



# 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

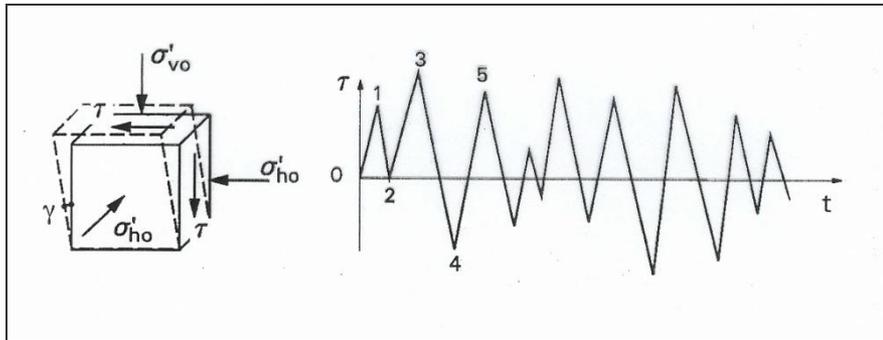
Ernesto Cascone

DICIEAMA - Università di Messina

# introduzione

- aspetti fondamentali del comportamento meccanico:
  - rigidezza (iniziale)
  - non linearità (degradamento)
  - capacità di dissipare energia (smorzamento)
- condizioni:
  - cicliche → frequenze: 0.01 – 1 Hz ( $T = 100 - 1$  s)  
numero di cicli: 10-100
  - dinamiche → frequenze: 10 – 100 Hz ( $T = 0.1 - 0.01$  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

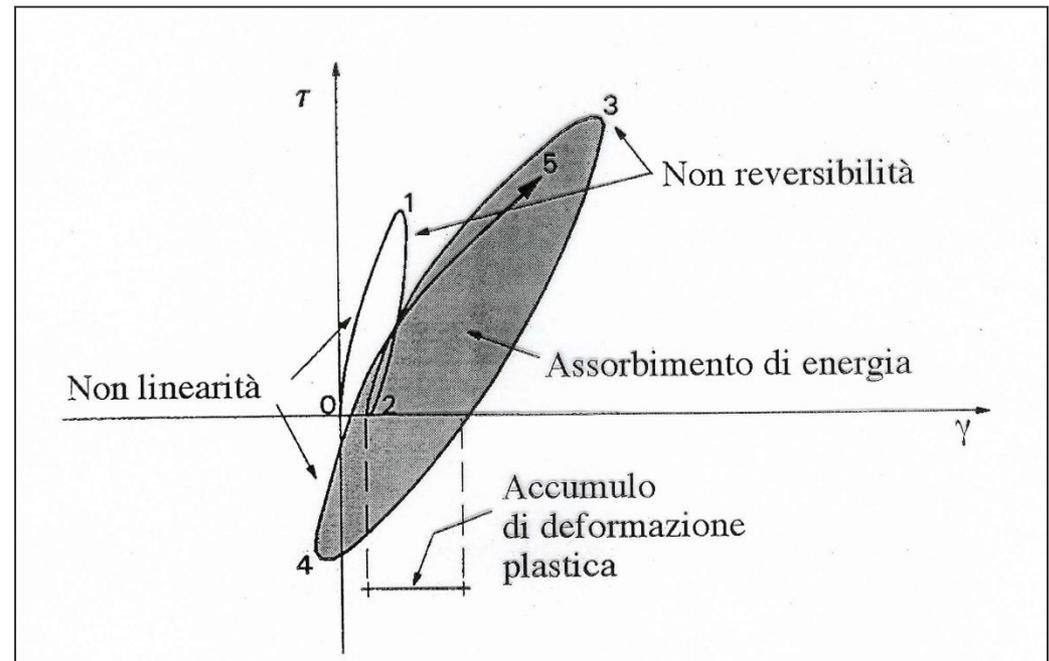


stati di interesse:

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

comportamento osservato:

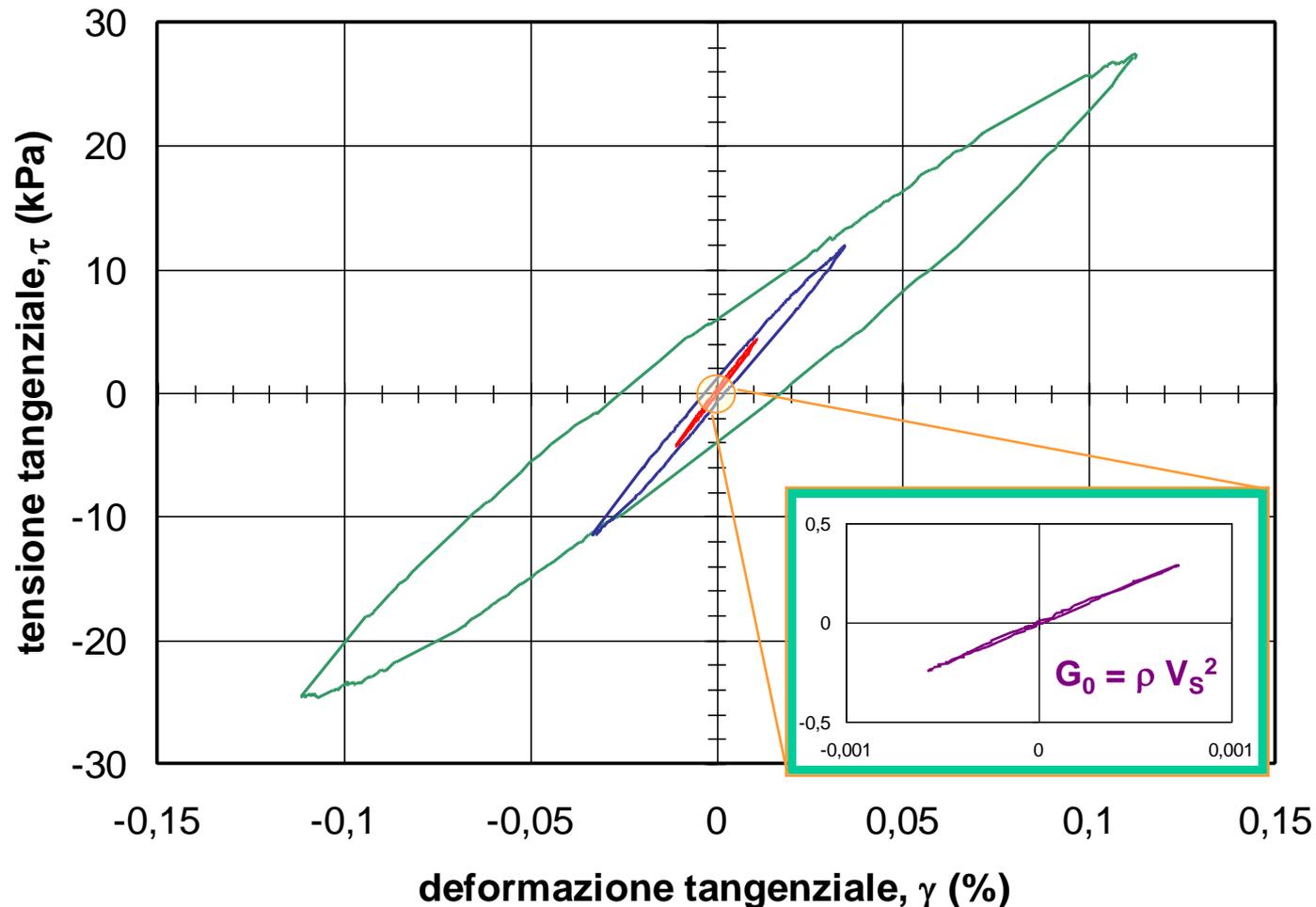
- non linearità
  - non reversibilità
- 
- dissipazione di energia
  - deformazioni residue



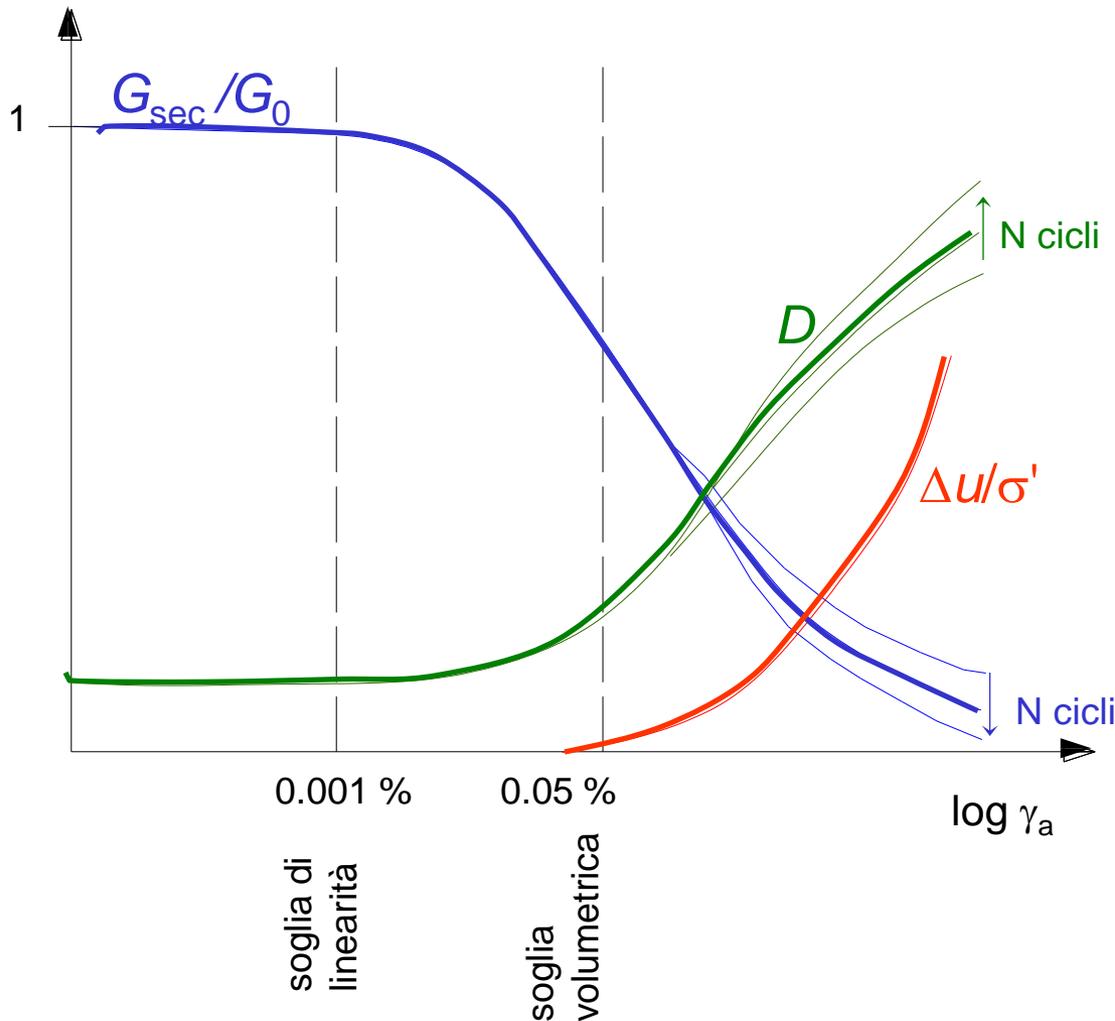
# Evidenza sperimentale della natura del legame $\tau$ - $\gamma$

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

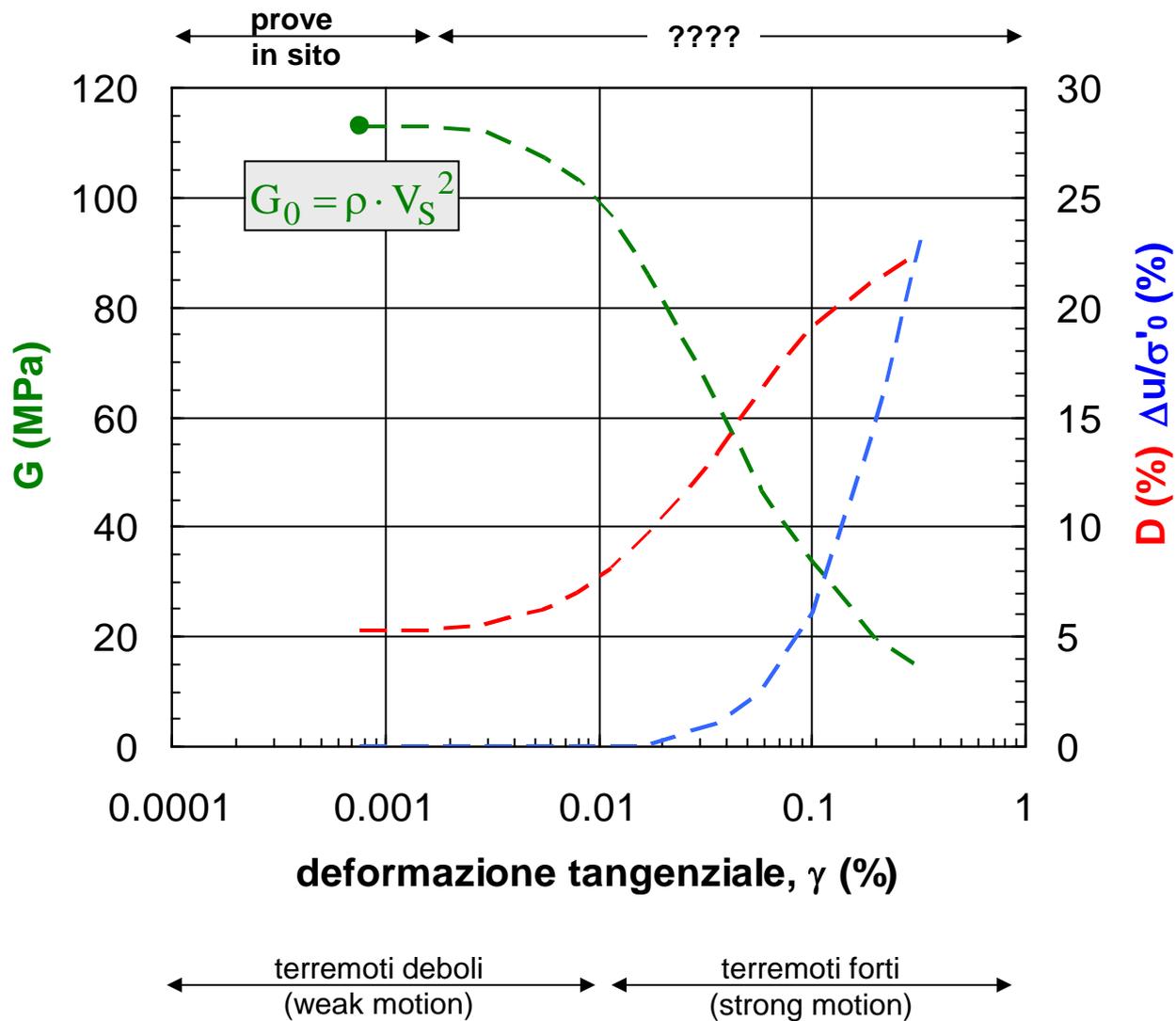


$\gamma < \gamma_l$   
comportamento lineare

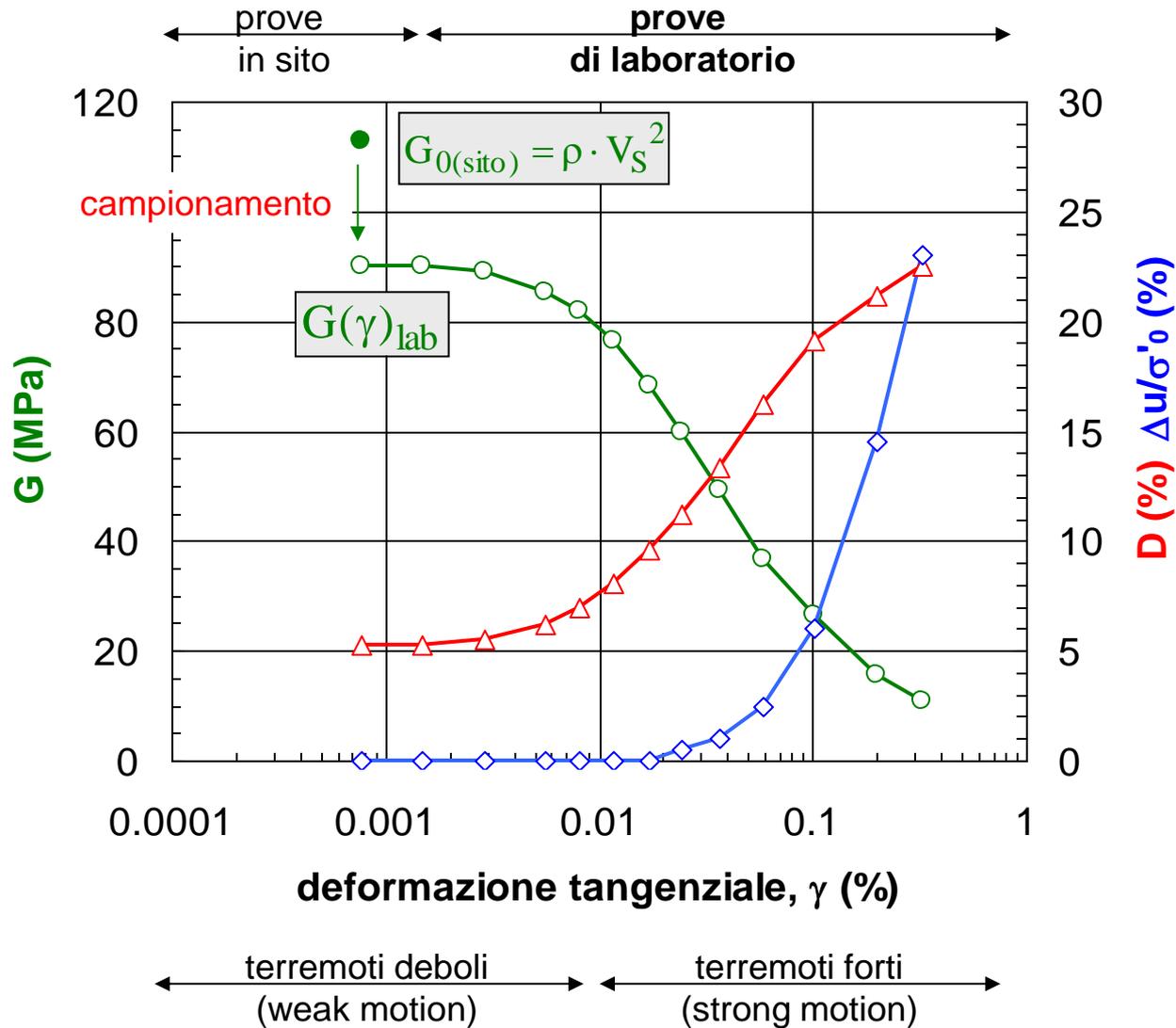
$\gamma_l < \gamma < \gamma_v$   
comportamento isteretico:  
 $G$  diminuisce,  $D$  aumenta  
senza degradazione  
(comportamento indipendente  
da numero cicli  $N$ )

