



# Prove dinamiche e cicliche di laboratorio sui terreni

C.G.G. S.r.l [www.cgg.it](http://www.cgg.it) [info@cgg.it](mailto:info@cgg.it)

Via G.Cherchi n.15/17 \_ 29122 Piacenza \_ tel.: +39.0523.648231 \_ fax: +39.0523.574091

# Finalità

- Studio comportamento dinamico terreni (generalmente cercando di "riprodurre" carichi sismici)
- Caratterizzazione dinamica dei terreni (parametri dinamici, leggi di decadimento, potenziale di liquefazione, resistenze post-cicliche)

# Significatività Risultati

- Direzione del carico: Unidirezionale (torsionale od assiale)
- Forme d'onda regolari (in natura le azioni sismiche producono sequenze tipicamente irregolari)
- Condizioni di drenaggio: le prove si svolgono in condizioni non drenate (non sempre vero per i terreni a grana grossa)
- Qualità dei campioni



# Tipi di prove

in base alla modalità di misura della risposta del terreno ai carichi applicati

## ■ Dinamiche:

- 1.Colonna Risonante (RC)
- 2.Bender Elements (BE)

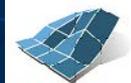
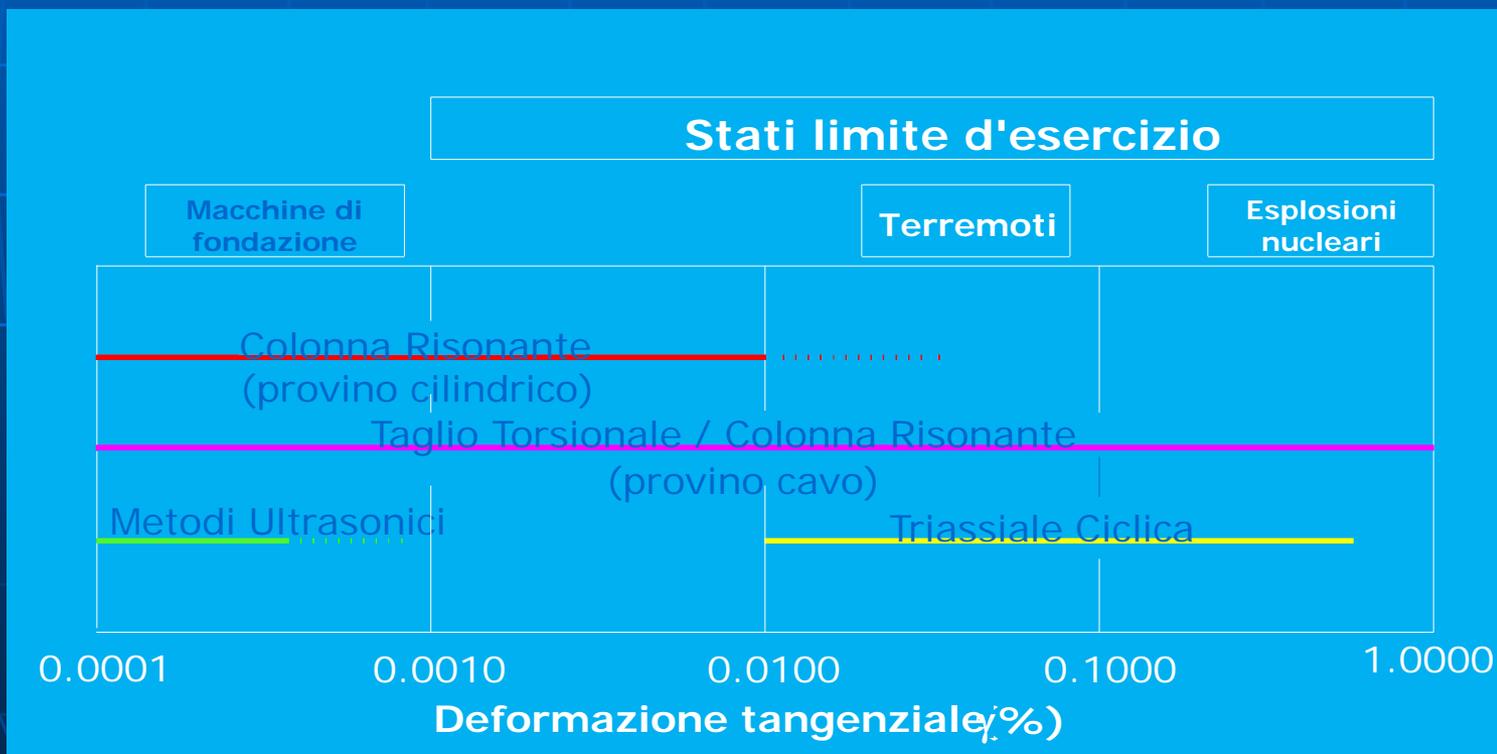
## ■ Cicliche:

- 1.Taglio torsionale ciclico (CTS)
- 2.Triassiale ciclica "a liquefazione" (TXC-L)
- 3.Triassiale ciclica "property" (TXC-P)
- 4.Taglio semplice ciclico (CSS)

-SONO TUTTE PROVE ESEGUITE IN CONDIZIONI NON DRENATE DOPO AVER SATURATO E CONSOLIDATO I PROVINI

# In base ai livelli deformativi:

- Caratterizzazione terreno per deformazioni minori della soglia di linearità ( $\gamma < 10^{-6}$ ): **BENDER ELEMENTS**
- Livelli deformativi da bassi a medio-alti ( $10^{-6} < \gamma < 10^{-2}$ ): **RC** e **CTS**
- Alti livelli deformativi ( $\gamma > 10^{-3}$ ) e resistenze post-cicliche: (**TXC** e **CSS**)



# Prove dinamiche

## ■ Bender elements:

Permettono di calcolare il valore di  $G_0$  a piccoli livelli deformativi ( $\gamma < 10^{-6}$ ) entro il campo di linearità

Trasduttori elettromeccanici in piezoceramica posizionati alla base e alla sommità del provino.

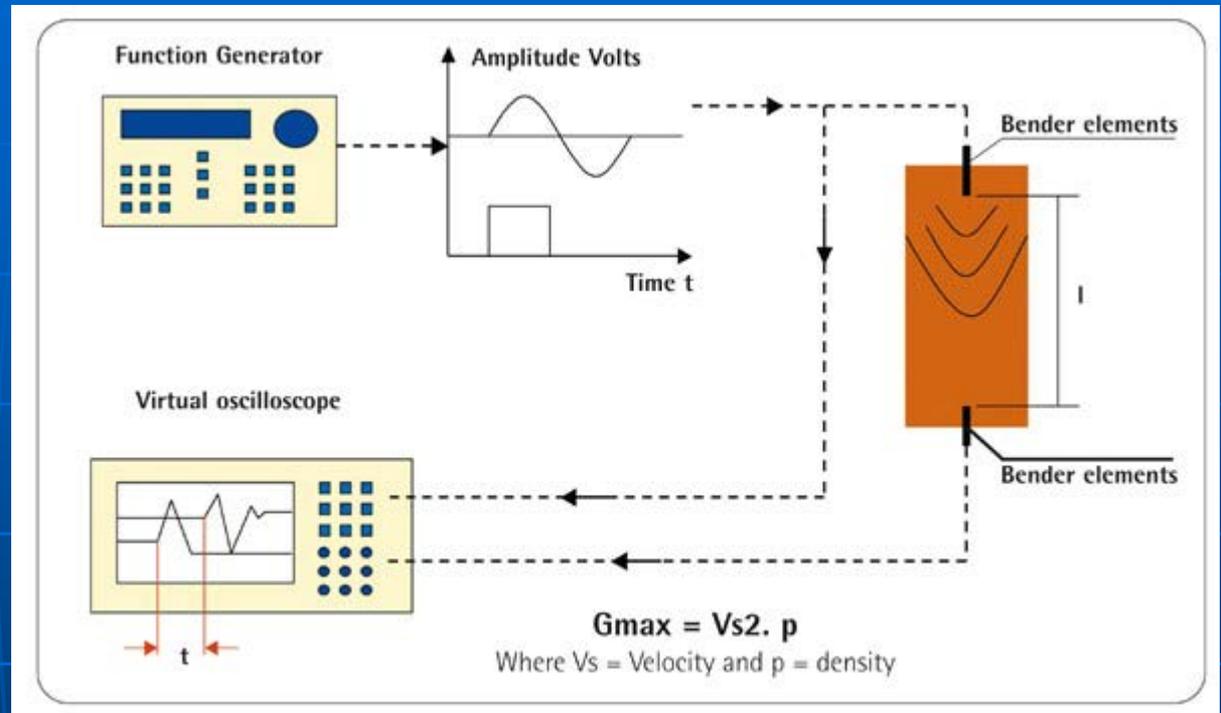
1 emettitore e 1 ricevitore



Si eccita il sensore sorgente tramite un segnale elettrico (onda sinusoidale) in modo che deformandosi emetta onde di taglio di ampiezza costante all'interno del provino.

