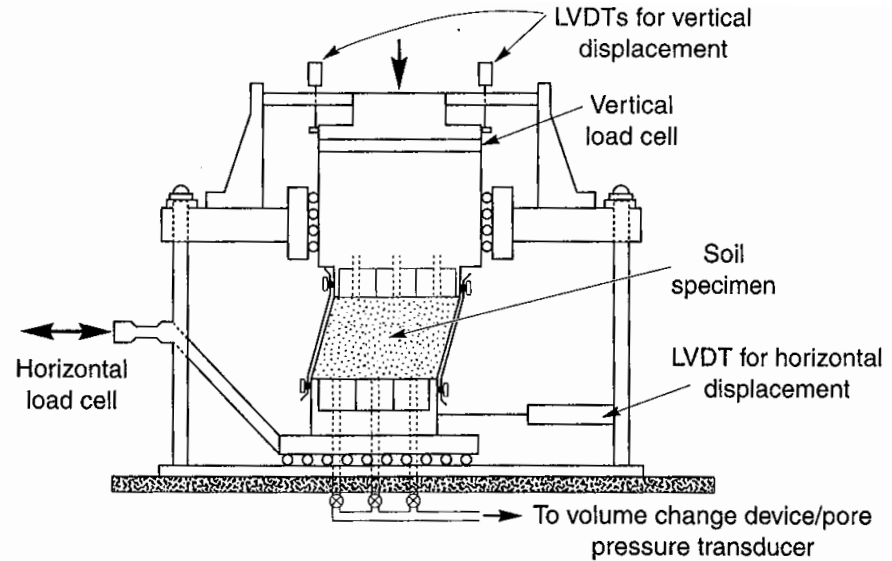
cella tipo Cambridge

provino prismatico
contorni rigidi



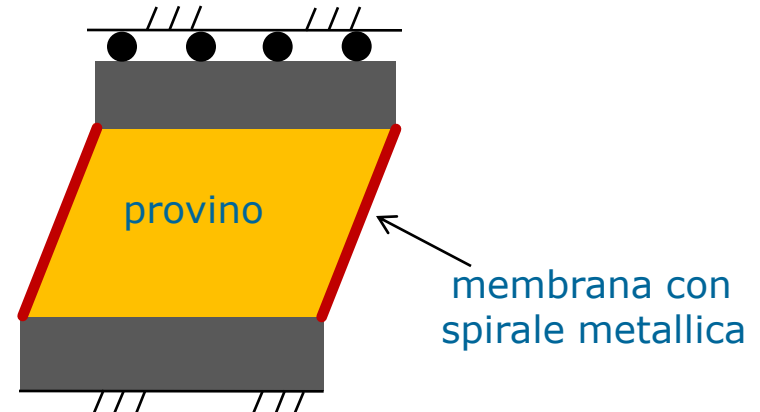
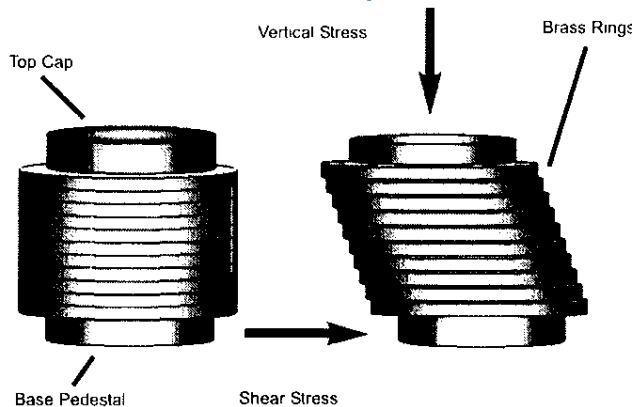
cella tipo NGI

provino cilindrico
membrana con spirale metallica

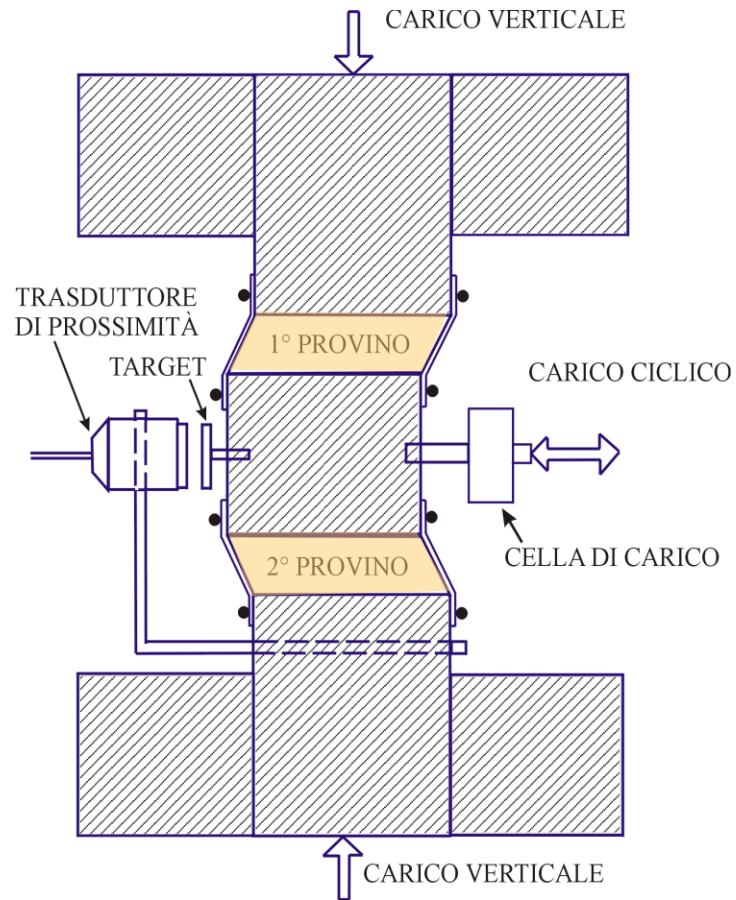


cella tipo SGI

provino cilindrico
contenuto in una pila di anelli

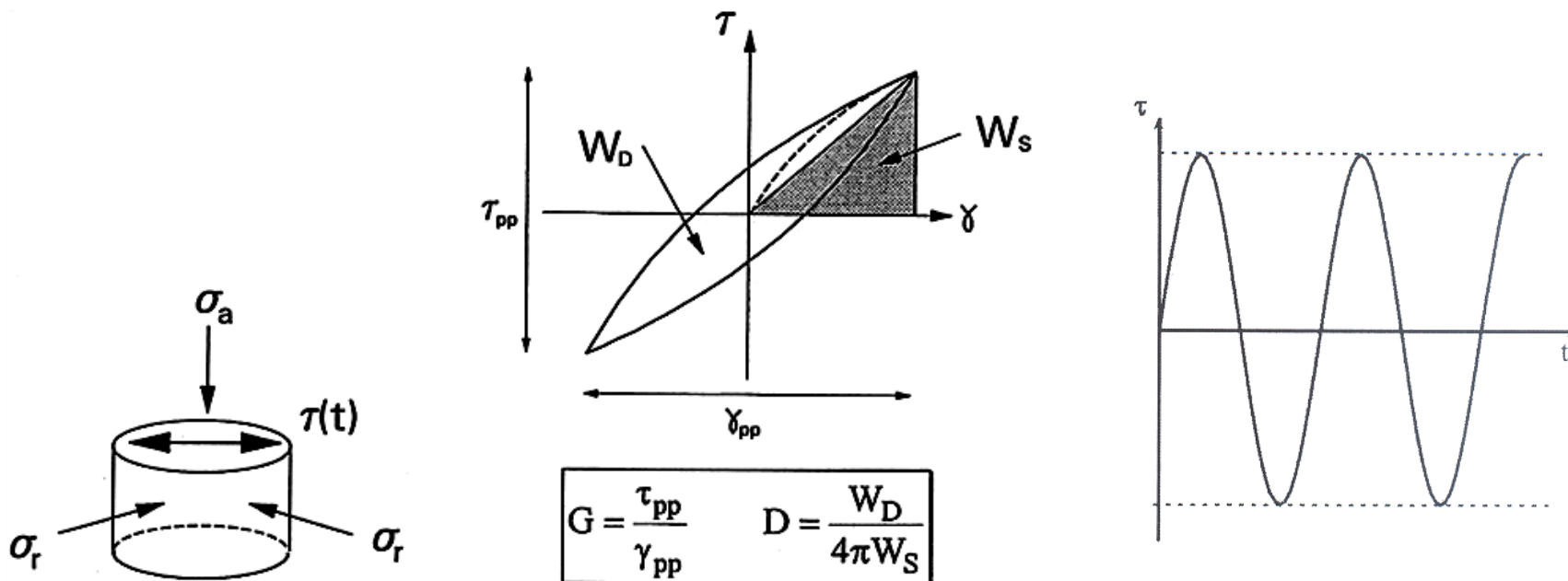


prova CSS: apparecchiature

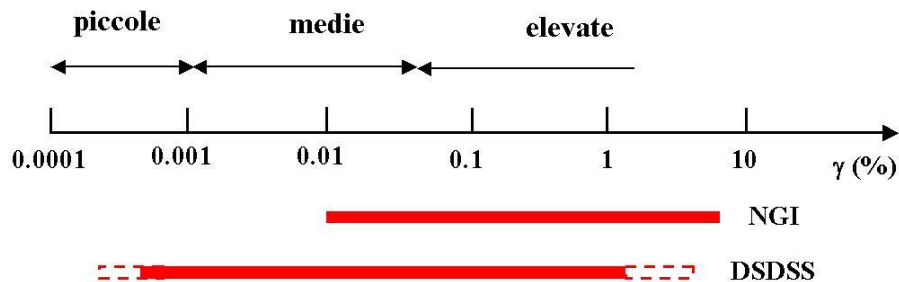


cella tipo UCLA con doppio provino (DSDSS):
(in dotazione all'Università di Roma La Sapienza)

prova di taglio semplice ciclico (CSS)



campo di deformazioni investigato:

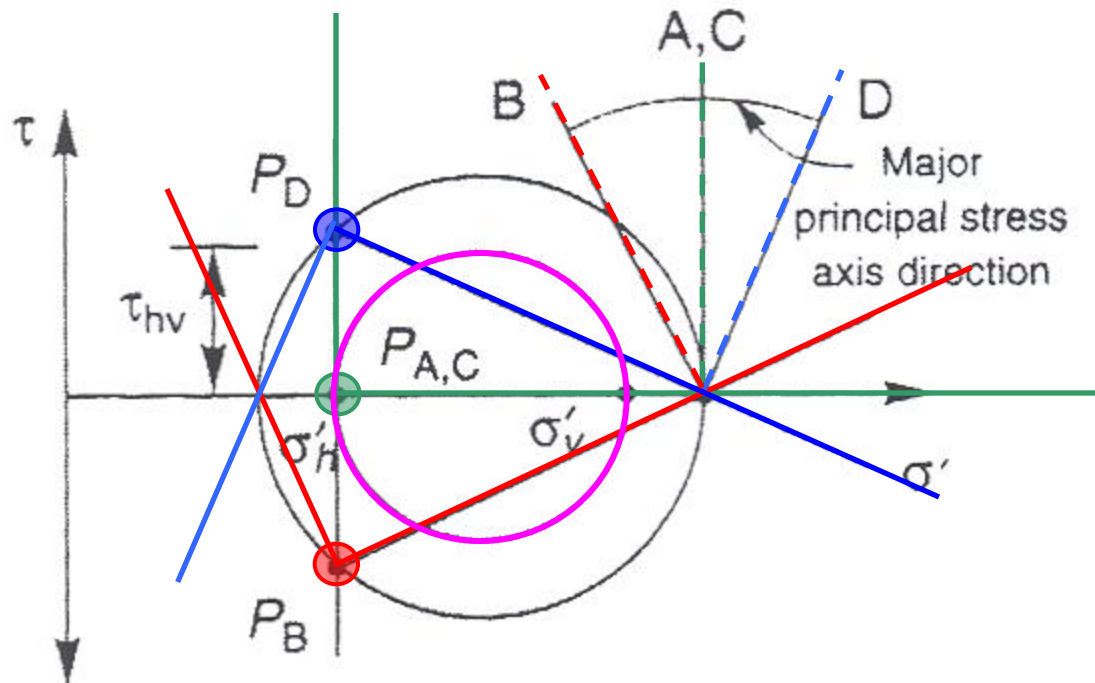
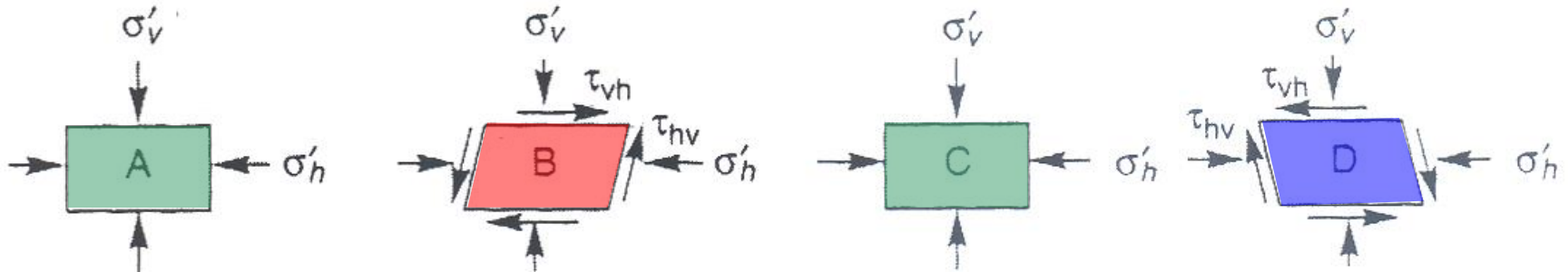


cicli di sforzi di taglio semplice simmetrici

campo di frequenze tipico:

$f = 0.01-1$ Hz

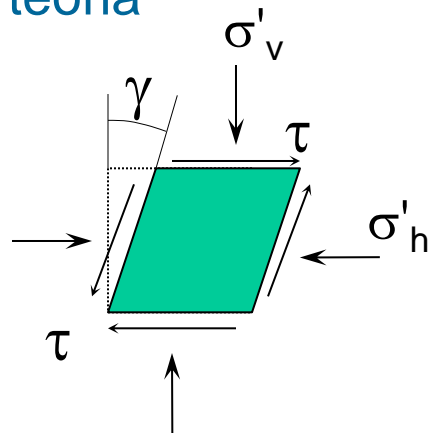
prova di taglio semplice ciclico (CSS)