$\gamma > \gamma_v$   
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

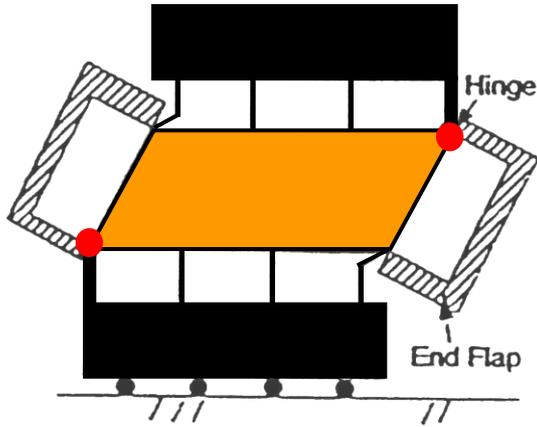
Categorie di prova		Tipo di prova	Stato tensionale	Deformazione $\gamma$ [%]	Frequenza $f$ [Hz]	Rigidezza	Smorzamento	Resistenza G      F
Laboratorio	Cicliche	Triassiale	Simmetria radiale	$>10^{-2}$	0.01-1	$q:\epsilon_a \rightarrow E \rightarrow G$	$W_D/W_S \rightarrow D$	$q/\sigma'_r : N_c$
		Taglio 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

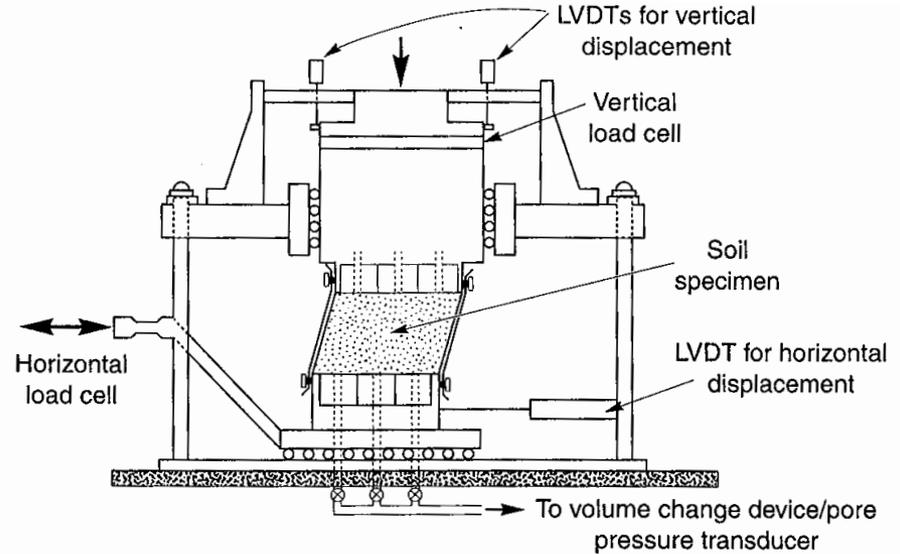
## cella tipo Cambridge

provino prismatico  
contorni rigidi



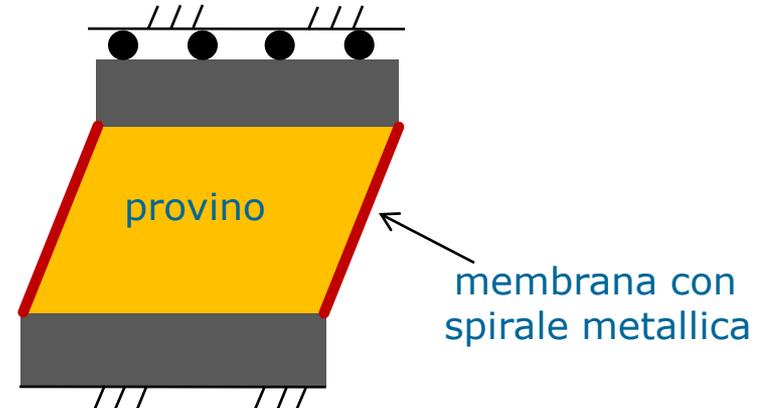
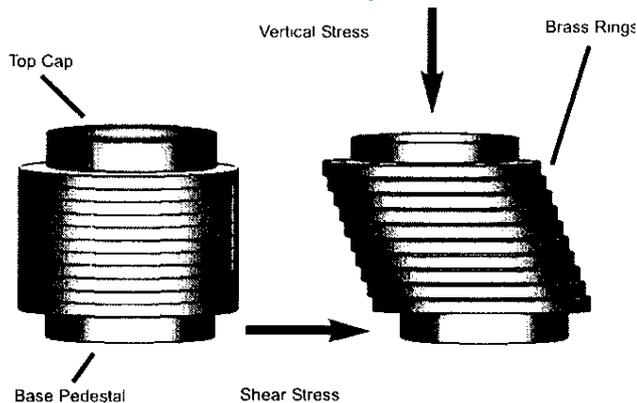
## cella tipo NGI

provino cilindrico  
membrana con spirale metallica

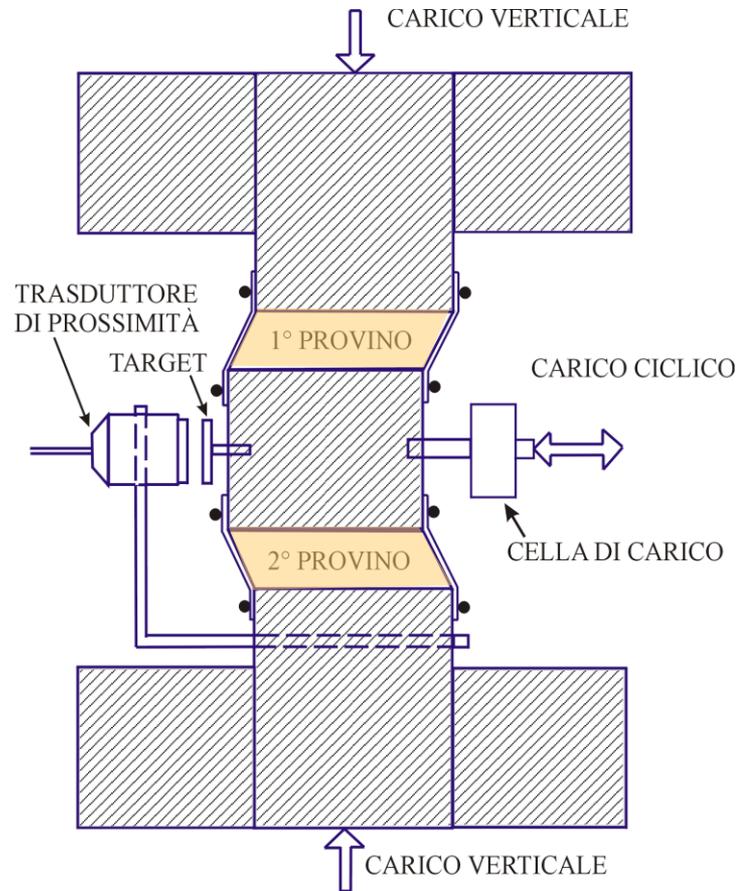


## cella tipo SGI

provino cilindrico  
contenuto in una pila di anelli

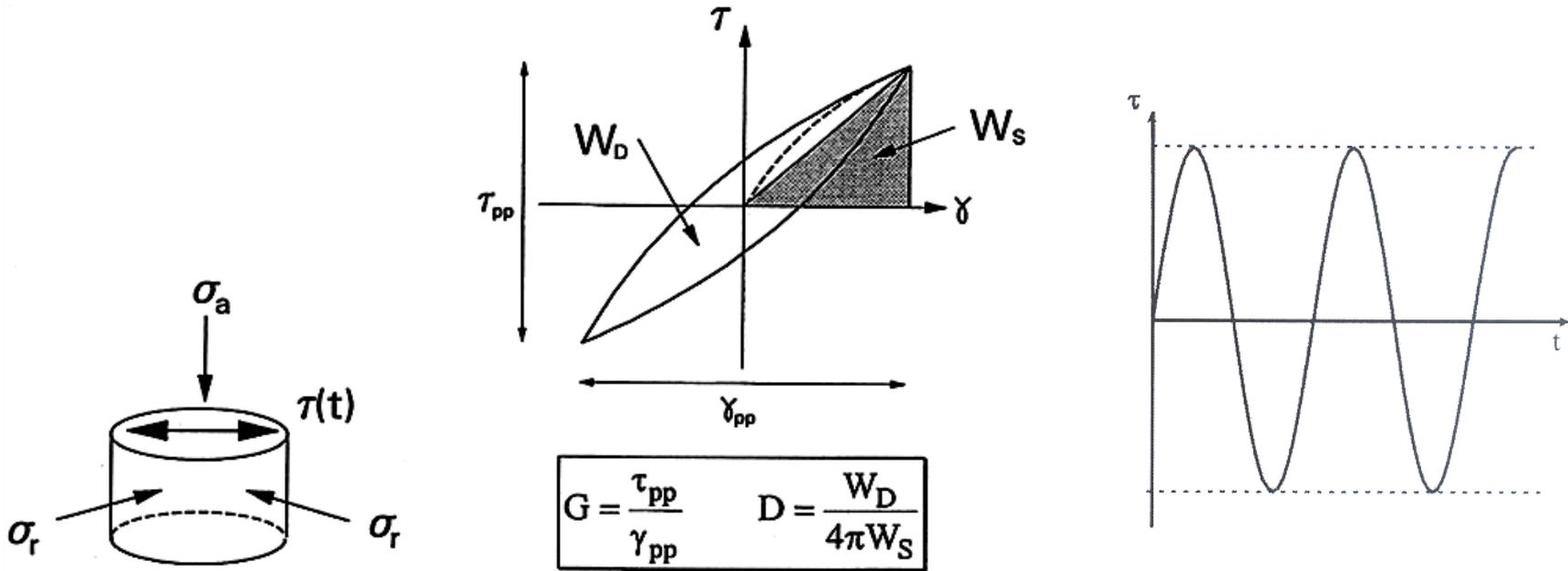


# prova CSS: apparecchiature

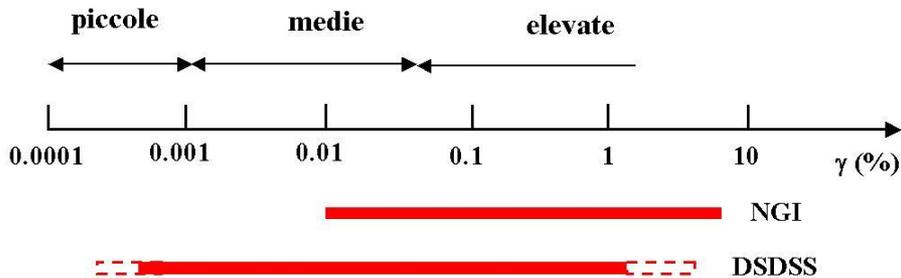


**cella tipo UCLA con doppio provino (DSDSS):**  
(in dotazione all'Università di Roma La Sapienza)

# prova di taglio semplice ciclico (CSS)



## campo di deformazioni investigato:

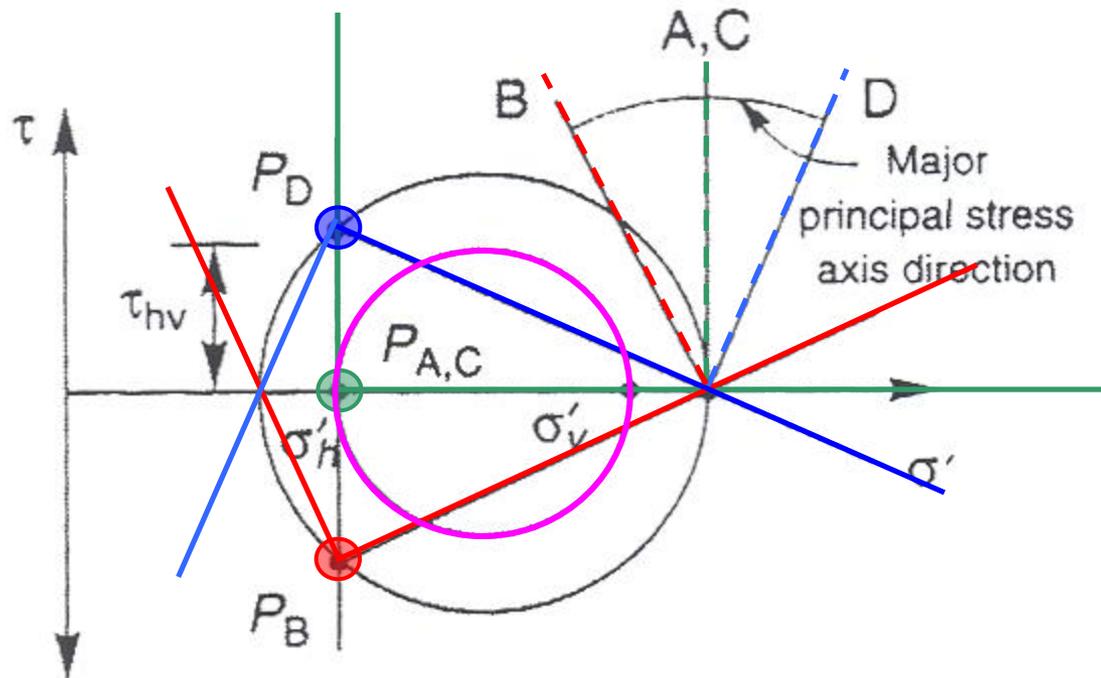
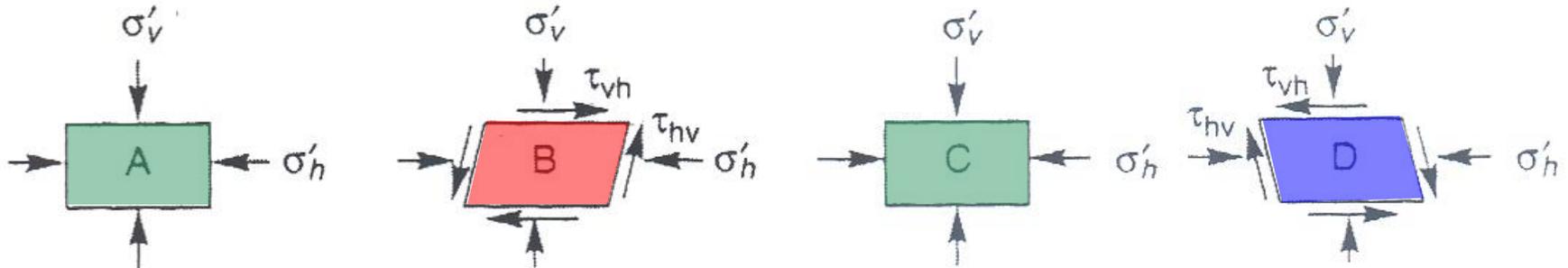


cicli di sforzi di taglio semplice simmetrici

## campo di frequenze tipico:

**f = 0.01-1 Hz**

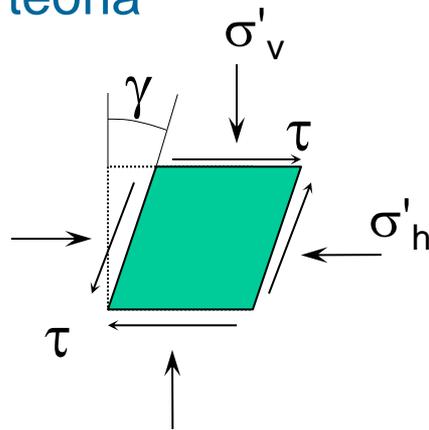
# prova di taglio semplice ciclico (CSS)