Il ricevitore viene colpito dalle onde si deforma e genera una corrente elettrica registrata da oscilloscopio: si determina il tempo di arrivo delle onde S e la velocità delle onde  $V_s$ .

Conoscendo la velocità  $V_s$  e la densità del provino si calcola  $G_0$  tramite:  
 $G_0 = \rho V_s^2$



# Prove dinamiche

- Colonna risonante:
  - -alte frequenze(occorre tenere conto nei calcoli dell'inerzia di tutto il sistema motore-sensori)
  - -si indaga un campo di frequenze per definire la frequenza di risonanza (max def. di taglio)

## OBIETTIVI DELLA PROVA:

- Determinazione  $G_0$  e  $D_0$  a piccoli livelli deformativi ( $\gamma < 10^{-6}$ )
- Legge di decadimento  $G$ ,  $D$  e  $RU$
- Valutazione soglia lineare  $\gamma_i$  e soglia volumetrica  $\gamma_v$

# Modalità di prova:

- Applicazione di un momento torcente di forma sinusoidale alla sommità di un provino cilindrico fixed-free (base fissa e sommità libera di ruotare), aumentando gradualmente la frequenza
- Si determina la frequenza di risonanza del provino come la frequenza a cui si ottiene la max deformazione di taglio
- Applicando la teoria di propagazione delle onde elastiche in un mezzo cilindrico, si può calcolare la velocità  $V_S$  e da qui il valore del modulo di taglio  $G = \rho V_S^2$
- Misura della deformazione di taglio: -diretta (sensore di prossimità); -indiretta (accelerometro)
- Smorzamento  $D$  si misura con due metodi: -Decadimento logaritmico oscillazioni libere; -Half Power Bandwidth (a oscillazioni forzate)
- Si procede per step successivi aumentando ogni volta l'ampiezza del momento torcente in modo da costruire la legge di decadimento del terreno (aumentando l'ampiezza del momento torcente aumenta la def. di taglio e diminuisce la frequenza di risonanza)





Ampiezza momento torcente



Freq. risonanza, Vs e G



$\gamma$ , D e RU

# Prova di colonna risonante: singolo step di prova

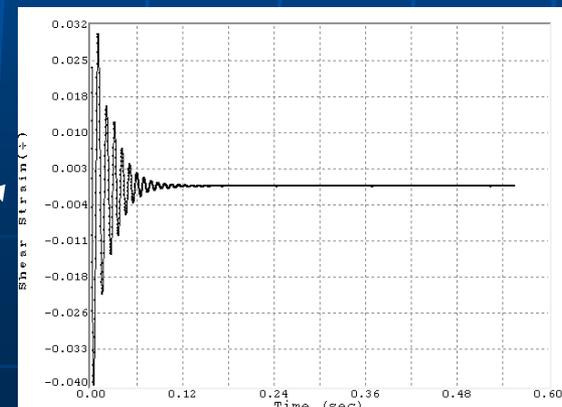
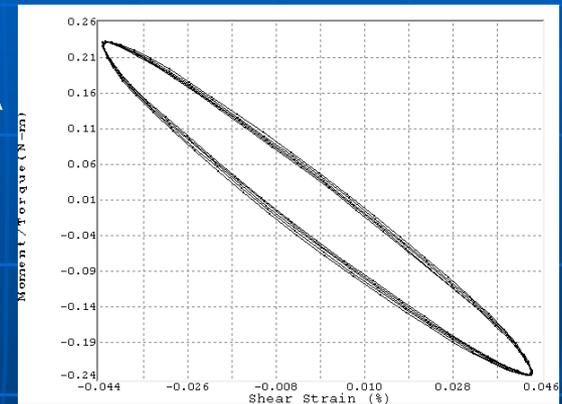
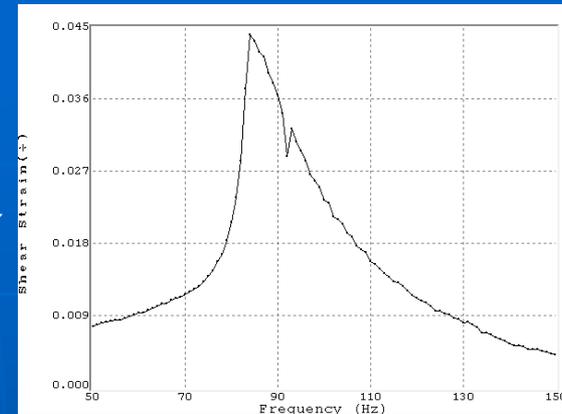
1- campo delle frequenze indagate

2- ellissi di isteresi t-γ in condizioni di oscillazioni forzate

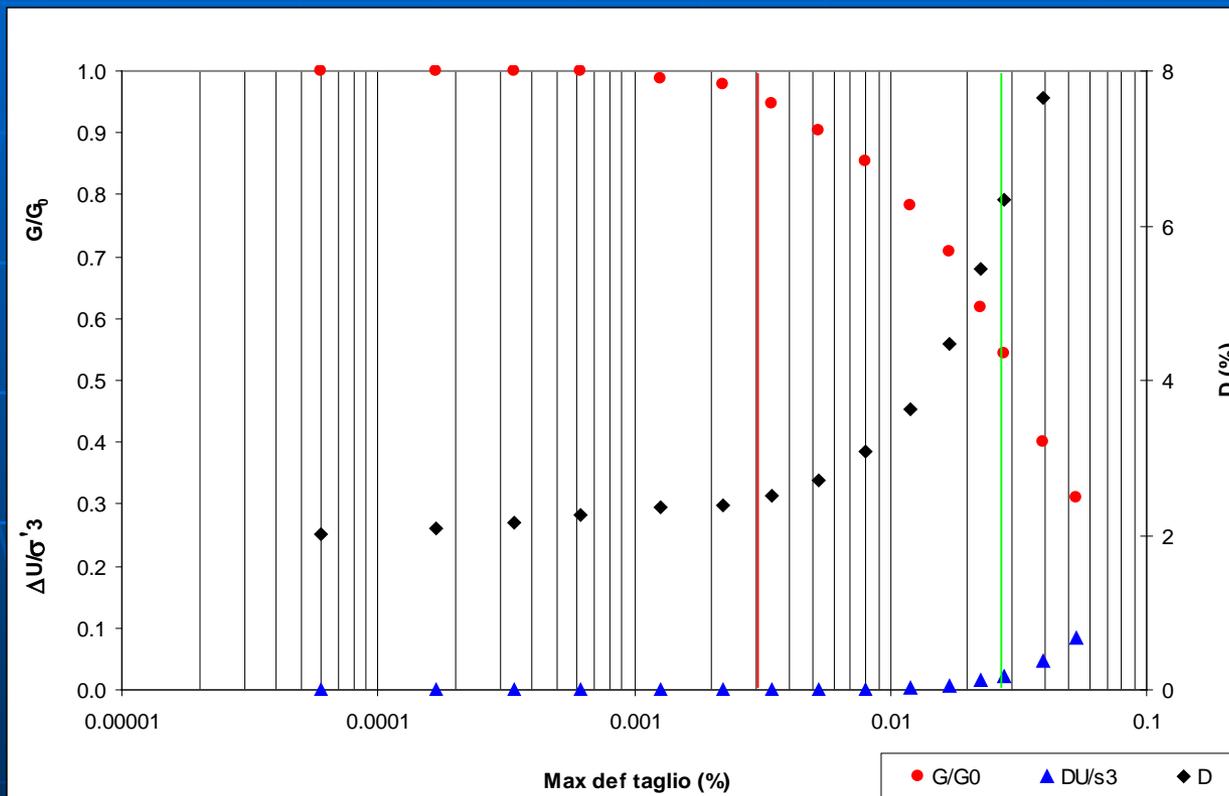
3- decadimento della deformazione (smorzamento) per oscillazioni libere