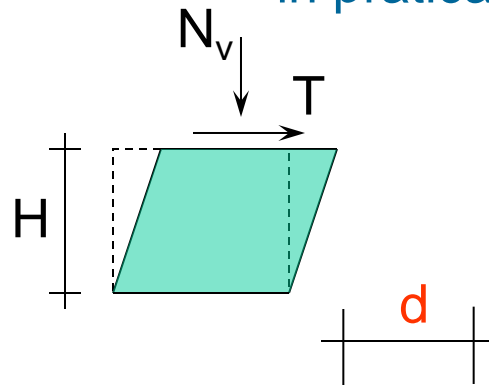
rotazione delle direzioni principali

prova di taglio semplice ciclico (CSS)

in teoria

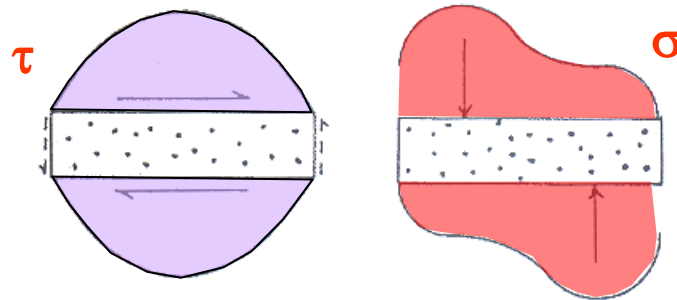


in pratica



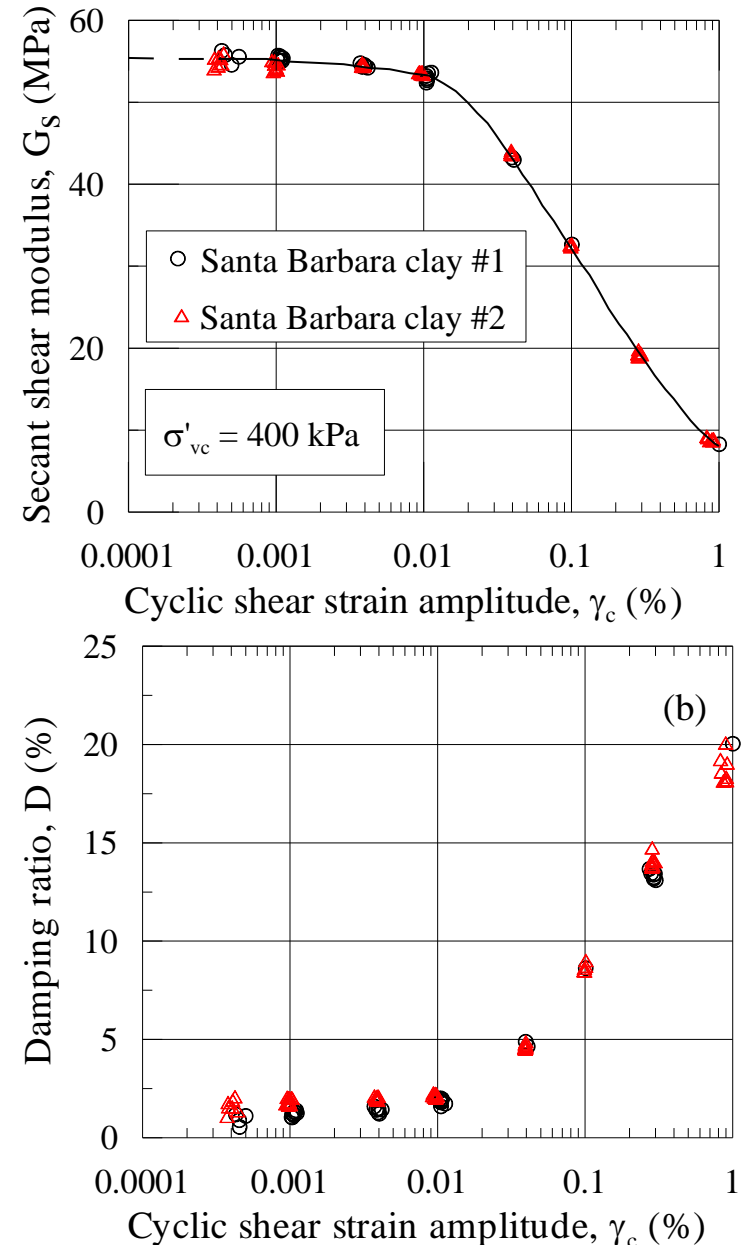
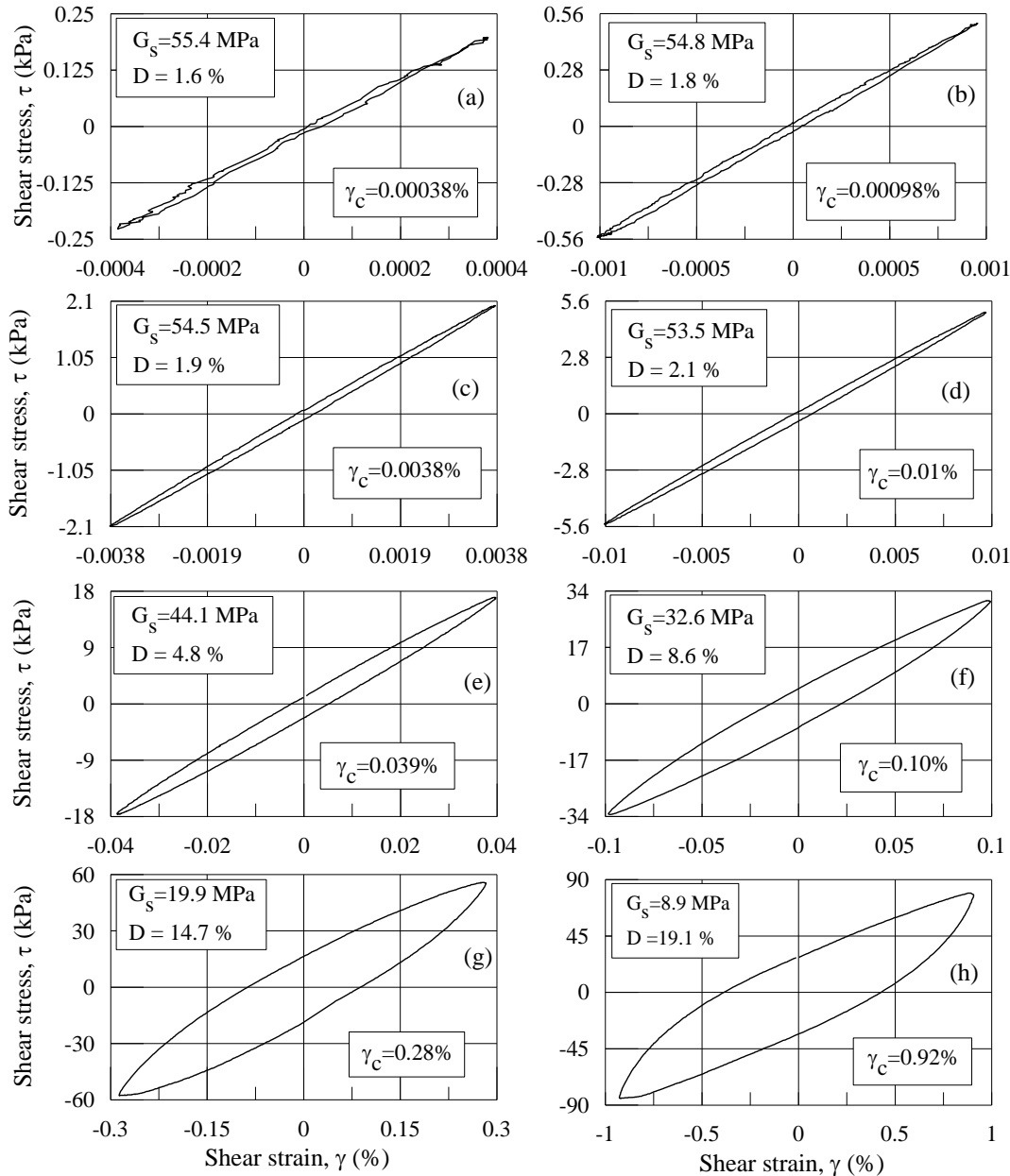
- tensioni normali in rapporto k_0

$$\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v$$

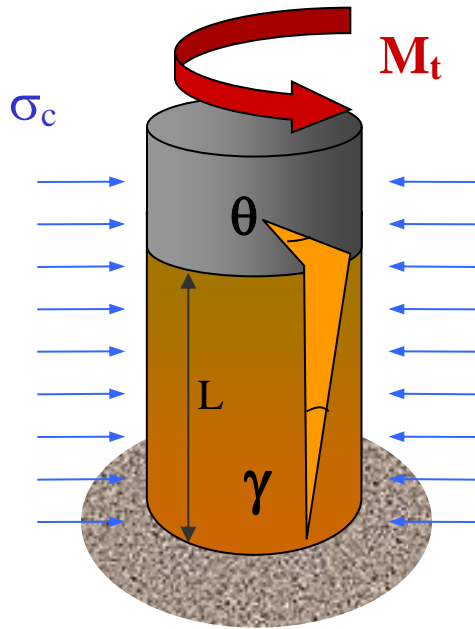


- mancono le τ coniugate \rightarrow nasce un momento $\rightarrow M = T \cdot H = N_v \cdot d$
- distribuzione disuniforme delle τ e delle σ sulle superfici di carico

argilla di Santa Barbara - prove DSDSS *(D'Elia, Lanzo, Pagliaroli, 2003)*



prova torsionale ciclica (CTS): tensioni e deformazioni



stato tensionale isotropo

+

coppia torcente variabile con legge
armonica: $M(t) = M_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$

prove a carico controllato

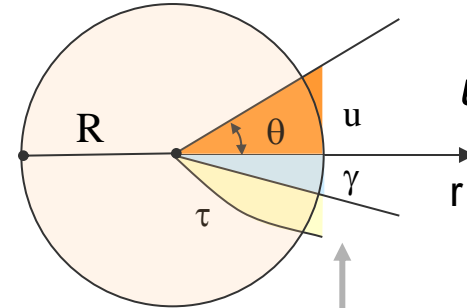
Operativamente si pone:

$$\begin{cases} \gamma = \frac{\theta(L)}{L} \bar{r} \\ \tau = \frac{M_t}{J} \bar{r} \end{cases}$$

θ lineare con z

$$\theta(z) = \theta(L) \frac{z}{L}$$

rotazione rigida nel piano



$$u(r) = \theta(z)r$$

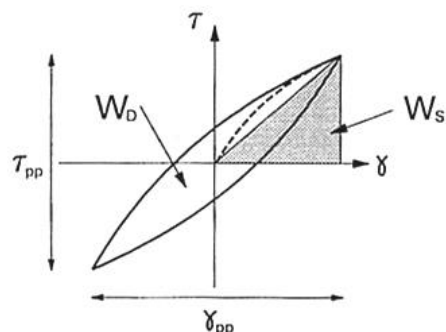
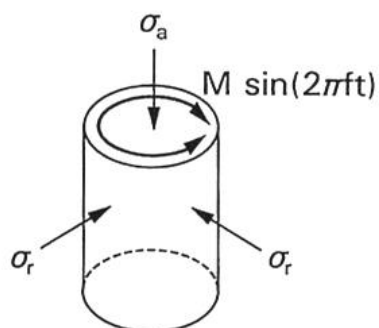
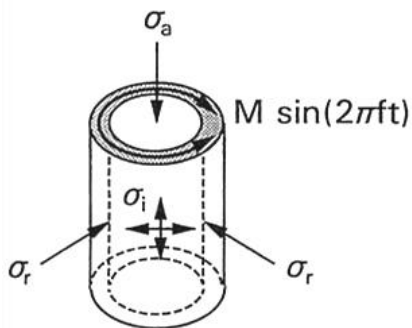
$$\gamma(z, r) = \frac{\partial u}{\partial z} = r \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\theta(L)}{L} r$$

$$\tau = G(\gamma) \cdot \gamma(z, r) = \tau(z, r)$$

dove:

$$\begin{cases} \bar{r} = (2/3)R & \text{(raggio medio)} \\ J = \int_A r^2 dA = \frac{\pi}{2} R^4 & \text{(momento polare d'inerzia della sezione)} \end{cases}$$

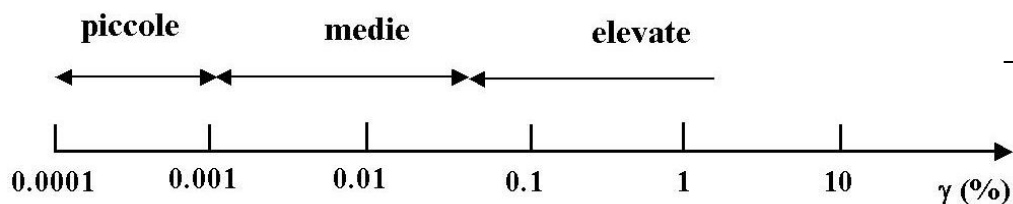
prova torsionale ciclica (CTS)



$$G = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}} \quad D = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$

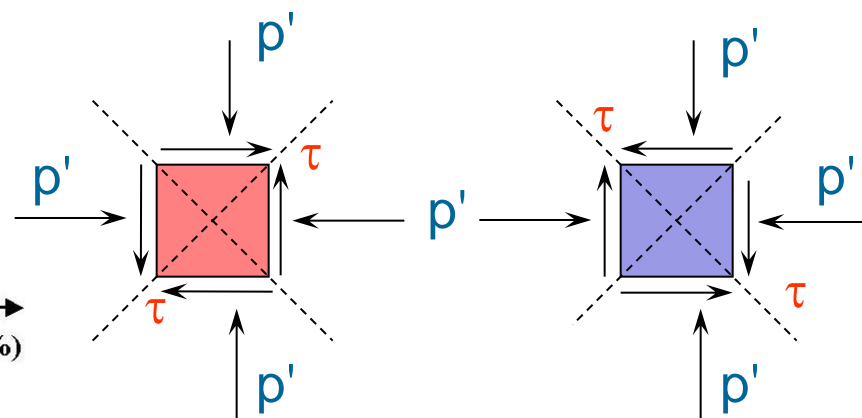
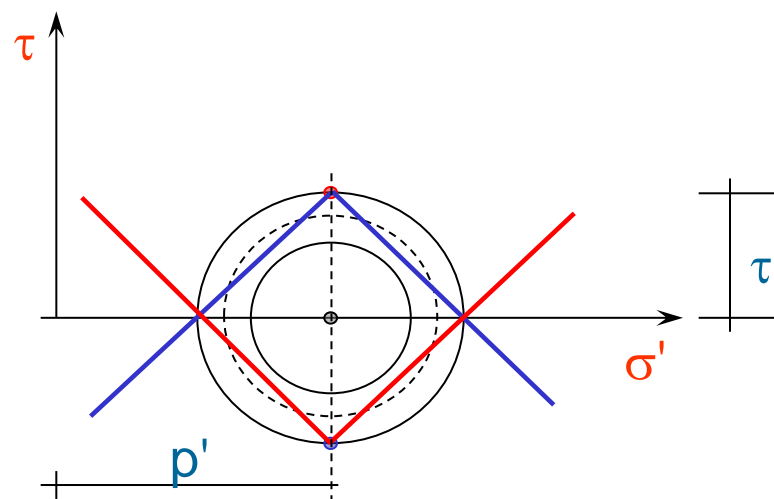
campo di frequenze tipico: $f = 0.01-1$ Hz

campo di deformazioni investigato:



- prova a tensione controllata
- alta risoluzione a piccole deformazioni
- Pre-sollecitazione:
 - isotropa su provini pieni
 - anche triassiale su provini cavi

