

Venerdì 4 dicembre 2015, III GIORNATA DI FORMAZIONE

METODI GEOFISICI A SUPPORTO DEL MODELLO GEOLOGICO E DEL MODELLO GEOTECNICO

FONDAZIONE MUSEO CIVICO ROVERETO, Sala Conferenze "F. Zeni"

Il ruolo delle prove sismiche
nella costruzione del modello geotecnico

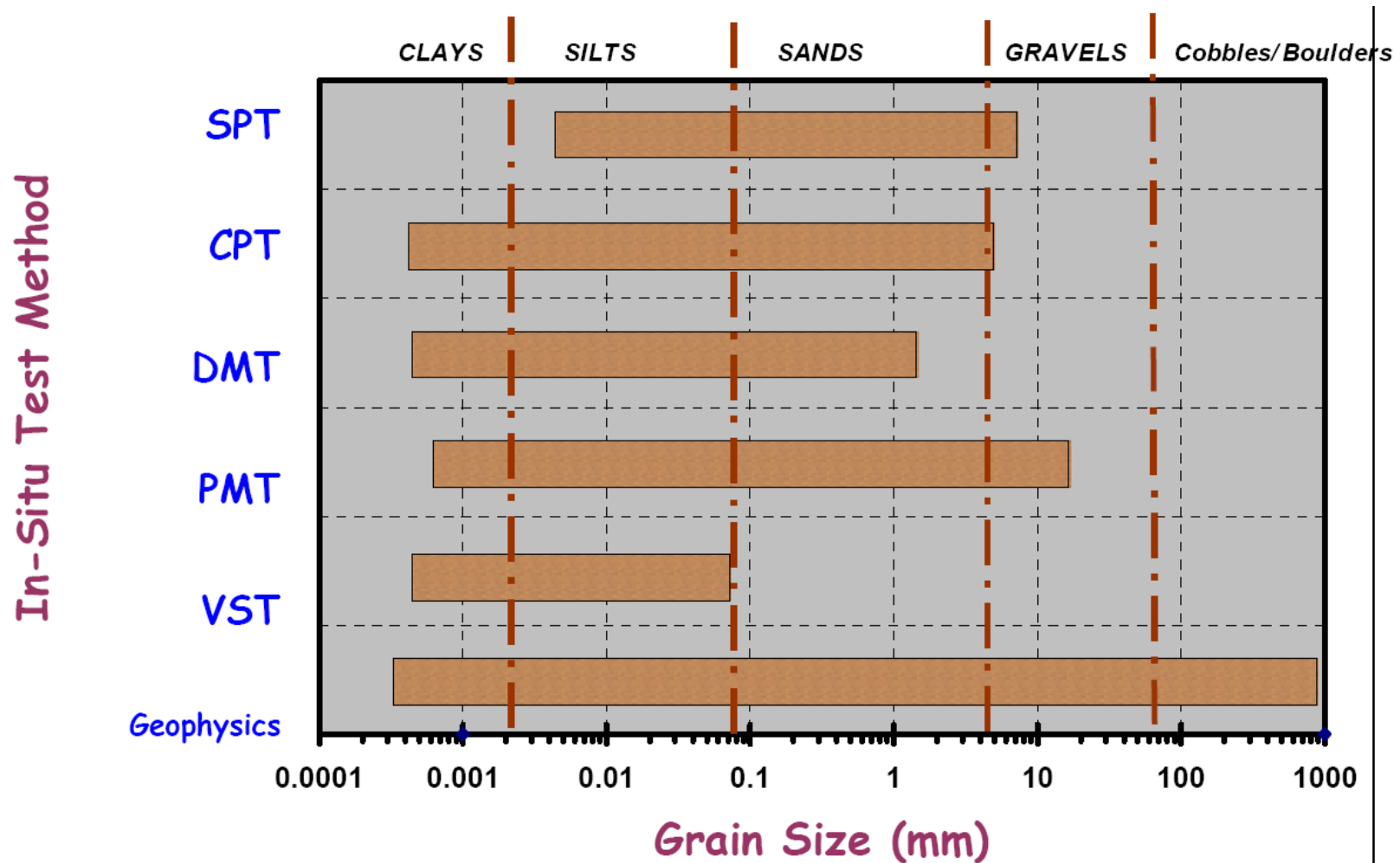
Sebastiano Foti



DISEG
POLITECNICO DI TORINO
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
STRUTTURALE, EDILE E
GEOTECNICA

Email: sebastiano.foti@polito.it
www.soilmech.polito.it/people/foti_sebastiano

Applicabilità delle prove in sito

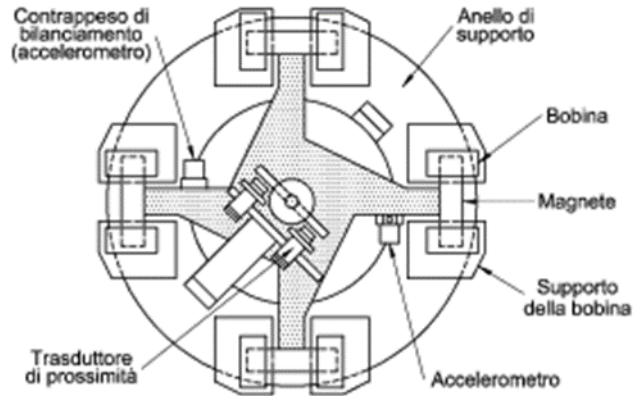


(Mayne et al, 2002)

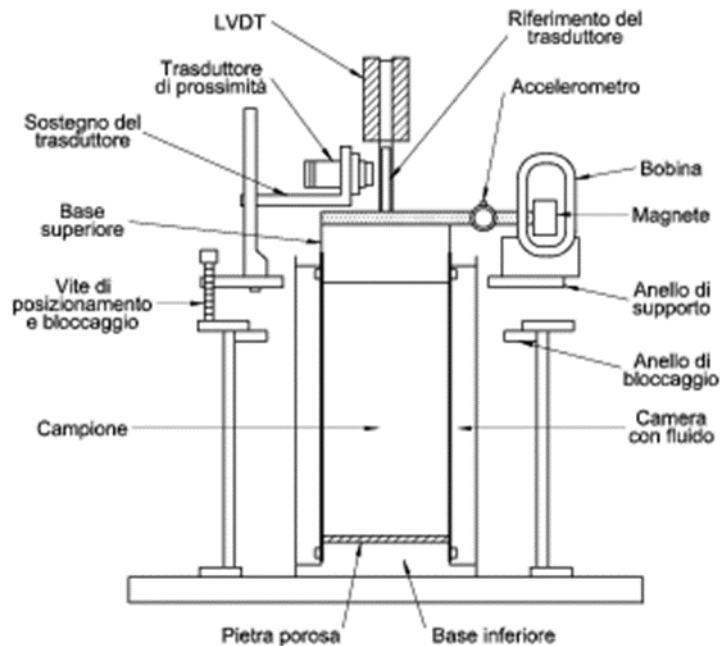
Indice

- Modulo di taglio a piccole deformazioni
 - Prove di laboratorio
 - Velocità di propagazione delle onde di taglio V_s
- Risposta sismica locale
 - Evidenza sperimentale
 - Modellazione
 - Il ruolo delle prove geofisiche
- Varie
 - Calcolo dei cedimenti
 - Correlazioni
- Velocità di propagazione delle onde di compressione V_p
 - Teoria di Biot
 - Applicazioni

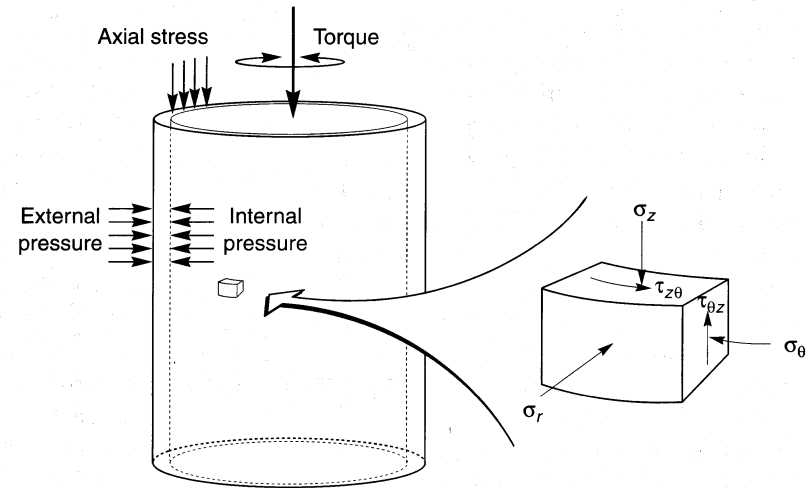
Taglio torsionale ciclico



Ripetendo la prova con diversi valori di forzante è possibile ricostruire la variazione della risposta in funzione della deformazione del provino.



(Kramer, 1996)



(Lancellotta, 2004)

Rappresentazione del comportamento ciclico dei terreni

In condizioni di carico ciclico possono definirsi i c.d. parametri equivalenti:

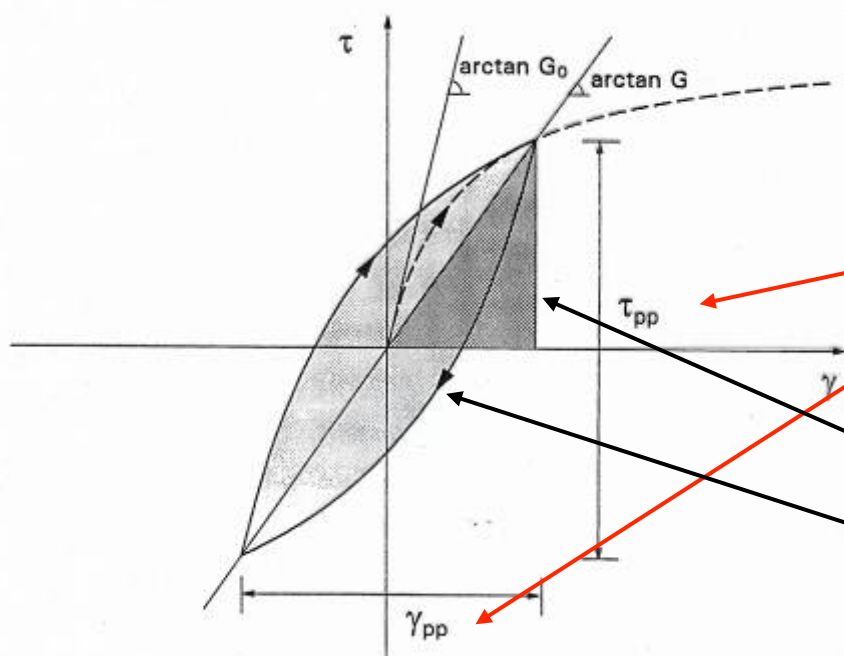
G = modulo di taglio

(G_0 = rigidezza a basse deformazioni = ρV_S^2)

$$G = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}}$$

D = fattore di smorzamento (*damping*)