**$G = \rho V_s^2$**  (da legge di propagazione delle onde sismiche in un mezzo cilindrico, elastico, isotropo ed omogeneo)

D : -HPB (oscillazioni forzate); -oscillazioni libere (decremento logaritmico dell'ampiezza delle oscillazioni )



Legge di decadimento del modulo di taglio normalizzato ( $G/G_0$ ), dello smorzamento ( $D$ ) e delle sovrappressioni interstiziali ( $RU$ ) rispetto al logaritmo della deformazione di taglio  $\gamma$



Soglia lineare:  
95%  $G/G_0$

Soglia  
volumetrica:  
circa 0,01 -  
0.05 RU

# PROVE CICLICHE

-TAGLIO TORSIONALE CICLICO

- PROVA TRIASSIALE CICLICA

- “PROPERTY” (ASTM D3999)

- POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE  
(ASTM D5311)

# -TAGLIO TORSIONALE CICLICO

-PROVA CICLICA A FREQUENZA BASSA E COSTANTE  
( $0,1 < \text{Hz} < 2$ )

- PROVA NON DISTRUTTIVA

-Si ricavano G, D e RU per una data DEFORMAZIONE DI TAGLIO ottenuta per una certa ampiezza del momento torcente applicato e si costruiscono le leggi di decadimento del terreno

- la misura del momento torcente avviene in maniera diretta tramite apposito sensore

-La misura della deformazione avviene in maniera diretta tramite utilizzo del sensore di prossimità

Prova di taglio torsionale  
ciclico: programma di prova  
universale

Il momento torcente  
applicato ha forma  
sinusoidale e viene  
controllato in retroazione  
dall'input del torsore

Universal Test Program Definition

Test Program

ID: 1

Description:

Duration | Data Acquisition | Cycle Recording

Timed: 50.00000 Seconds

Until AI-1: Accelerometer

is >= 0.00 [g]

Until Output Completes: Torque Control Output

Master Output: Torque Control Output

Analog Outputs

AO-1: Axial Actuator - Not Defined

AO-2: Cell Pressure - Not Defined

AO-3: Back Pressure - Not Defined

AO-4: Torque Control Output - Sine

Digital Outputs Control

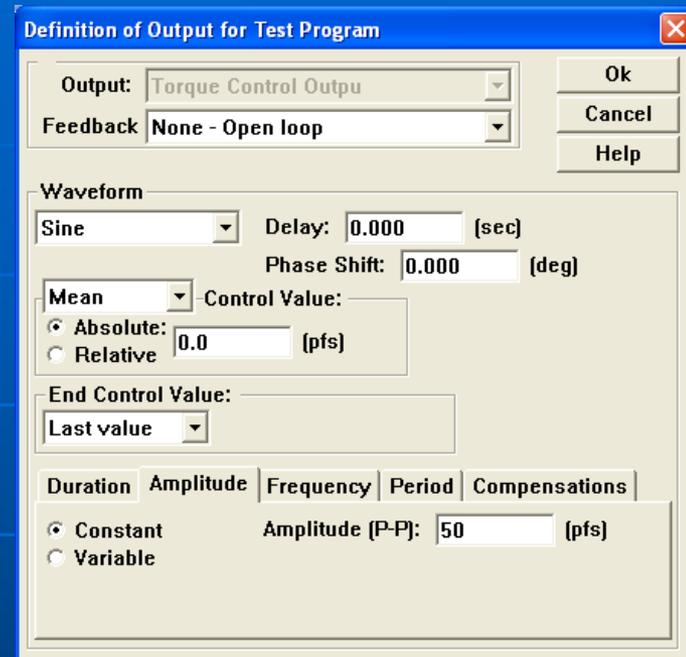
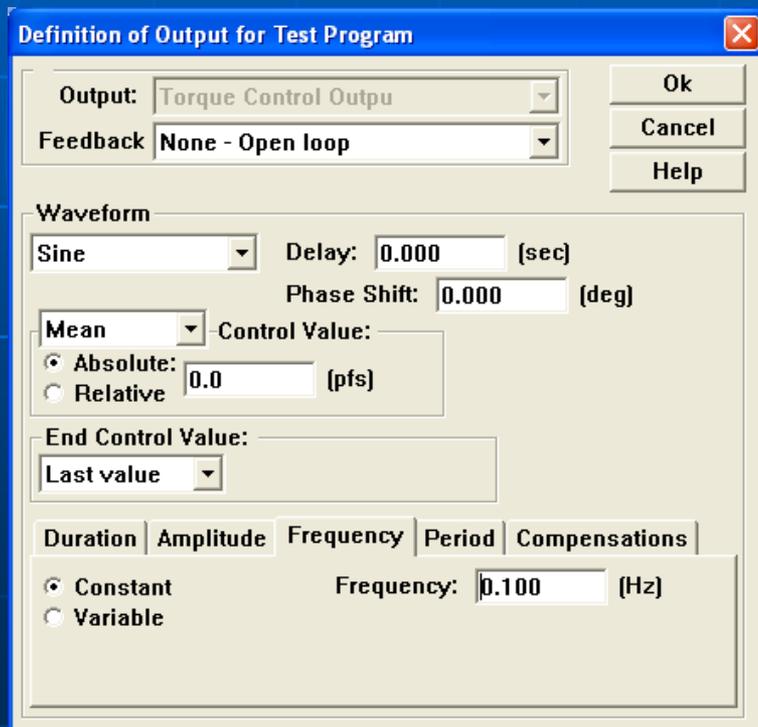
#	Digital Output	Control
DO-1:	Motor Inhibit	On
DO-2:	Auto Ball Valve	Not Defined
DO-3:	Digital Output 3	Not Defined
DO-4:	Digital Output 4	Not Defined
DO-5:	Digital Output 5	Not Defined

On Pause - Control Digital Output:

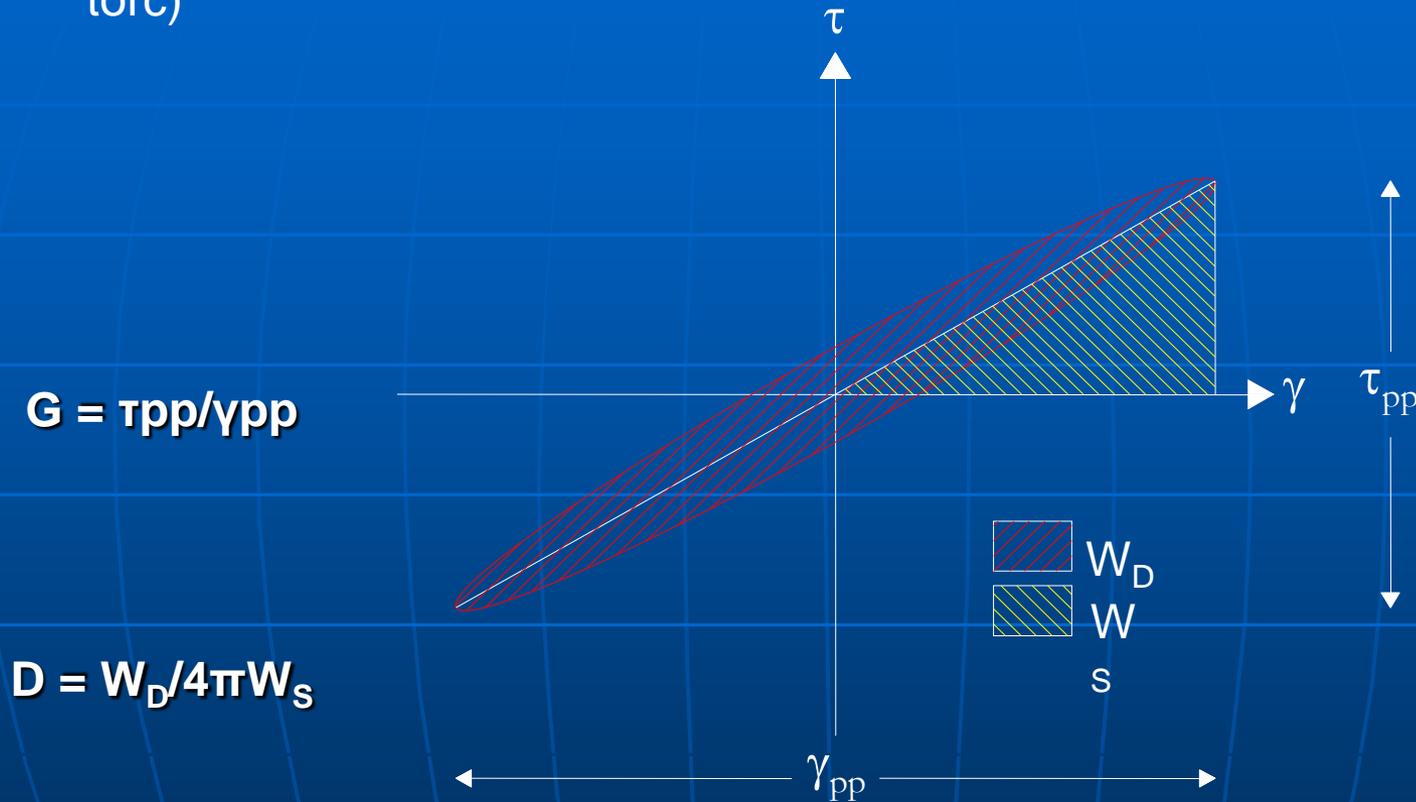
[none] Turn Off

Per ogni singolo step di prova:

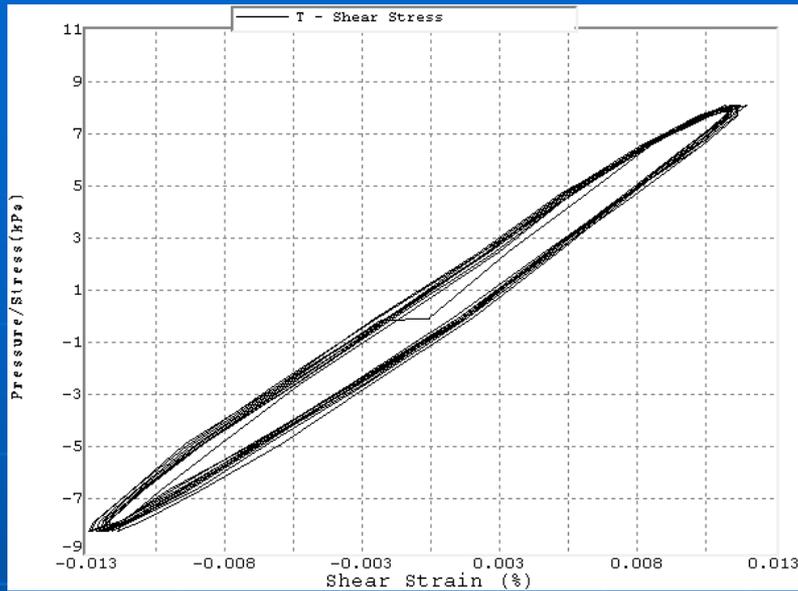
- Si definisce l'ampiezza del momento torcente da applicare e si mantiene costante la frequenza



Per ogni step di prova i valori di G e D si ricavano dalle ellissi di isteresi (def-mom torc)

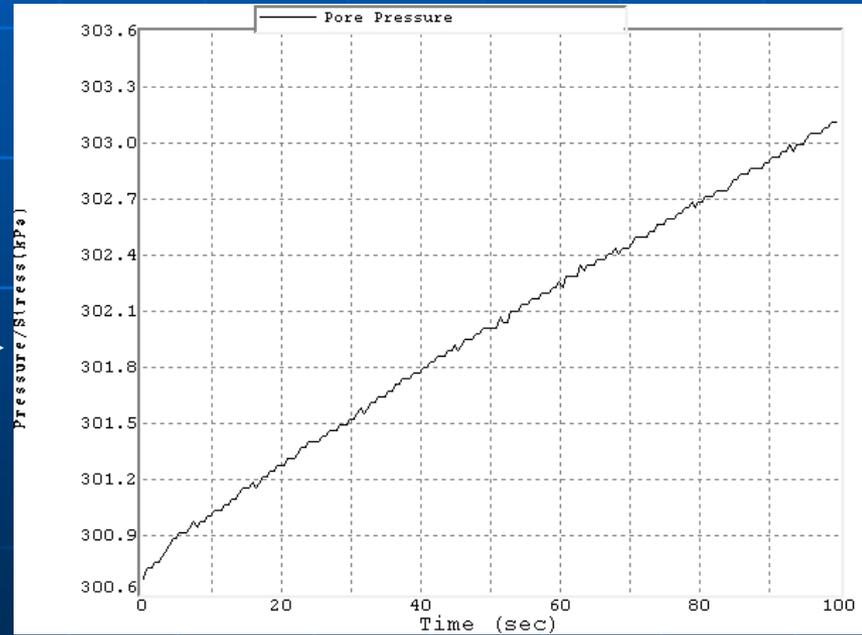


Dove:  $W_D$  = energia dissipata durante il ciclo e  $W_s$  = energia di dissipazione elastica spesa x raggiungere il max livello deformativo nel ciclo

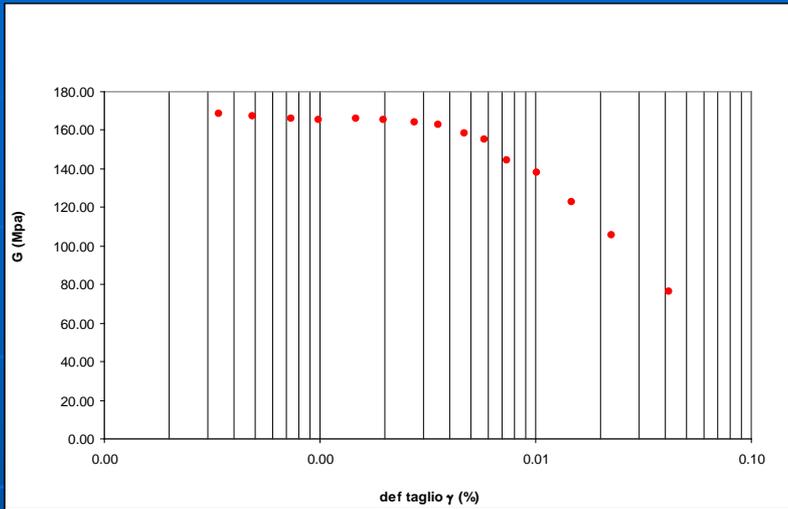


← Ellissi di isteresi  $\tau/\gamma$

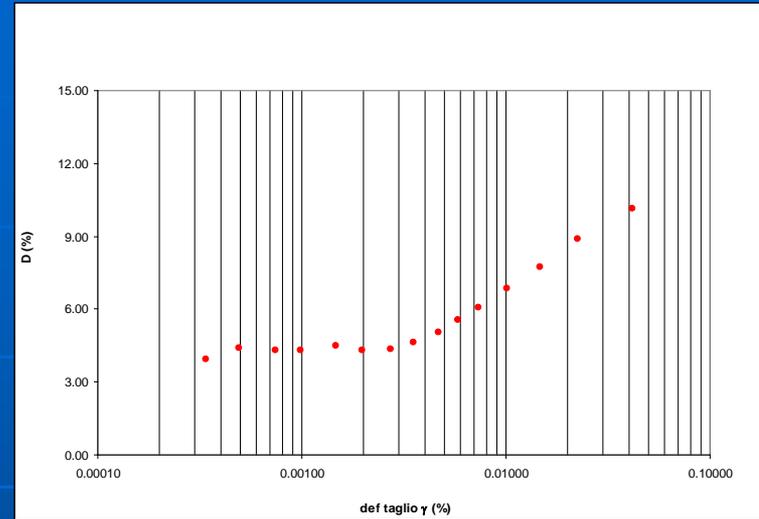
Incremento della pressione interstiziale