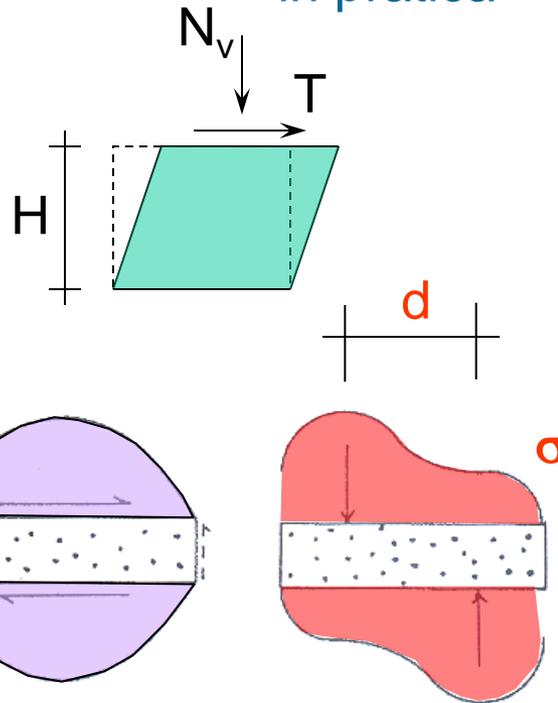
rotazione delle direzioni principali

# prova di taglio semplice ciclico (CSS)

in teoria



in pratica

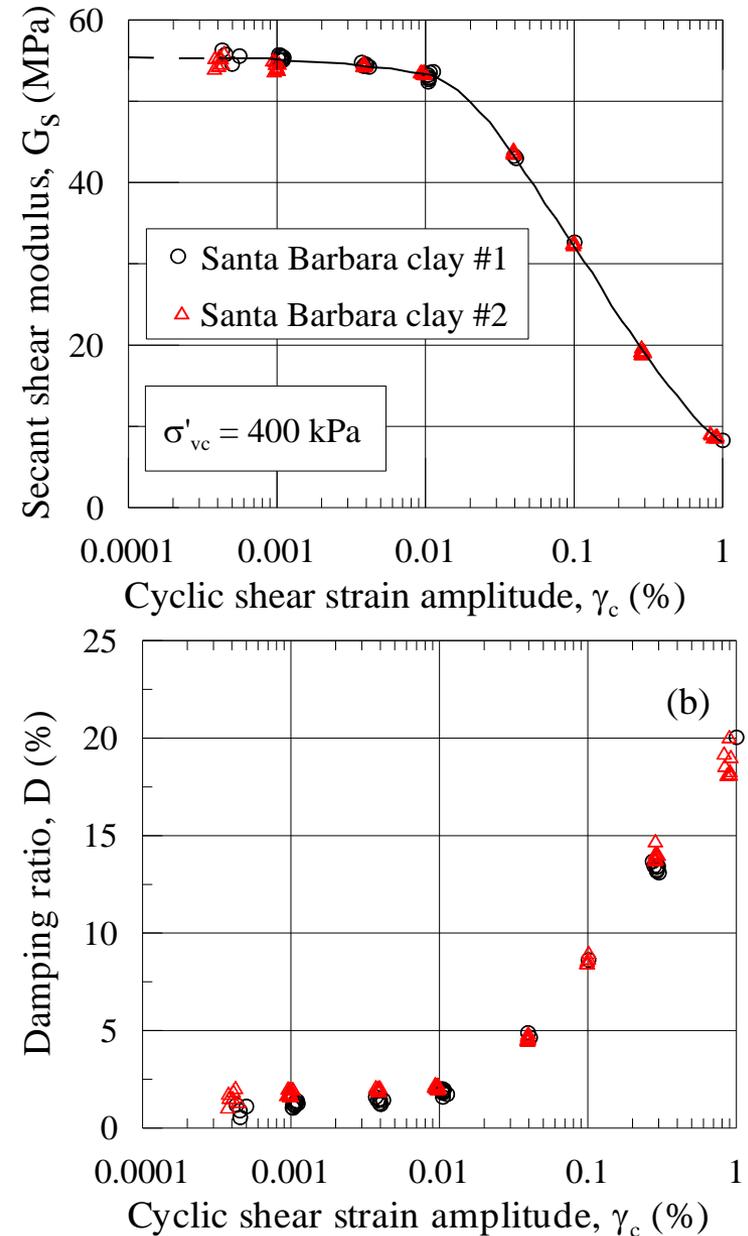
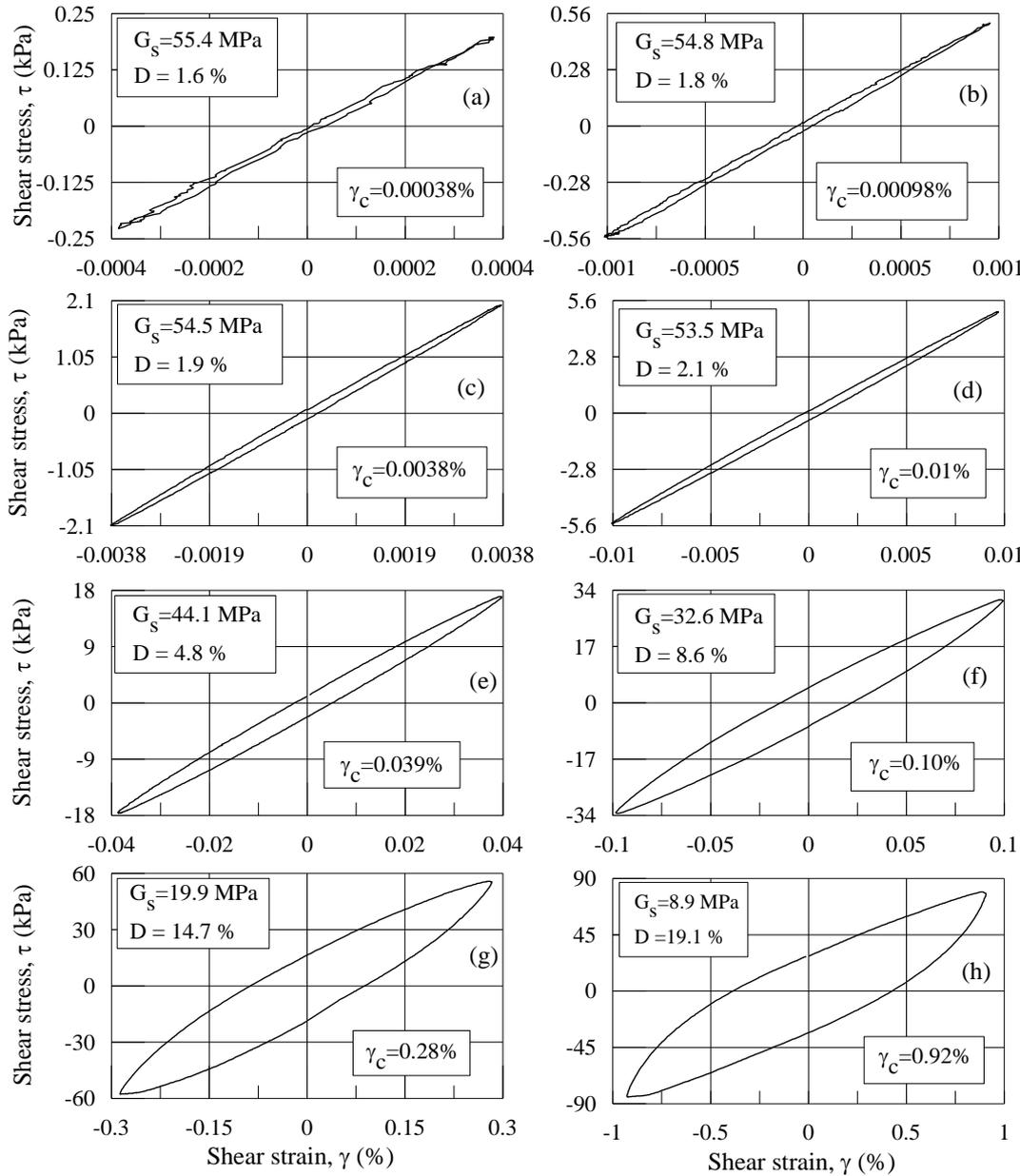


- tensioni normali in rapporto  $k_0$

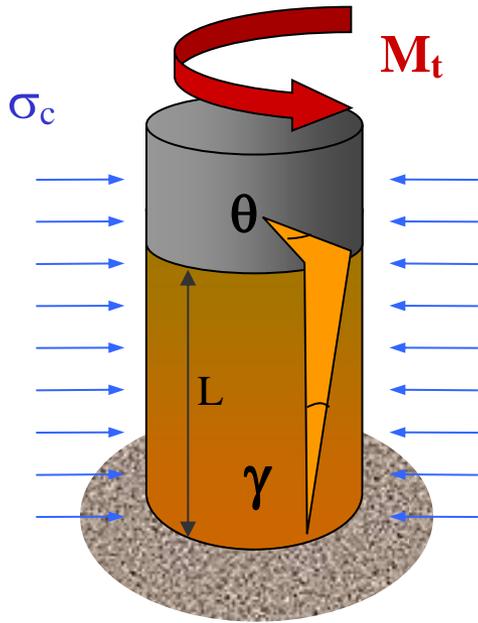
$$\sigma'_h = k_0 \cdot \sigma'_v$$

- mancano le  $\tau$  coniugate  $\rightarrow$  nasce un momento  $\rightarrow M = T \cdot H = N_v \cdot d$
- distribuzione disuniforme delle  $\tau$  e delle  $\sigma$  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

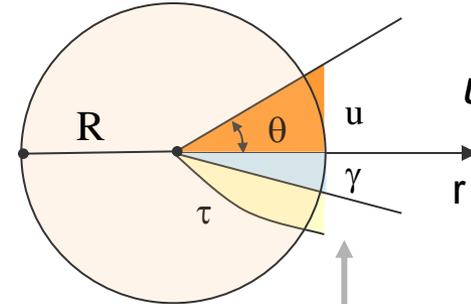
+

coppia torcente variabile con legge armonica:  $M(t) = M_0 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot f \cdot t)$

$\theta$  lineare con  $z$

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

rotazione rigida nel piano



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

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

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

prove a carico controllato

Operativamente si pone:

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

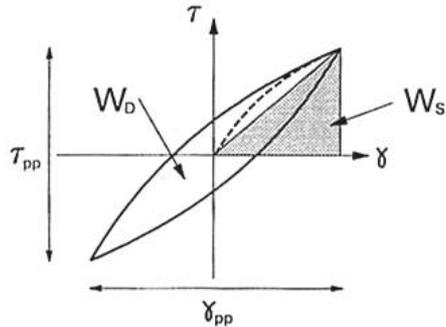
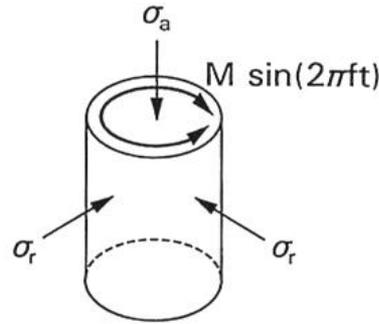
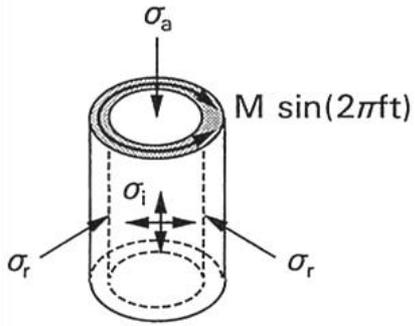
dove:

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

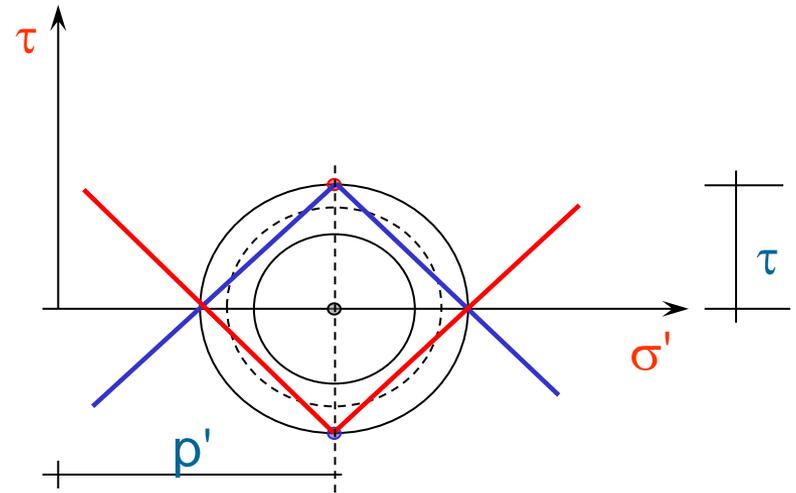
# prova torsionale ciclica (CTS)

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

## rotazione delle direzioni principali

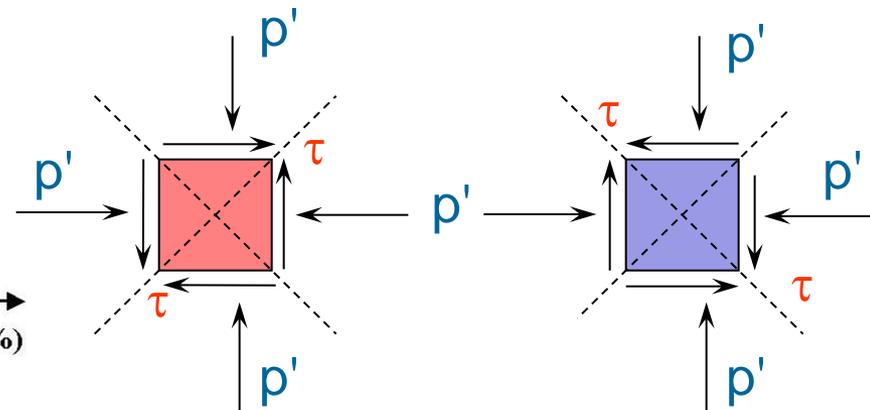
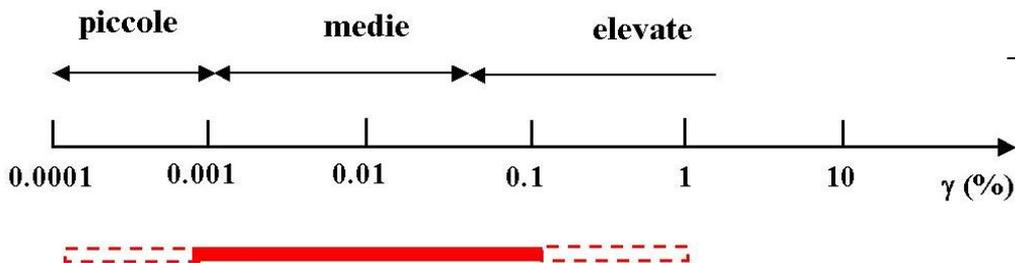


$$G = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}} \quad D = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$