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$



τ_{pp} = tensione picco-picco

γ_{pp} = deformazione picco-picco

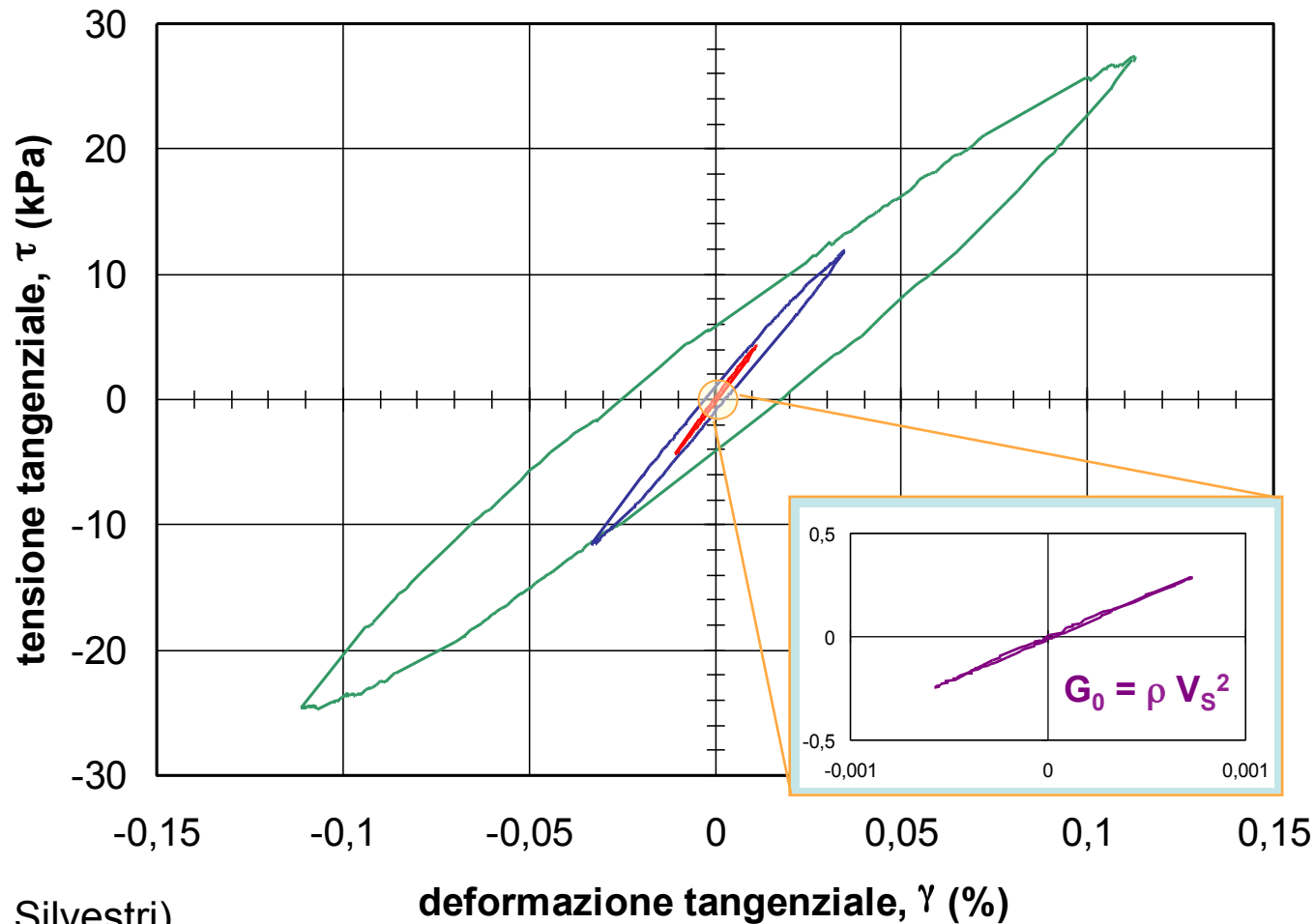
W_S = energia elastica equivalente

W_D = energia dissipata nel ciclo

Evidenza sperimentale della natura del legame τ - γ

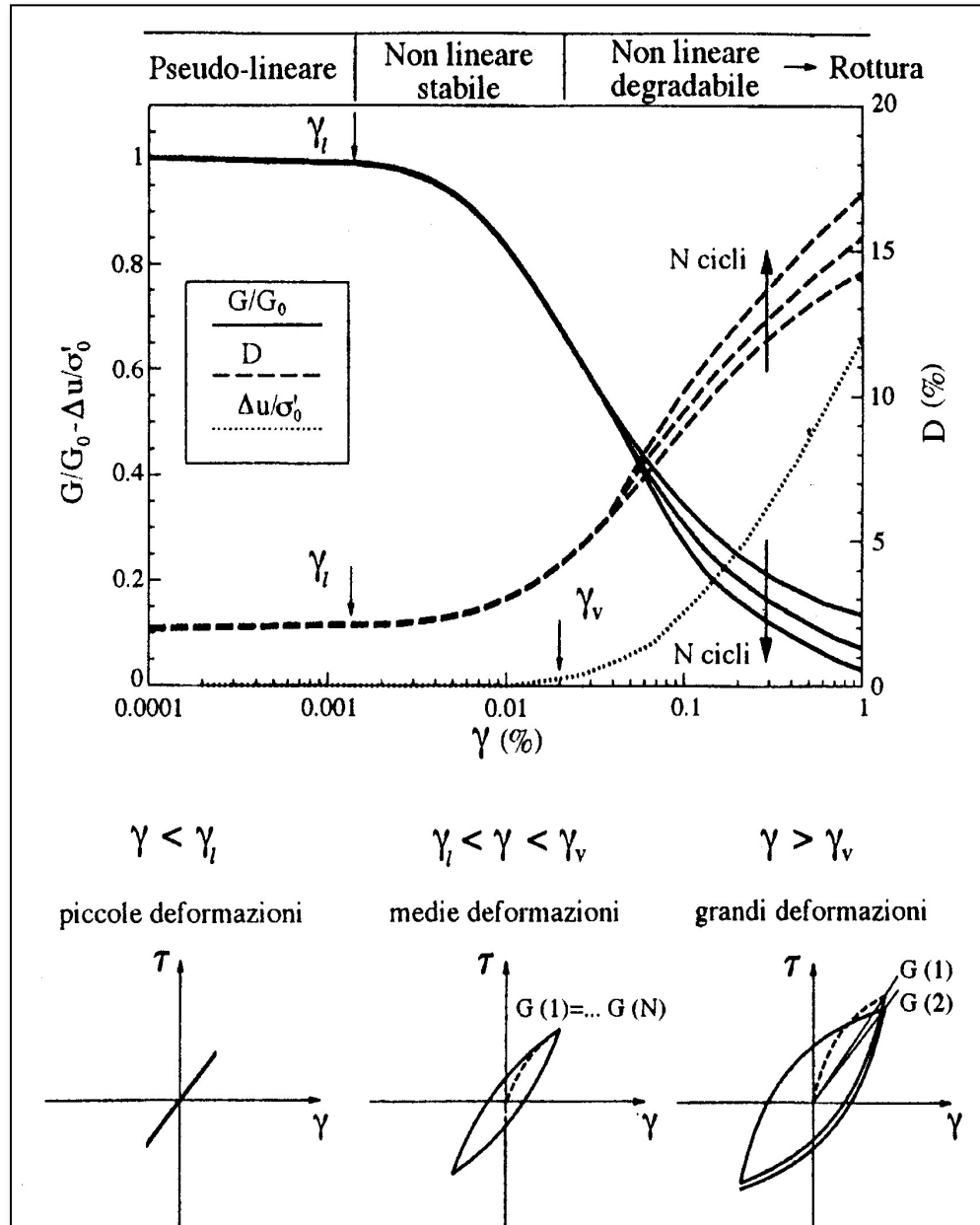
All'aumentare del livello di sollecitazione, il ciclo tensione-deformazione:

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



(cortesia F. Silvestri)

Threshold Strain Values (Valori di Soglia) (Vucetic, 1994)



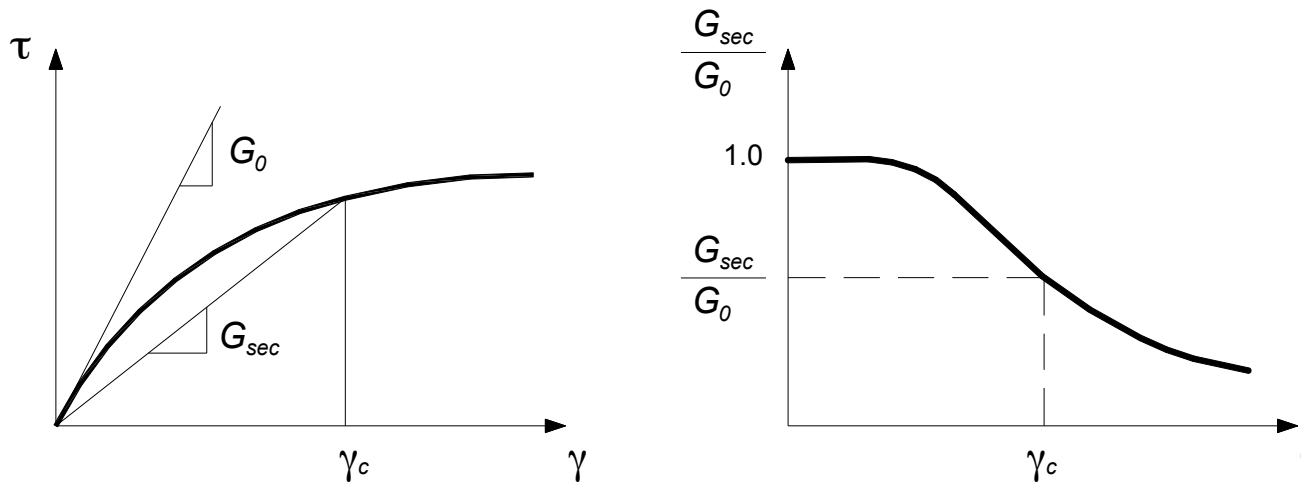
Praticamente relazione sforzi deformazioni lineare. Poca dissipazione

lineare γ_t^l → Comportamento non lineare. Poca influenza del numero di cicli (risposta stabile). Deformazioni plastiche limitate.

volumetrica γ_t^v → Grandi deformazioni plastiche (deformazioni volumetriche permanenti e accumulo sovrappressione interstiziale). Cicli non più stabili (Degradazione).

(Lanzo e Silvestri, 1999)

Modulo di taglio secante

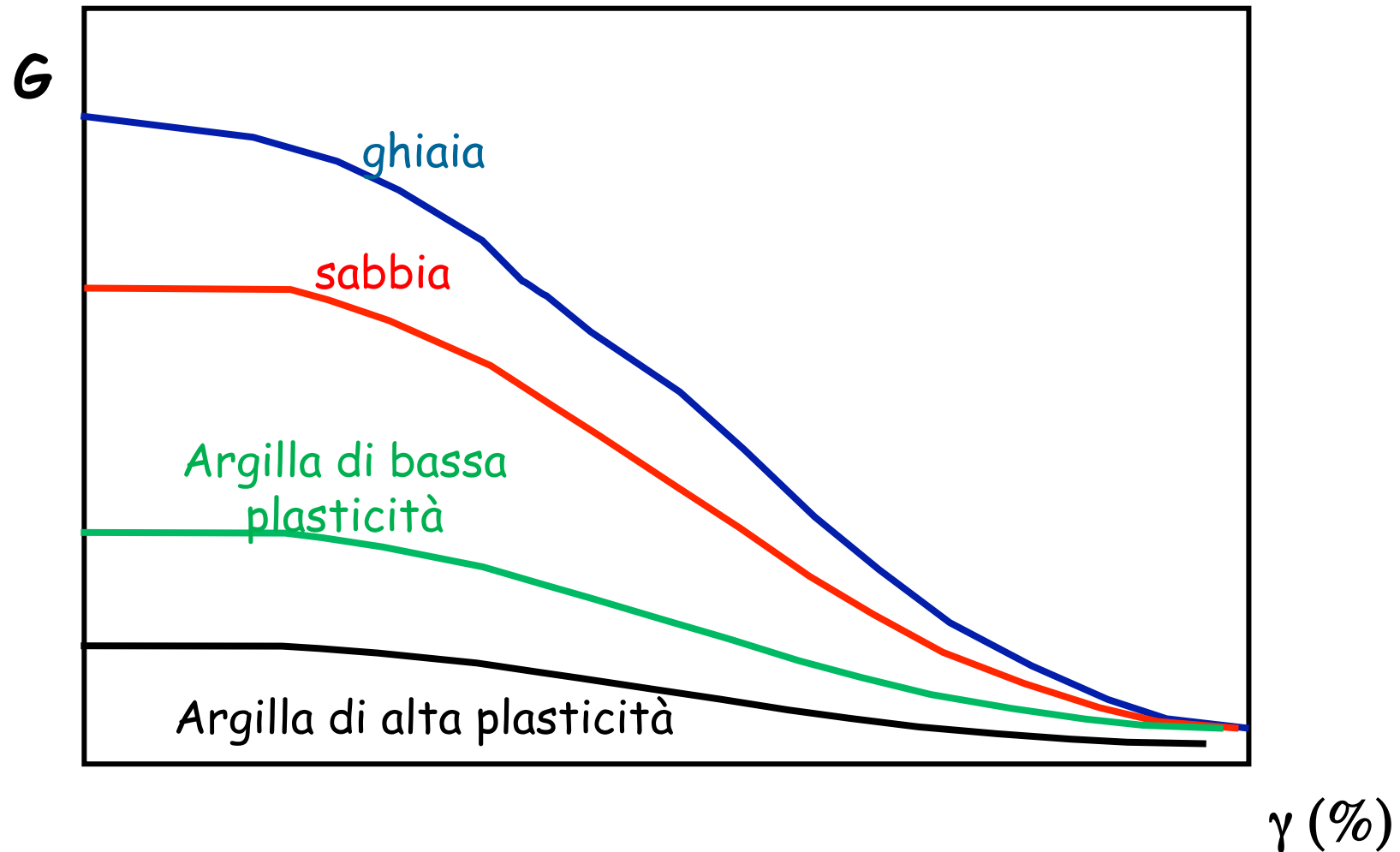


(Kramer, 1996)

Variazione del modulo secante in funzione della deformazione

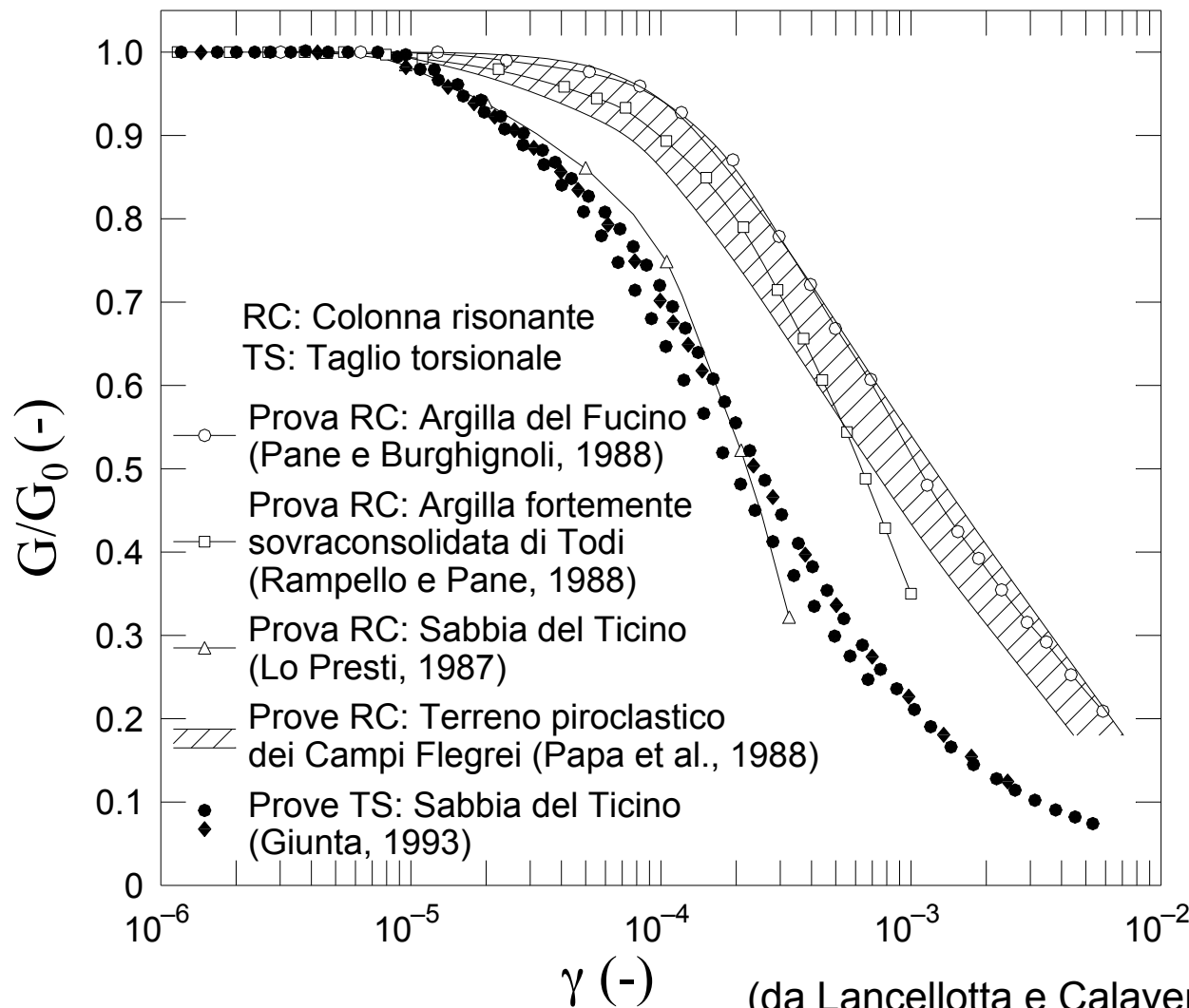
Nota: $G_{max} = G_0$: modulo iniziale a piccole deformazioni

Curve G- γ



(cortesia G. Lanzo)

Modulo secante normalizzato per diversi terreni



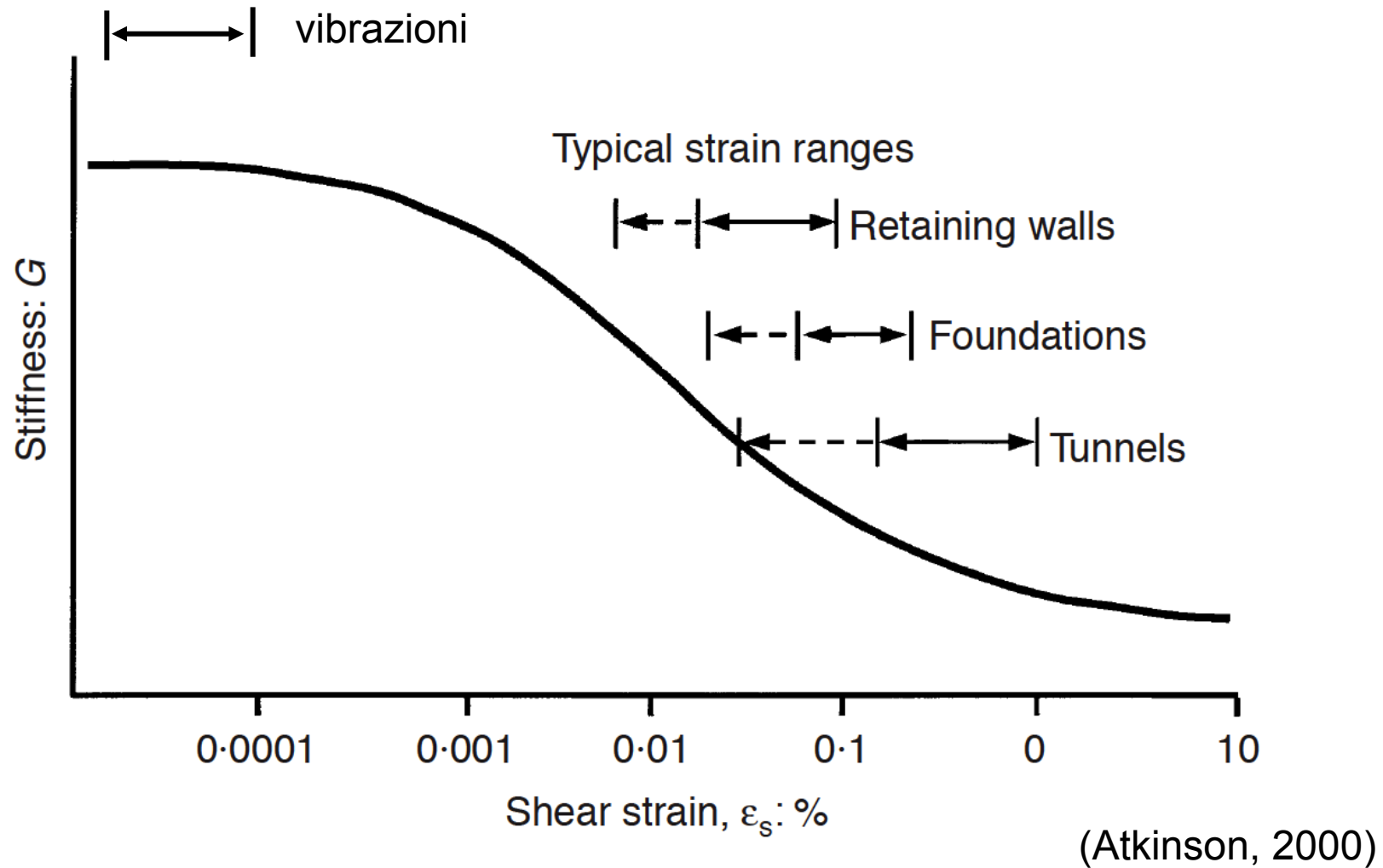
Soglia elastica ($G/G_0 > 0.99$)

aumenta con pressione di confinamento e indice di plasticità (contenuto fine)

limite inf.: 5×10^{-6}
(e.g. sabbia a 20 kPa)