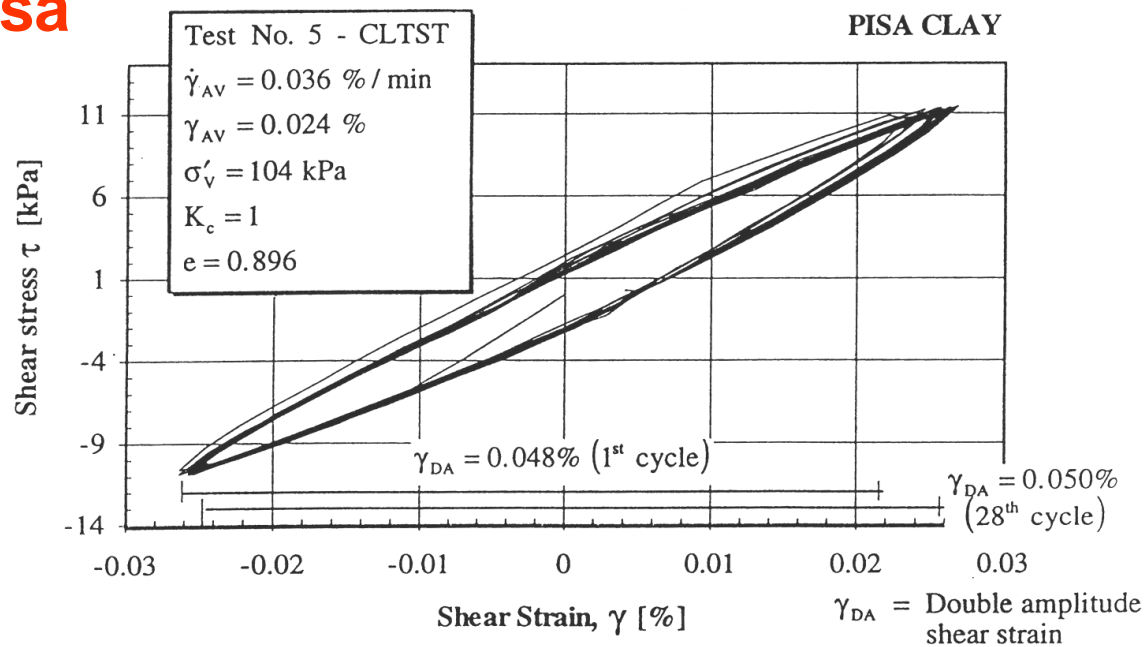
rotazione delle direzioni principali



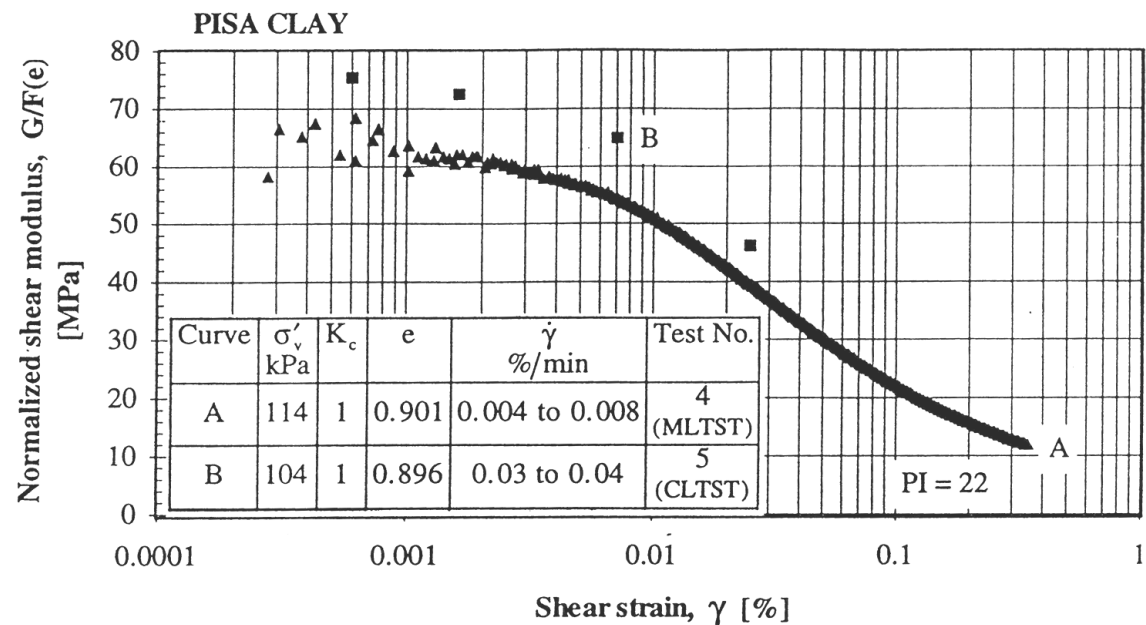
prova CTS:argilla di Pisa

(Cavallaro, 1997)

cicli di isteresi $\tau:\gamma$ da misure
di coppia **M** e rotazione θ
alla testa del provino



modulo di taglio normalizzato
in funzione della
deformazione di taglio



prova di colonna risonante (RC)

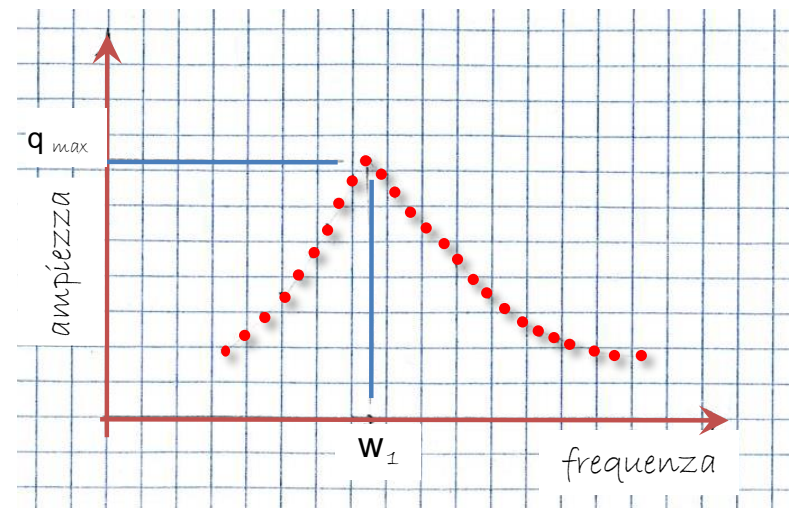
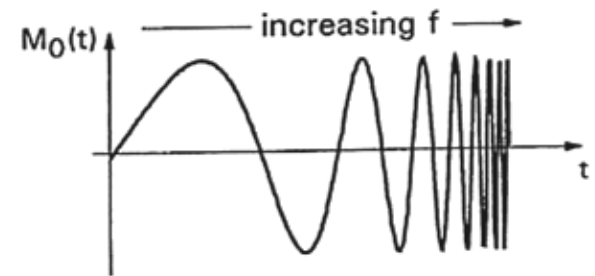
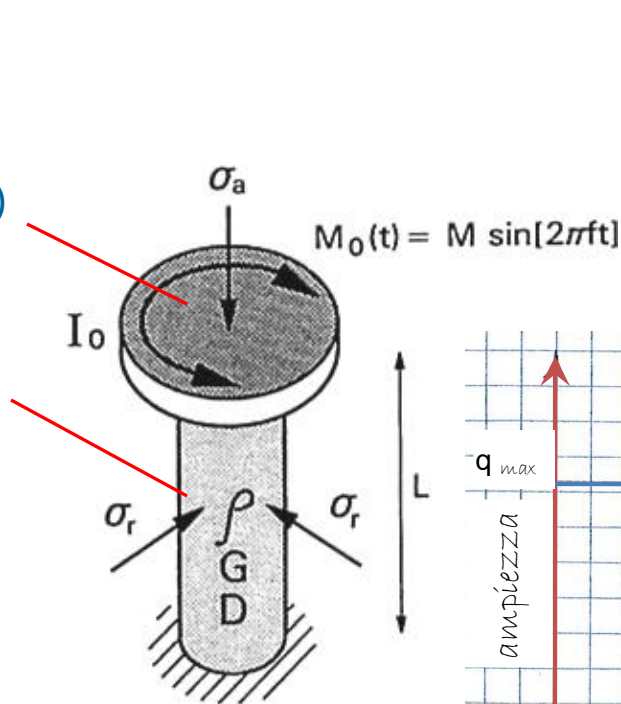
- analoga alla prova torsionale ciclica
- sollecitazioni applicate in condizioni dinamiche: $M_0(t) = M_a \cdot e^{i\omega t}$
- fissato M_a , si fa variare ω con continuità individuando la prima frequenza di risonanza massime ampiezze di oscillazione θ_a

attuatore
(motore elettromagnetico)

provino

$$I_p = \int_A r^2 dA = \frac{\pi R^4}{2}$$

$$J_p = \rho \cdot H \cdot I_p = \rho \cdot H \cdot \frac{\pi R^4}{2}$$



prova di colonna risonante (RC)

interpretazione prova:

soluzione per mezzo elastico lineare senza smorzamento

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = V_s^2 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} \quad \rightarrow \quad \vartheta(z, t) = A \cdot e^{i(\omega t - kz)} + B \cdot e^{i(\omega t + kz)}$$

condizioni al contorno:

$$z = 0, \theta = 0$$

$$z = H \rightarrow \textcircled{Gl_p \frac{\partial \vartheta}{\partial z}} = \textcircled{-J_0 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2}}$$

reazione elastica provino = reazione inerziale massa attuatore

$$\boxed{\frac{J_p}{J_0} = \frac{\omega H}{V_s} \cdot \tan \frac{\omega H}{V_s} \cong \left(\frac{\omega H}{V_s} \right)^2}$$

lo smorzamento riduce le ampiezze ma ha influenza modesta sulla
frequenza di risonanza (per ξ basso)

prova di colonna risonante (RC)

interpretazione prova: valutazione del modulo G

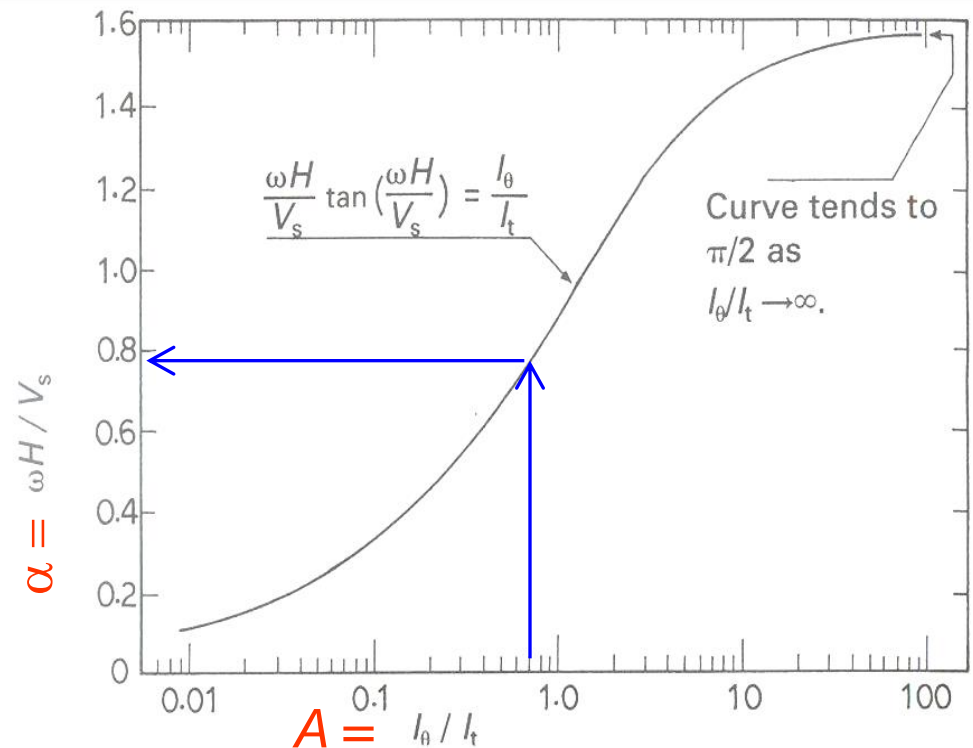
$$\frac{J_p}{J_0} = \frac{\omega H}{V_s} \cdot \tan \frac{\omega H}{V_s} \cong \left(\frac{\omega H}{V_s} \right)^2$$

$$A = \alpha \cdot \tan \alpha \quad \alpha = \frac{\omega H}{V_s}$$

$$V_s = \frac{\omega H}{\alpha} = \frac{2\pi f_n H}{\alpha}$$

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

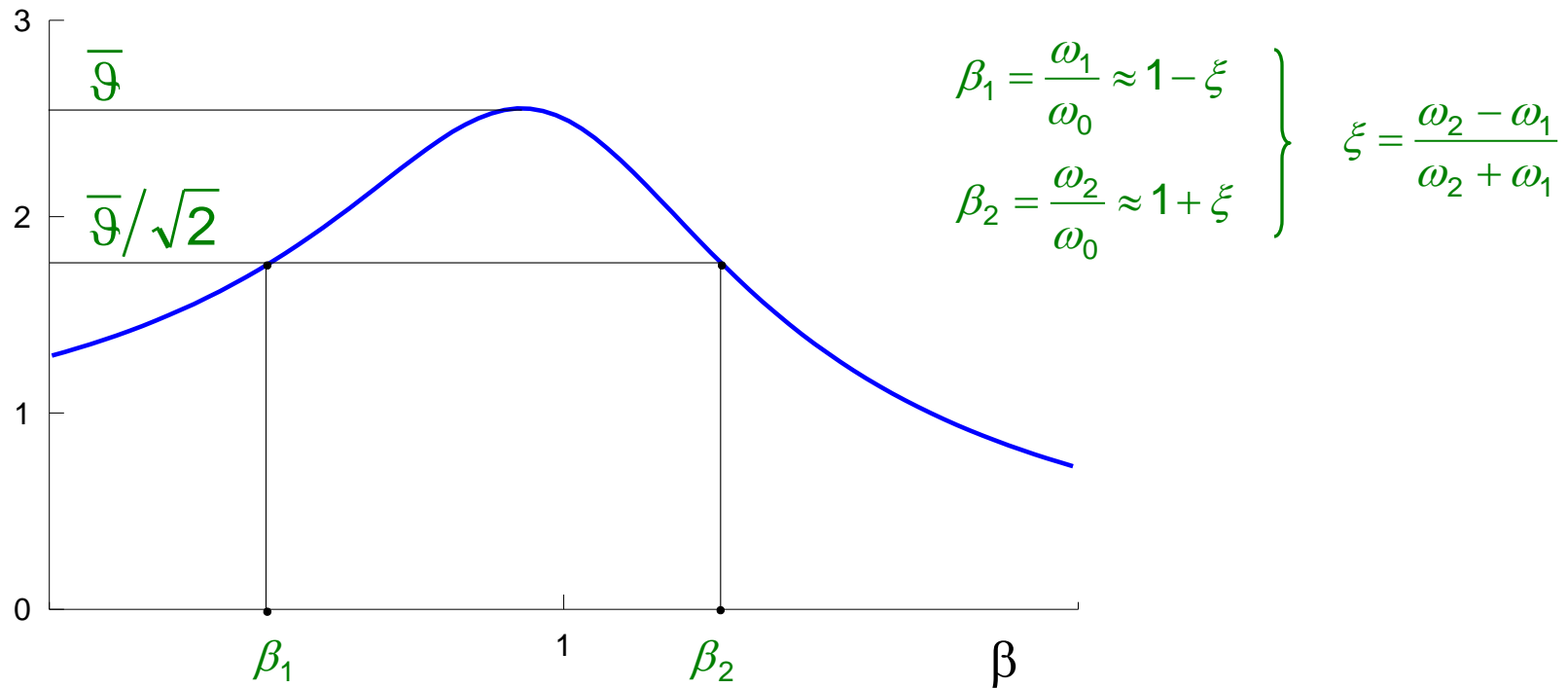
$$\gamma = \frac{\theta(L)}{L} \bar{r}$$



prova di colonna risonante (RC)