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

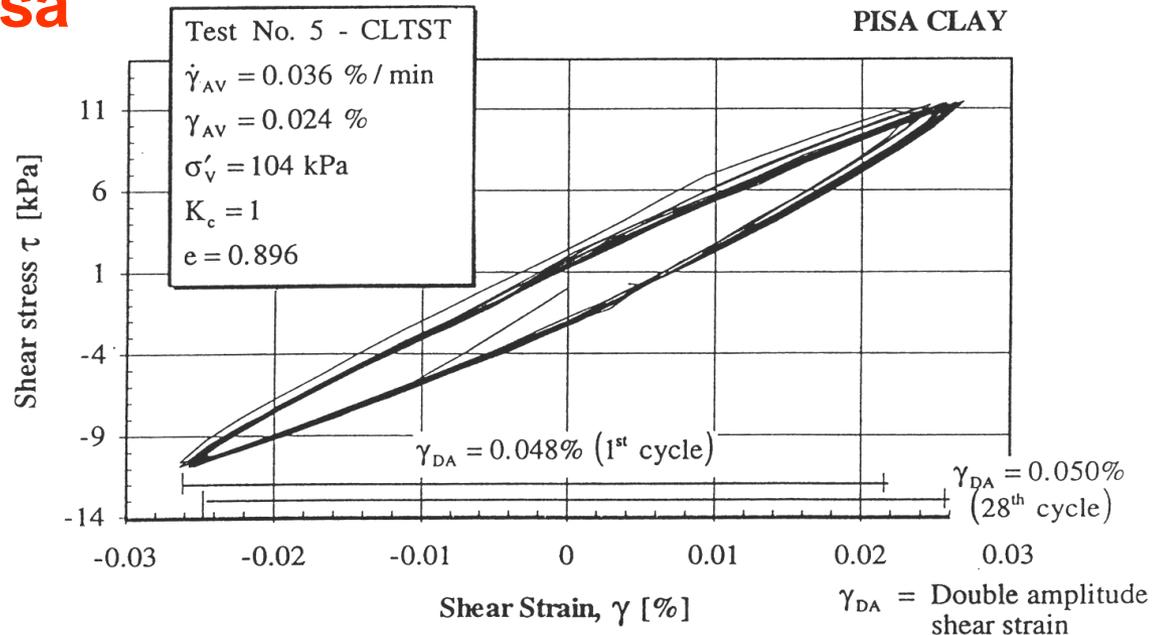
campo di deformazioni investigato:



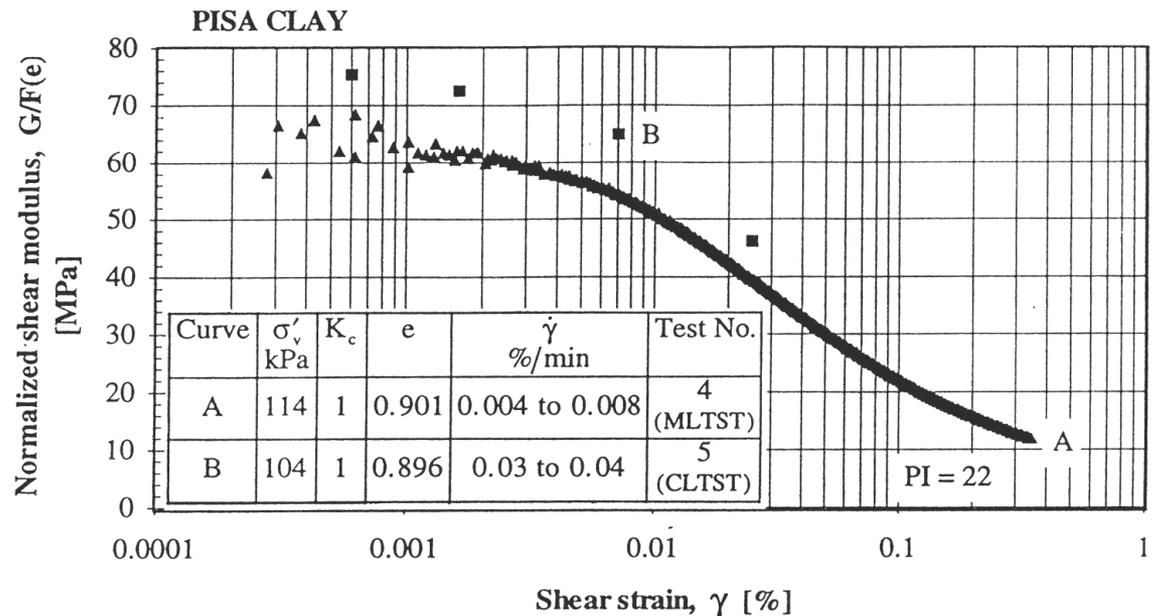
# prova CTS:argilla di Pisa

(Cavallaro, 1997)

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



modulo di taglio normalizzato in funzione della deformazione di taglio



# prova di colonna risonante (RC)

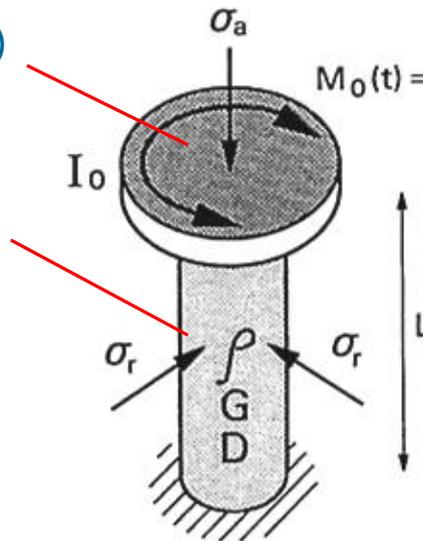
- analoga alla prova torsionale ciclica
- sollecitazioni applicate in condizioni dinamiche:  $M_0(t) = M_a \cdot e^{i\omega t}$
- fissato  $M_a$ , si fa variare  $\omega$  con continuità individuando la prima frequenza di risonanza massime ampiezze di oscillazione  $\theta_a$

attuatore  
(motore elettromagnetico)

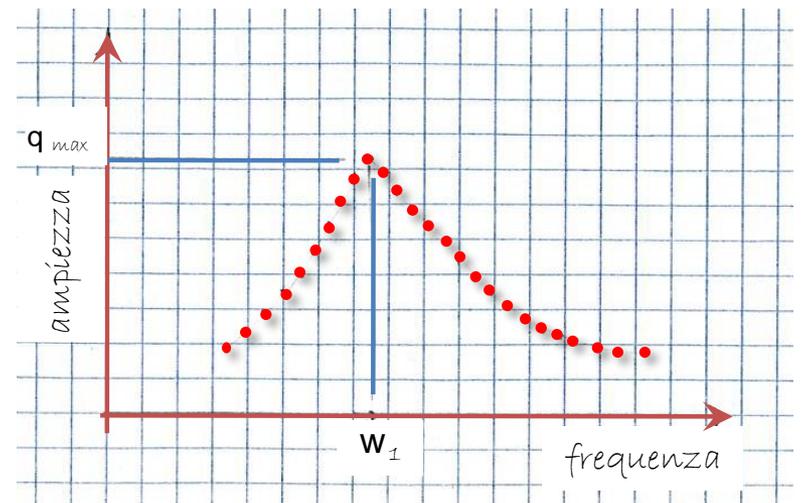
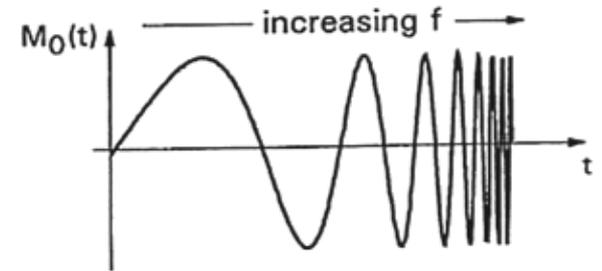
provino

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

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



$$M_0(t) = M \sin[2\pi f t]$$



# 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:

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

$$z = H \rightarrow \left( G I_p \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \right) = -J_0 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2}$$

reazione elastica provino = reazione inerziale massa attuatore

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

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

# prova di colonna risonante (RC)

## interpretazione prova: valutazione del modulo $G$

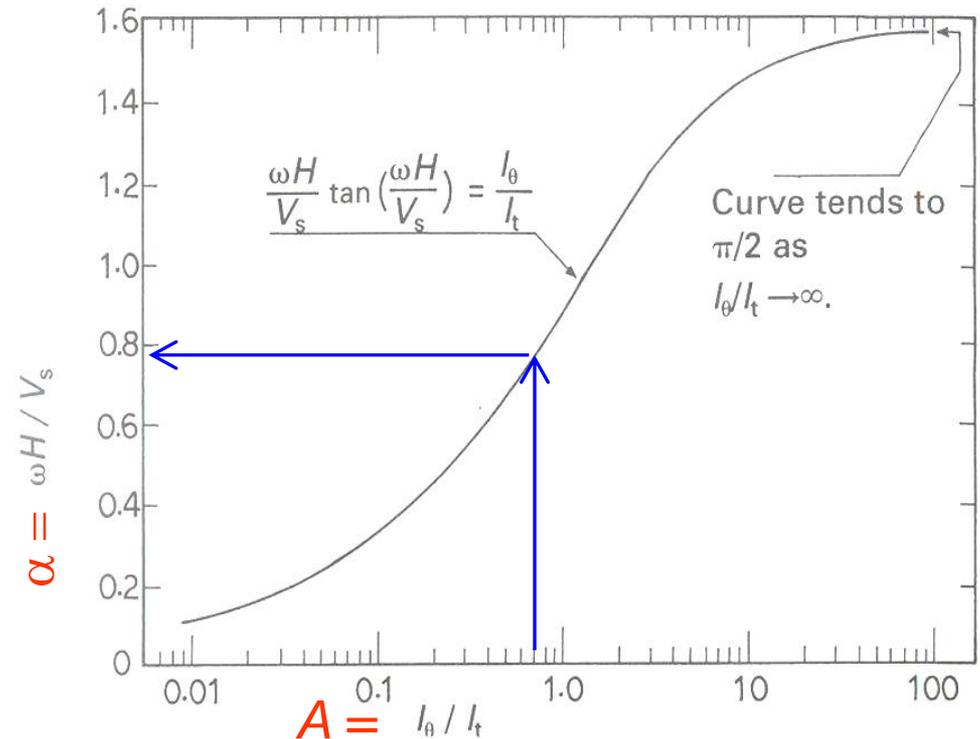
$$\frac{J_p}{J_0} = \frac{\omega H}{V_s} \cdot \tan \frac{\omega H}{V_s} \cong \left( \frac{\omega H}{V_s} \right)^2$$

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

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

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

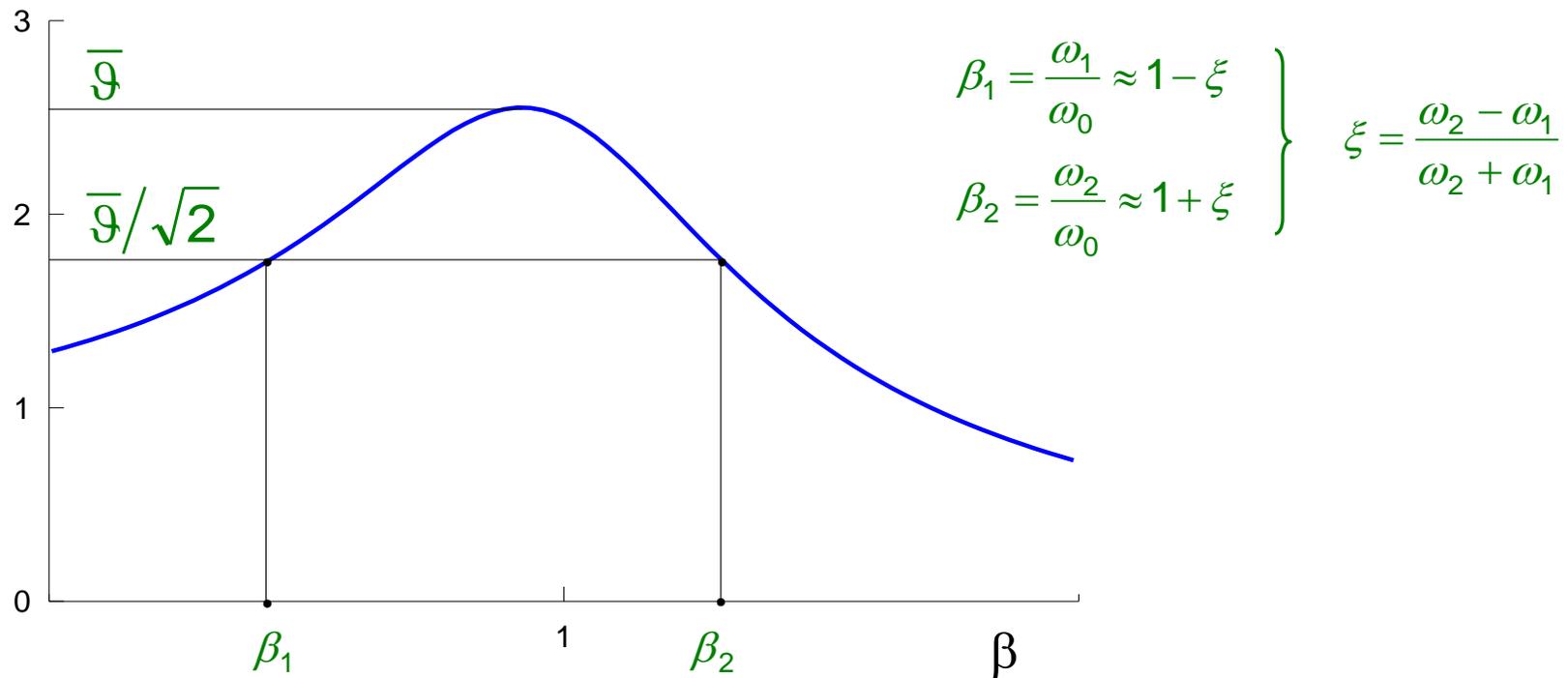
$$\gamma = \frac{\theta(L)}{L} \bar{r}$$



# prova di colonna risonante (RC)

## interpretazione prova: determinazione del rapporto di smorzamento

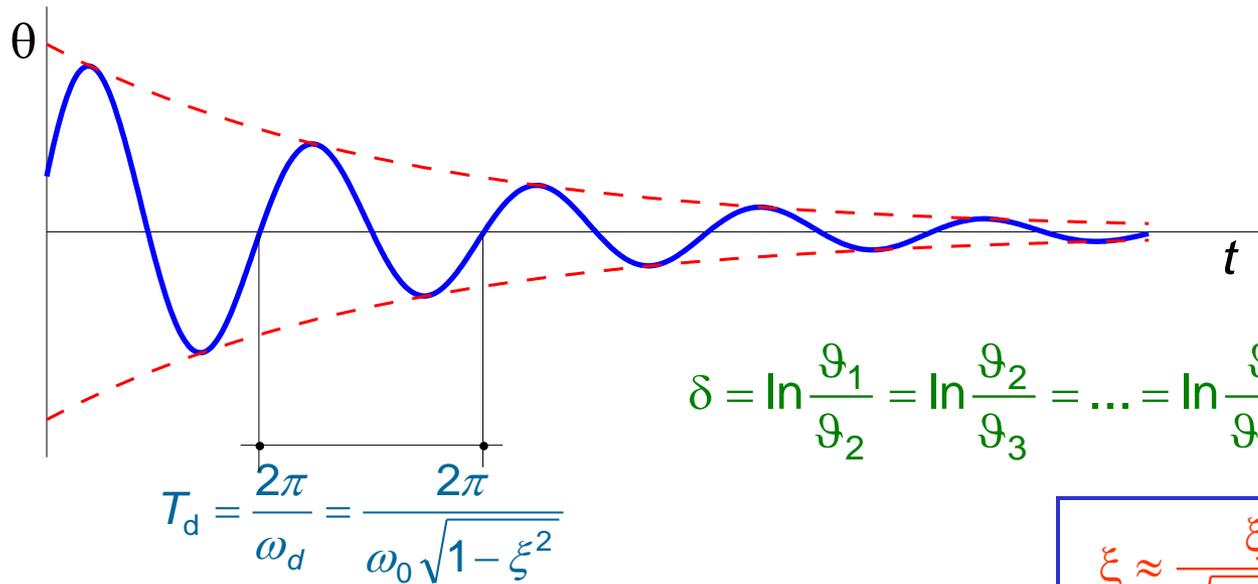
### 1) metodo della larghezza di banda



# prova di colonna risonante (RC)

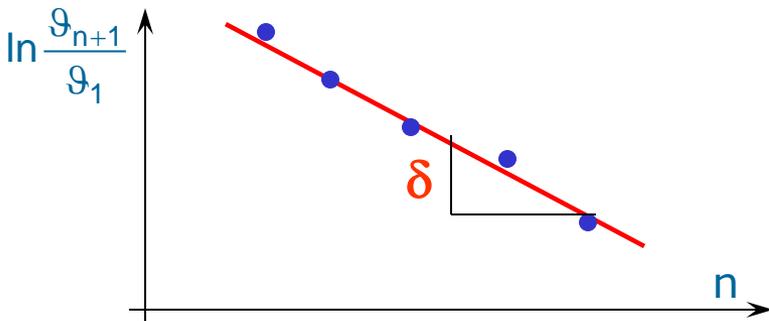
interpretazione prova: determinazione del rapporto di smorzamento

2) metodo del decremento logaritmico



$$\delta = \ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_3} = \dots = \ln \frac{\vartheta_n}{\vartheta_{n+1}} = \xi \omega_0 T_d = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

$$\xi \approx \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} = \frac{\delta}{2\pi}$$



$$\ln \vartheta_1 = \delta + \ln \vartheta_2 = 2\delta + \ln \vartheta_3 = \dots = n \cdot \delta + \ln \vartheta_{n+1}$$