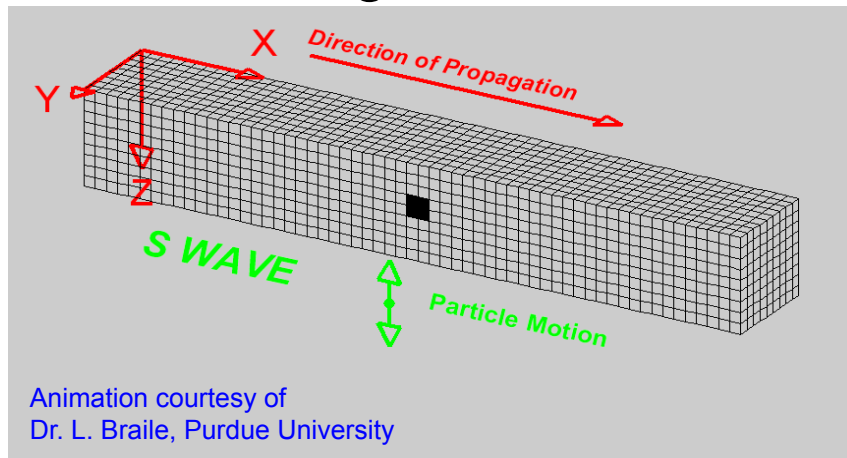
limite sup.: 10^{-4}
(e.g. caolinite a 200 kPa)

Intervalli di deformazione tipici



Metodi Sismici

Onde di taglio

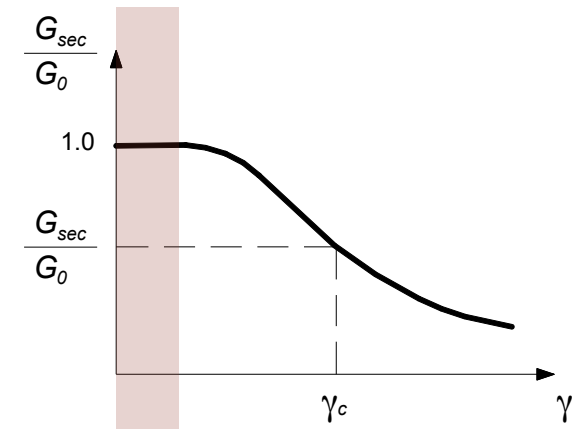
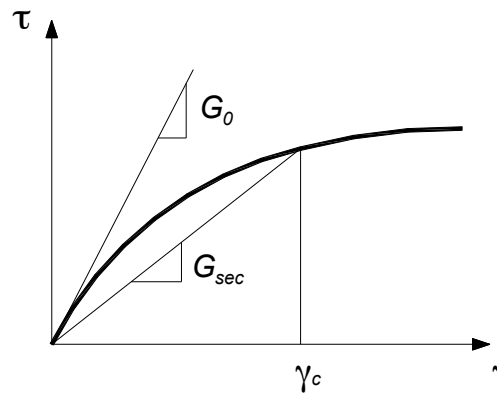


In un mezzo elastico lineare

$$G = \rho V_S^2$$

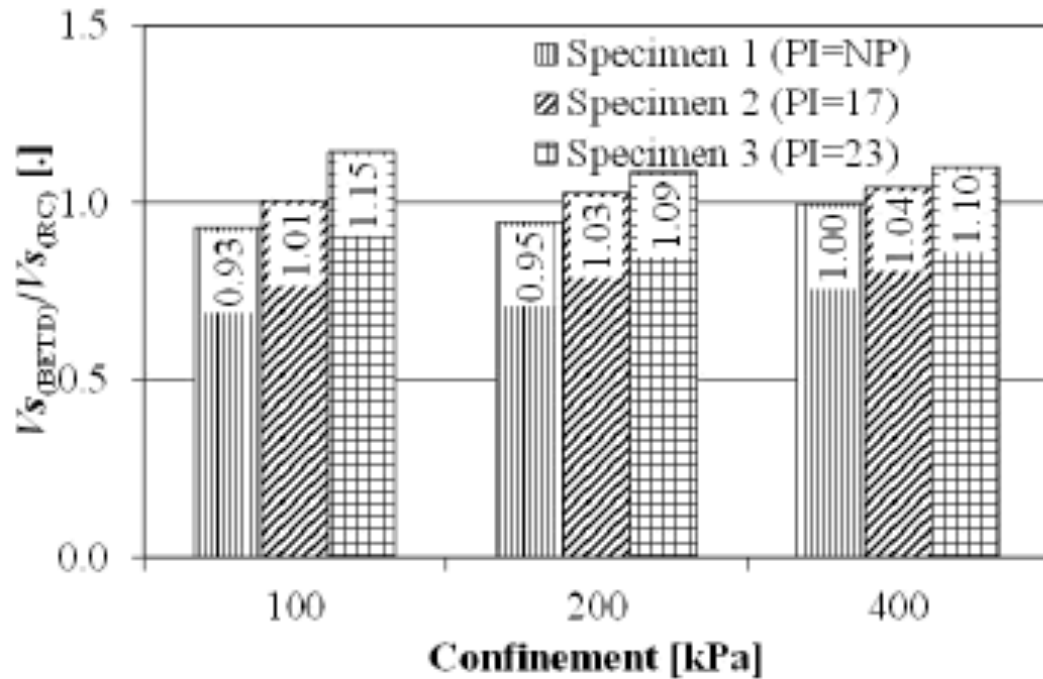
Nei terreni

$$G_0 = \rho V_S^2$$

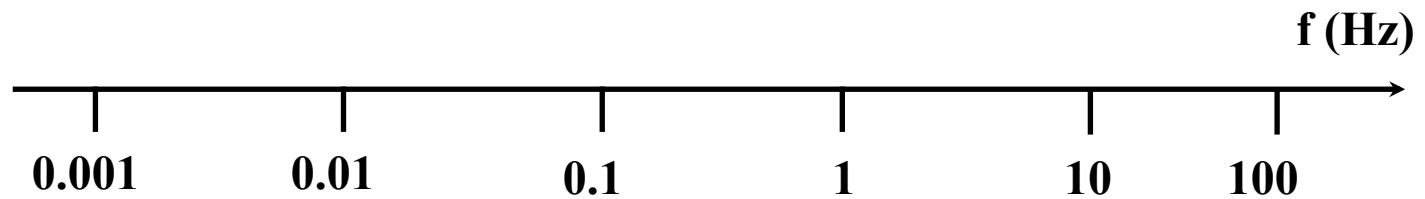
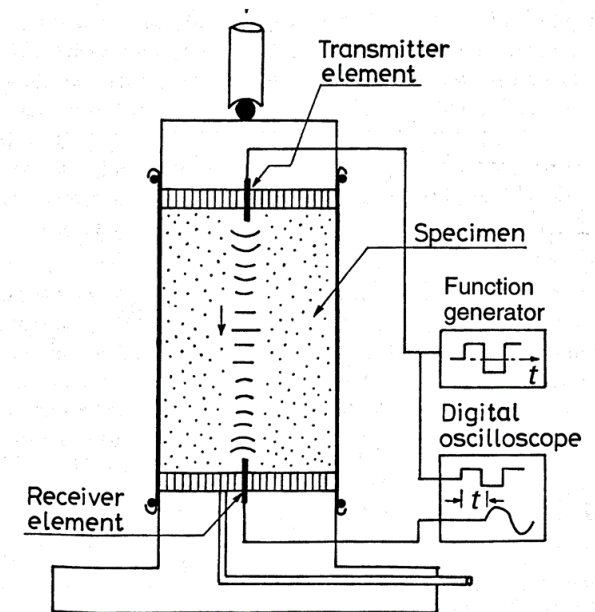


Deformazioni indotte
in una prova geofisica

Confronto Bender Elements – Colonna Risonante



CAMACHO-TAUTA et al., 2013



Bender elements (BE)

Colonna risonante (RC)

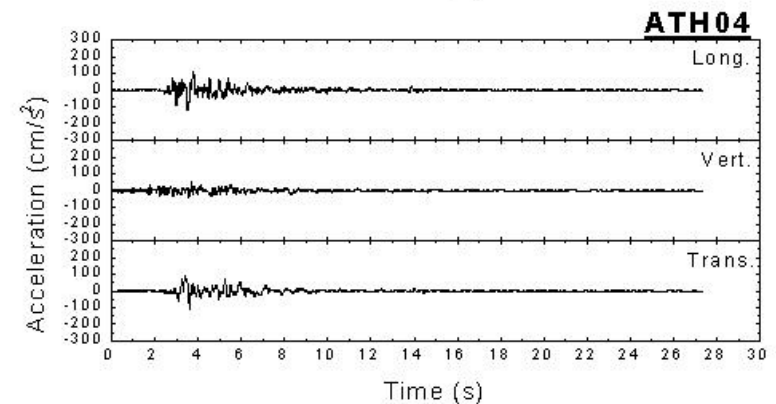
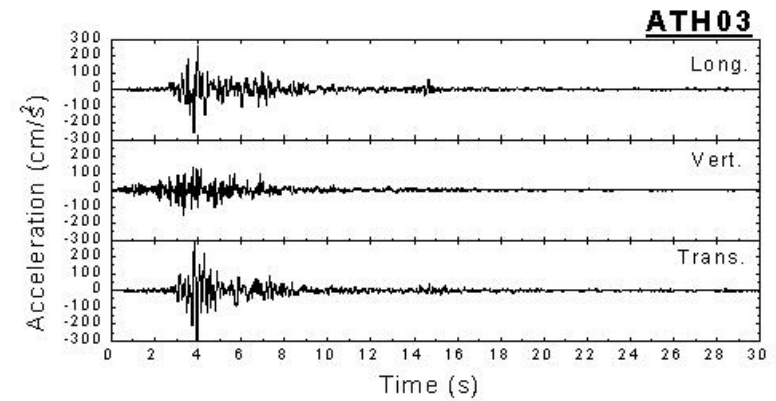
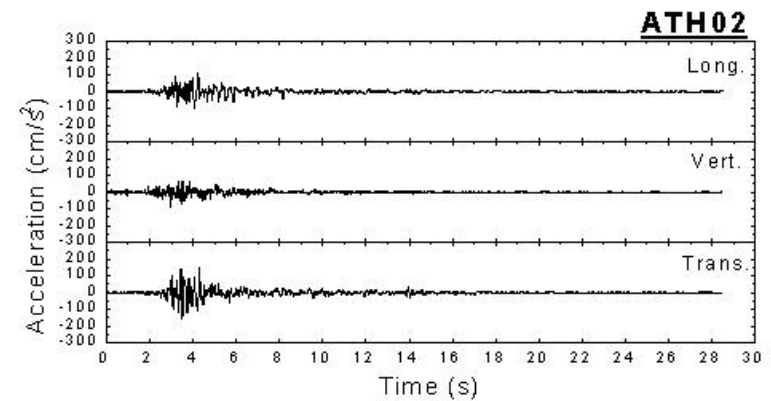
Uso di G_0 (V_s)

- Valutazioni della sulla risposta sismica locale
- Fondazioni di macchine vibranti
- Interazione dinamica terreno-struttura
- Propagazione di vibrazioni (e.g. traffico su rotaia)
- Suscettibilità alla liquefazione dei terreni
- Valutazione efficacia compattazione
- Correlazione con G a medie deformazioni
- Simulazioni numeriche con leggi costitutive avanzate

Indice

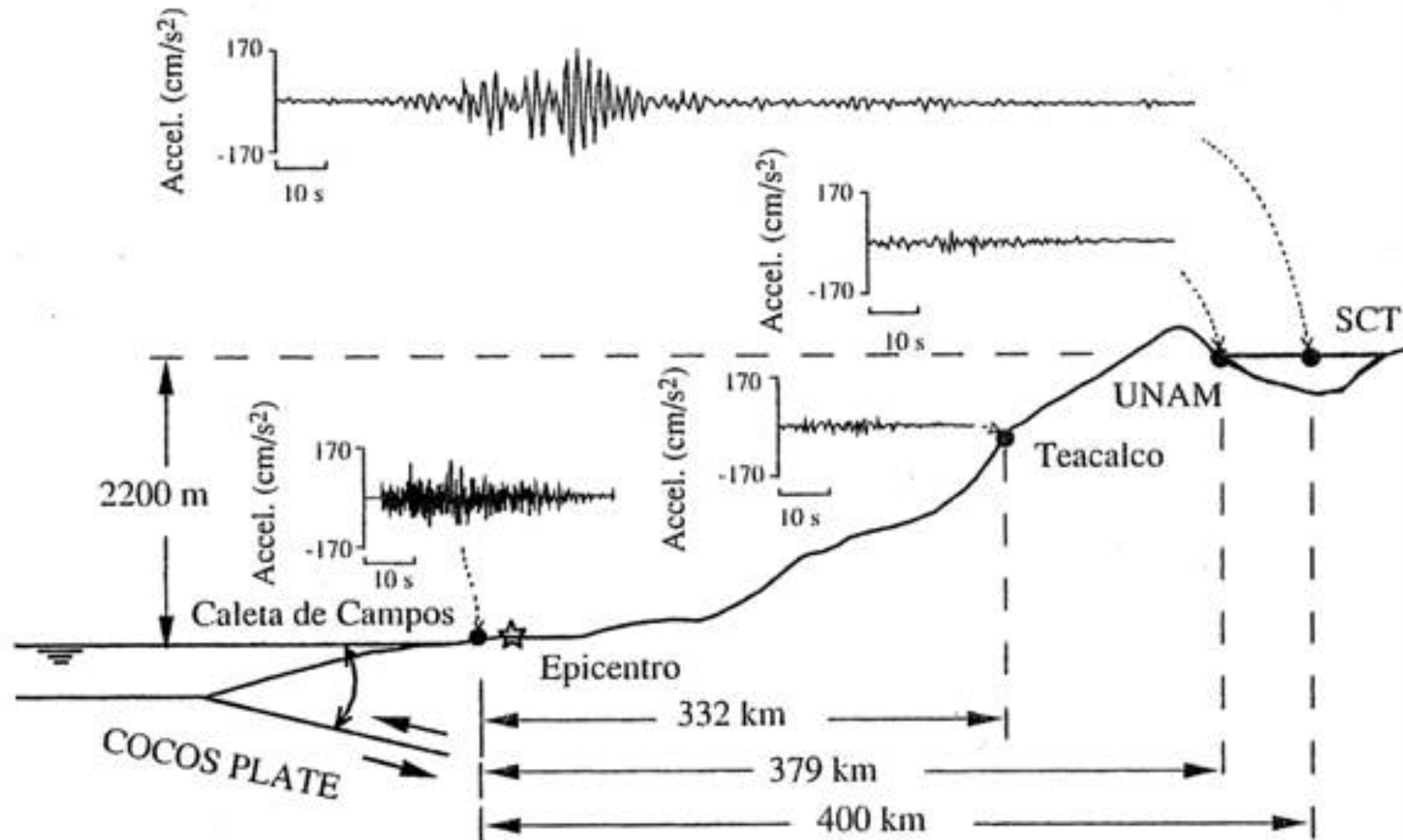
- Modulo di taglio a piccole deformazioni
 - Prove di laboratorio
 - Velocità di propagazione delle onde di taglio V_S
- **Risposta sismica locale**
 - Evidenza sperimentale
 - Modellazione
 - Il ruolo delle prove geofisiche
- Varie
 - Calcolo dei cedimenti
 - Correlazioni
- Velocità di propagazione delle onde di compressione V_P
 - Teoria di Biot
 - Applicazioni