interpretazione prova: determinazione del rapporto di smorzamento

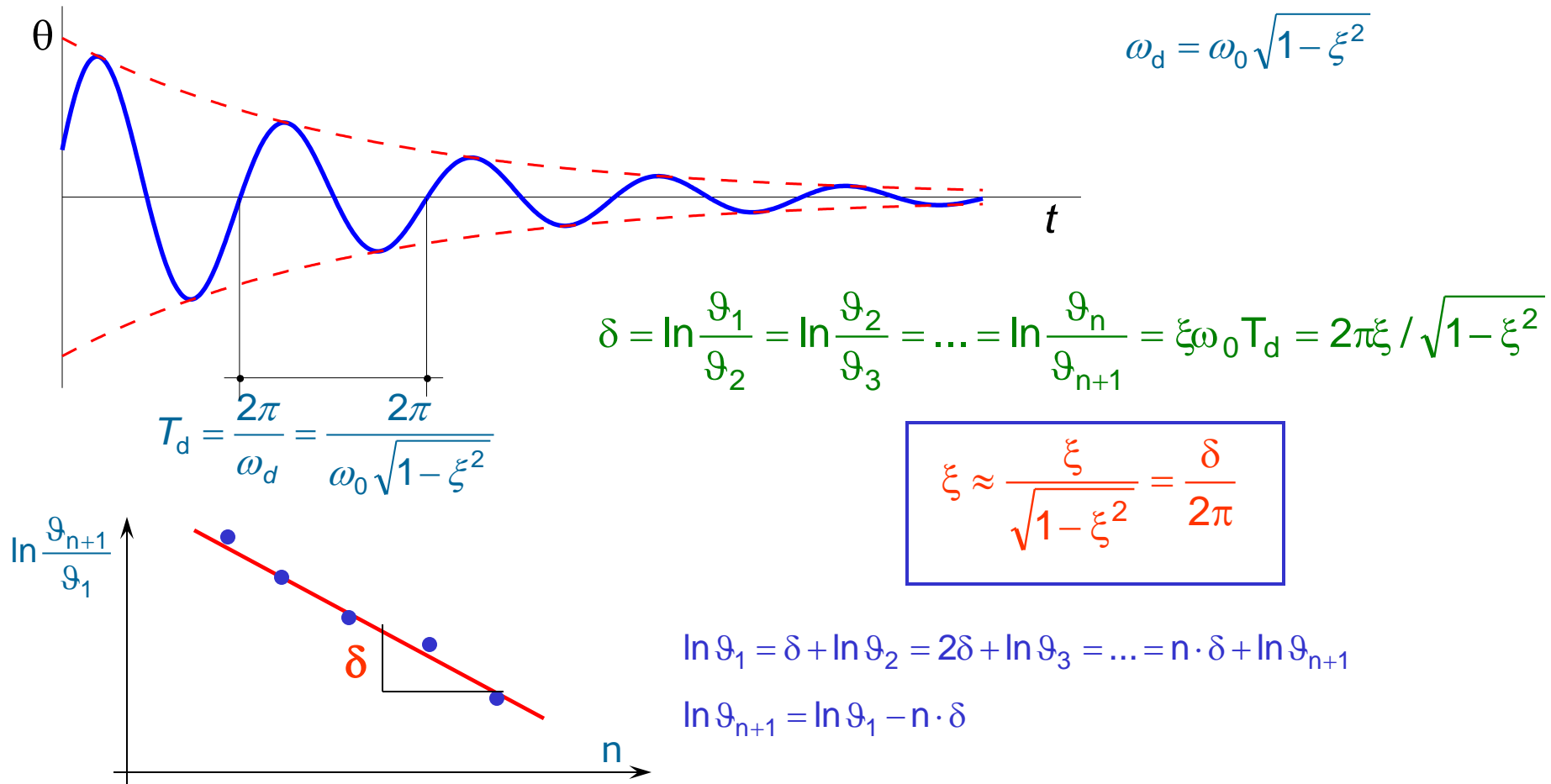
1) metodo della larghezza di banda



prova di colonna risonante (RC)

interpretazione prova: determinazione del rapporto di smorzamento

2) metodo del decremento logaritmico

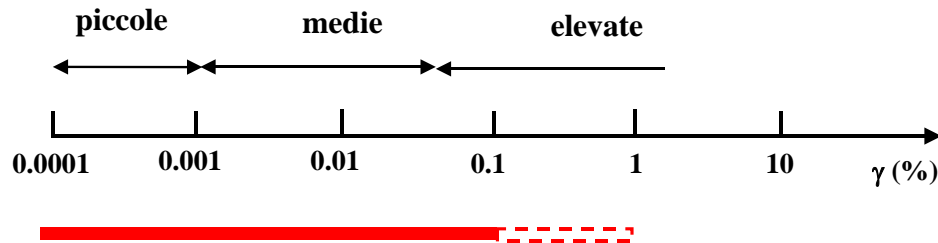


prova di colonna risonante (RC)

- per ogni fissata ampiezza M_a della sollecitazione si ottengono: γ_a , $G(\gamma_a)$, $\xi(\gamma_a)$
- incrementando l'ampiezza delle sollecitazioni si ripetono le misure

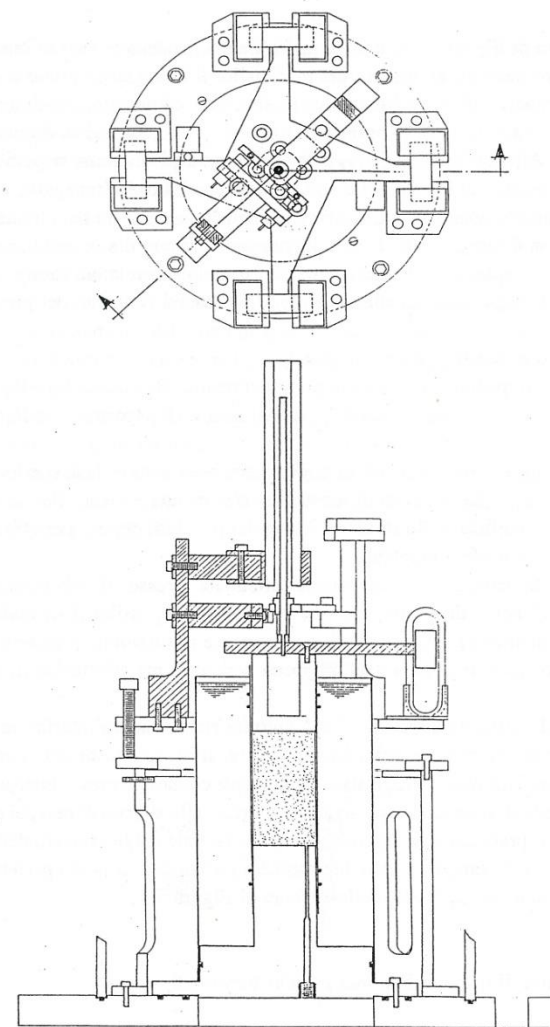
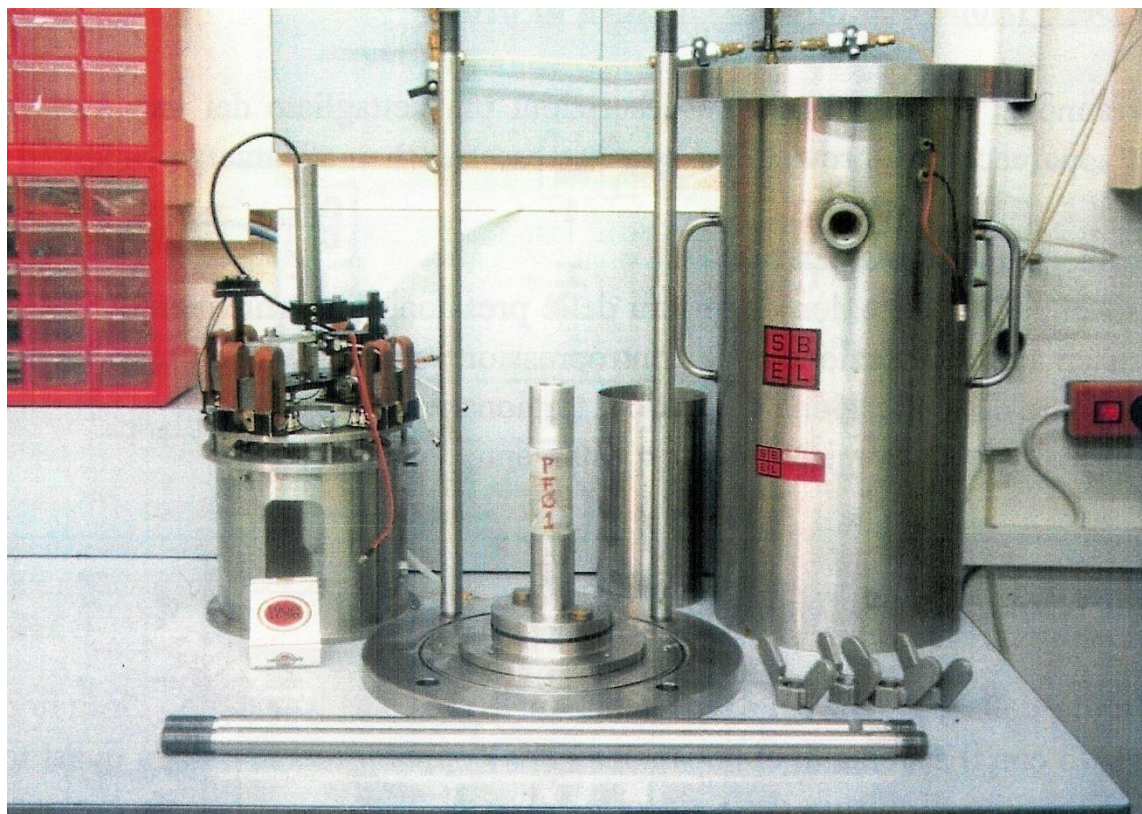
campo di frequenze tipico: $f = 10-100$ Hz

campo di deformazioni investigato:

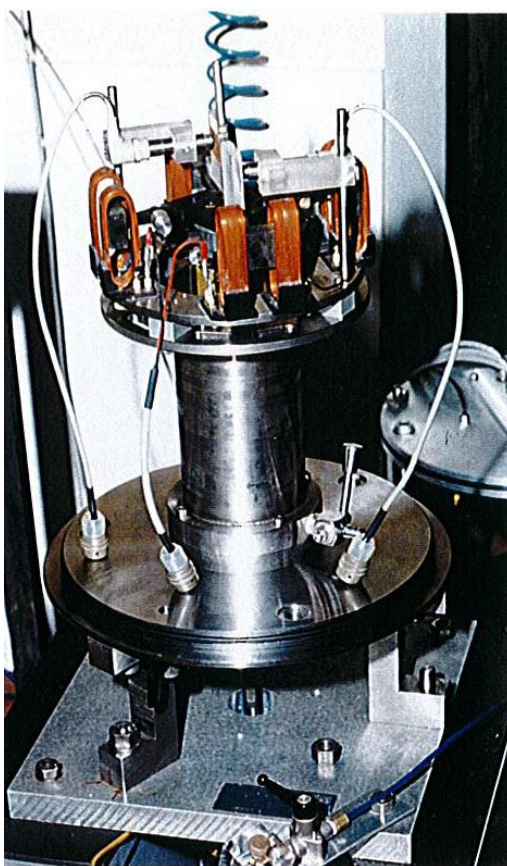
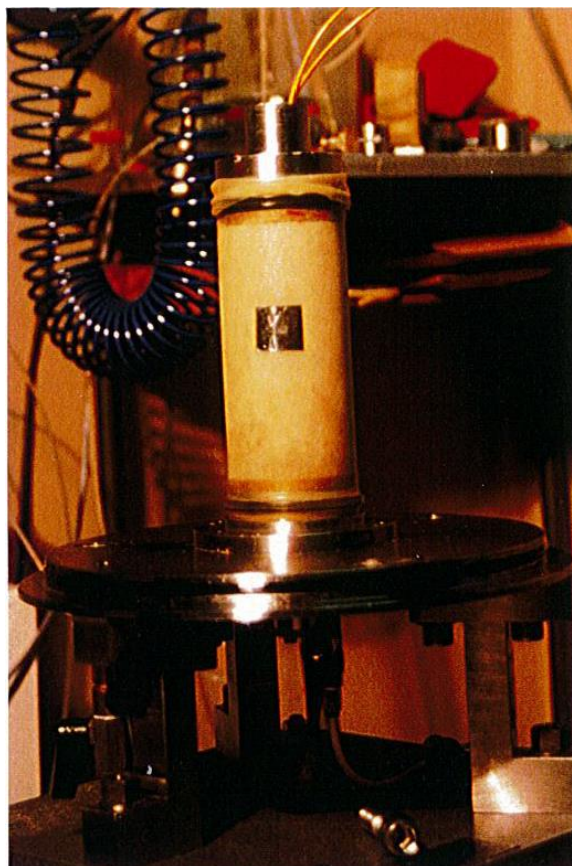


- ⇒ alta risoluzione, affidabilità e ripetibilità a piccole deformazioni
- ⇒ meno affidabile per deformazioni $\gamma > 0.1\%$ (effetti non linearità e N_c)