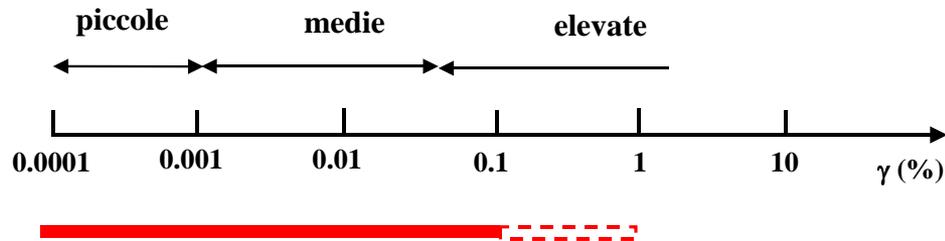
$$\ln \vartheta_{n+1} = \ln \vartheta_1 - n \cdot \delta$$

# prova di colonna risonante (RC)

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

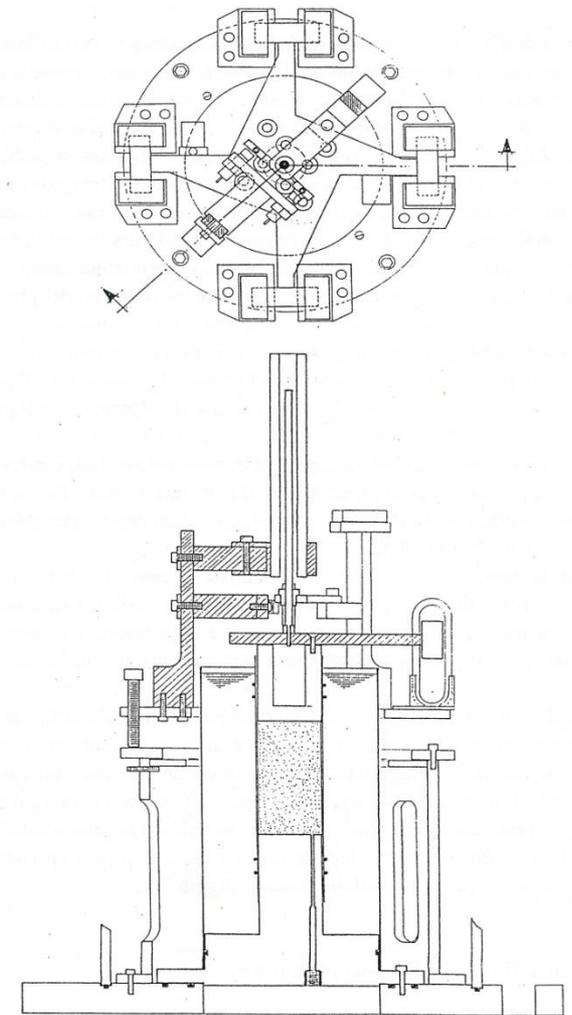
**campo di frequenze tipico:  $f = 10-100$  Hz**

**campo di deformazioni investigato:**

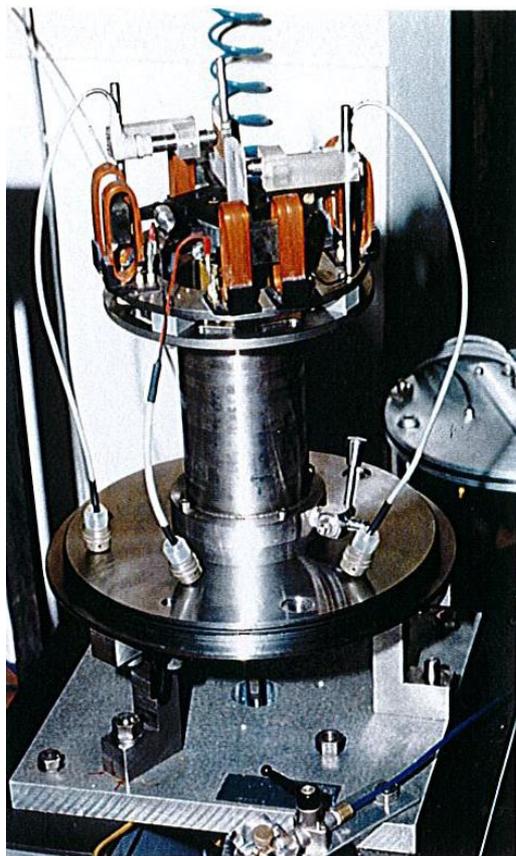
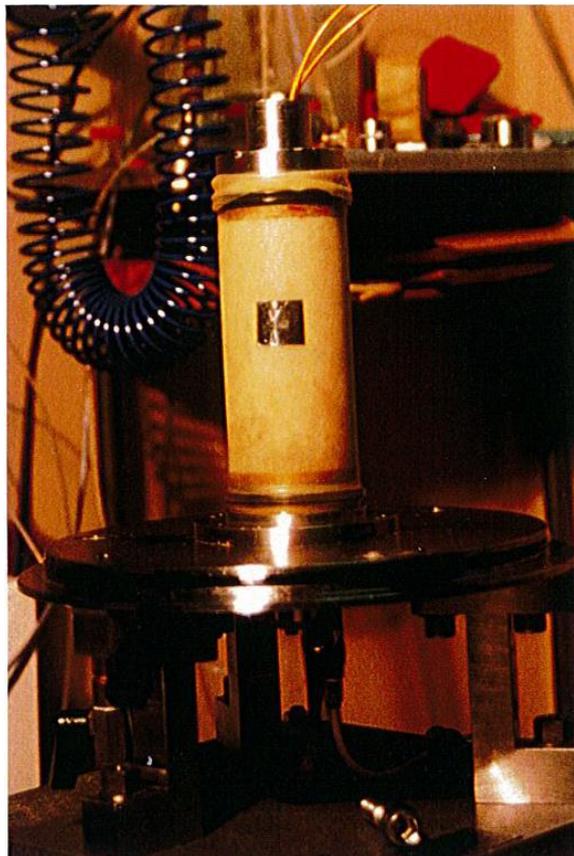


- ⇒ alta risoluzione, affidabilità e ripetibilità a piccole deformazioni
- ⇒ meno affidabile per deformazioni  $\gamma > 0.1\%$  (effetti non linearità e  $N_c$ )

## prove CTS-RC: apparecchiature

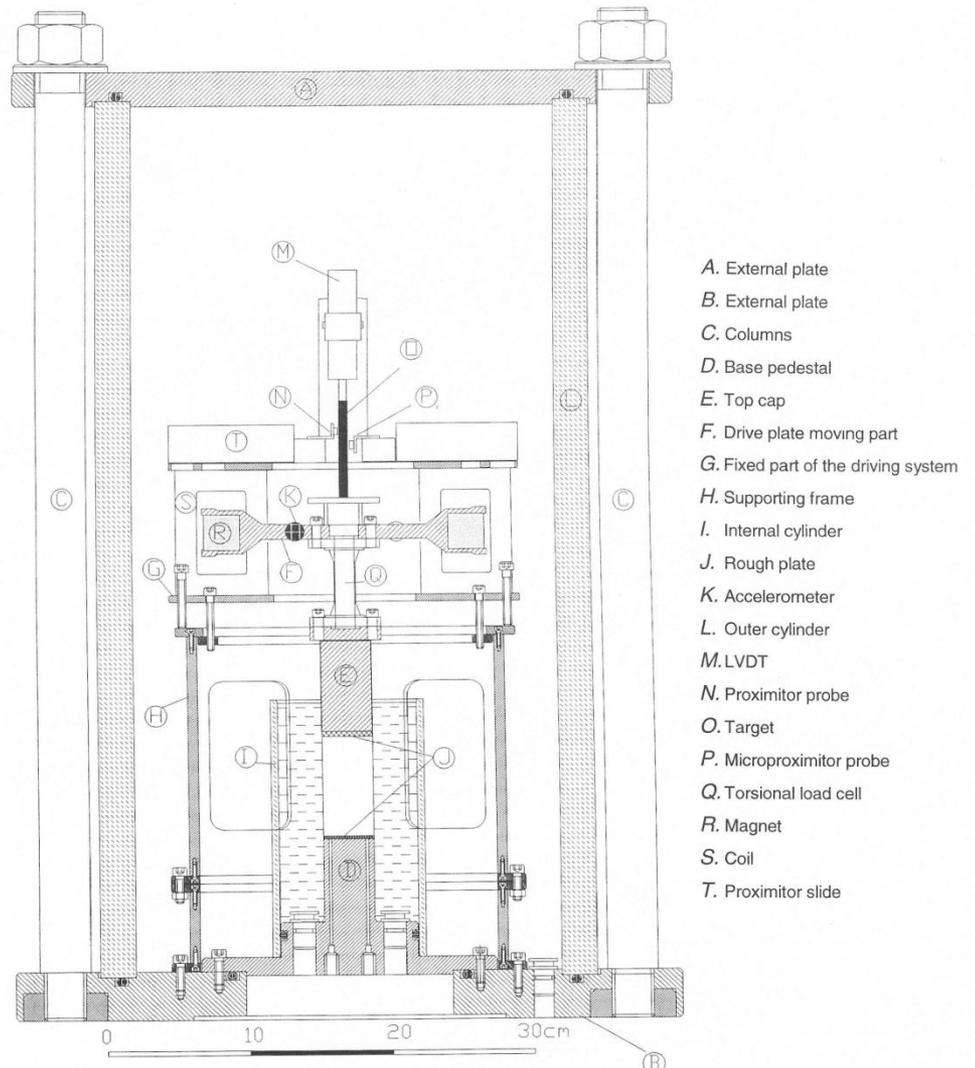


## prove CTS-RC: apparecchiature

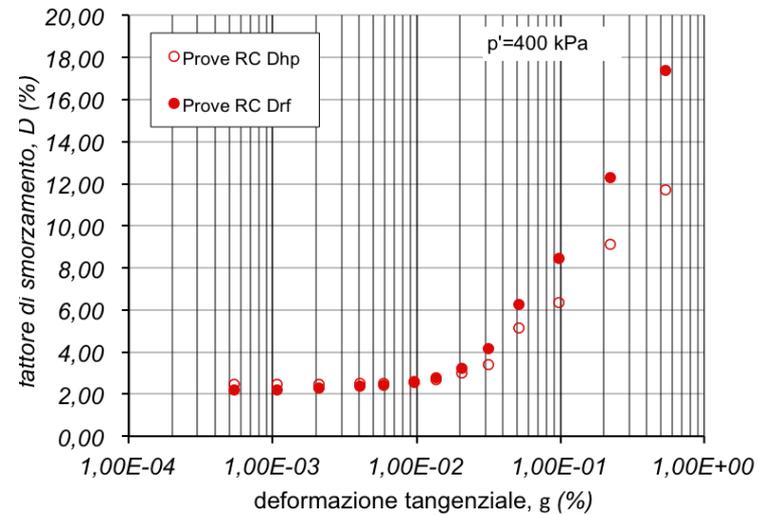
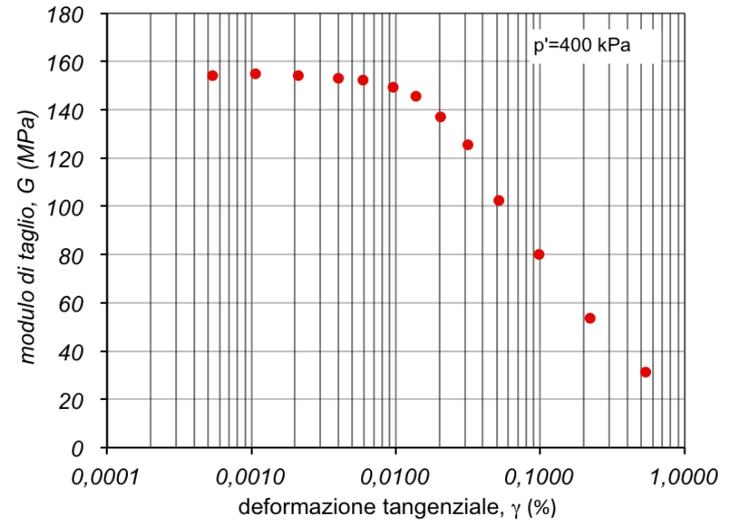
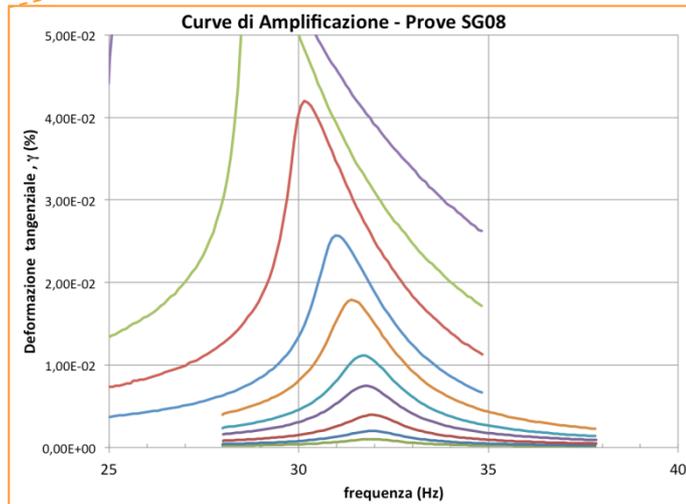
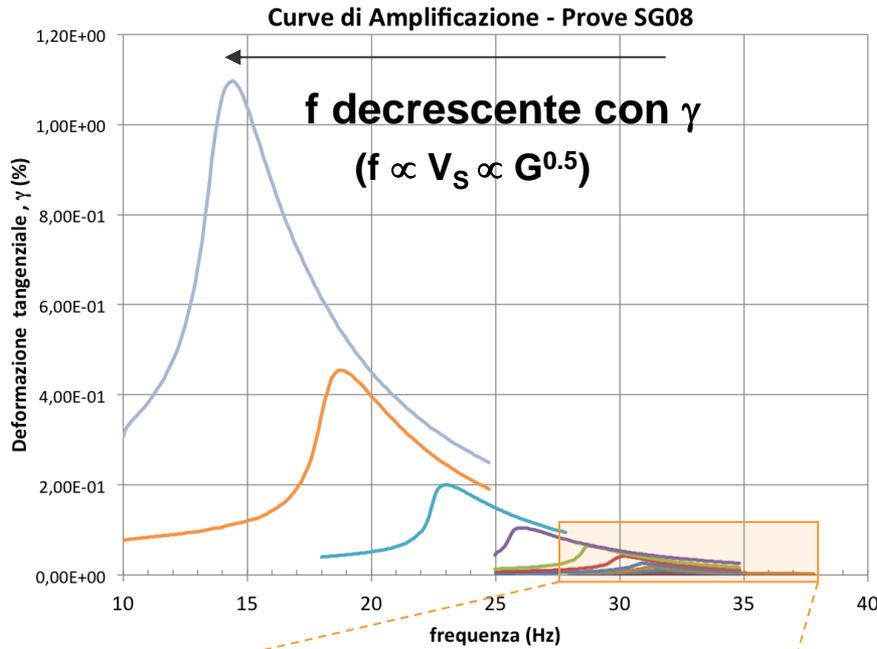


Politecnico di Torino

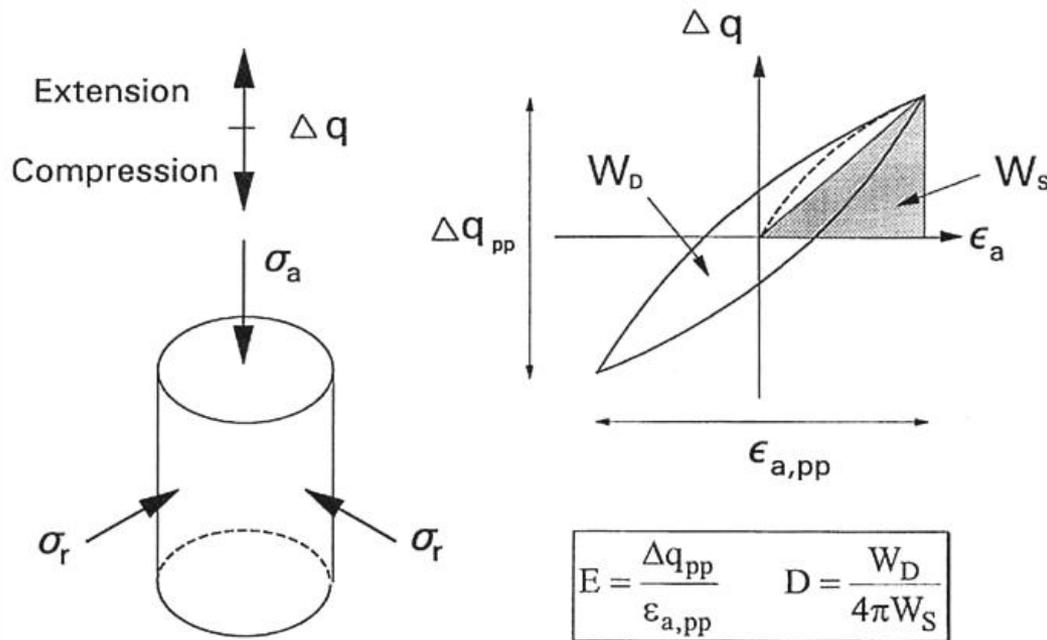
# prove CTS-RC: apparecchiature



# 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  $\sigma_r$  e sforzo assiale  $\sigma_a$   
in modo da riprodurre qualsiasi  
percorso di sollecitazione