Amplificazione sismica locale



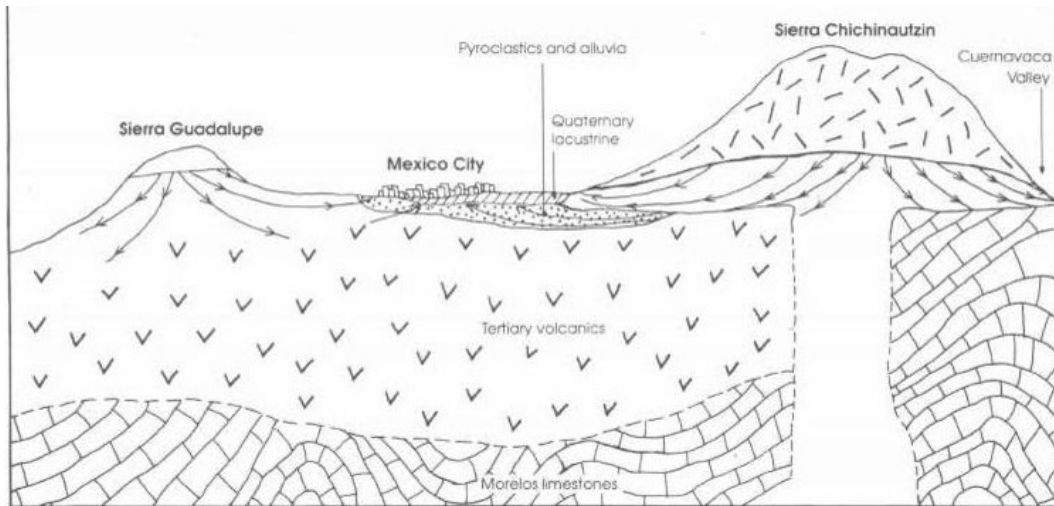
Registrazioni accelerometriche
del terremoto di Atene del 1999
(M=5.9)

Città del Messico (Terremoto del 1985)

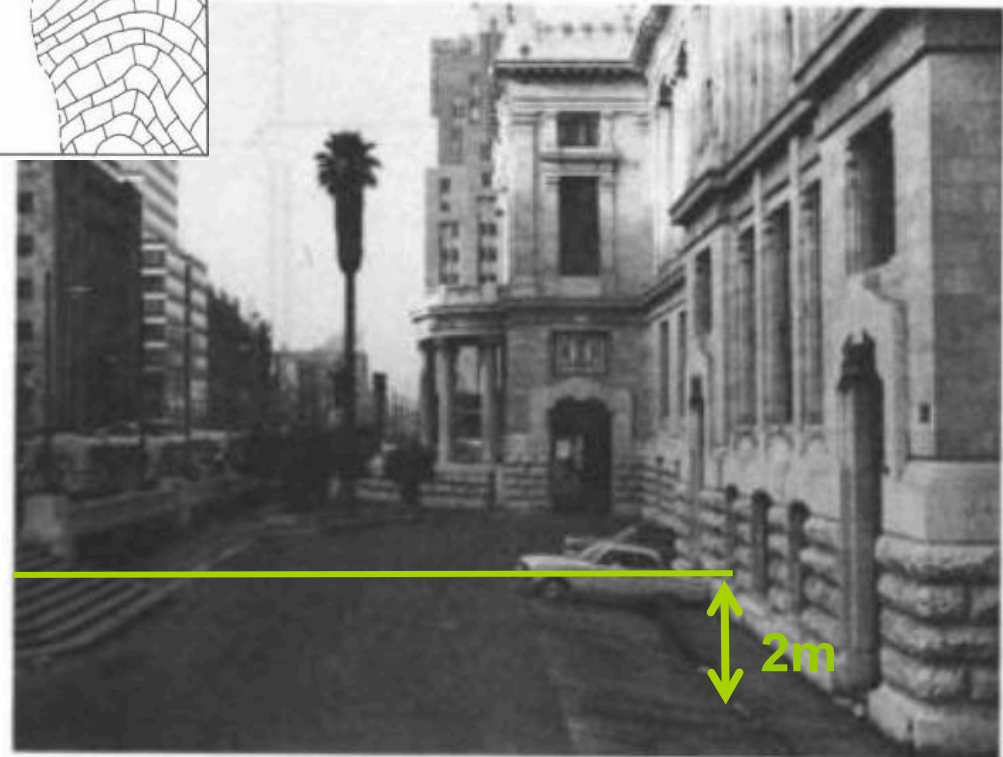


(Faccioli e Paolucci, 2005)

Geologia

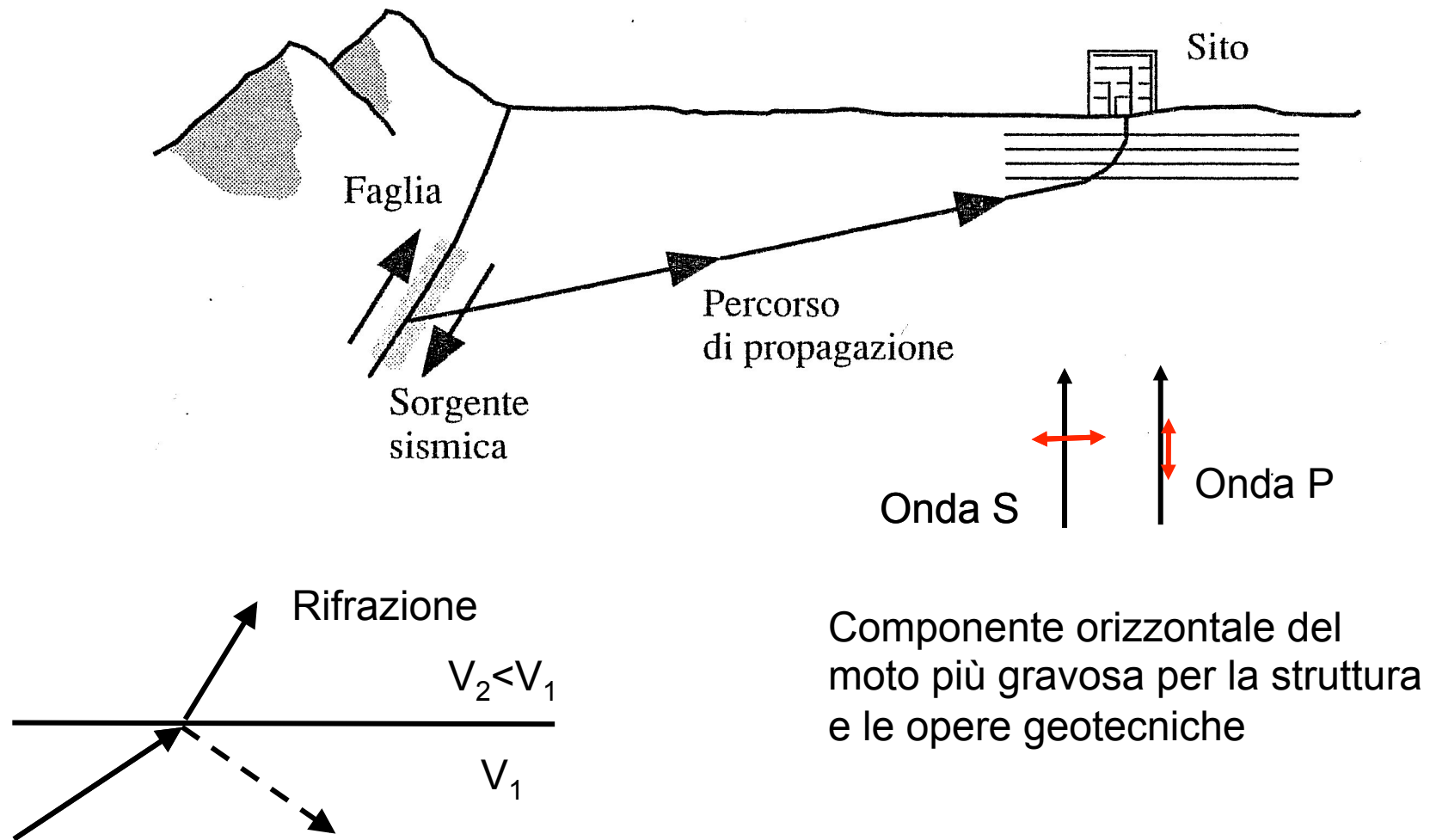


Palacio de las Bellas Artes, Mexico City

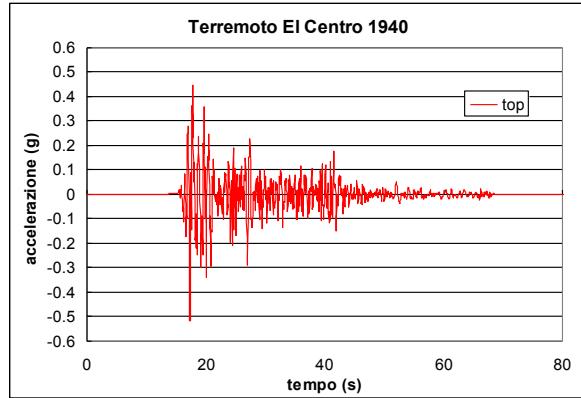


Città del Messico è costruita su un deposito lacustre di origine vulcanica, che presenta caratteristiche geotecniche molto peculiari con elevatissima deformabilità

Propagazione ipocentro-sito

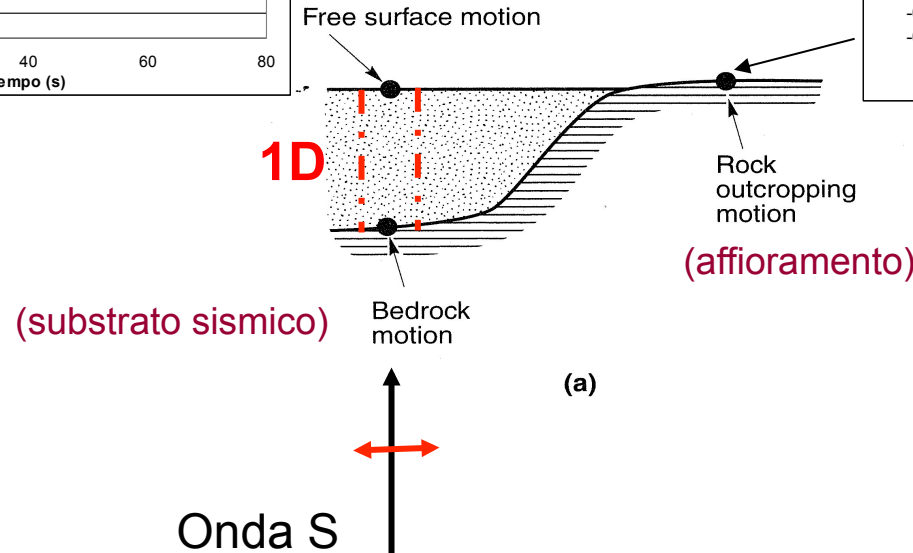
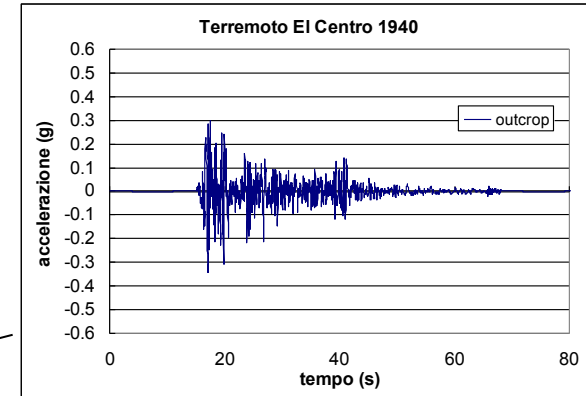


Risposta sismica locale

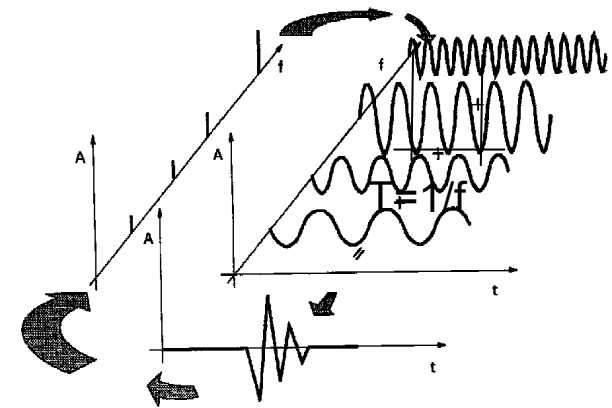


Rapporto di amplificazione

$$RA = \frac{a_{\max, surface}}{a_{\max, outcrop}}$$



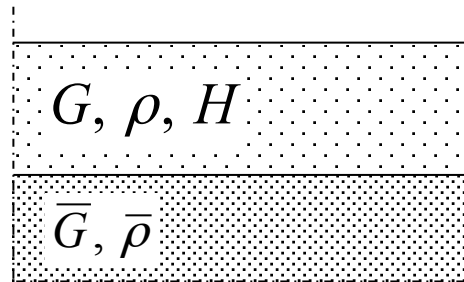
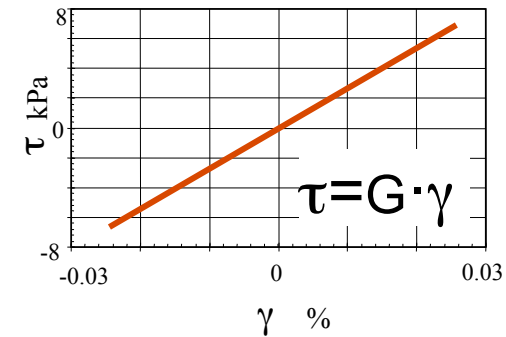
Analisi di Fourier