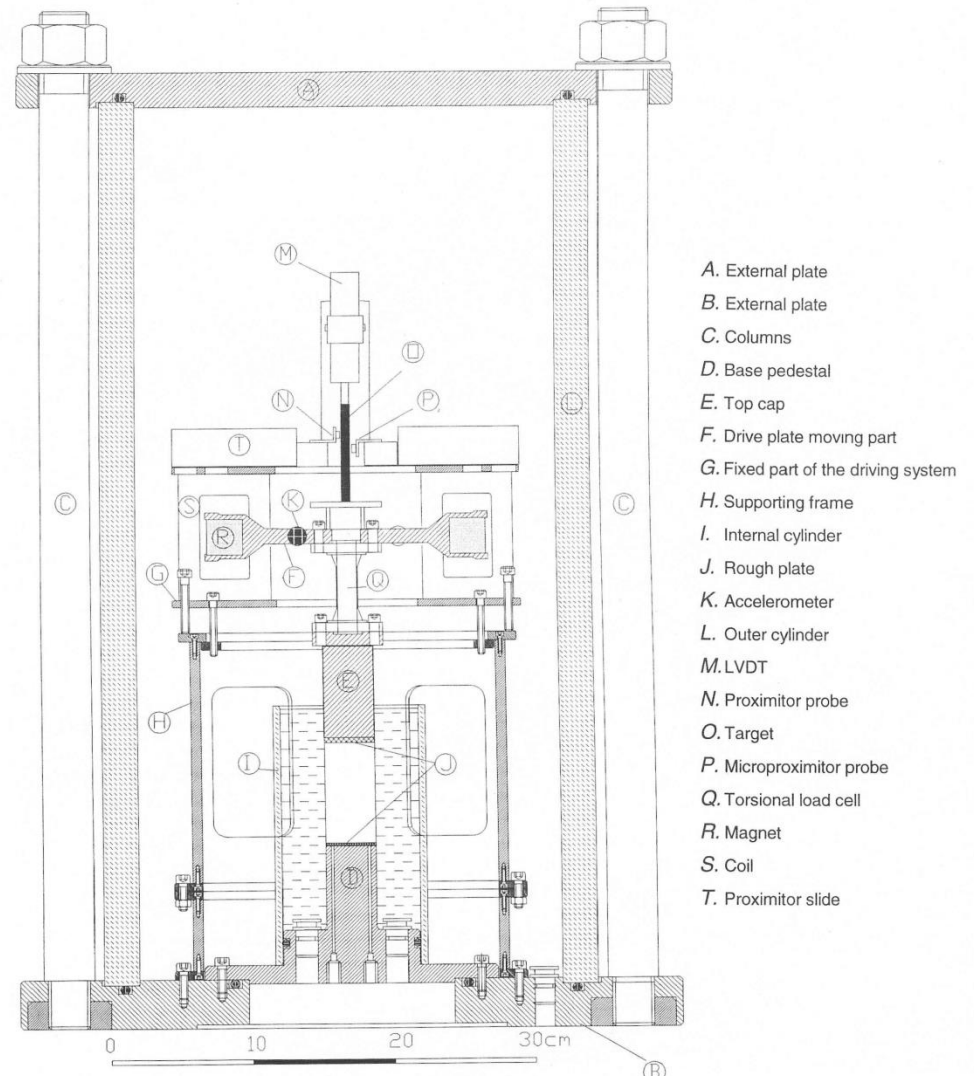
prove CTS-RC: apparecchiature



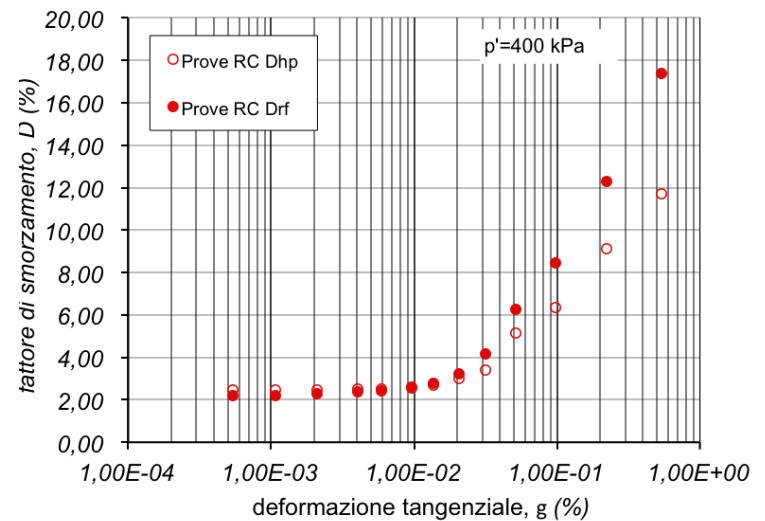
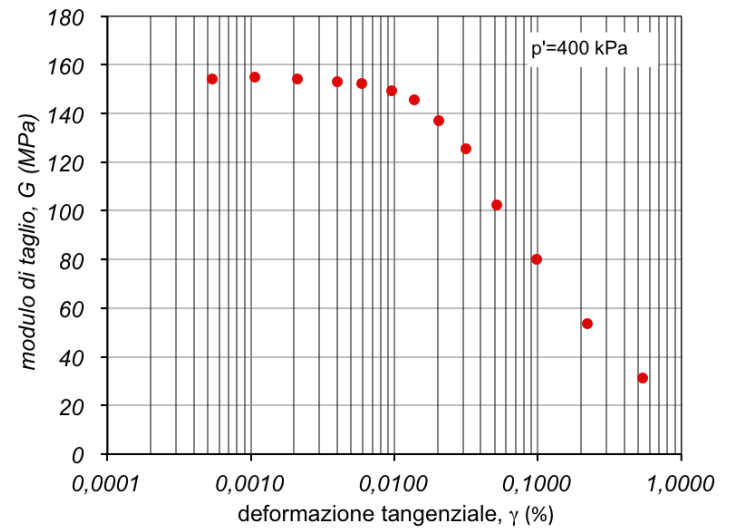
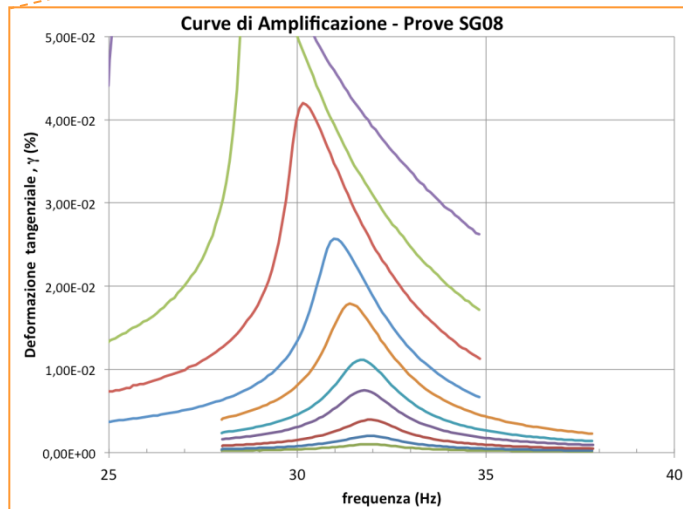
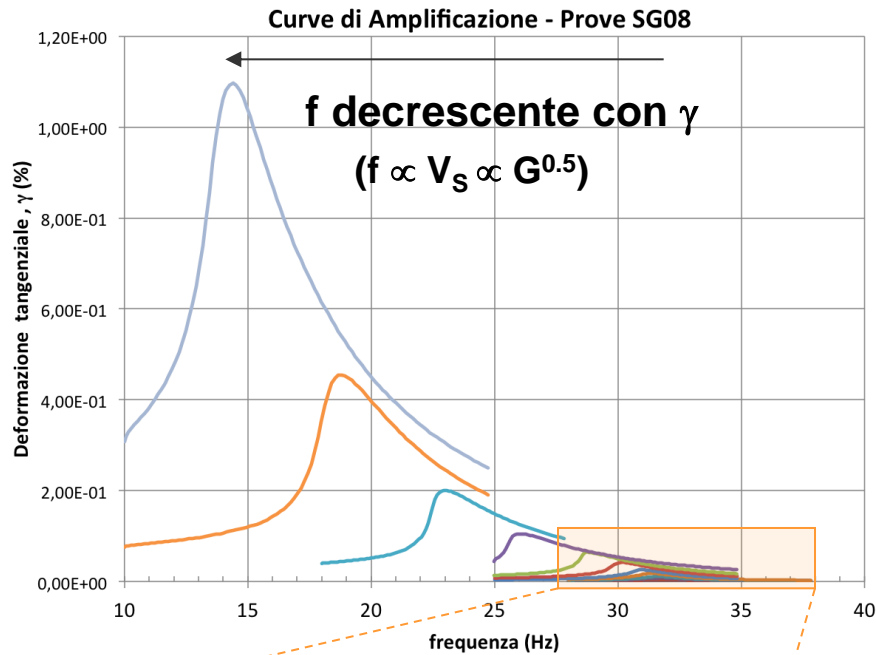
prove CTS-RC: apparecchiature



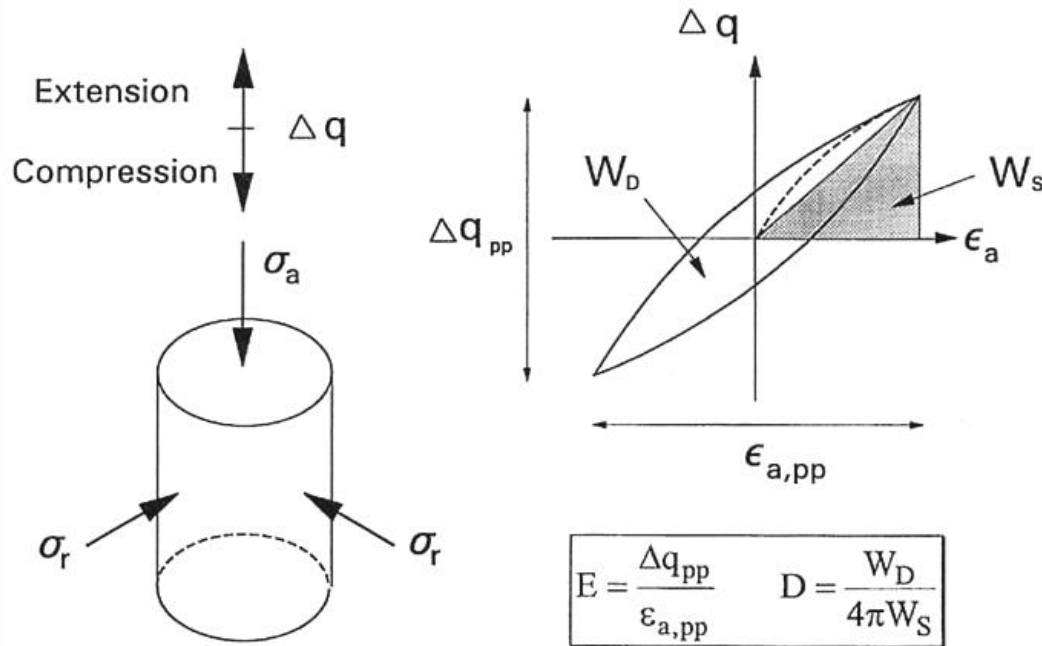
prove CTS-RC: apparecchiature



Prova RC: risultati sperimentali su terreni a grana fine



prova triassiale ciclica (CTX)



tecnica di esecuzione:

cicli di estensione-compressione
è possibile controllare separatamente
pressione di cella σ_r e sforzo assiale σ_a
in modo da riprodurre qualsiasi
percorso di sollecitazione

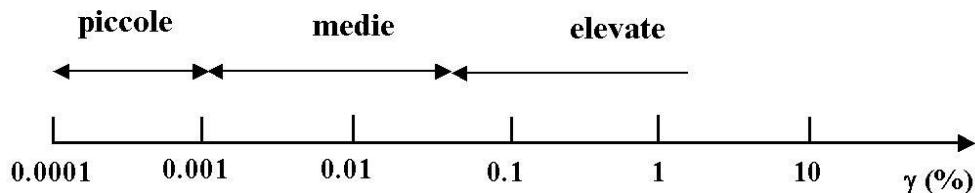
campo di frequenze tipico:

$$f = 0.01-1 \text{ Hz}$$

⇒ preferibile a deformazione controllata

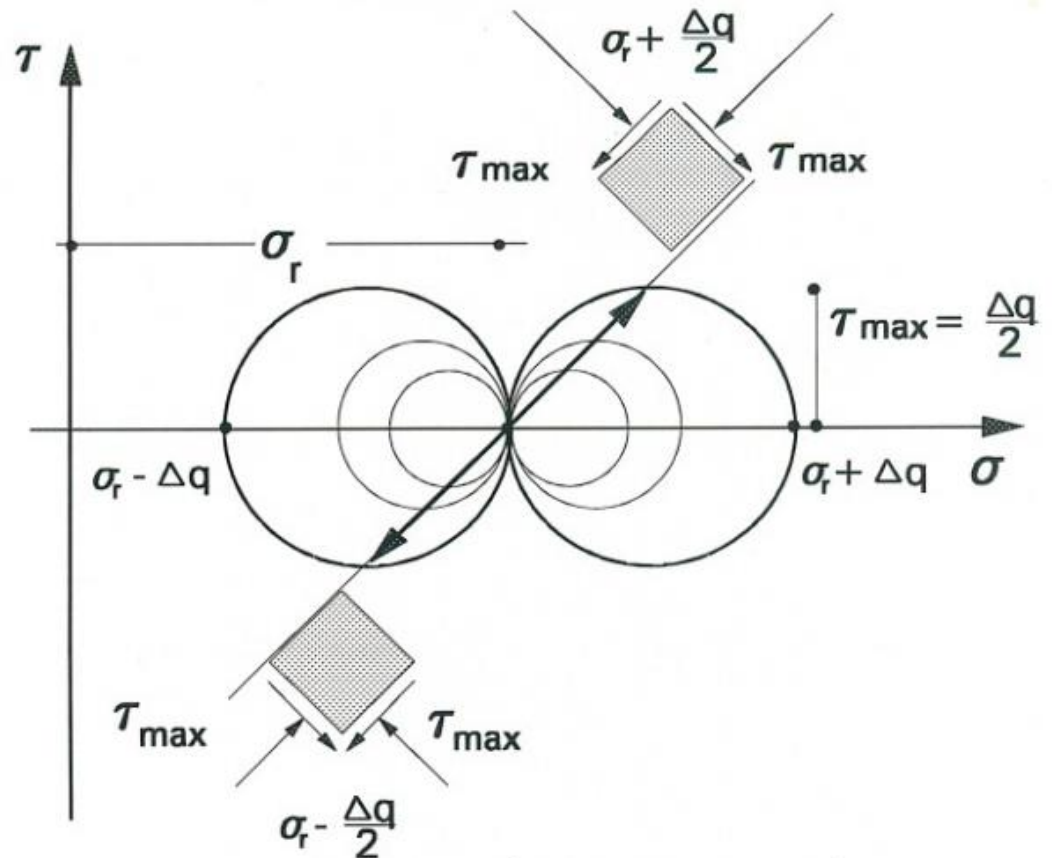
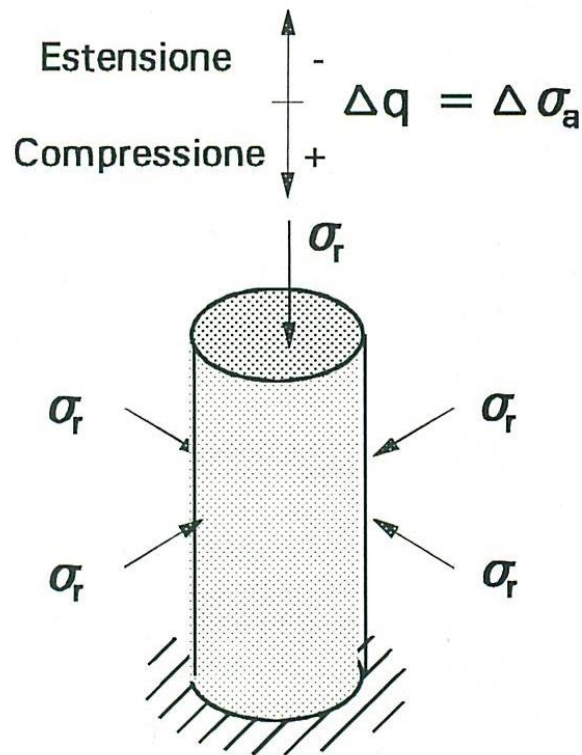
⇒ risultato tipico: rapporto tensionale ciclico (q/σ'_r): N_c

campo di deformazioni investigato:



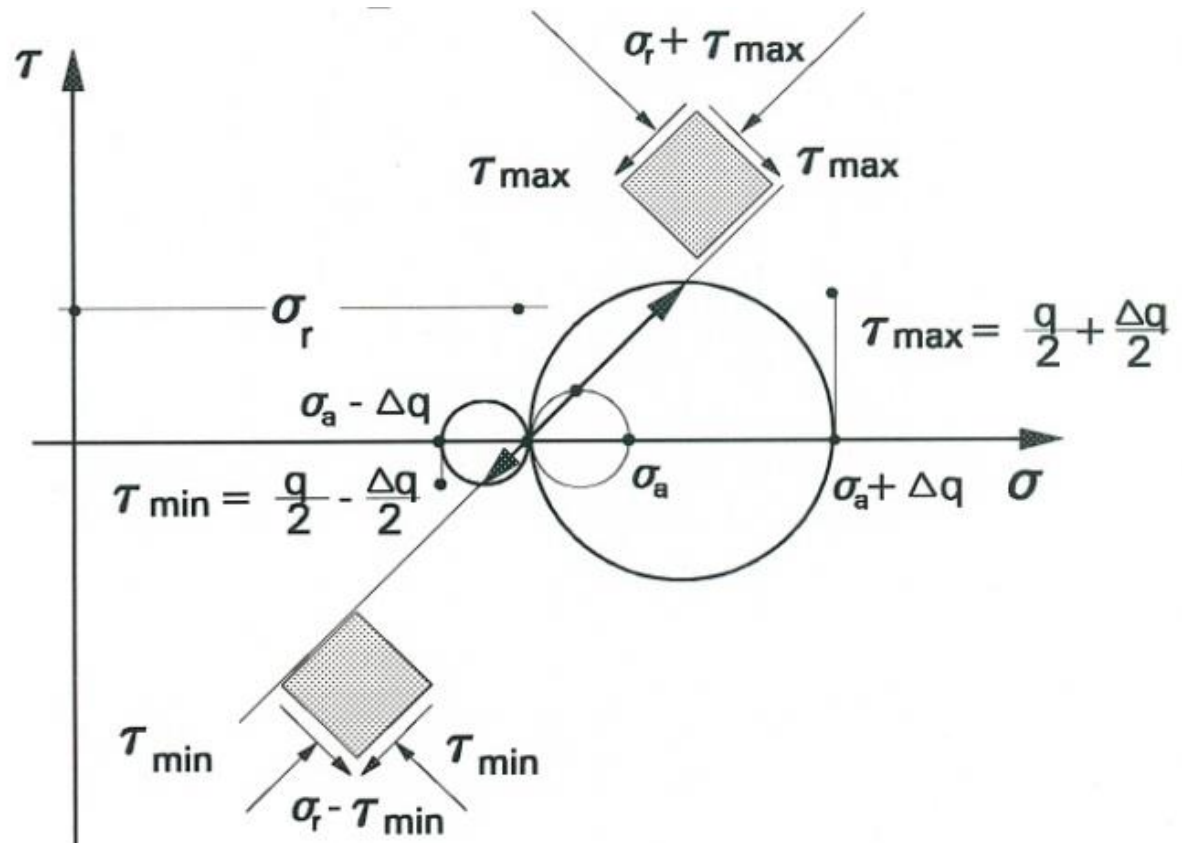
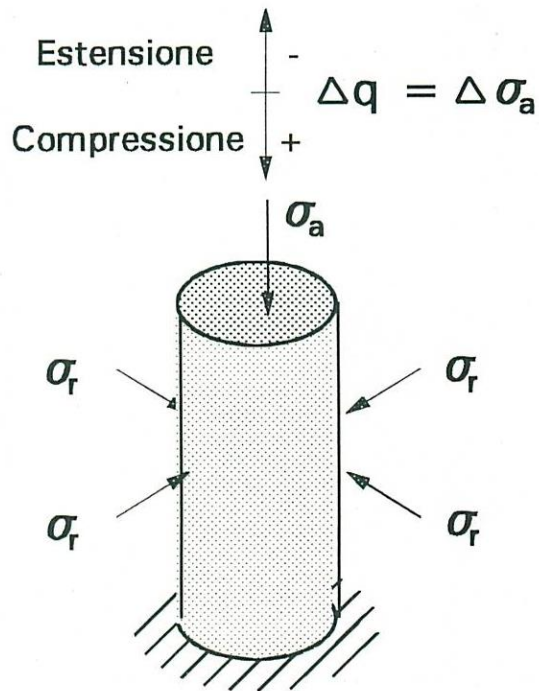
prova triassiale ciclica (CTX)