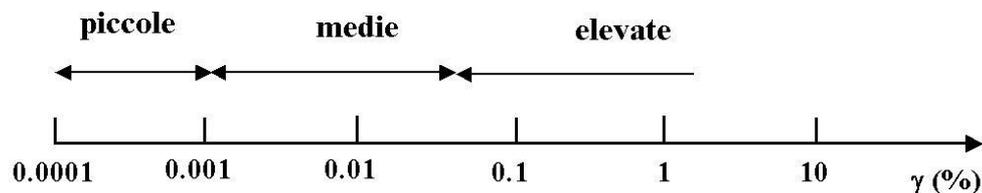
## campo di frequenze tipico:

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

⇒ preferibile a deformazione controllata

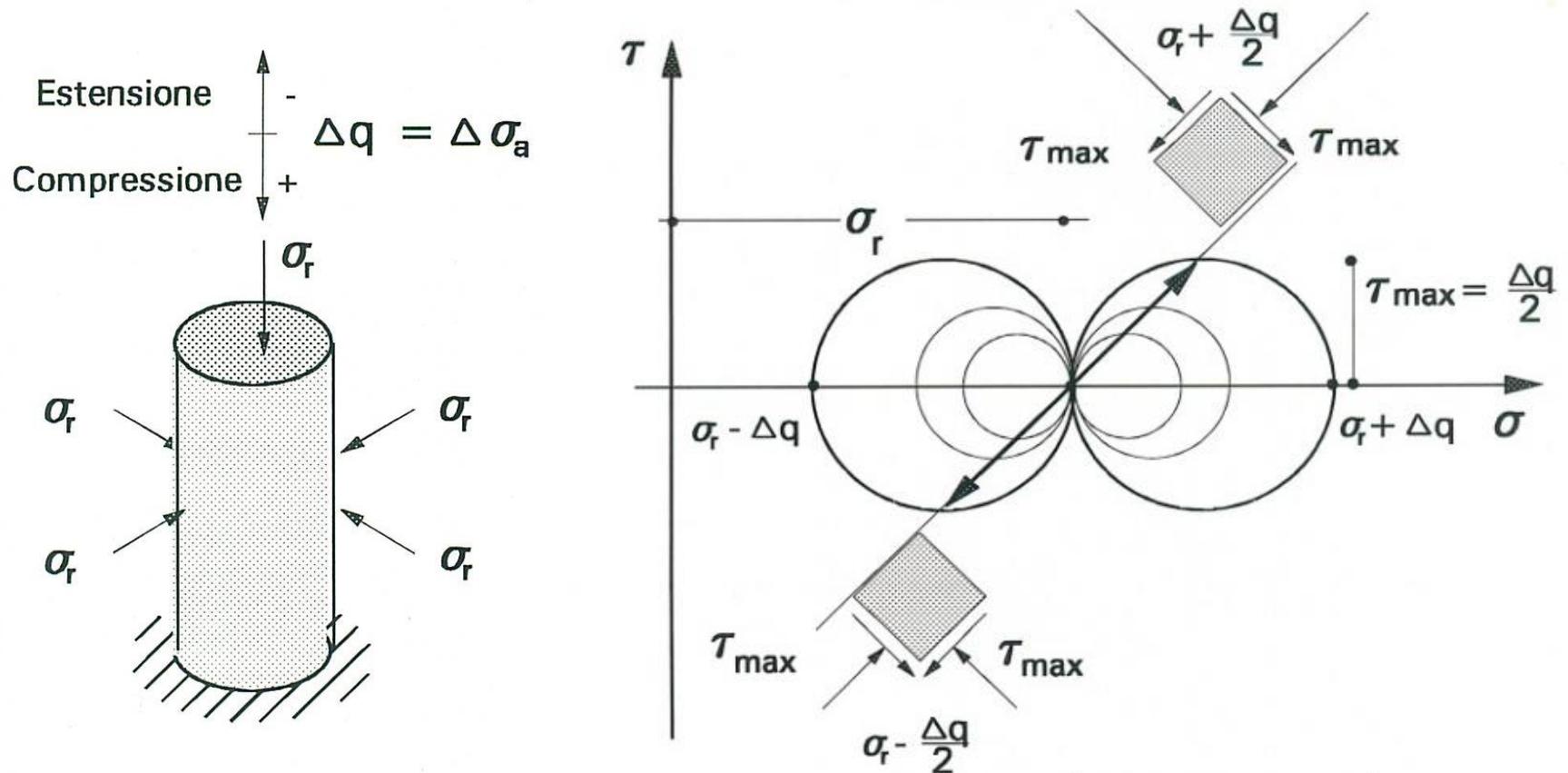
⇒ risultato tipico: rapporto tensionale ciclico ( $q/\sigma'_r$ ):  $N_c$

## campo di deformazioni investigato:



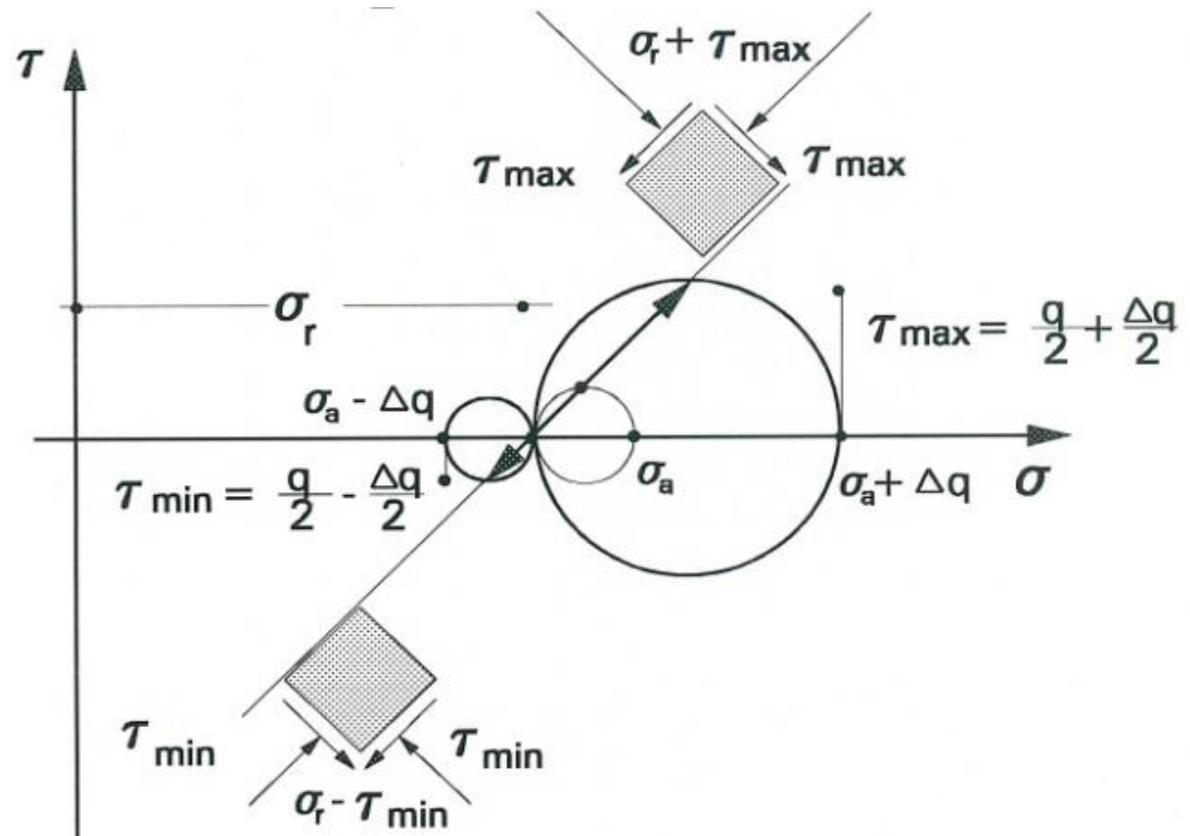
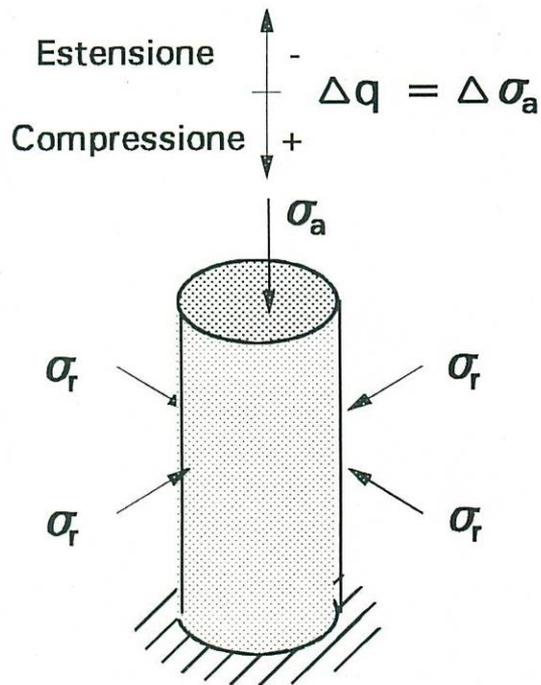
# prova triassiale ciclica (CTX)

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



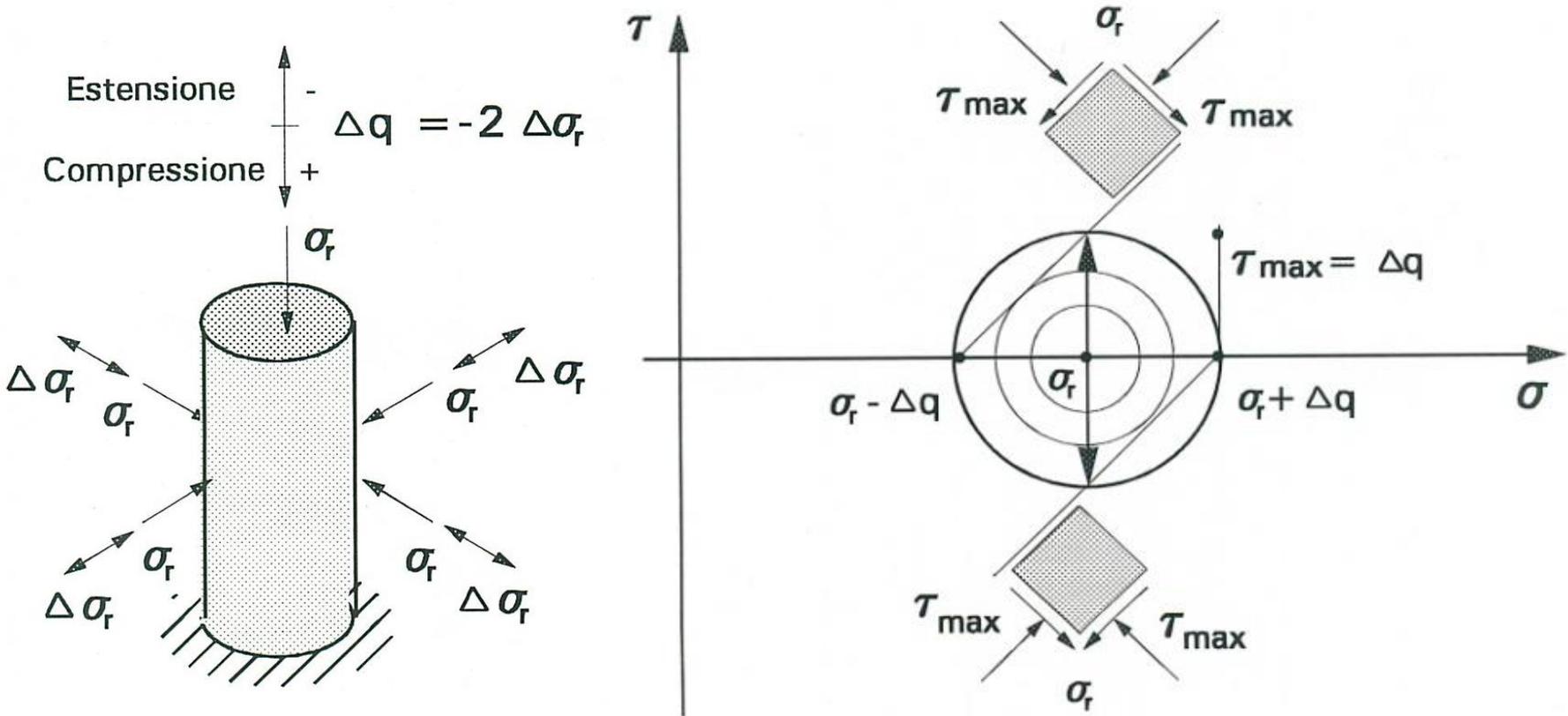
# prova triassiale ciclica (CTX)

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

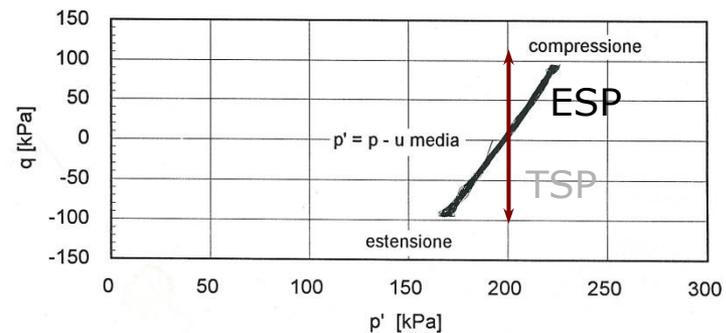
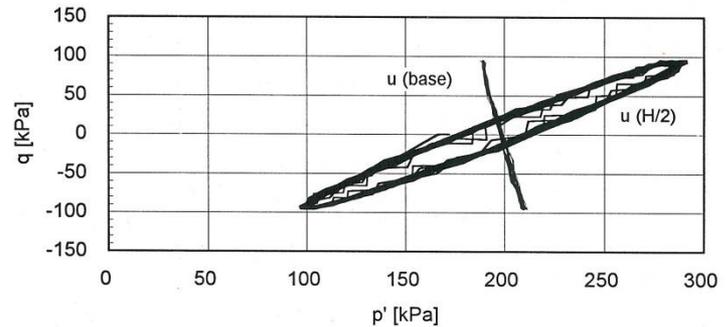
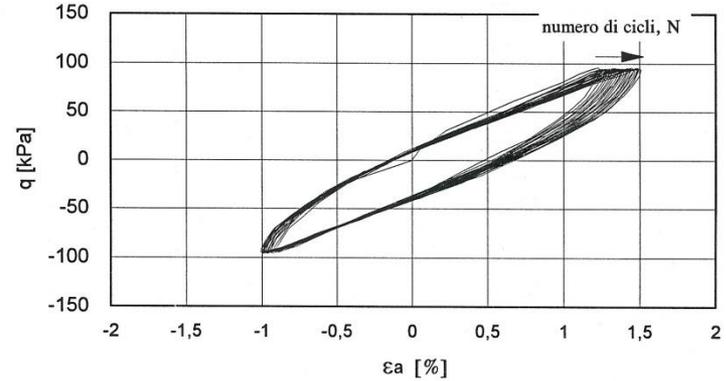
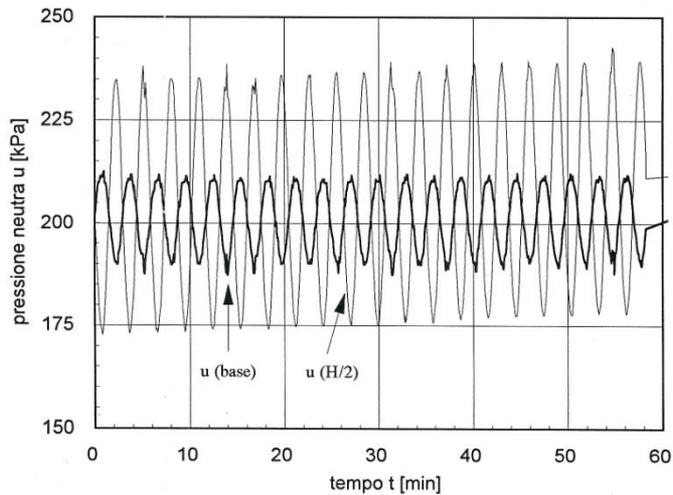
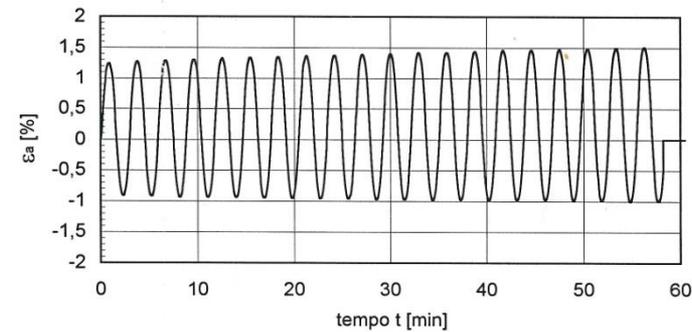
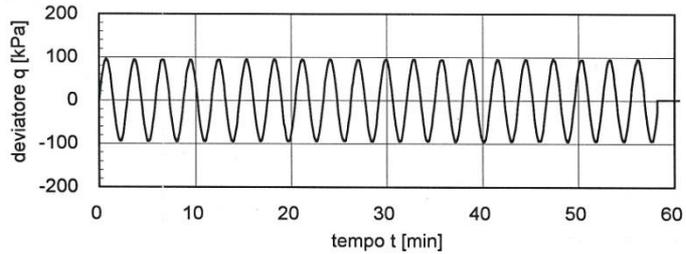