Funzione di amplificazione

$$A_r(\omega) = \frac{FFT(a_{surface})}{FFT(a_{outcrop})}$$

Risposta sismica locale:
Modello 1D elastico lineare

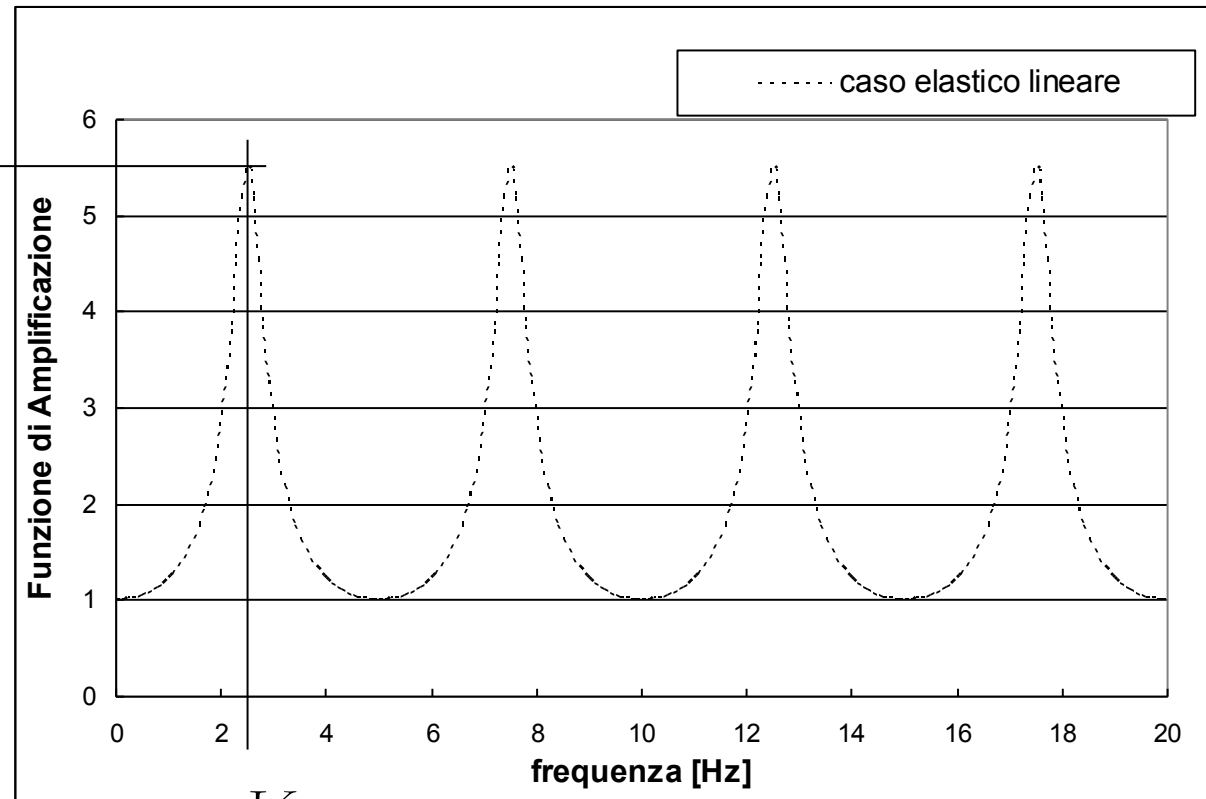


Onda S

$$\frac{1}{\alpha_z}$$

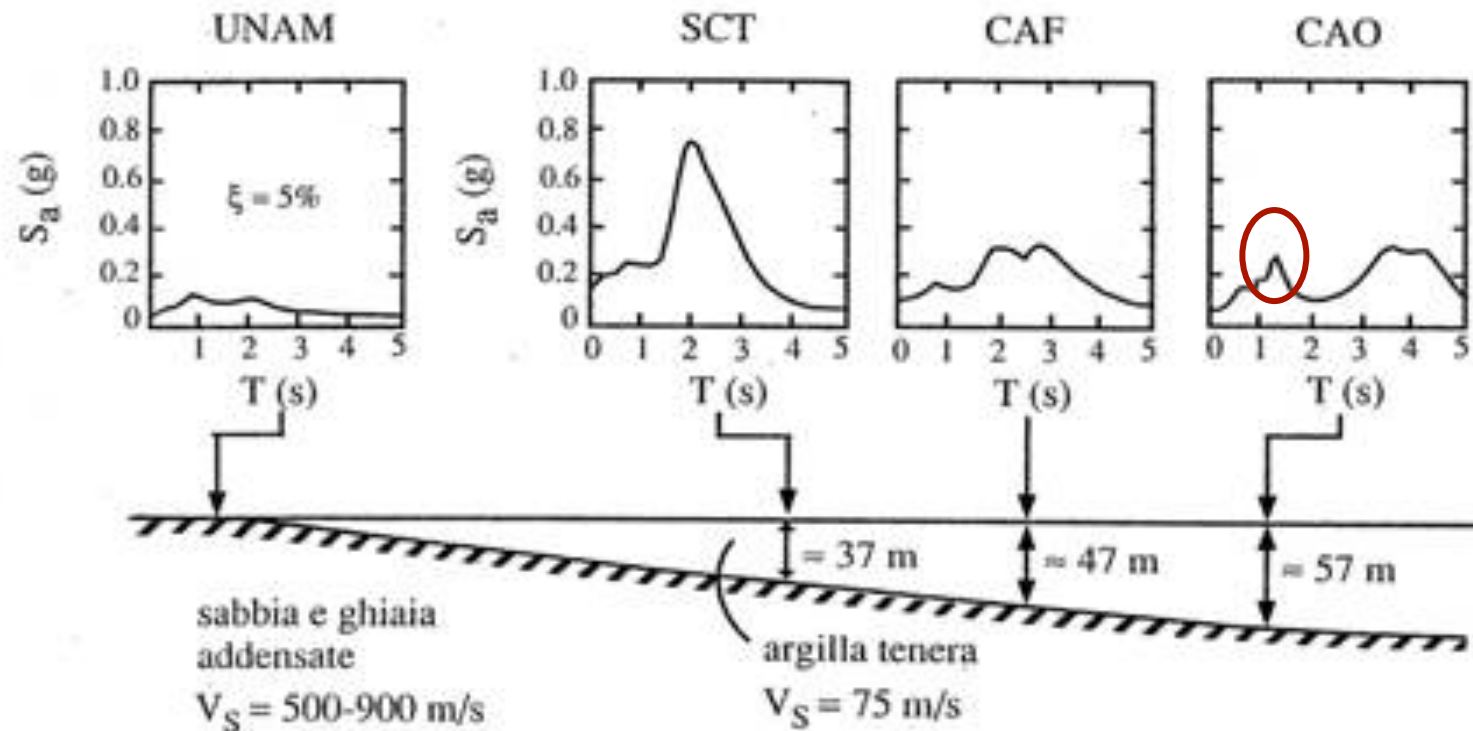
$$\alpha_z = \frac{\rho V_S}{\bar{\rho} \bar{V}_S}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \bar{V}_S = \sqrt{\frac{\bar{G}}{\bar{\rho}}}$$



$$f_0 = \frac{V_S}{4H}$$

Città del Messico (Terremoto del 1985)



(Faccioli e Paolucci, 2005)

SCT

$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 37} = 0.5 \text{ Hz}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = 2 \text{ s}$$

CAF

$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 47} = 0.4 \text{ Hz}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = 2.5 \text{ s}$$

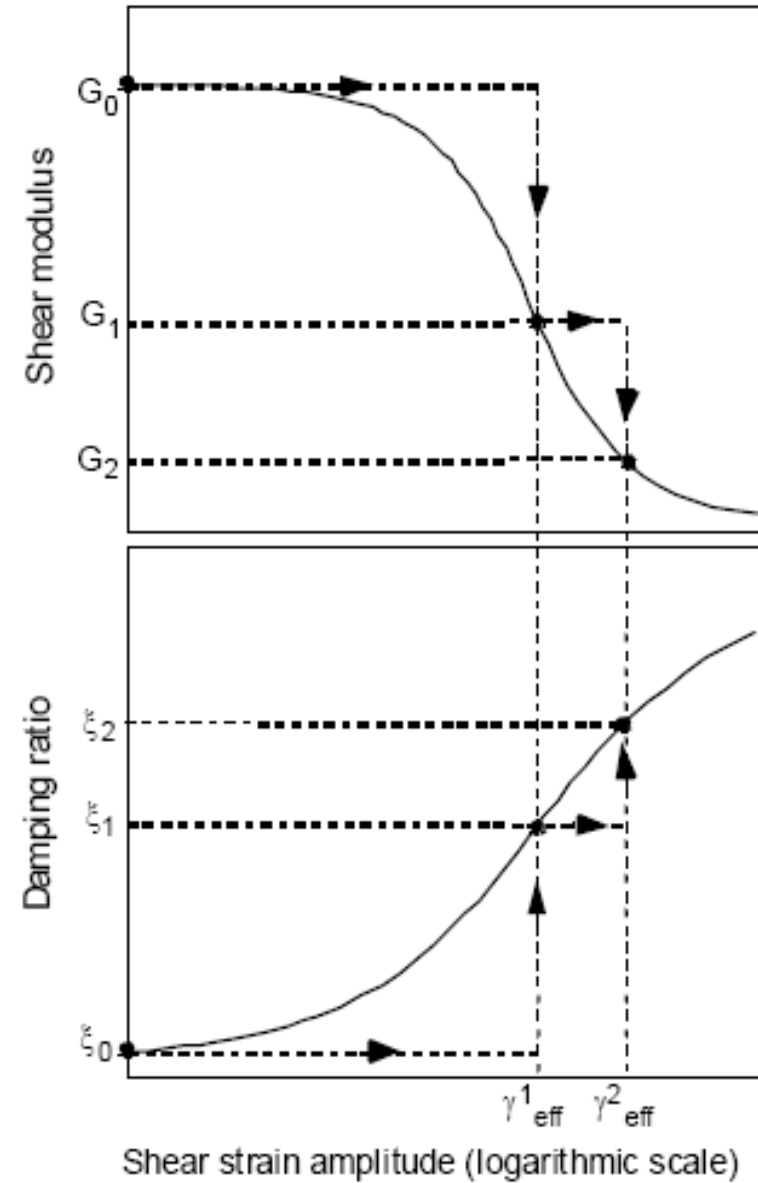
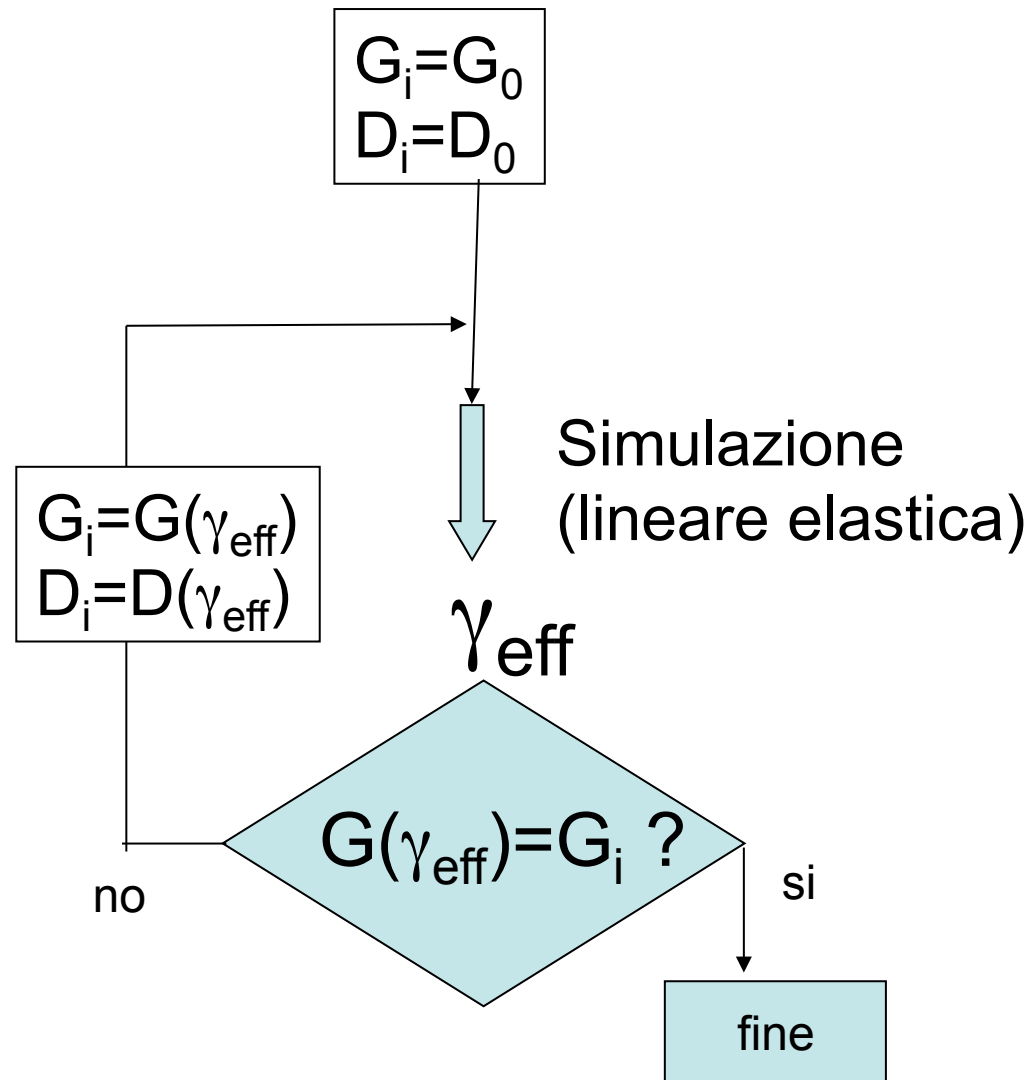
CAO