- stato di tensione efficace iniziale isotropo σ'_r
- deviatore applicato ciclicamente $\pm \Delta q = \pm \Delta \sigma_a$
- tensione di cella costante



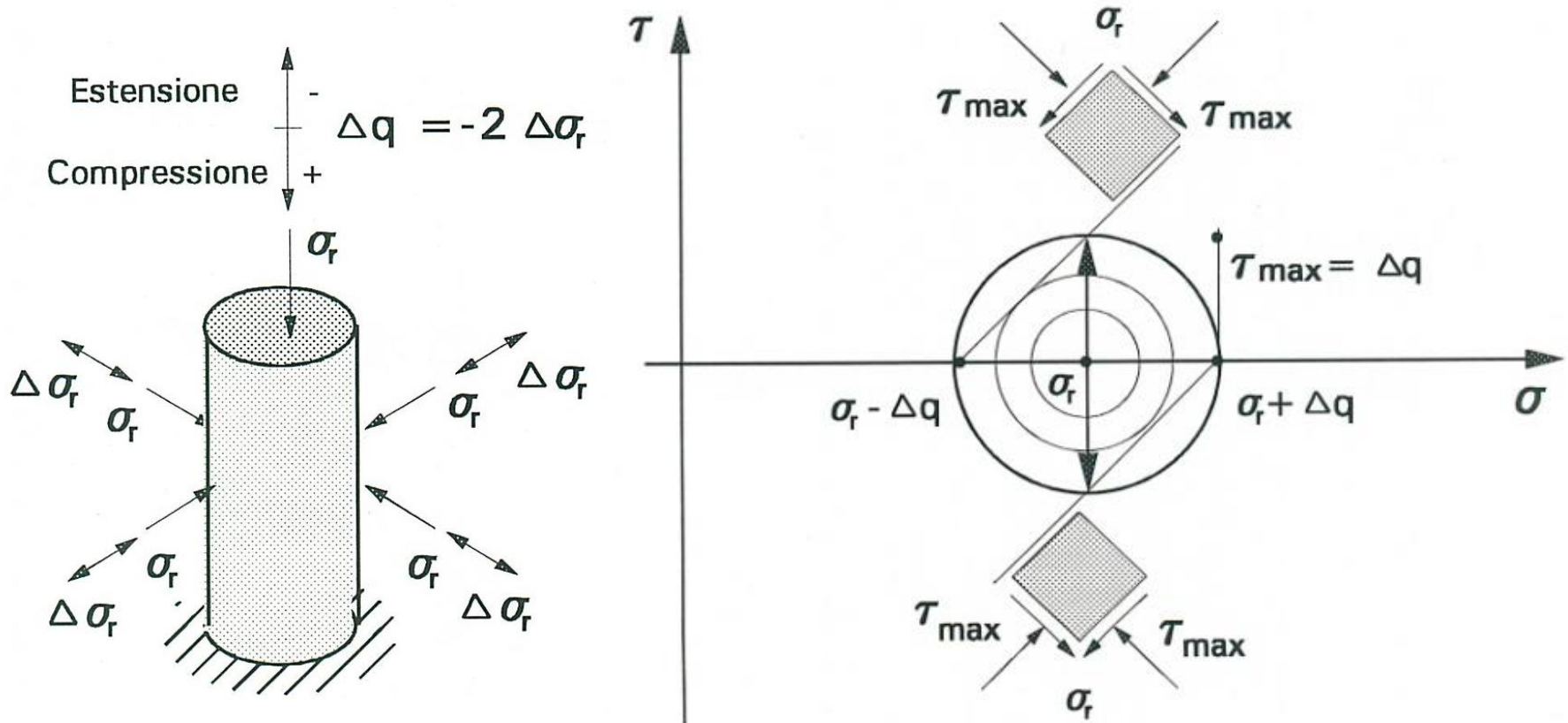
prova triassiale ciclica (CTX)

- stato di tensione efficace iniziale anisotropo σ'_r, σ'_a
- deviatore applicato ciclicamente $\pm \Delta q = \pm \Delta \sigma_a$
- tensione di cella costante

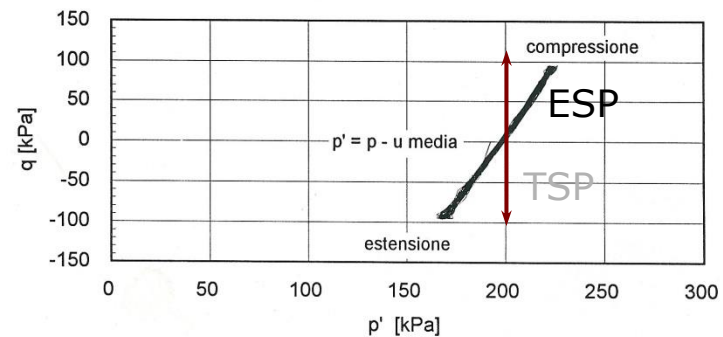
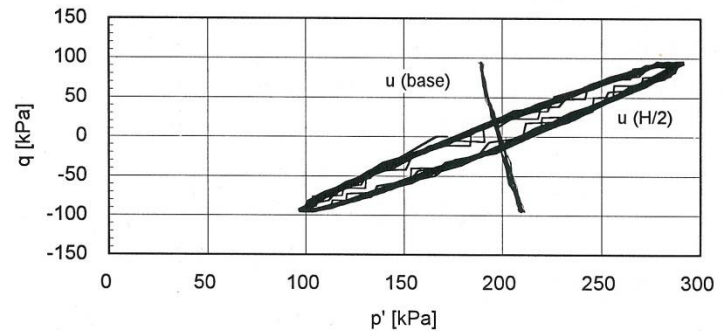
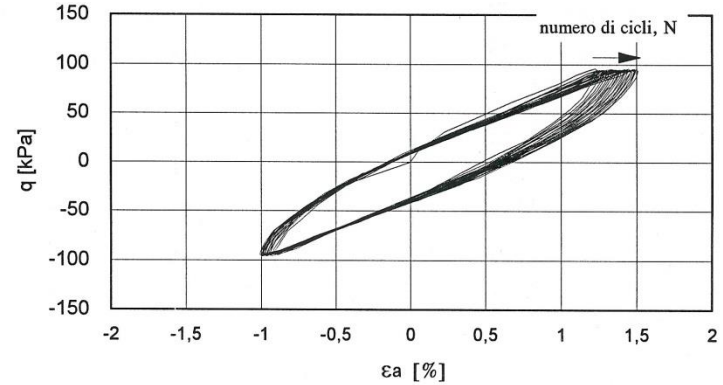
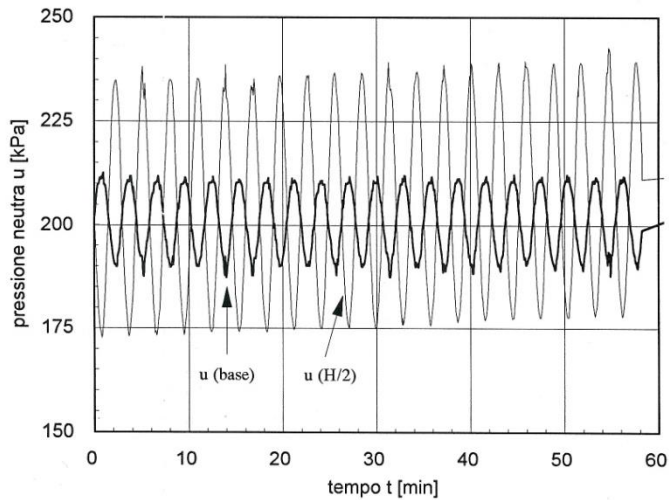
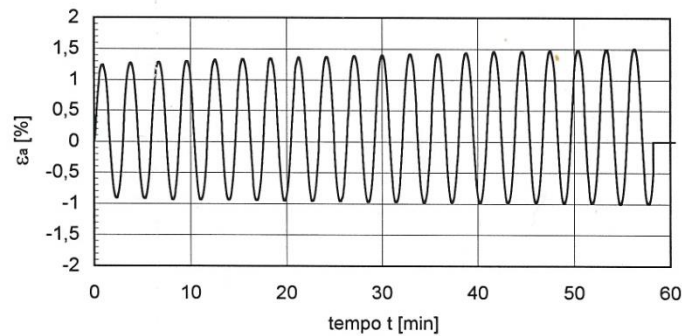
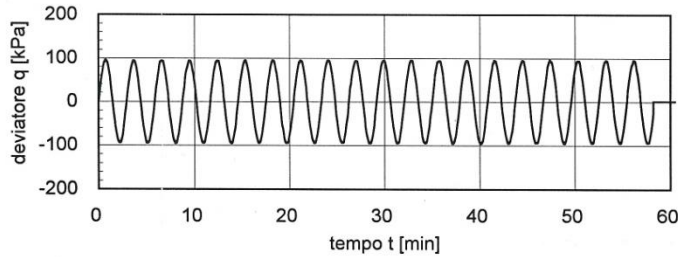


prova triassiale ciclica (CTX)

- stato di tensione efficace iniziale isotropo σ'_r
- deviatore applicato ciclicamente $\Delta q = -2\Delta\sigma_r$
- tensione s' costante



prova CTX non drenata – percorso di carico controllato argilla ricostituita di Bisaccia ($I_p = 100\%$)



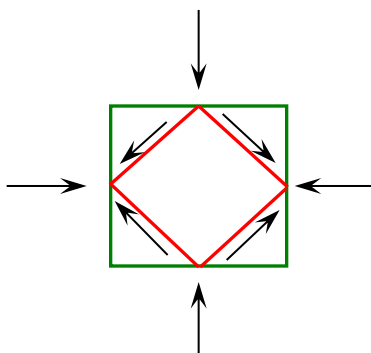
tracce temporali $q(t)$, $\varepsilon_a(t)$, $u(t)$

cicli di isteresi $q:\varepsilon_a$ e percorsi $q:p'$

prova triassiale ciclica (CTX)

note:

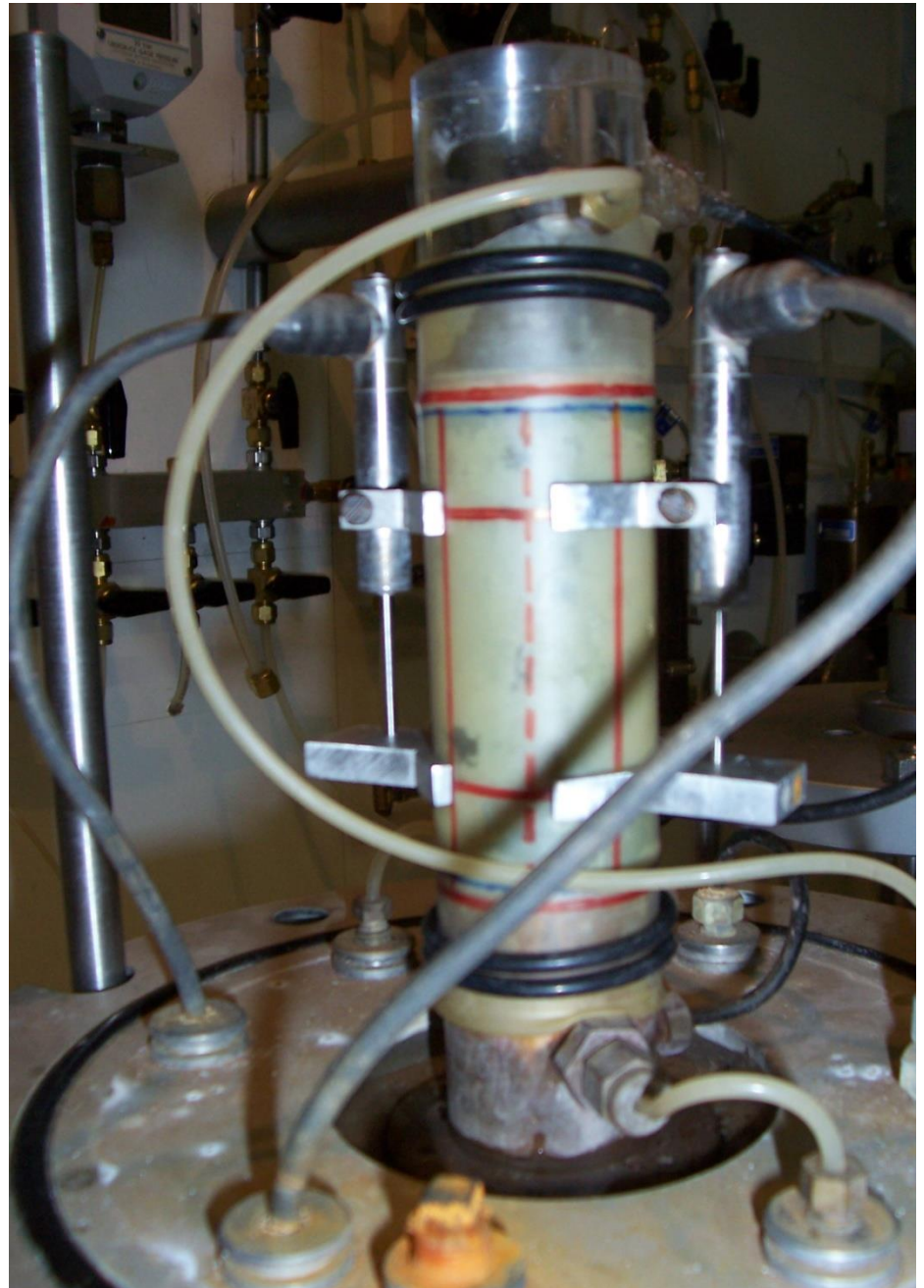
- le direzioni principali di tensione non ruotano
- le giaciture lungo le quali si verificano le tensioni tangenziali massime sono inclinate di 45°
- il modo di deformazione è quindi sostanzialmente diverso da quello relativo alle condizioni di taglio semplice (più simili a ciò che avviene in sito)