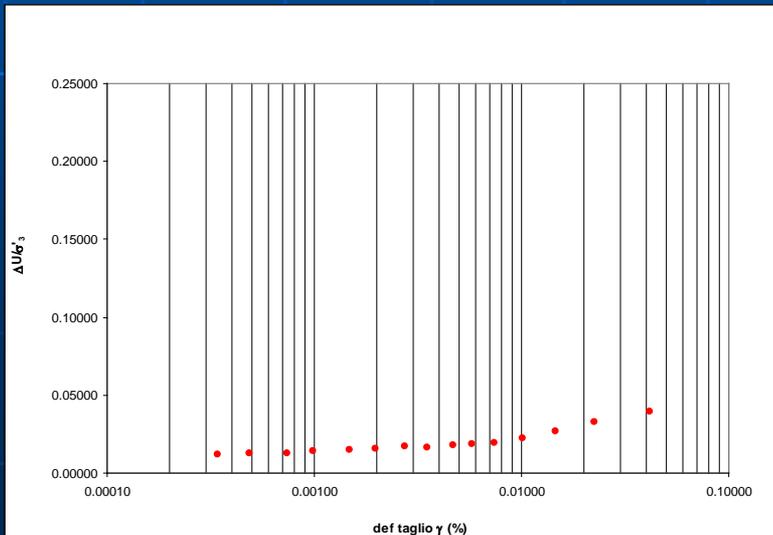
1



2



3

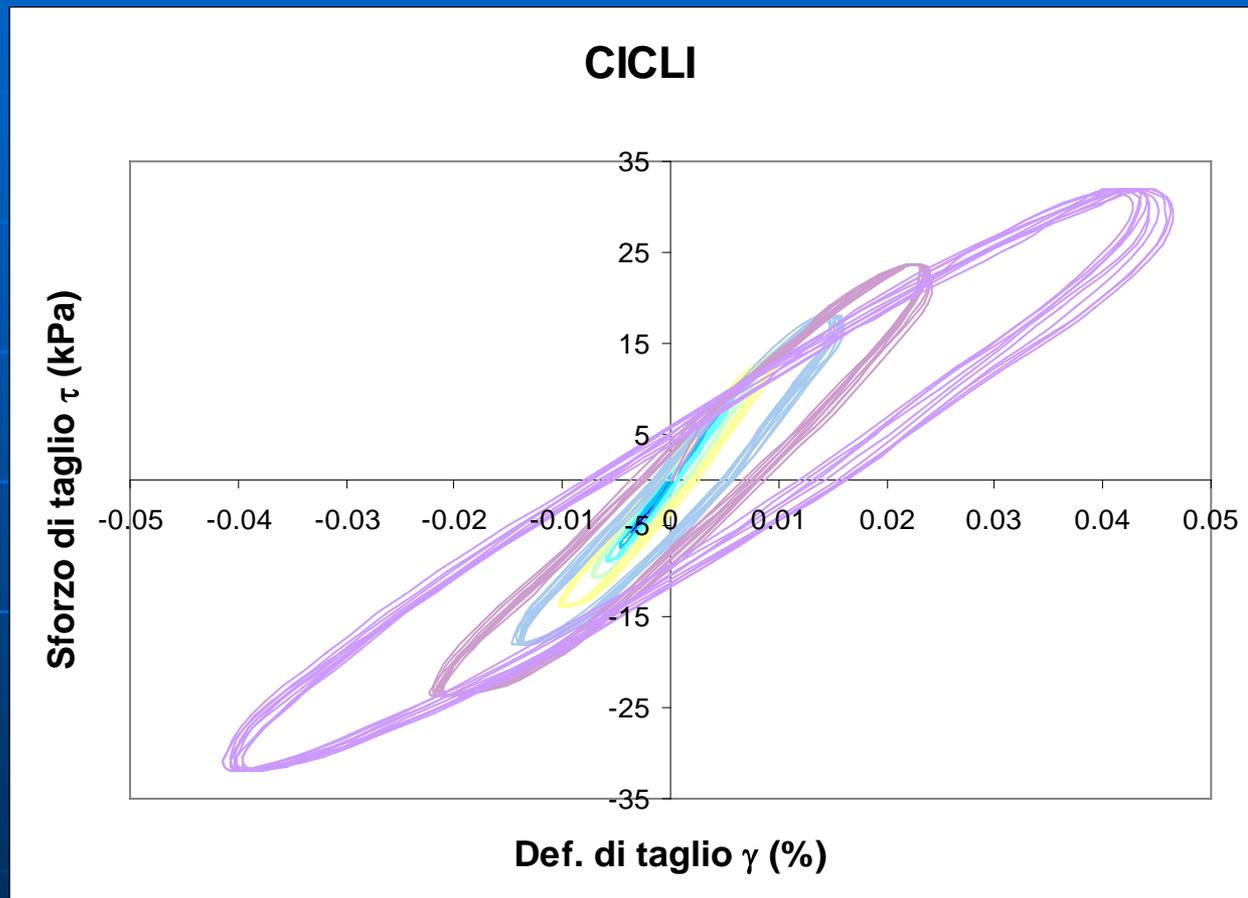


1- G vs  $\gamma$

2- D vs  $\gamma$

3- RU vs  $\gamma$

Grafico d'insieme di tutti gli step di prova



# PROVA TRIASSIALE CICLICA DI TIPO PROPERTY (ASTM D 3999)

Prova non distruttiva, CU, a frequenza bassa e costante ( $0,1 < \text{Hz} < 2$ ), con forma d'onda del carico di tipo sinusoidale

Carico ciclico applicato longitudinalmente da un attuatore assiale pneumatico

Prova a carico o a deformazione controllata

Dati da ricavare per ogni step di prova: E, D(assiale) e RU

Eventualmente studio comportamento post-ciclico (rottura monotonica del provino in condizioni non drenate)

Prova triassiale ciclica  
“property”: programma di  
prova universale

Il carico assiale ciclico  
applicato ha forma  
sinusoidale e viene  
controllato in retroazione  
dall’input del carico assiale  
(prova a carico controllato) o  
dalla deformazione assiale  
(prova a deformazione  
controllata)

Universal Test Program Definition

Test Program

ID:

Description:

Ok  
Cancel  
Help

Duration | Data Acquisition | Cycle Recording

Timed:

Until

is

Until Output Completes:

Master Output:

Analog Outputs

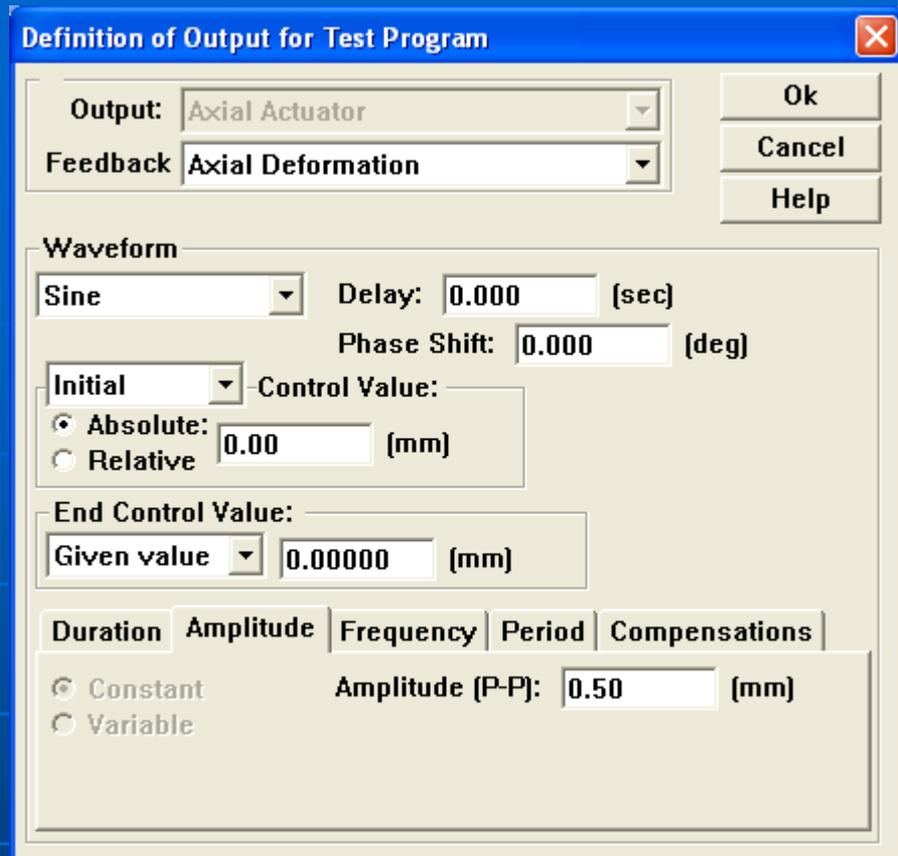
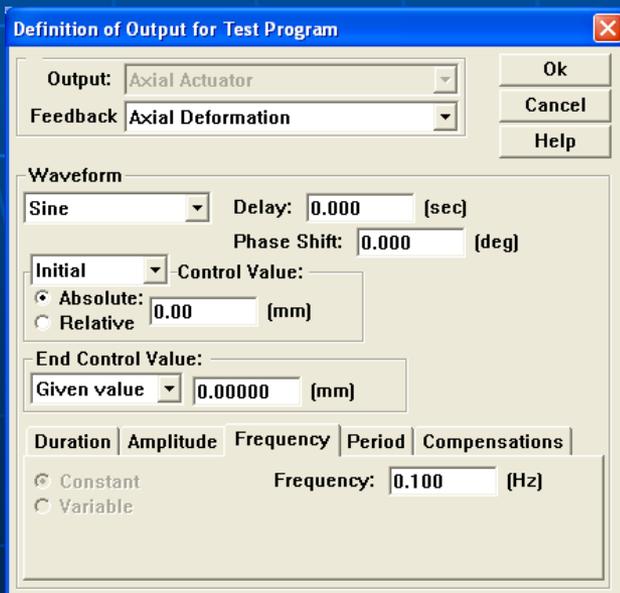
AO-1: Axial Actuator - Sine  
AO-2: Cell Pressure - Not Defined  
AO-3: Back Pressure - Not Defined  
AO-4: Torque Control Outpu - Not Defined

Define  
Undefine

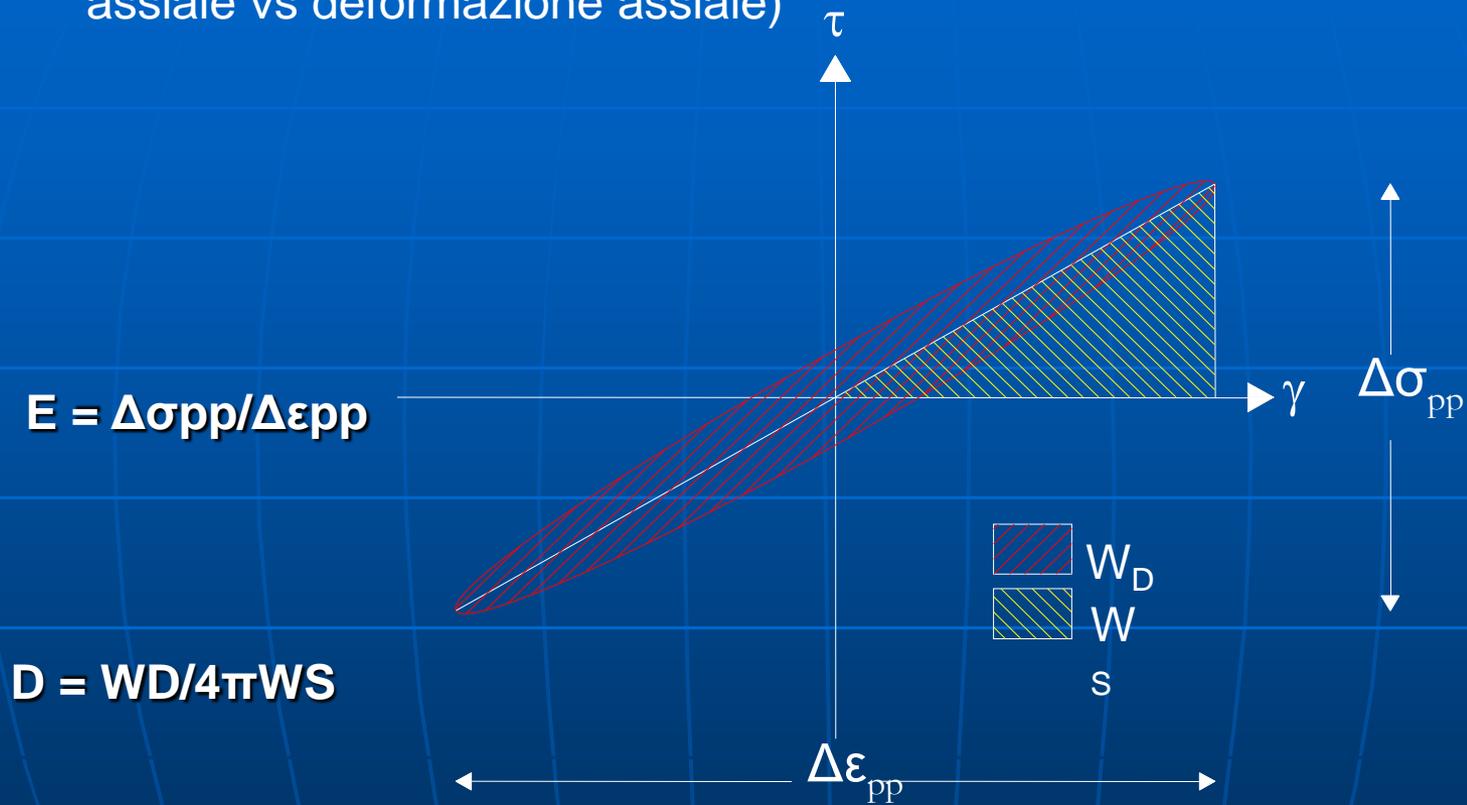
Digital Outputs Control

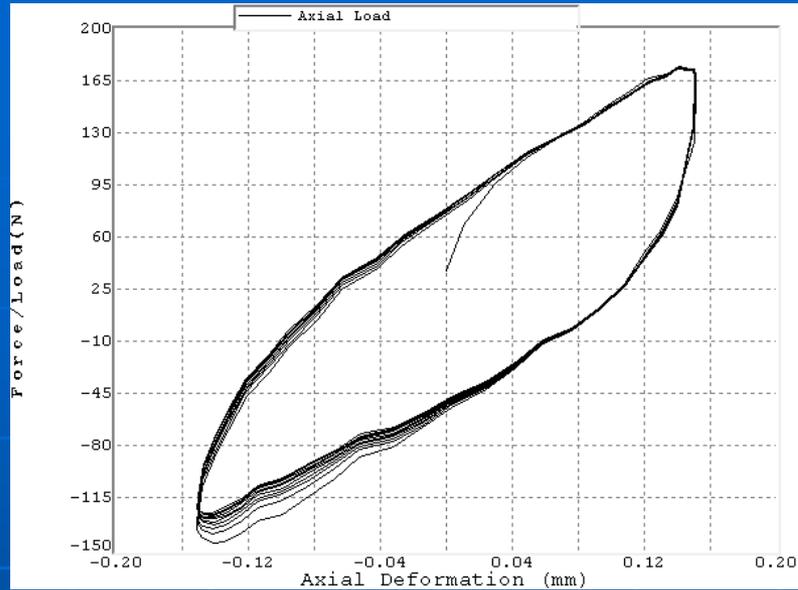
Per ogni singolo step di prova:

- Si definisce l'ampiezza del carico assiale o della deformazione assiale (entrambe di doppia ampiezza o picco-picco) da applicare e si mantiene costante la frequenza



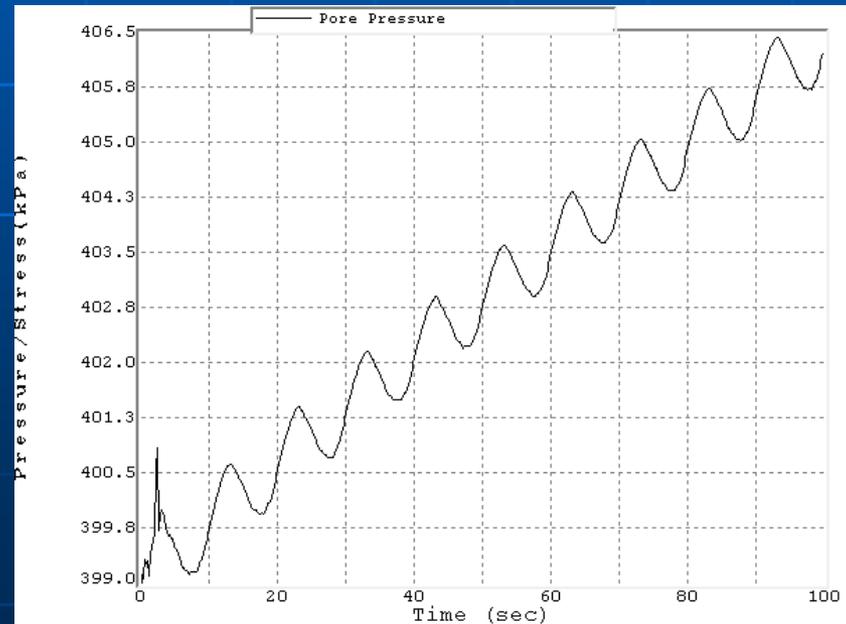
Per ogni step di prova i valori di E e D si ricavano dalle ellissi di isteresi (carico assiale vs deformazione assiale)



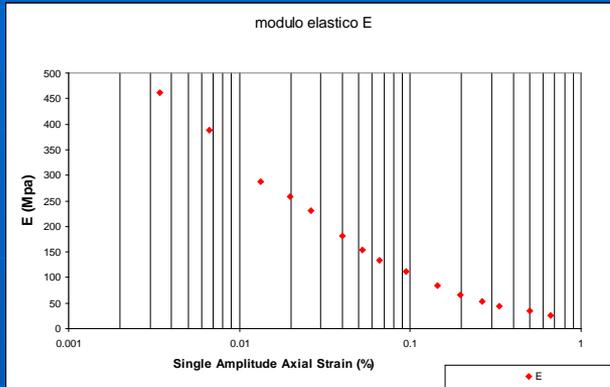


Ellisse di isteresi carico  
assiale vs deformazione  
assiale

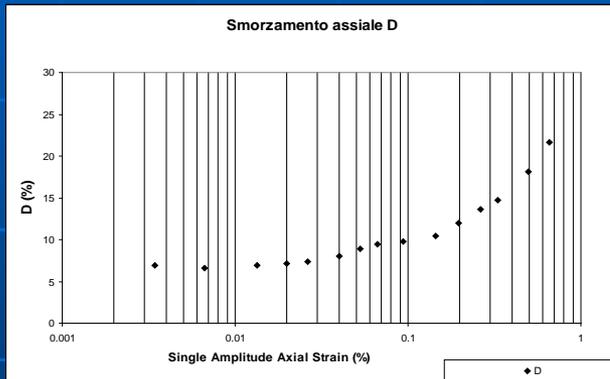
Aumento della  
pressione interstiziale  
durante la fase di  
carico ciclico



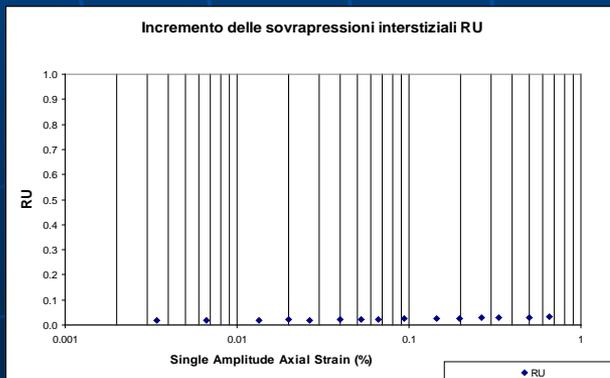
# GRAFICI



E (MPa) vs  $\epsilon$  (%)



D (%) vs  $\epsilon$  (%)



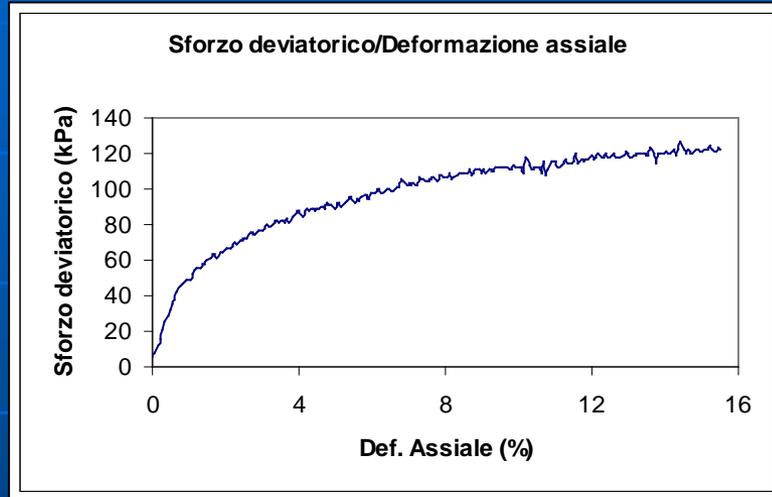
RU vs  $\epsilon$  (%)

# RESISTENZA POST-CICLICA

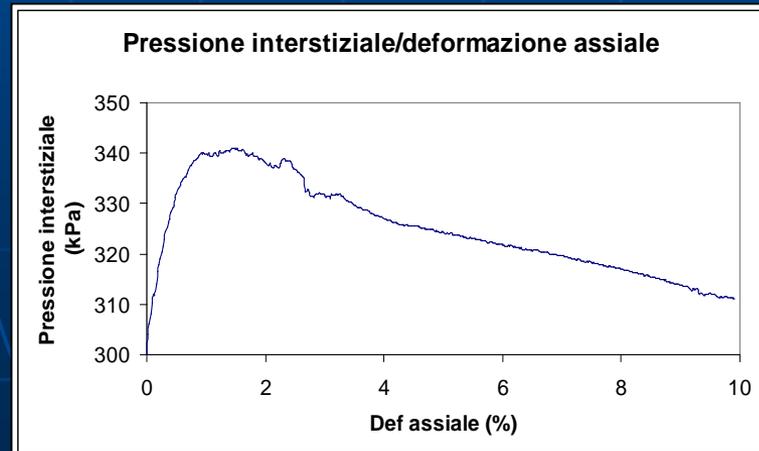
- Valuta la perdita di resistenza del provino dovuta ai carichi ciclici applicati (rottura monotonica del provino in condizioni non drenate)
- Dati da monitorare: -dissipazione delle pressioni interstiziali nel tempo;  
- valori degli sforzi deviatori durante la fase di taglio monotonica

# Grafici per la fase di rottura post-ciclica

Sforzo deviatorico / Deformazione assiale



Pressione interstiziale / Deformazione assiale



# PROVA TRIASSIALE CICLICA per ottenere il potenziale di liquefazione (ASTM D 5311)

Prova distruttiva da eseguire su più provini (min 3) a diverso SR (fattore di sforzo), CU, a frequenza bassa e costante ( $0,1 < \text{Hz} < 2$ ), con forma d'onda del carico di tipo sinusoidale