$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 57} = 0.33 \text{ Hz}$$

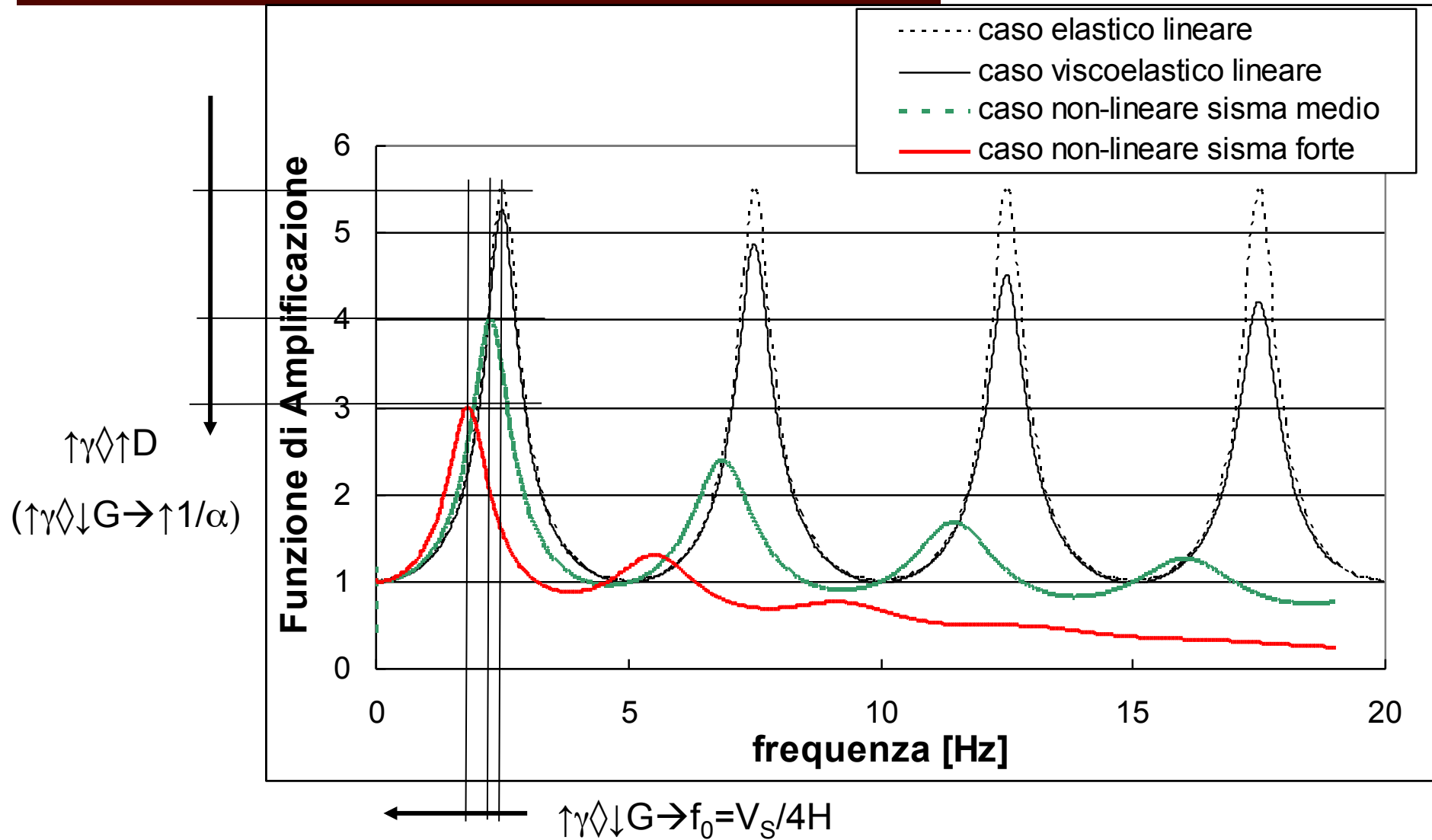
$$T_n = \frac{1}{f_n} = 3 \text{ s}$$

$$f_1 = \frac{3V_s}{4H} = \frac{3 \cdot 75}{4 \cdot 57} = 1 \text{ Hz}$$

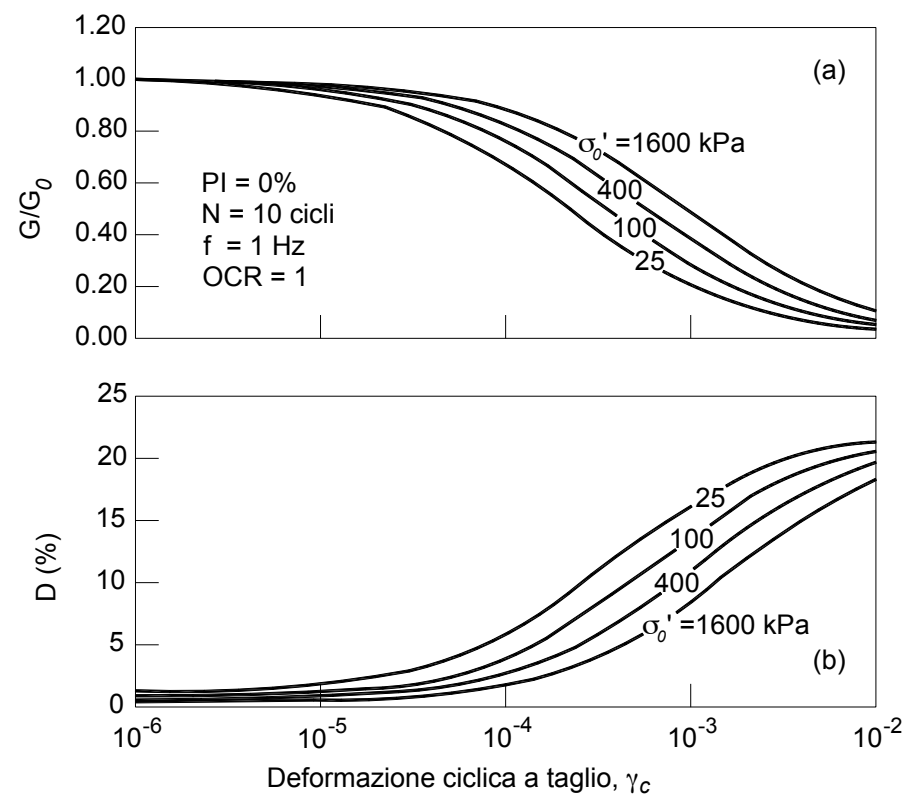
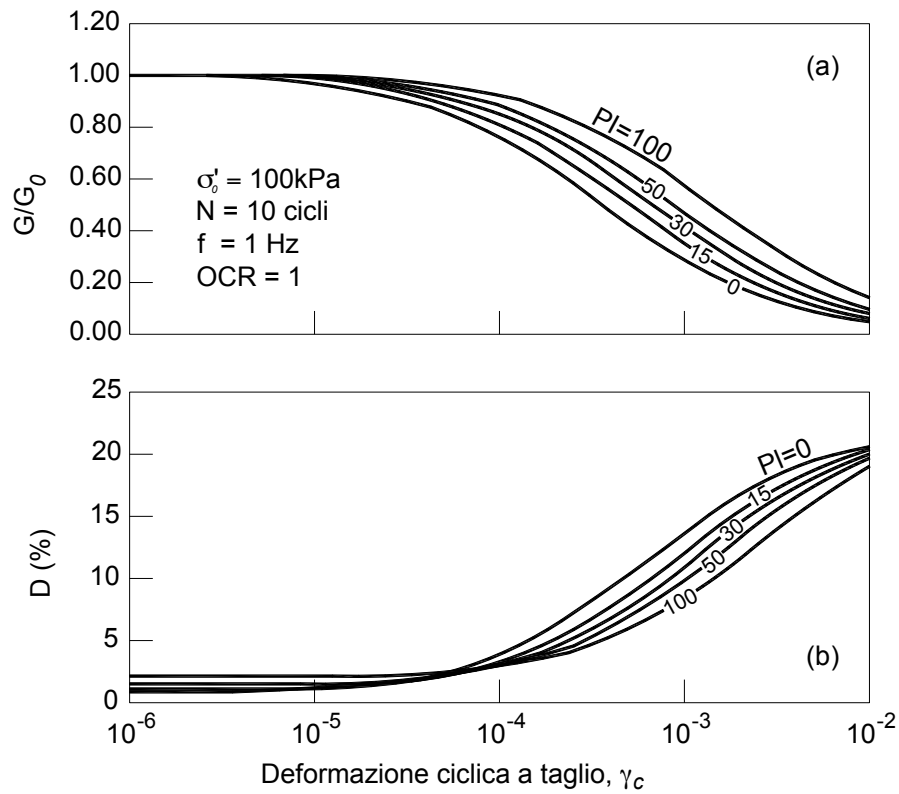
Metodo lineare elastico equivalente



Modello 1D: effetto della non-linearità

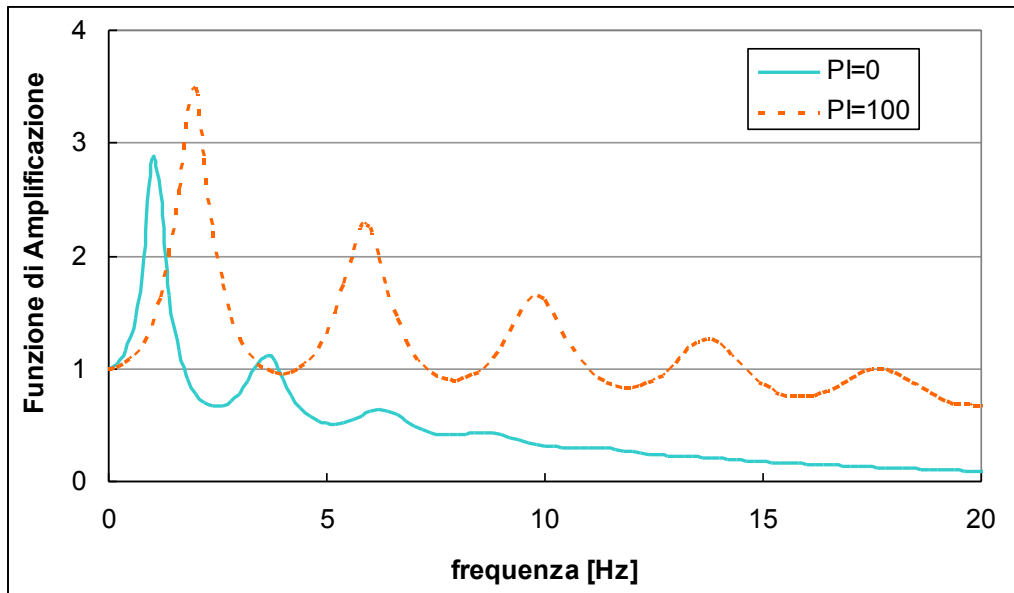
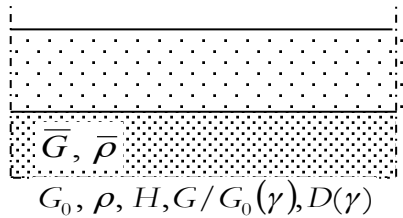


Curve di decadimento

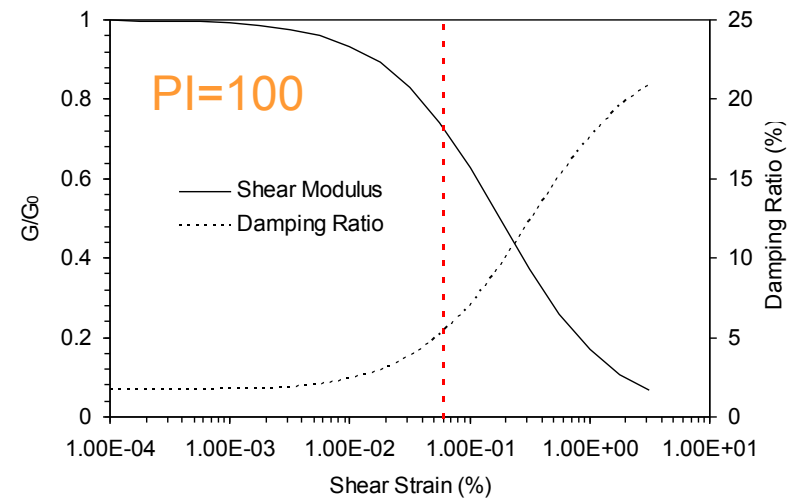
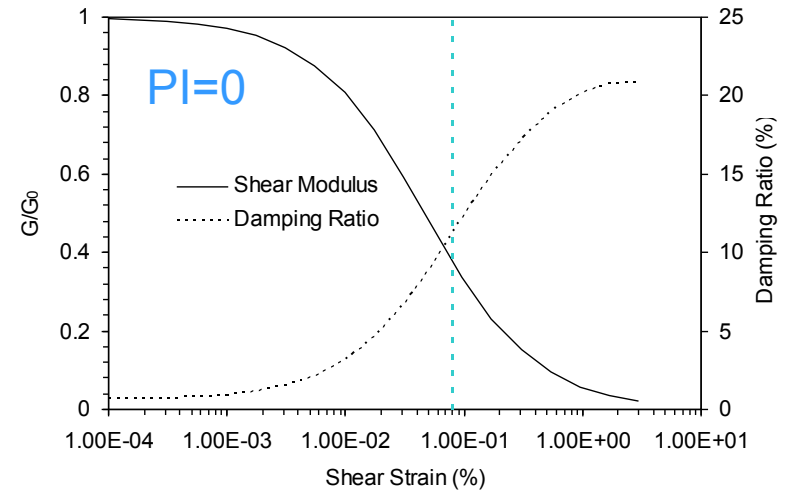


(Darendeli, 2001)

Confronto amplificazione PI=0 vs PI=100



Parametri equivalenti in mezzera strato



Argilla di Città del Messico

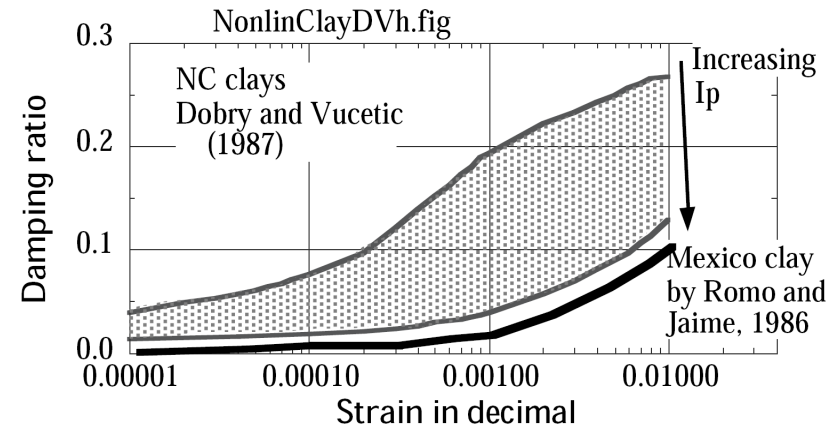
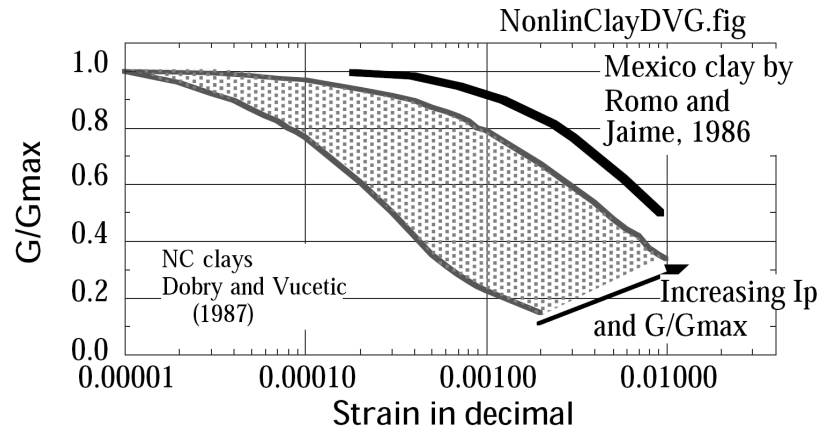
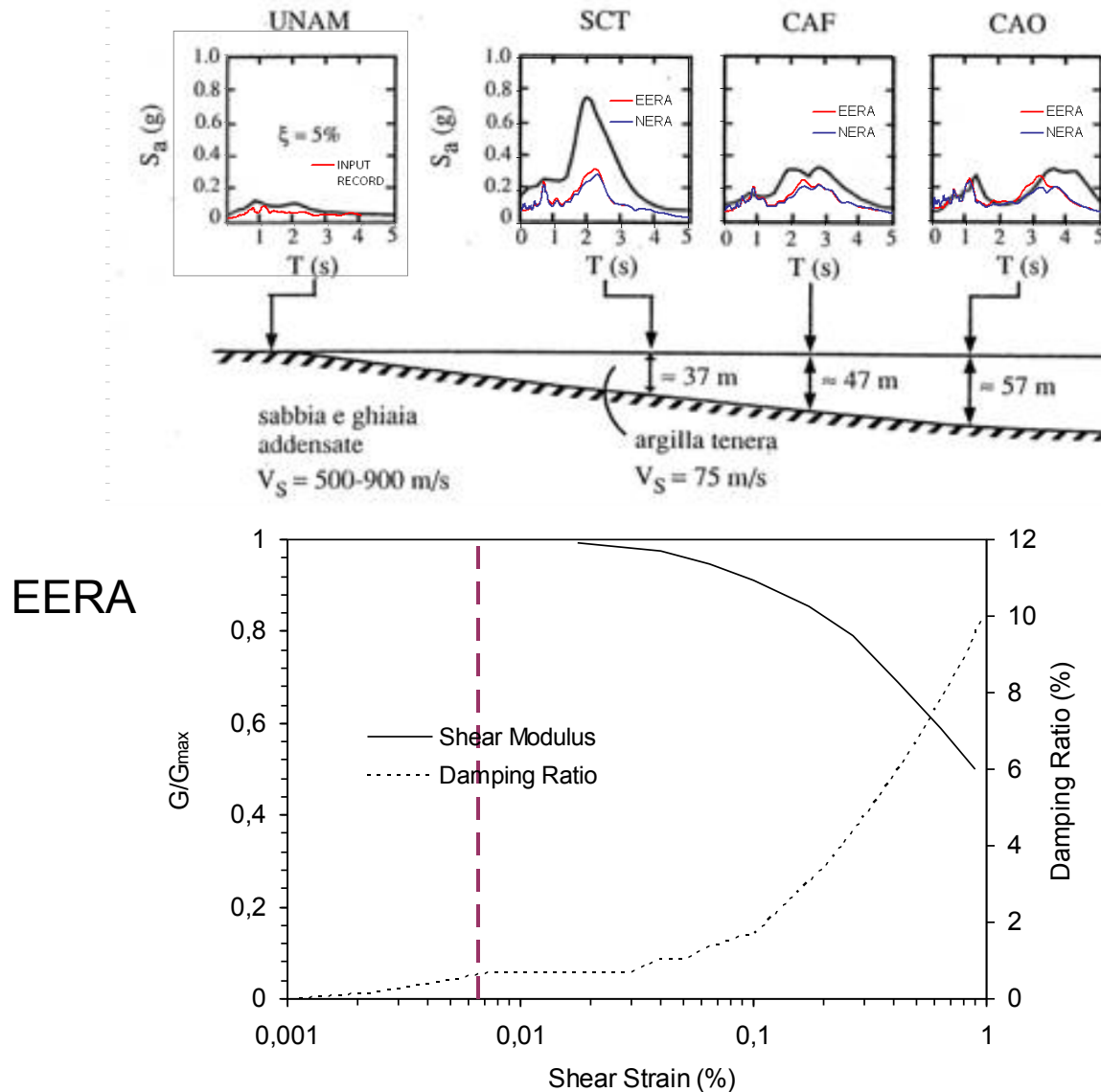


Table 1. Typical ranges of mineralogical and geotechnical index properties of different soft lacustrine and marine sediments.