# prova triassiale ciclica (CTX)

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



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



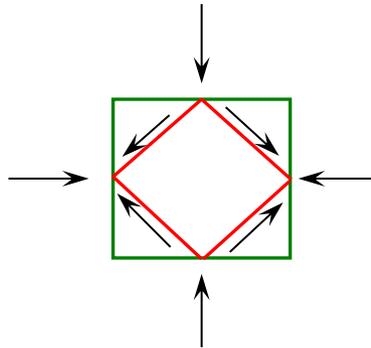
tracce temporali  $q(t)$ ,  $\varepsilon_a(t)$ ,  $u(t)$

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

# prova triassiale ciclica (CTX)

## note:

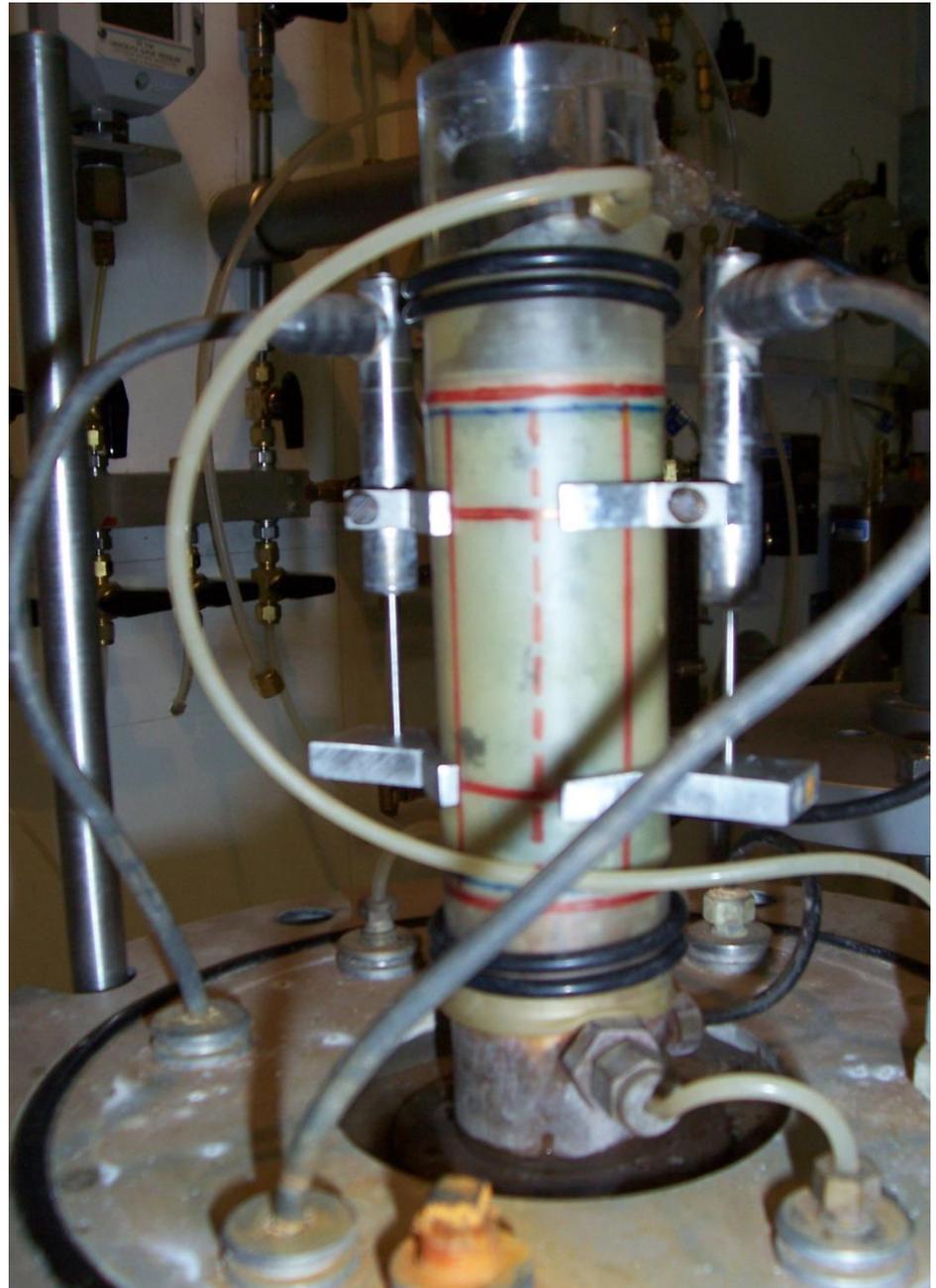
- le direzioni principali di tensione non ruotano
- le giaciture lungo le quali si verificano le tensioni tangenziali massime sono inclinate di  $45^\circ$
- il modo di deformazione è quindi sostanzialmente diverso da quello relativo alle condizioni di taglio semplice (più simili a ciò che avviene in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



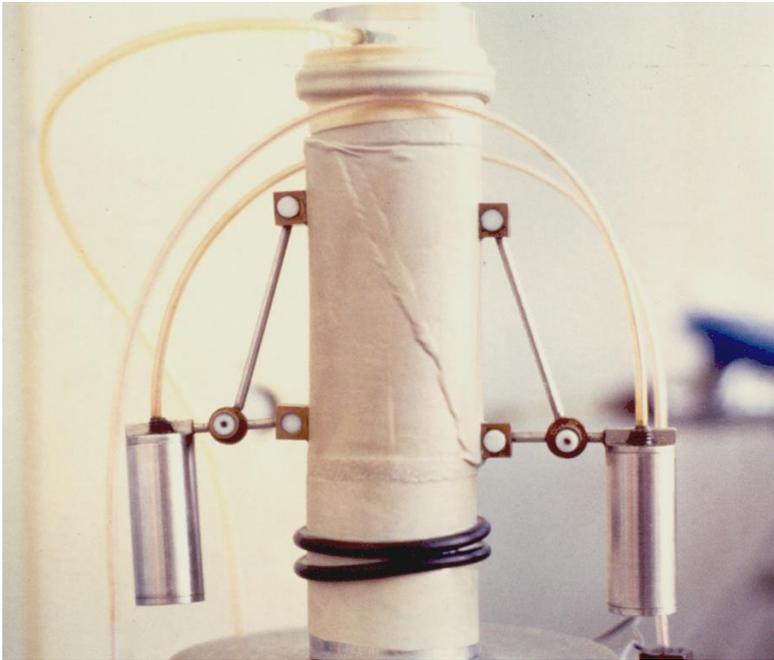
- le deformazioni misurabili con apparecchiature convenzionali sono  $> 0.1 \%$
- con traduttori locali si possono misurare deformazioni di circa  $0.001 \%$
- in una prova triassiale si possono raggiungere deformazioni molto maggiori di quelle ottenibili in condizioni di taglio semplice
- le prove triassiali 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**

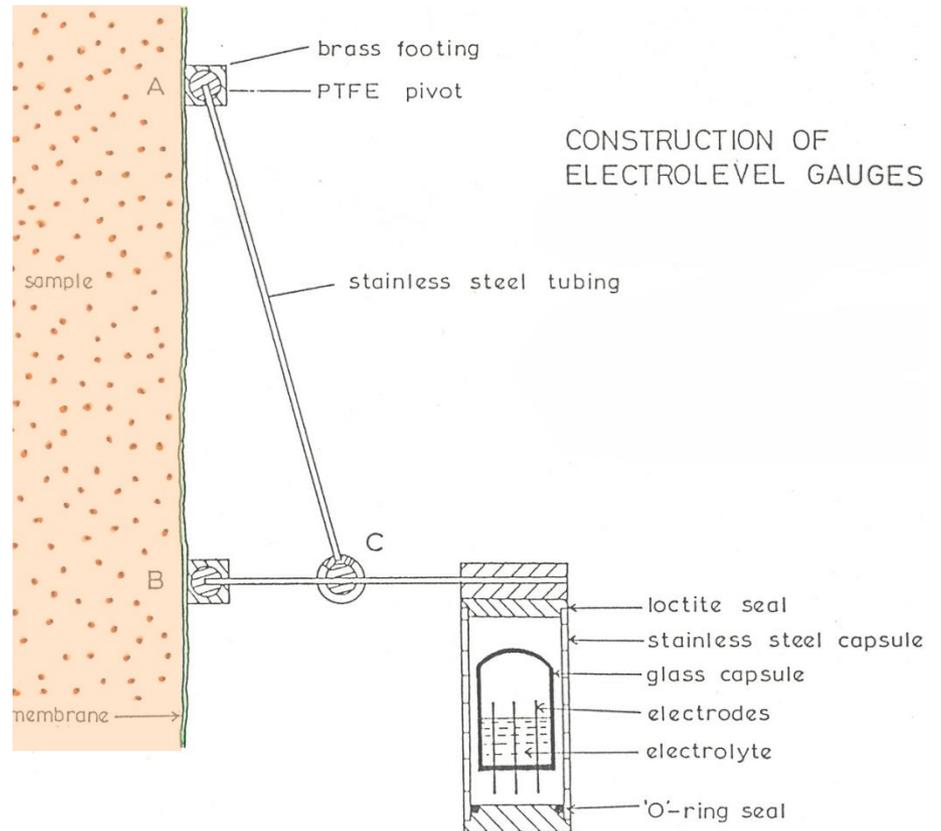
**(risoluzione  $\varepsilon$  fino a 0.001 %)**



# misure locali di deformazione

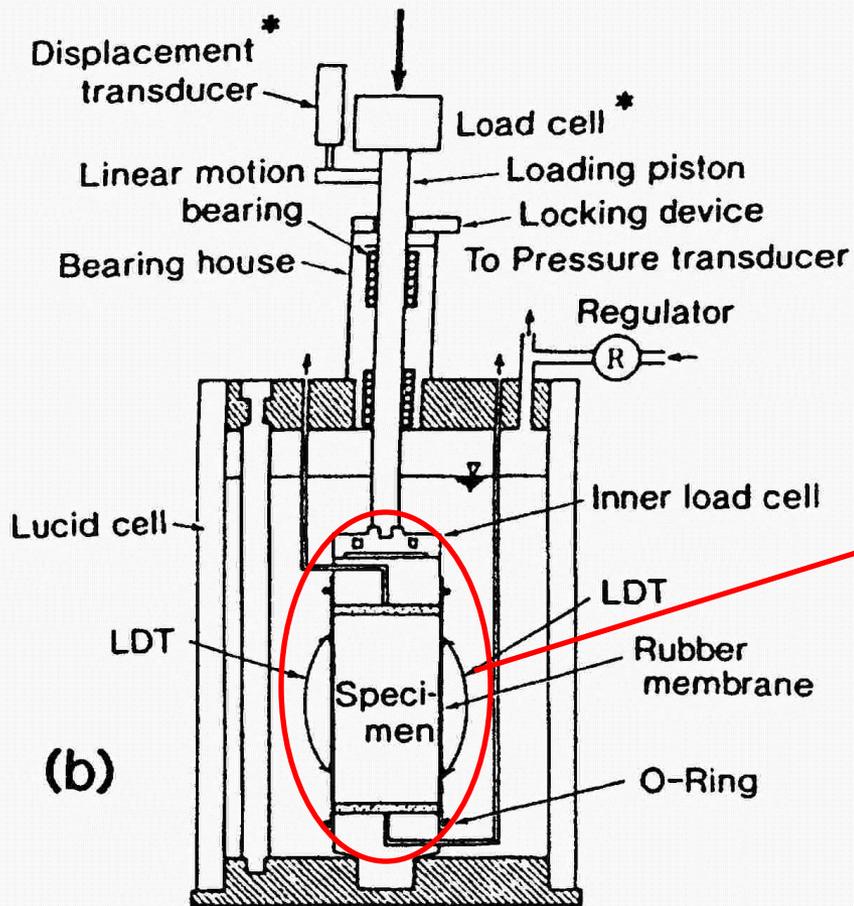


*Rampello (1989)*

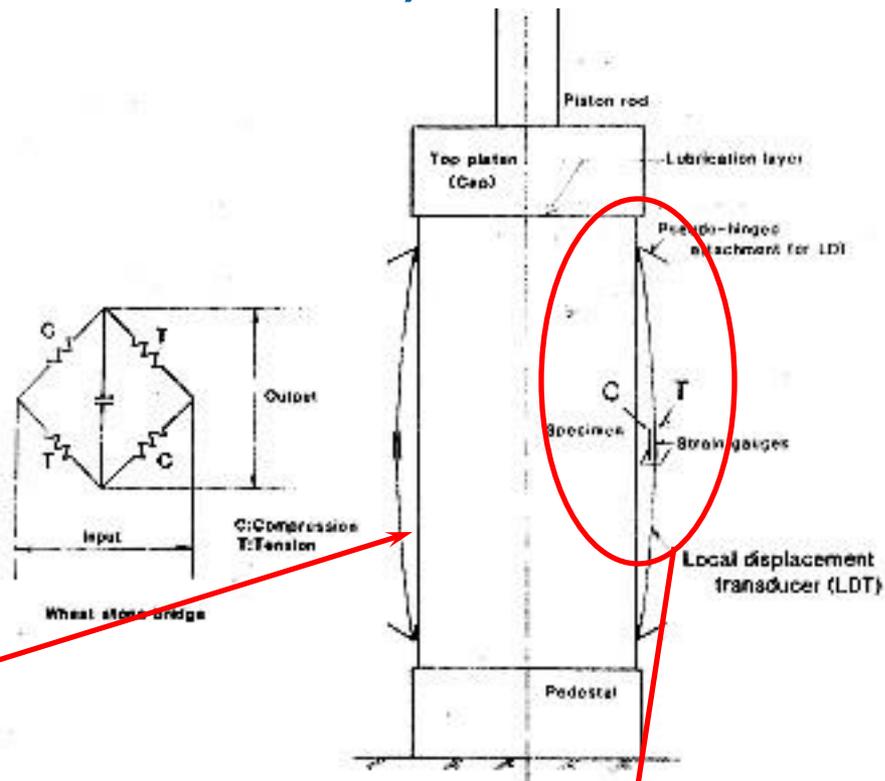


*Burland e Symes (1982)*

# cella triassiale strumentata con trasduttori di spostamento locali (risoluzione $\epsilon$ fino a 0.001 %)



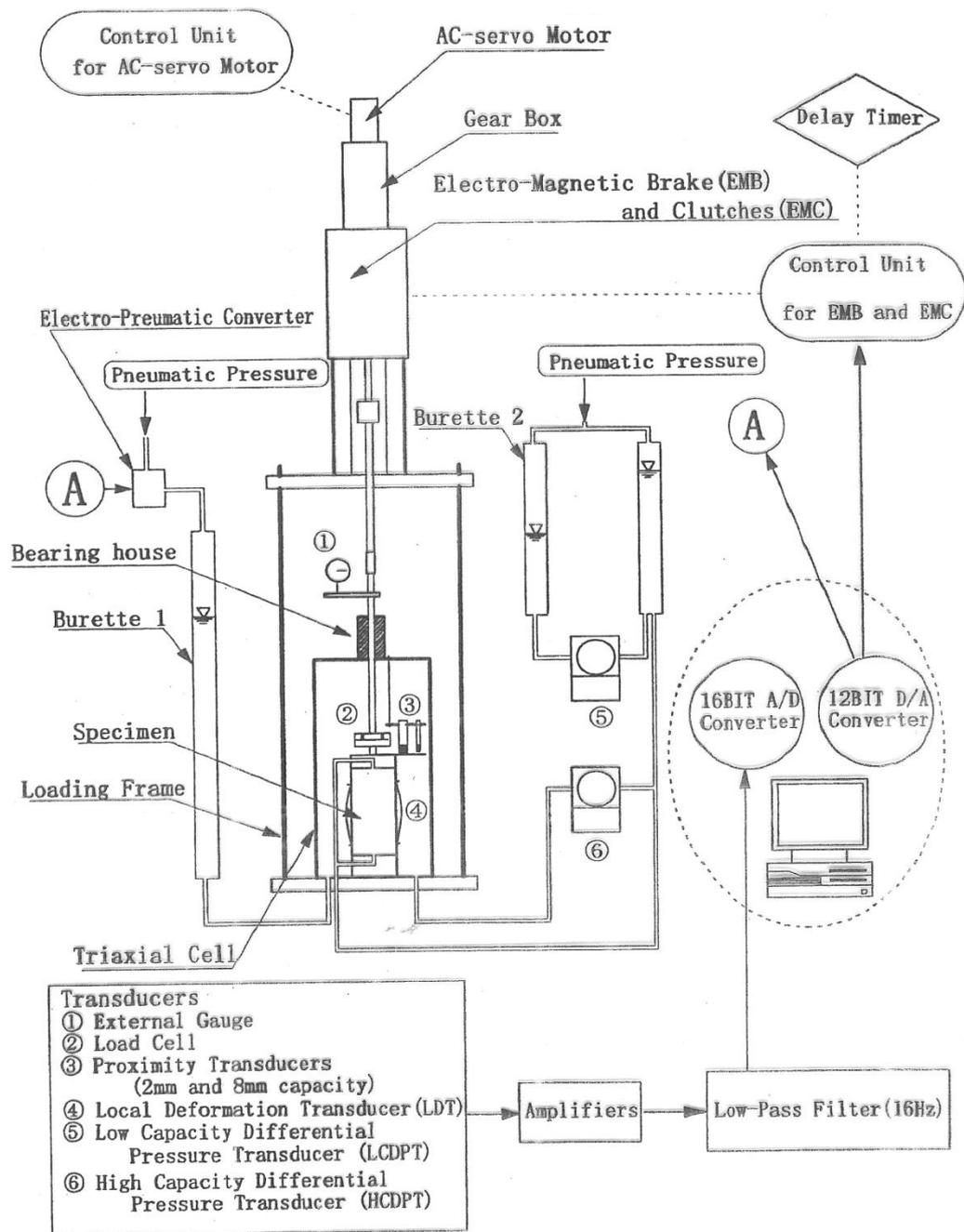
(\* used for monitoring, and can be omitted)