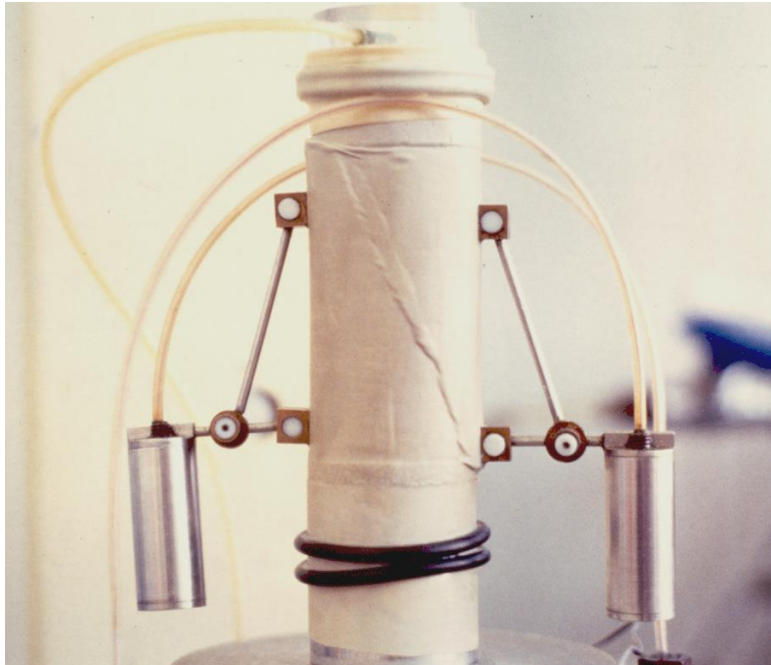
- le deformazioni misurabili con apparecchiature convenzionali sono $> 0.1 \%$
- con traduttori locali si possono misurare deformazioni di circa 0.001%
- in una prova triassiale si possono raggiungere deformazioni molto maggiori di quelle ottenibili in condizioni di taglio semplice
- le prove triassiali possono quindi essere utilizzate per caratterizzare la resistenza in condizioni cicliche e per lo studio di fenomeni di liquefazione di terreni incoerenti saturi

**cella triassiale strumentata
con trasduttori di
spostamento locali**

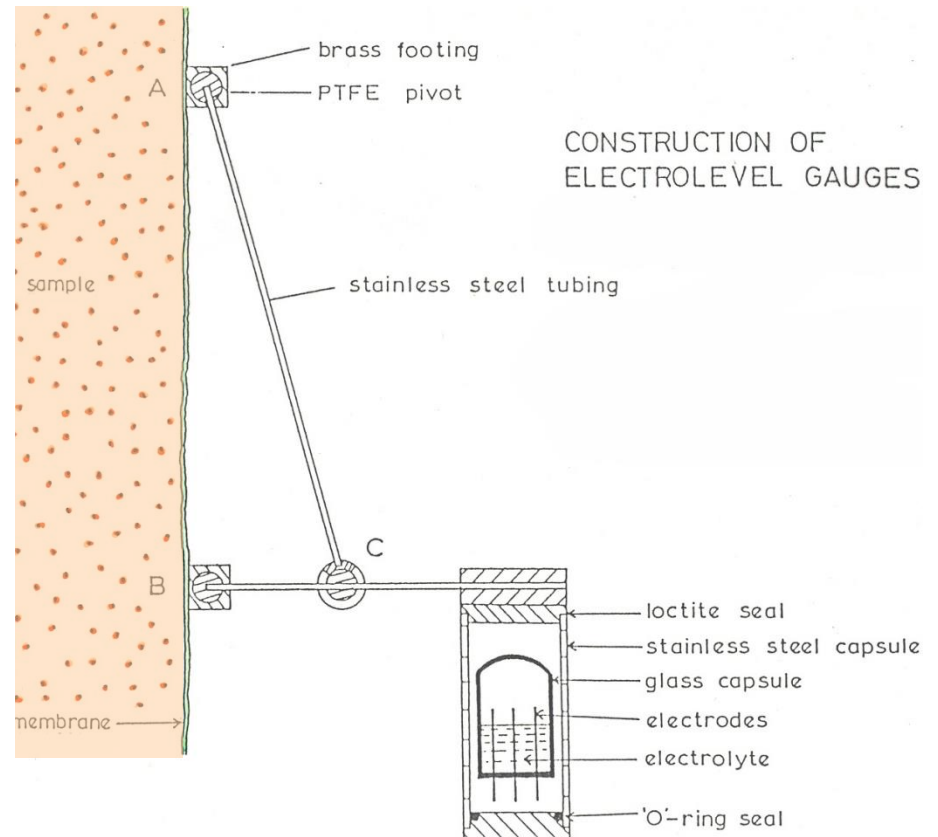
(risoluzione ε fino a 0.001 %)



misure locali di deformazione

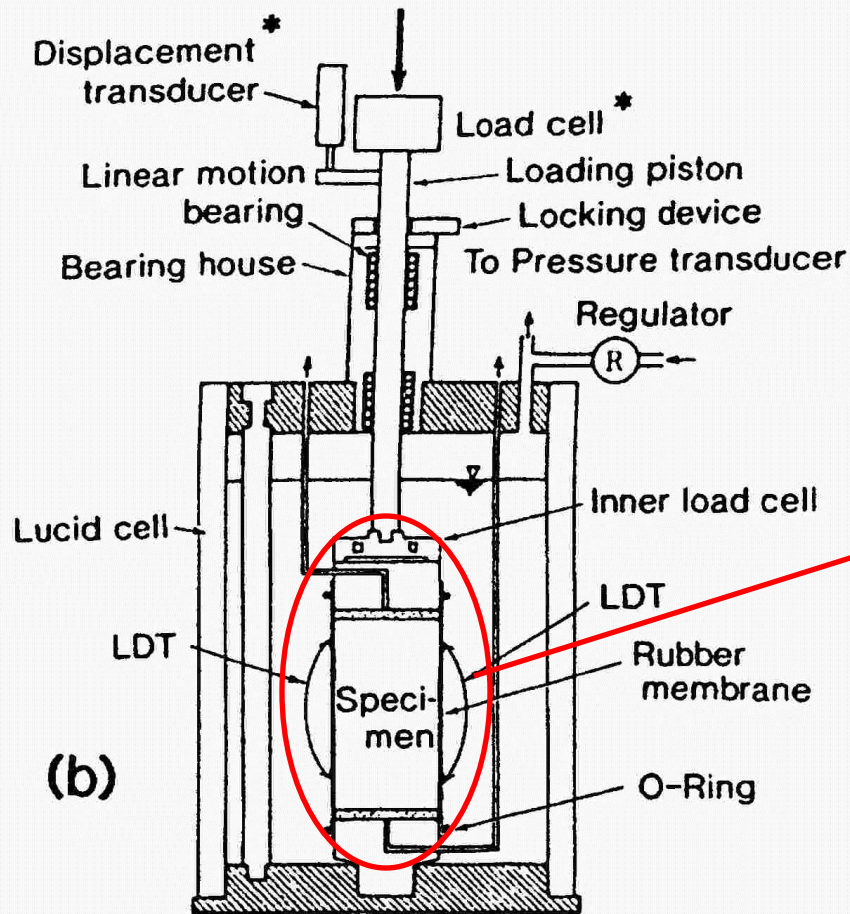


Rampello (1989)

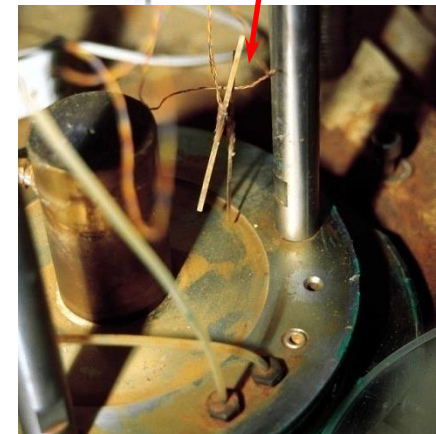
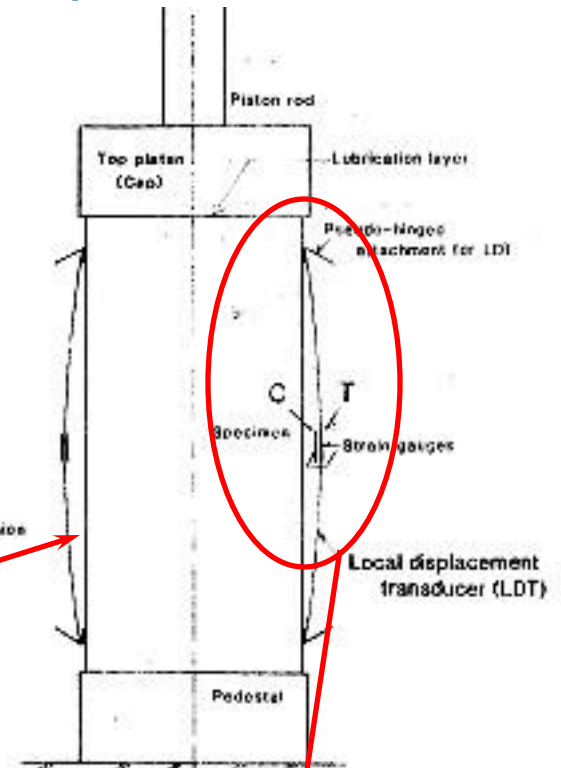
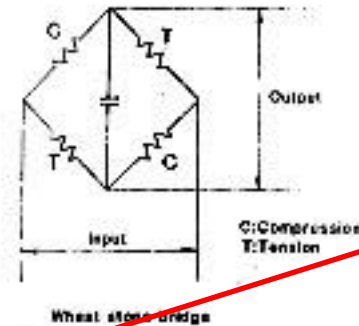


Burland e Symes (1982)

cella triassiale strumentata con trasduttori di spostamento locali (risoluzione ϵ fino a 0.001 %)



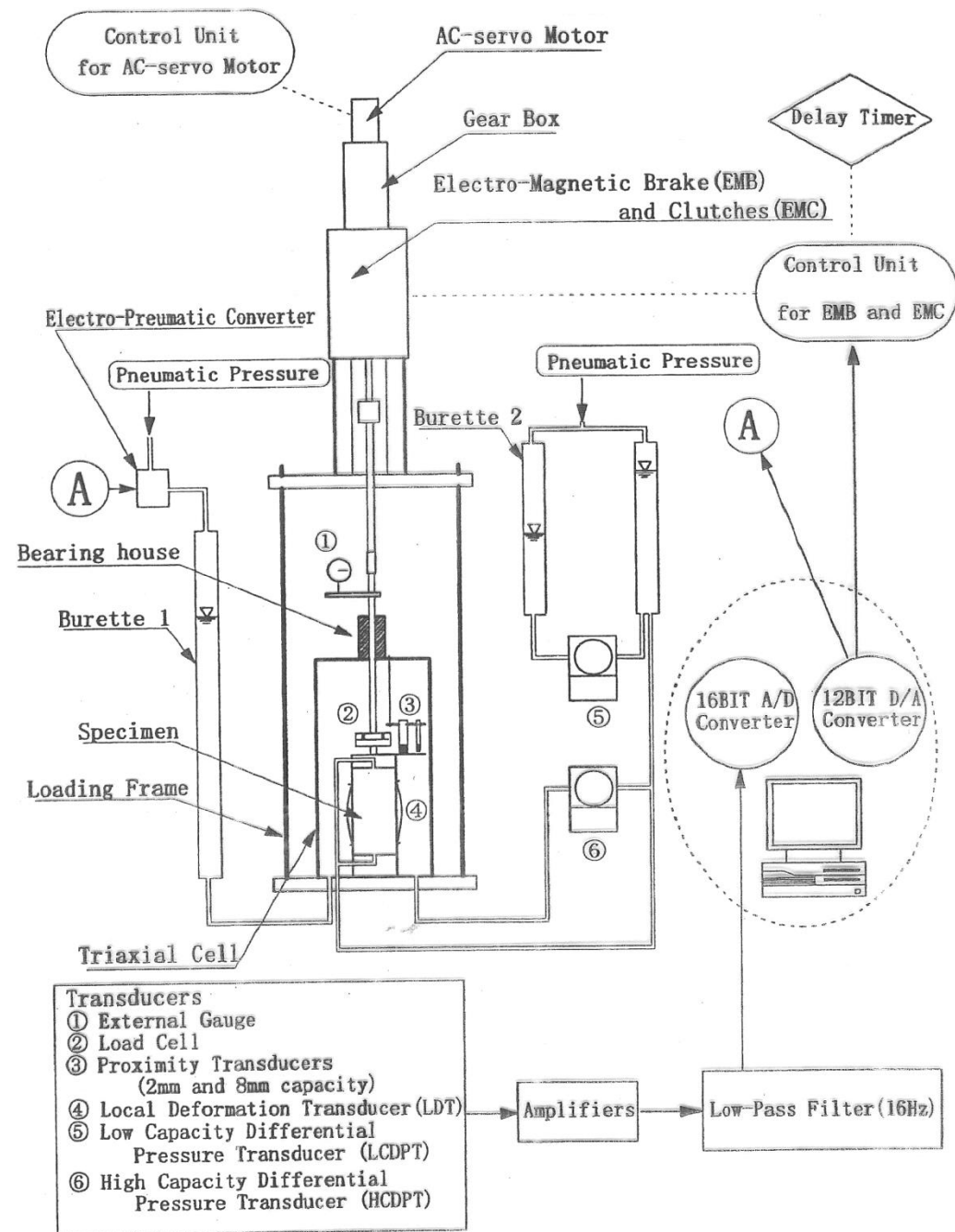
(* used for monitoring, and can be omitted)



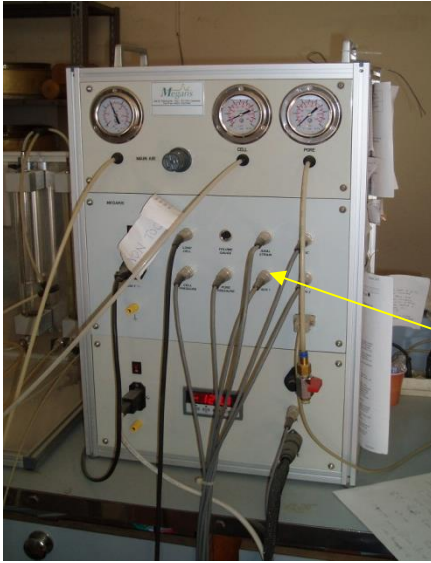
prova CTX: apparecchiature



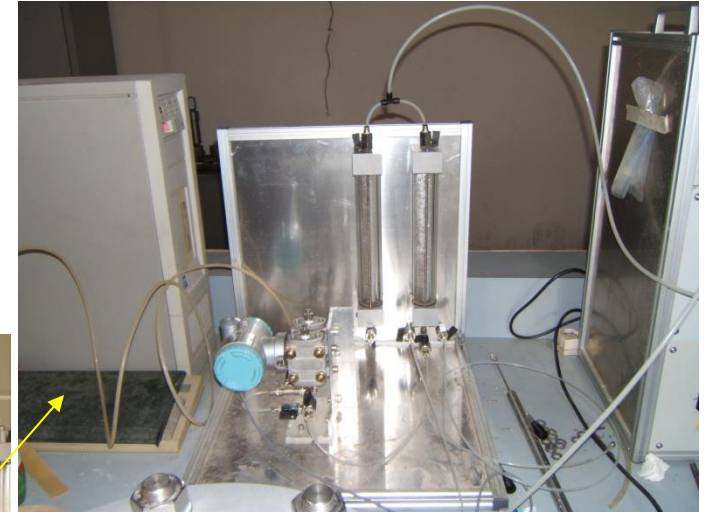
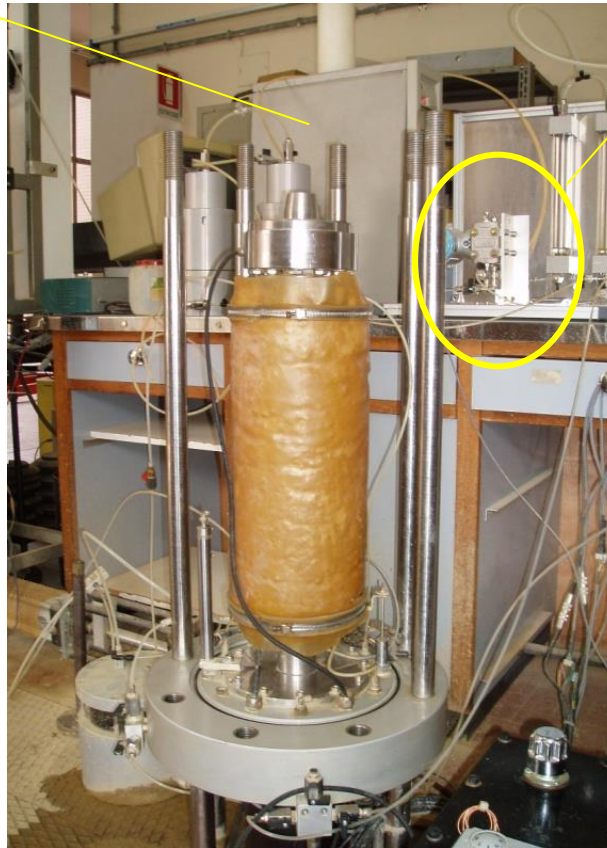
Cella dell'IIS-Tokyo (Università di Napoli)