	Leda clay						
	Glacial Lake Albany ^a	St. Lawrence Valley, New York ^a	Hawkesbury, Ontario ^b	Drammen, Norway ^c		Fucino, Italy ^d	Mexico City ^e
Depositional environment	Fresh water	Brackish	Brackish	Saline	Saline, leached	?	?
Approx. age of sediment column (years)	15 000	12 000	12 000	10 000	10 000	64 000	600 000
Carbonate content (%)	2–20	10–27	2–13	0–3	0–3	10–70	10–30
Smectite content (%)	—	—	5–12	Rare	Rare	?	4–16
Clay-size fraction (%)	20–40	30–70	75–90	30–65	30–65	25–50	20–50
Organic matter (%)	—	—	1	—	—	?	6
Sensitivity	2–15	20 to >100	2–30	8–10	200	?	?
Liquid limit water content (%)	40–60	22–45	50–80	35–50	20–43	80–120	338 avg.
Plastic limit water content (%)	20–30	16–25	20–30	25–30	18–25	45–60	80 avg.
Plasticity index	2–30	5–23	20–50	10–20	5–10	25–70	308 avg.
Pore-water salinity (g/L)	0	?	1–15	21	1	?	?
Typical natural water content range (%)	20–40	39–71	40–80	40–50	40–50	60–120	50–400

Simulazione numerica per Mexico City 1985



Opinione popolare ...

Il terremoto di Città del Messico del 1985

Strano ma vero!



21255 Nel catastrofico terremoto che colpì Città del Messico nel 1985, rimase indenne il più alto edificio della metropoli, la «Torre Latino-Americana», perché le sue fondamenta erano state gettate su un terreno paludoso, che dunque smorzò le vibrazioni.

ne siamo proprio sicuri?

(cortesia G. Lanzo)

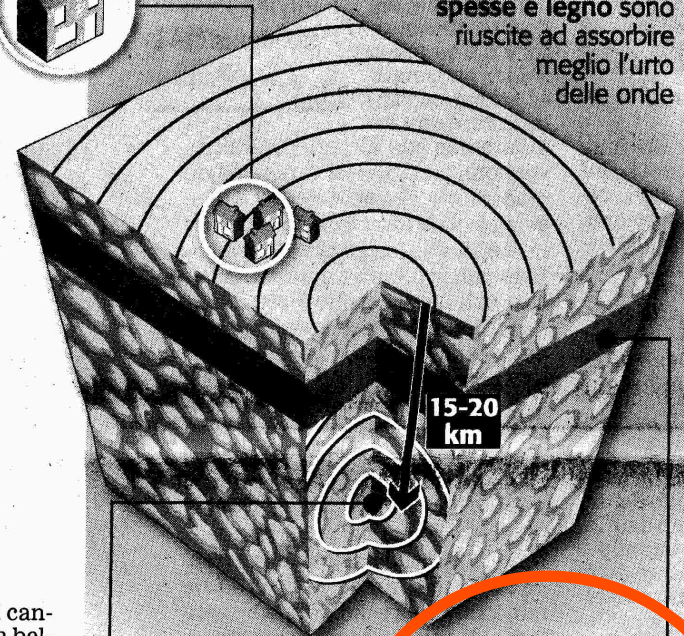
Il terremoto in Emilia-Romagna del sett. 2003

Le case basse costruite in campagna con pietre e legno, sono riuscite ad assorbire meglio l'urto delle onde

Perché i danni sono stati limitati

CASE IN PIETRA

Le case basse costruite in campagna con pietre e legno sono riuscite ad assorbire meglio l'urto delle onde



nel campo della geologia

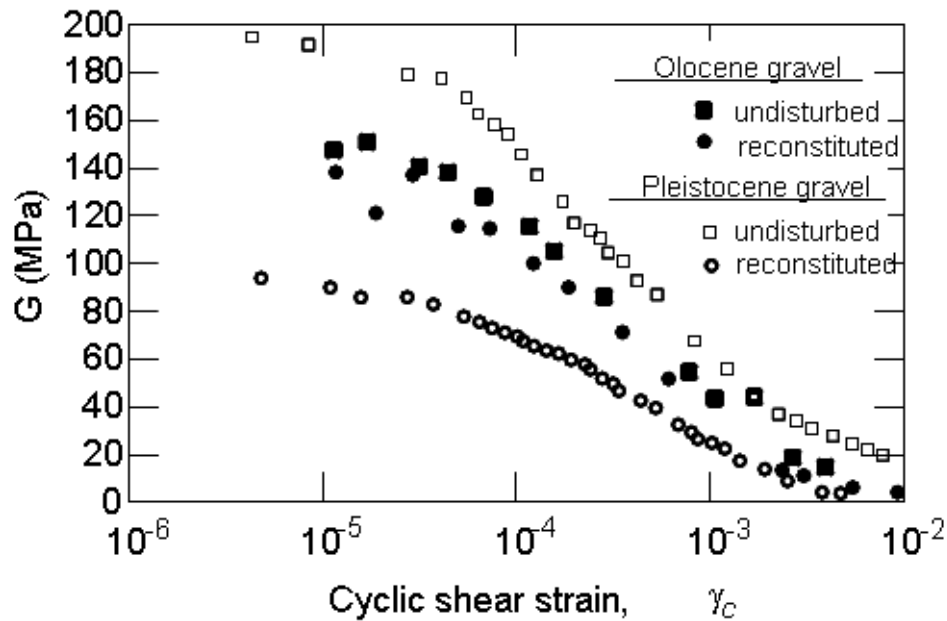
PROFONDITA'

La profondità focale dell'ipocentro è stata di 15-20 chilometri dentro la crosta terrestre. L'onda sismica ha avuto più spazio per smaltire l'effetto devastante

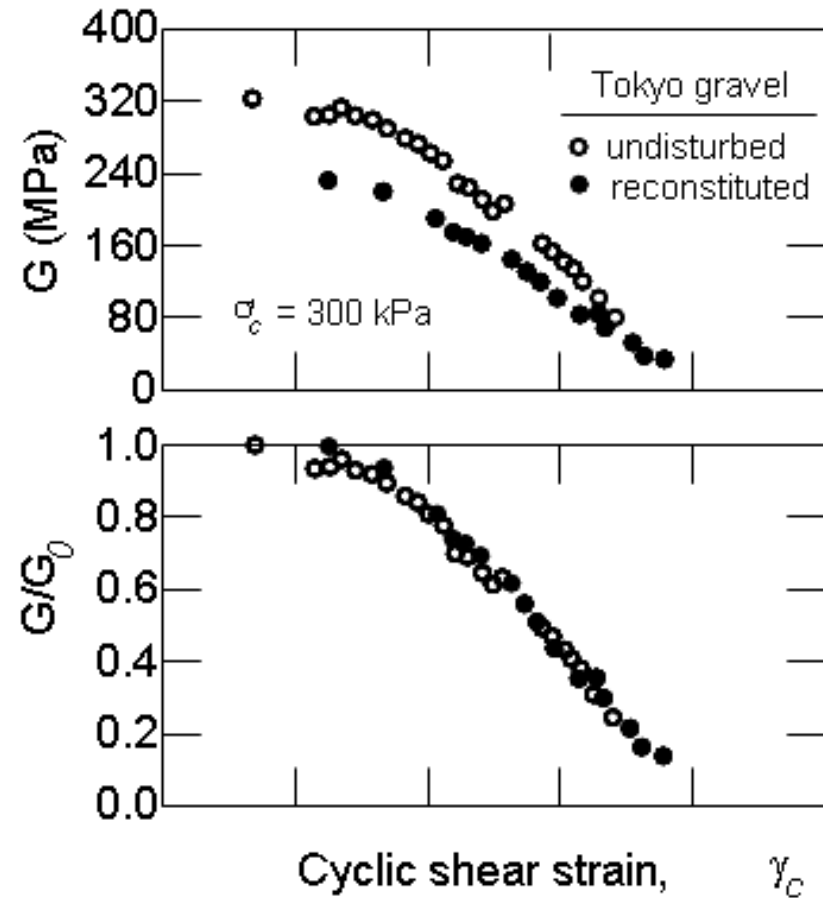
TERRENO ARGILLOSO

Il terreno morbido e argilloso tipico dell'Appennino toscano-emiliano ha facilitato l'assorbimento delle onde riducendo gli effetti in superficie

Curve di variazione del modulo G

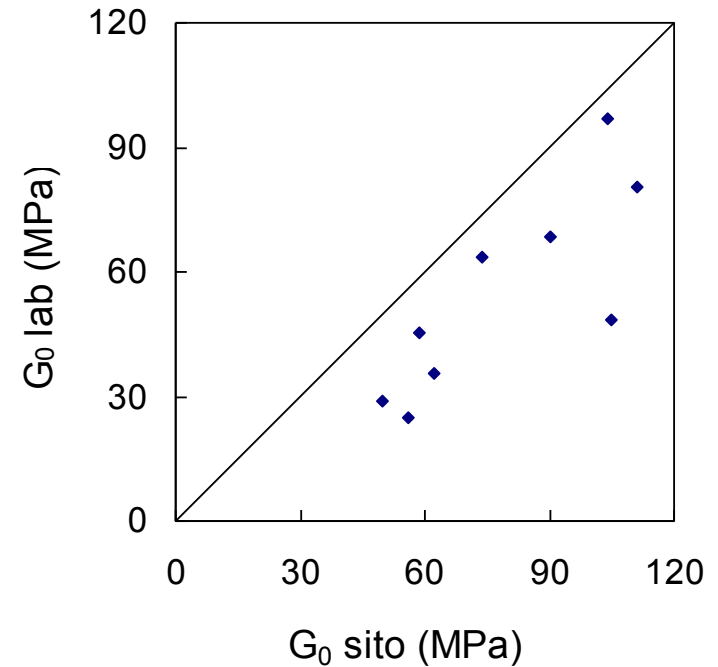
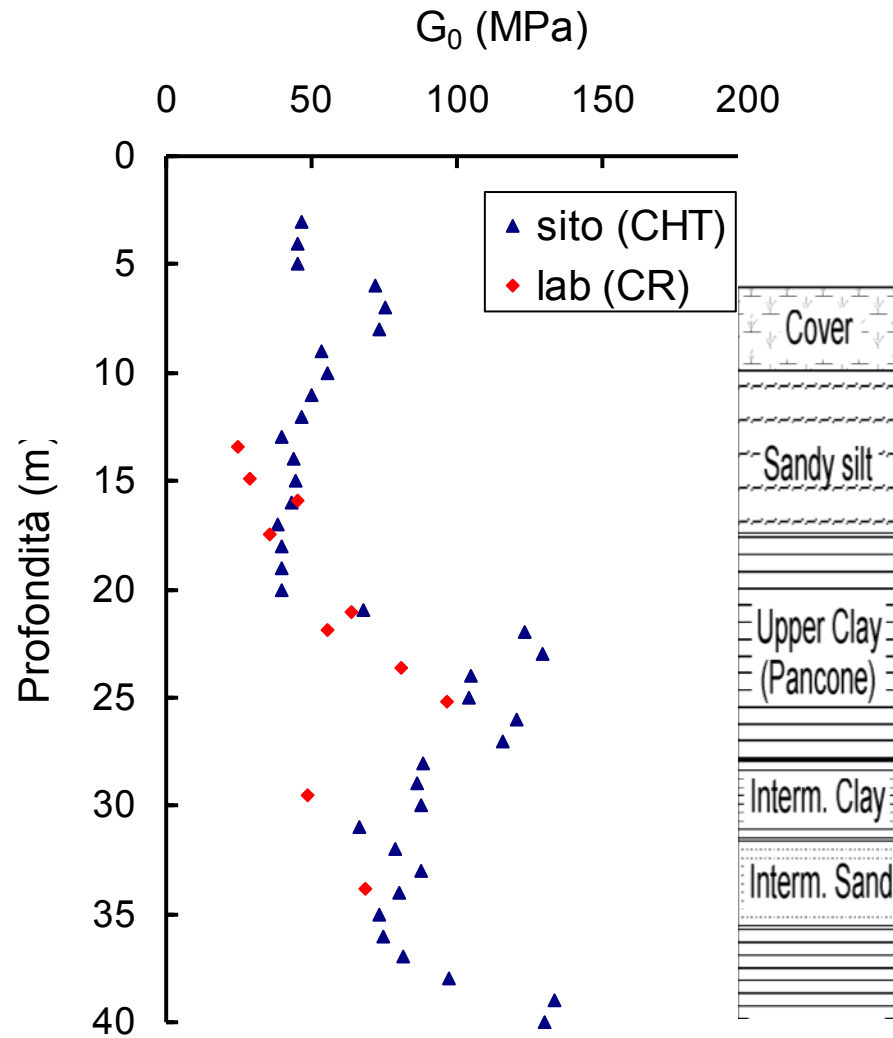


(Goto et al., 1994)



(Hatanata e Uchida, 1995)