# prova CTX: apparecchiature



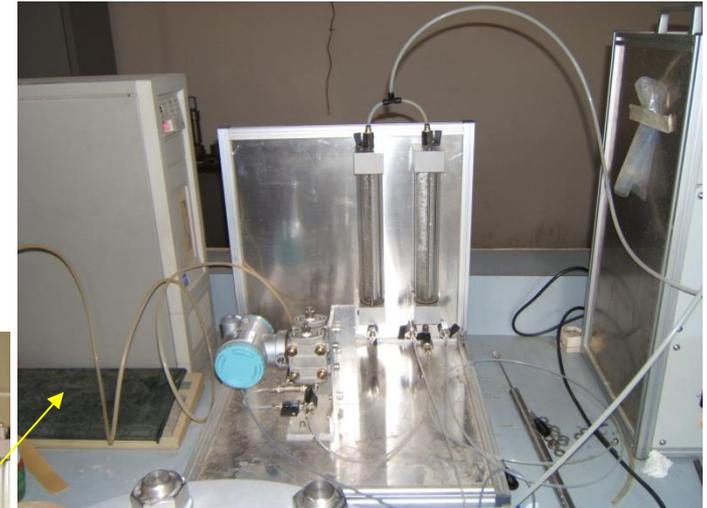
Cella dell'IIS-Tokyo (Università di Napoli)



# Prova CTX: apparecchiature per terreni a grana grossa

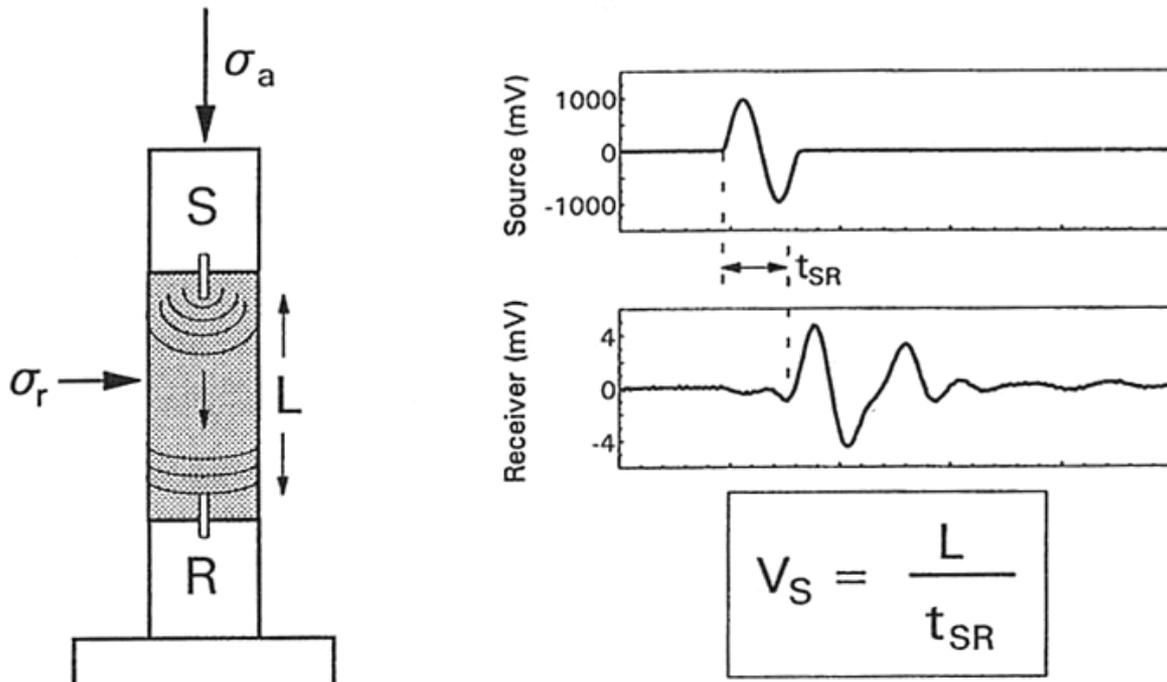


pannello di controllo pressioni



misura variazioni di volume

# prova con *Bender Elements* (BE)



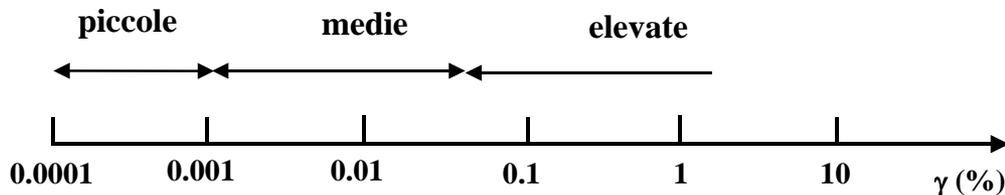
## tecnica di esecuzione:

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

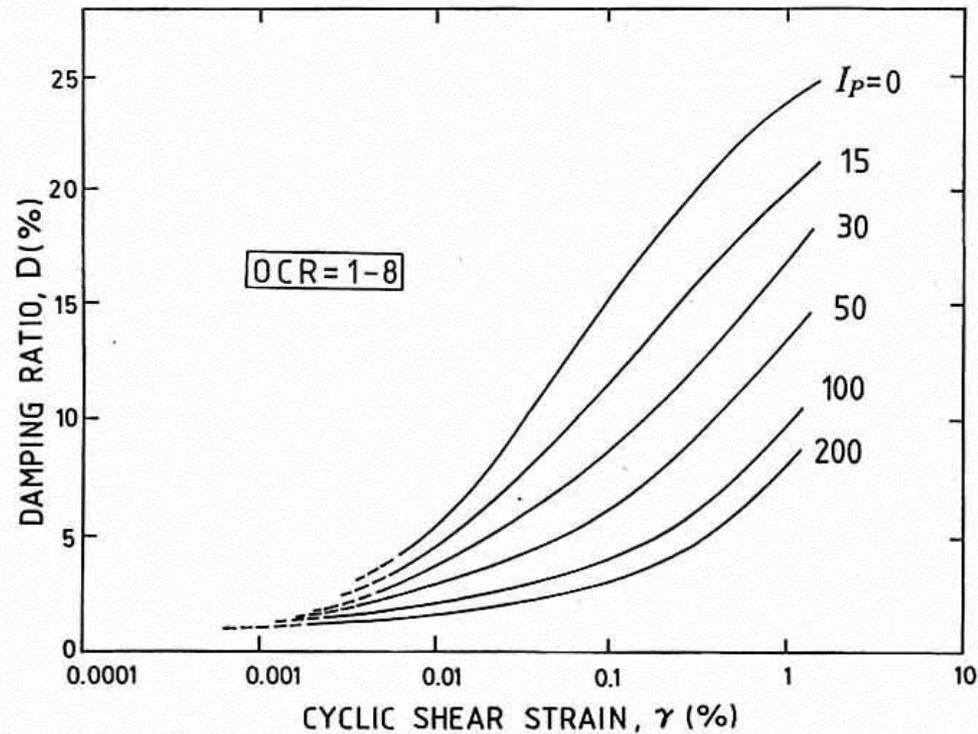
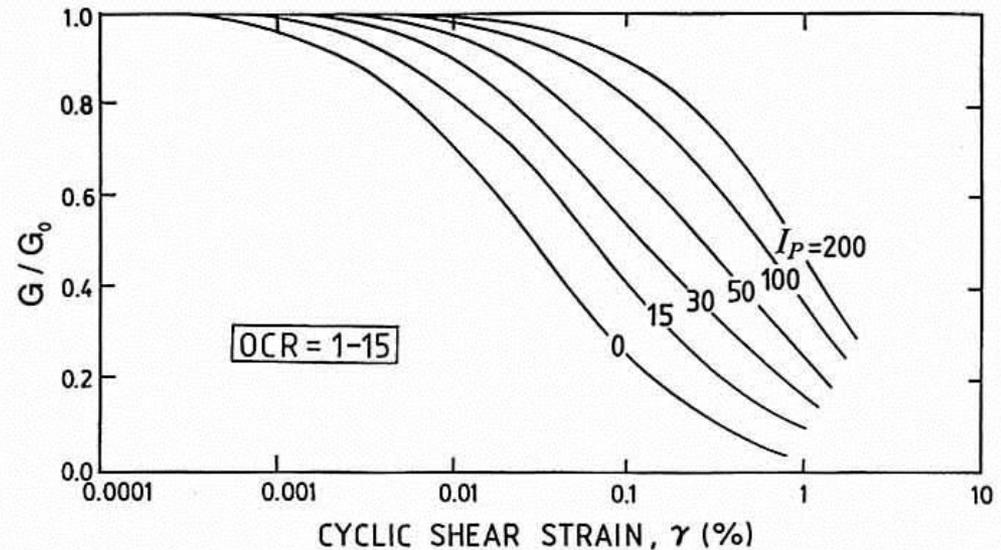
## risultati sperimentali

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

dipendono da  $I_p$

in subordine:

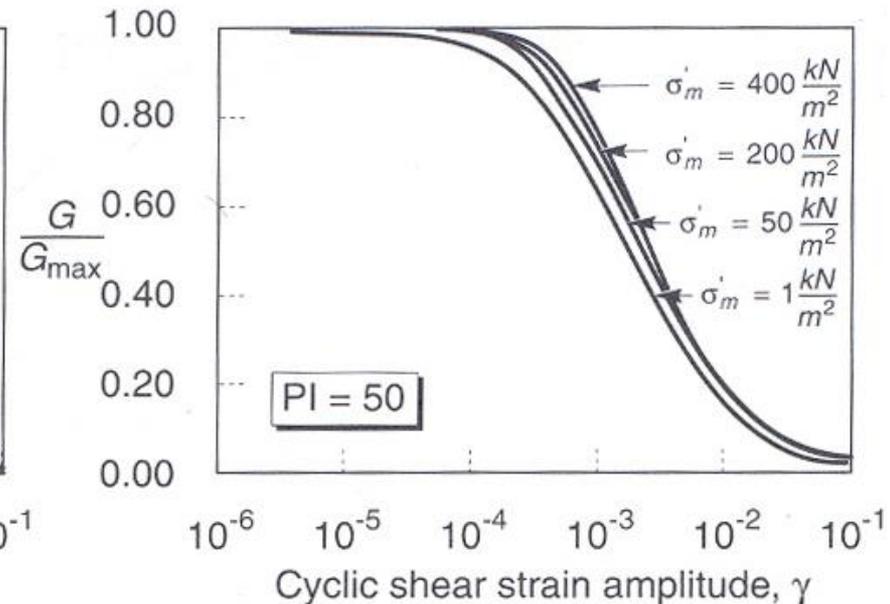
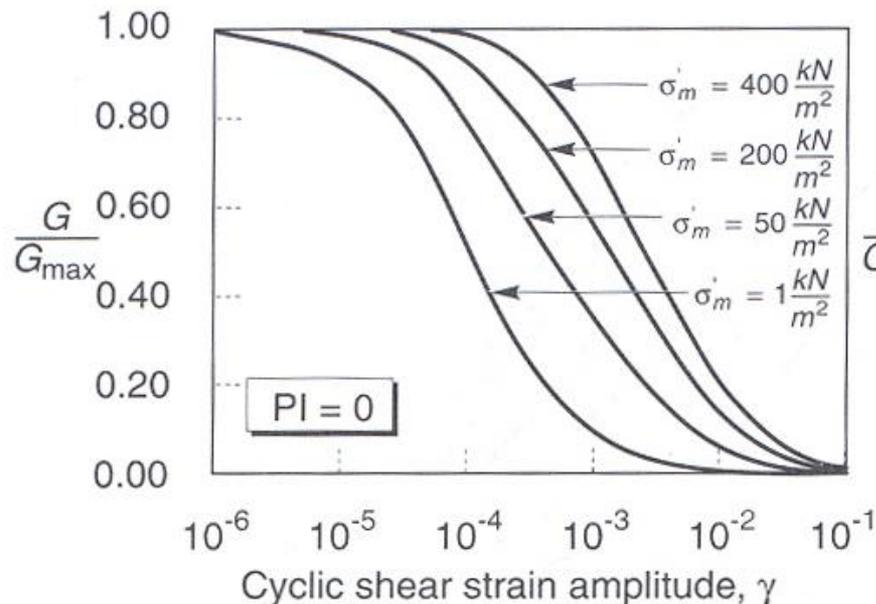
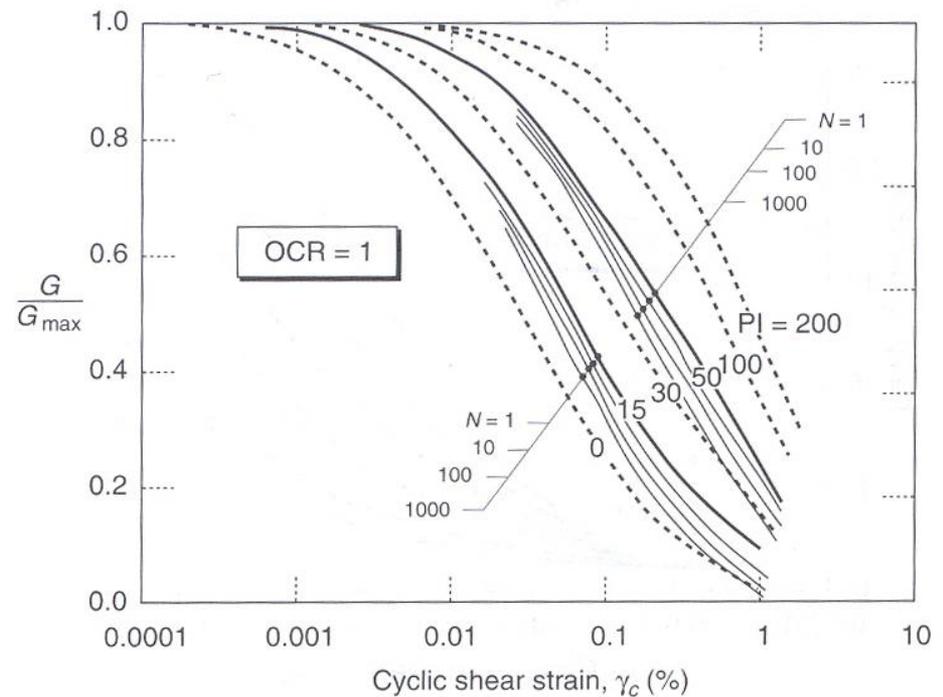
- dallo stato tensionale efficace di confinamento
  - dal numero di cicli
  - dal grado di sovraconsolidazione
- 
- per le sabbie si può utilizzare la curva con  $I_p = 0$



# 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