Carico ciclico applicato longitudinalmente da un attuatore assiale pneumatico

Prova a carico controllato

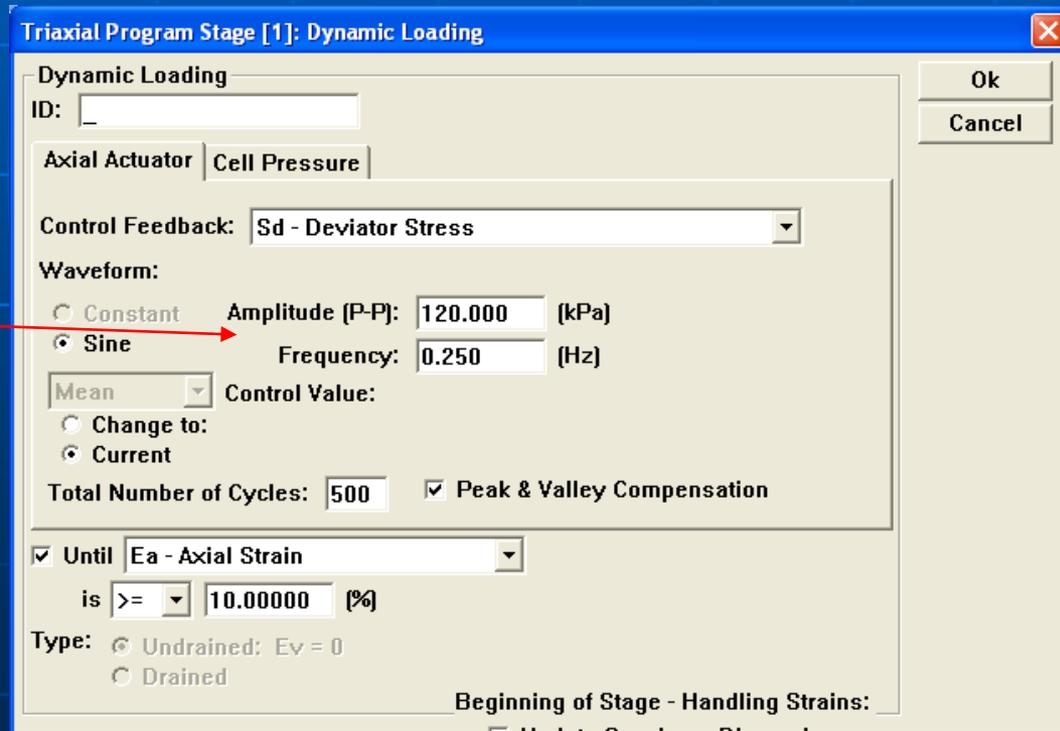
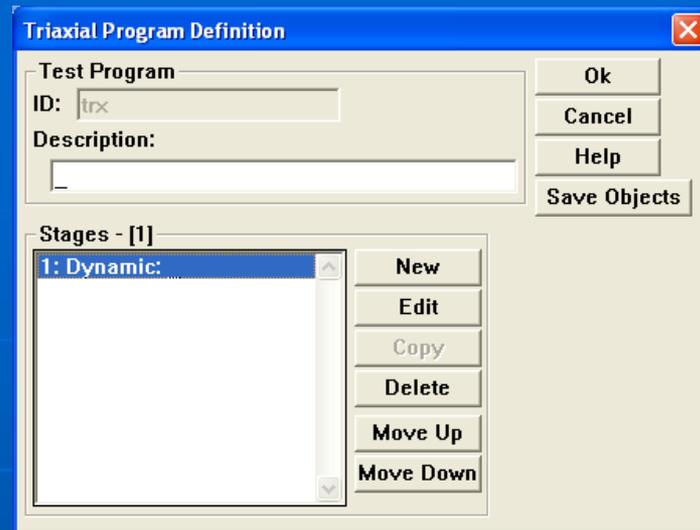
Dati da ricavare per ogni provino: determinazione RESISTENZA CICLICA data dalla relazione tra rapporto di sforzo ( $\sigma_{dev}/2\sigma_3'$ ) e numero di cicli per cui si ottiene la liquefazione

Prova triassiale ciclica “a liquefazione”: programma di carico dinamico

Il controllo è fornito dall'input dello sforzo deviatorico

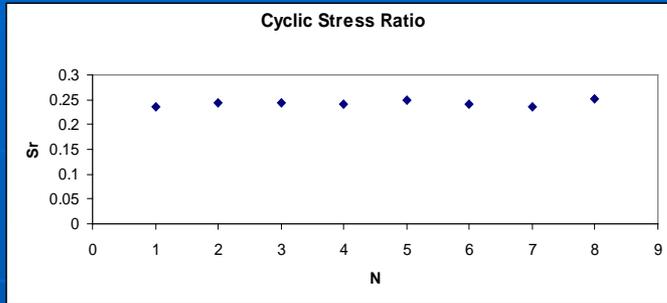
Per ogni campione si definisce l'ampiezza picco-picco del carico assiale da applicare (in funzione del SR desiderato). La frequenza è costante per tutti i provini

carico ciclico: -one way (solo compressione); -two way (compressione ed estensione)

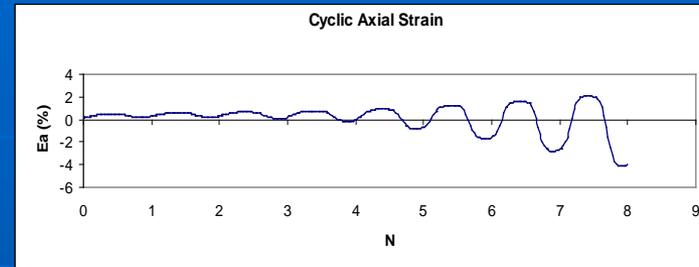


# GRAFICI

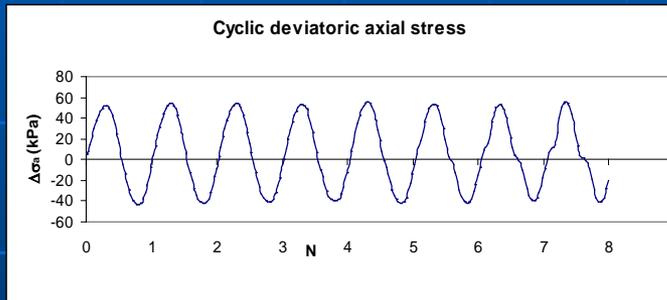
## Rapporto di sforzo/numero di cicli



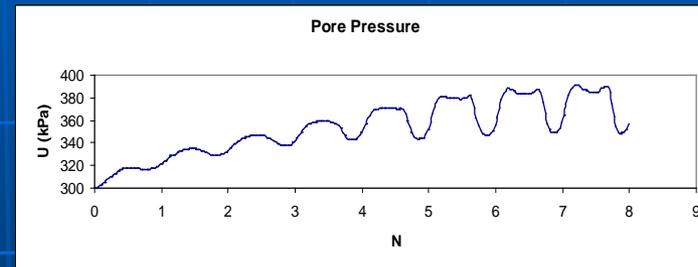
## Deformazione assiale/numero di cicli



## Carico assiale ciclico/numero di cicli



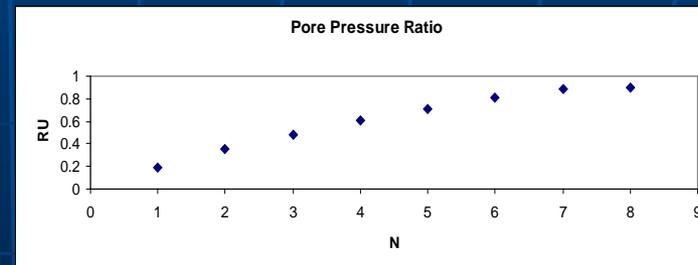
## Pressione interstiziale/numero di cicli



La liquefazione si ottiene:

- Quando  $RU=1$
- Quando si perde la forma d'onda sinusoidale del carico
- quando si supera il 20% di deformazione assiale di doppia ampiezza del provino
- quando si raggiungono i 500 cicli

## RU/numero di cicli



## Curva di resistenza normalizzata in campo dinamico (SR vs N)