Prova CTX: apparecchiature per terreni a grana grossa

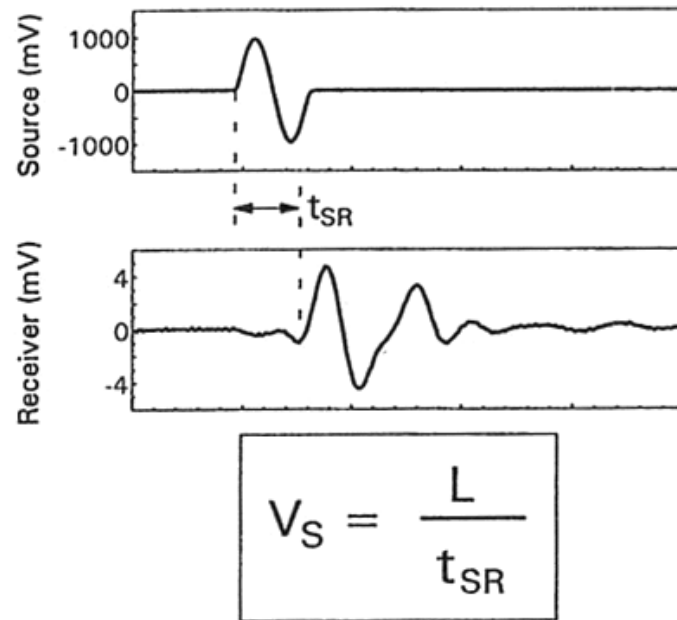
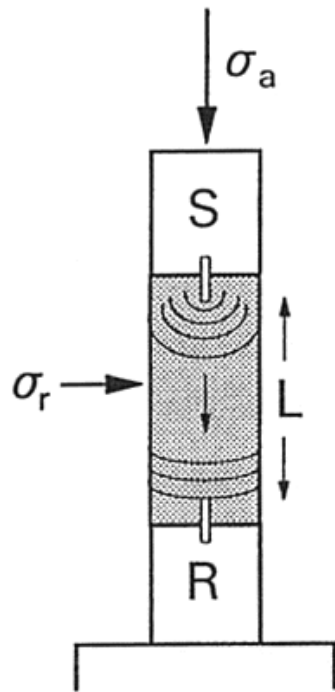


pannello di controllo pressioni



misura variazioni di volume

prova con *Bender Elements* (BE)



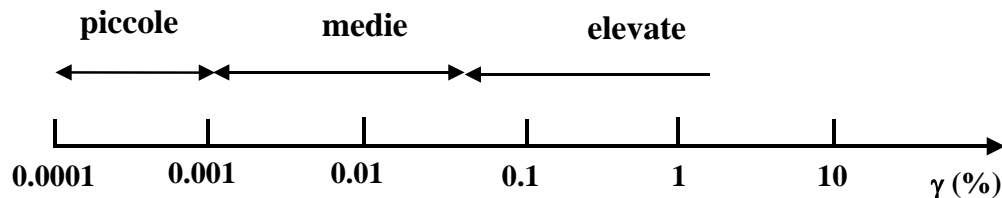
tecnica di esecuzione:

trasduttori piezoceramici
sorgente (S) e ricevitore (R)
inseriti in testa e base provino
eccitati da impulsi elettrici
con deformazione flessionale

campo di frequenze tipico:

f > 100 Hz

campo di deformazioni investigato:



- ⇒ installati in apparecchiature per prove statiche (p.es. TX)
- ⇒ adoperati per terreni granulari e fini
- ⇒ misurabili solo parametri a basse deformazioni
- ⇒ raccomandata analisi nel dominio delle frequenze

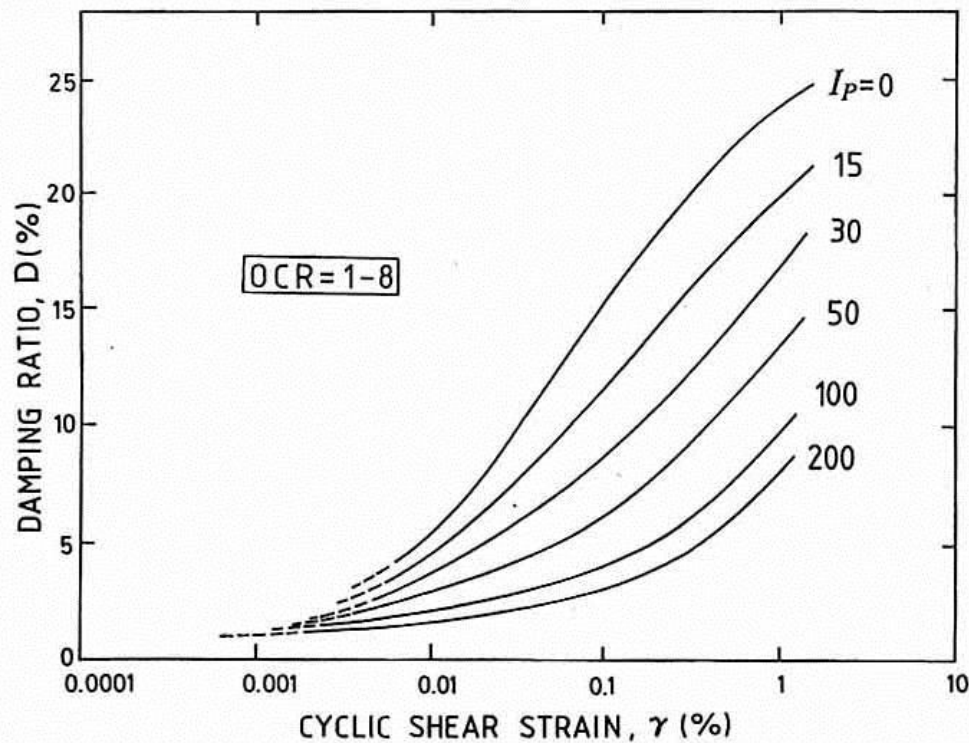
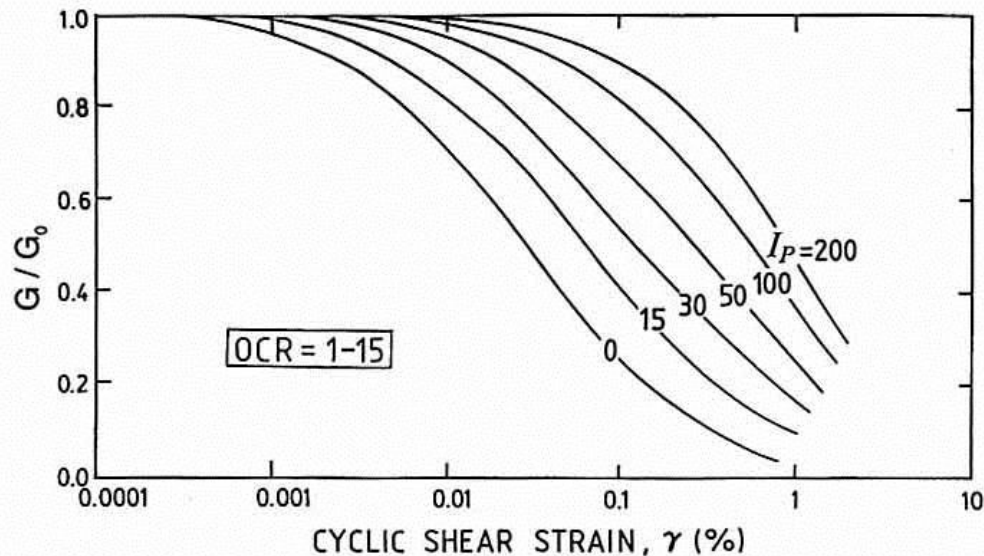
risultati sperimentali

- curve di decadimento della rigidezza normalizzate $G/G_0 - \gamma$
- curve di incremento dello smorzamento $D - \gamma$

dipendono da I_p

in subordine:

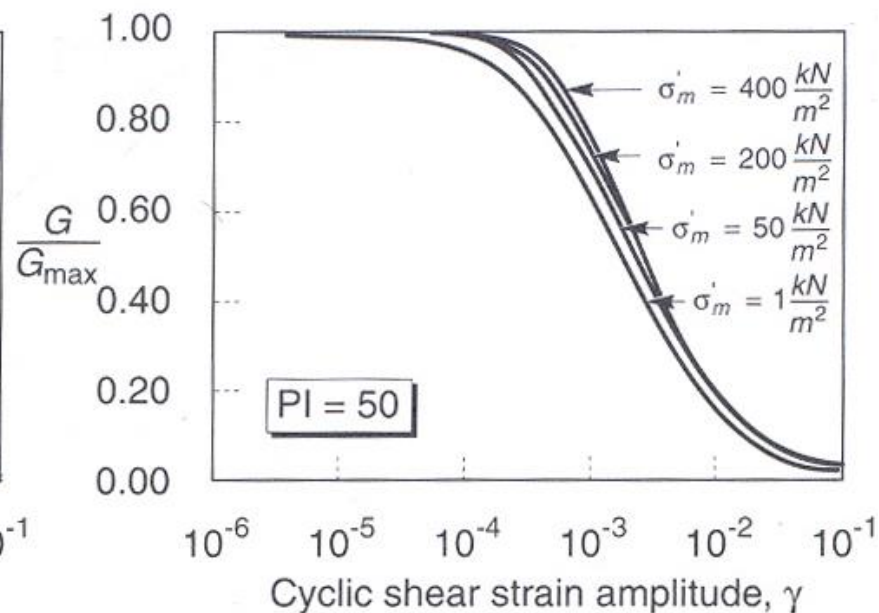
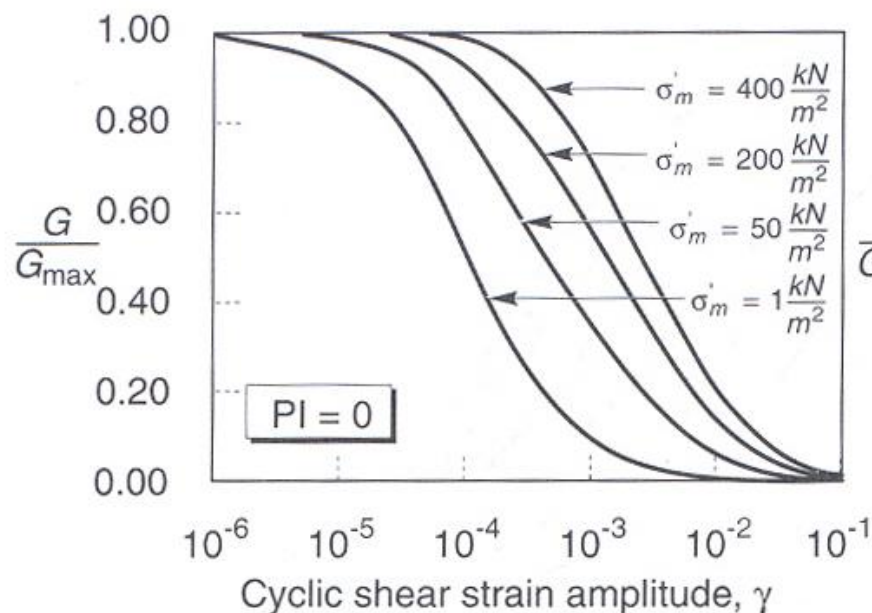
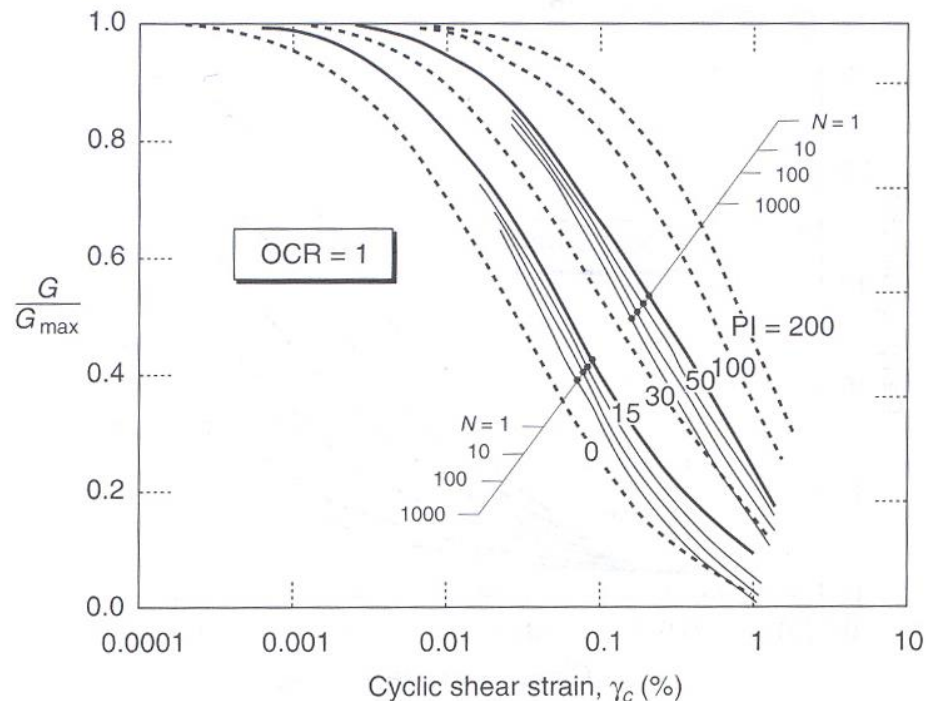
- dallo stato tensionale efficace di confinamento
 - dal numero di cicli
 - dal grado di sovraconsolidazione
-
- per le sabbie si può utilizzare la curva con $I_p = 0$



risultati sperimentali

se c'è degradazione G/G_0 diminuisce al crescere del numero di cicli

- decadimento più rapido a basse tensioni efficaci
- effetto più marcato in terreni granulari ($I_p = 0$)



Il comportamento dinamico dei terreni

Laboratorio di Geotecnica

Università degli Studi di Enna “Kore”

Enna, 20-21 giugno 2013



Prove di laboratorio

Tecniche sperimentali e risultati tipici

Ernesto Cascone

DICIEAMA - Università di Messina