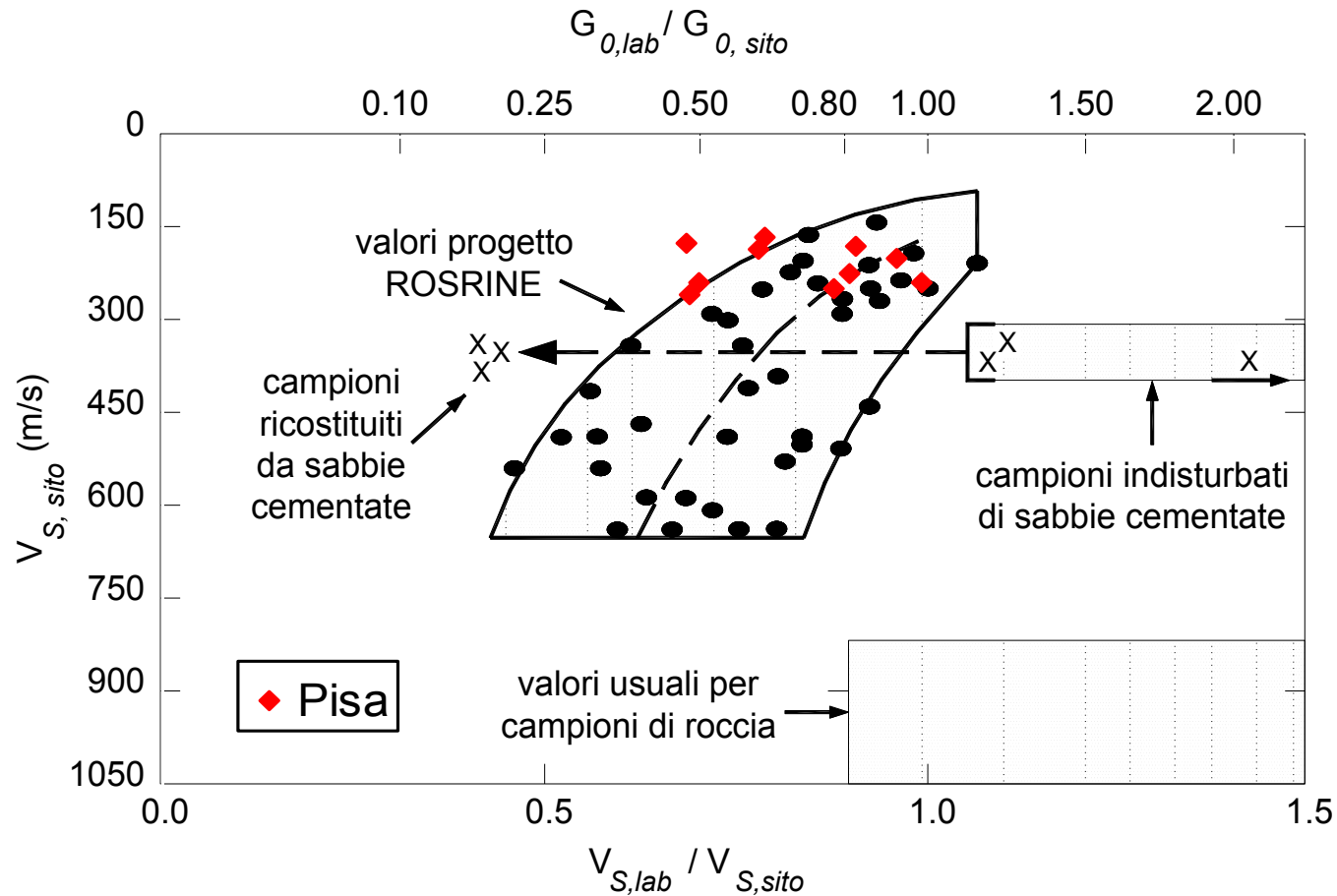
Site vs Lab (Pisa)



$$G_0 = \rho V_S^2$$

(Cross-Hole Test)

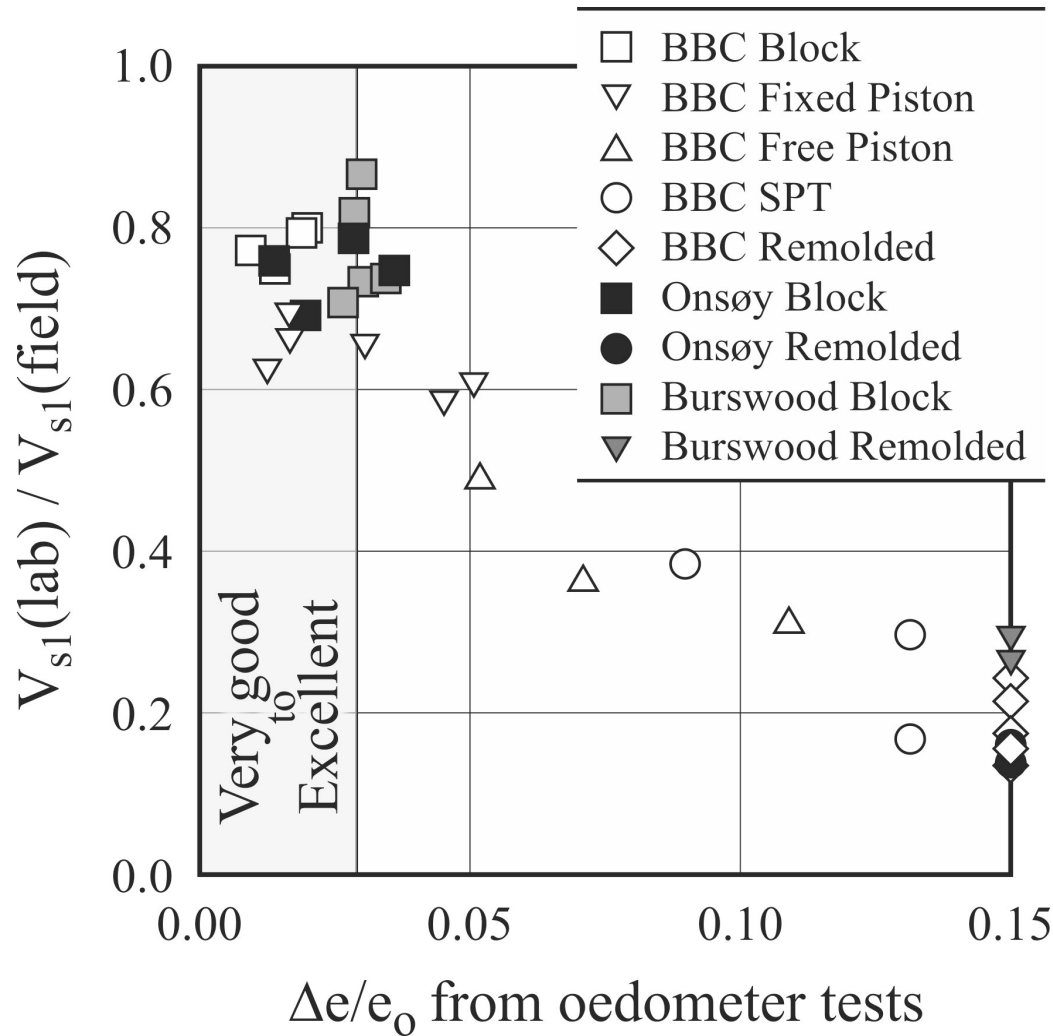
G_0 site vs lab



$$G_0 = \rho V_S^2$$

(Stokoe e Santamarina, 2000)

Valutazione della qualità dei campioni "indisturbati"

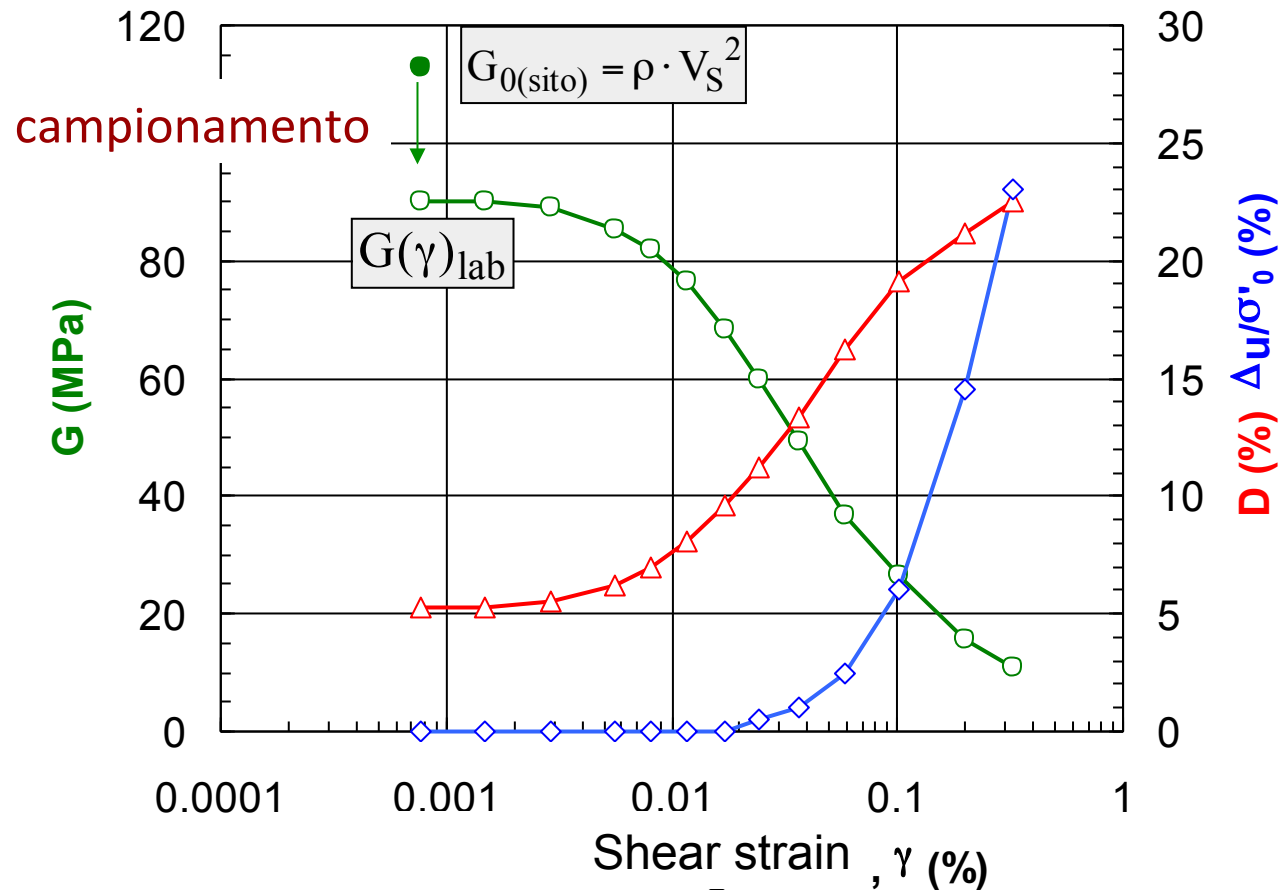


Un elevato rapporto $V_{s1}(\text{lab}) / V_{s1}(\text{sito})$ è indice di una buona qualità del campione

Il criterio può essere utilizzato anche per i terreni a grana grossa

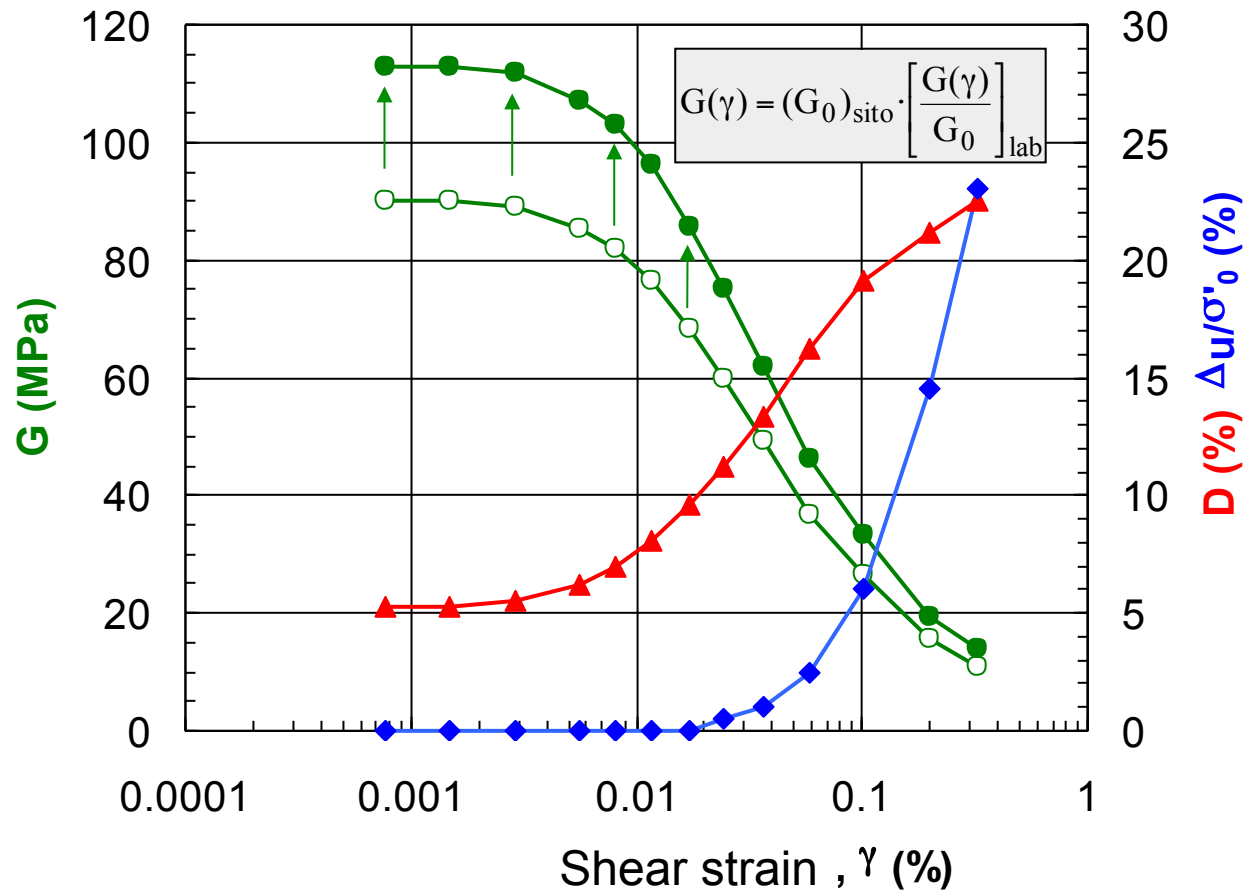
DeGroot et al (2011).

Strategia di caratterizzazione



- G_0 dalle prove geofisiche in sito
- $G/G_0(\gamma)$ e $D(\gamma)$ da prove di laboratorio

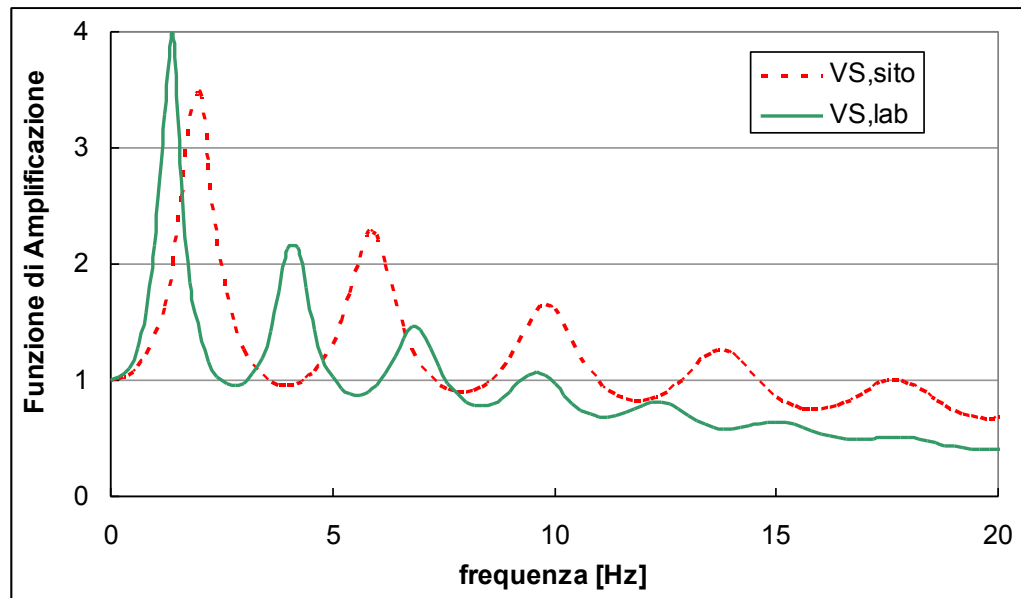
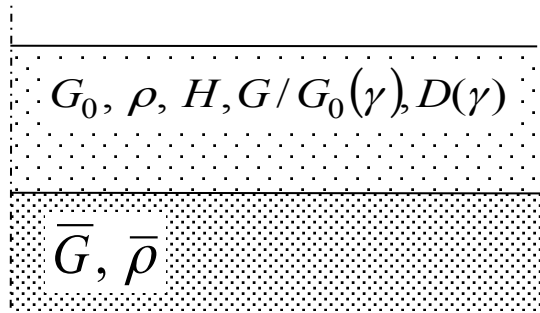
Strategia di caratterizzazione



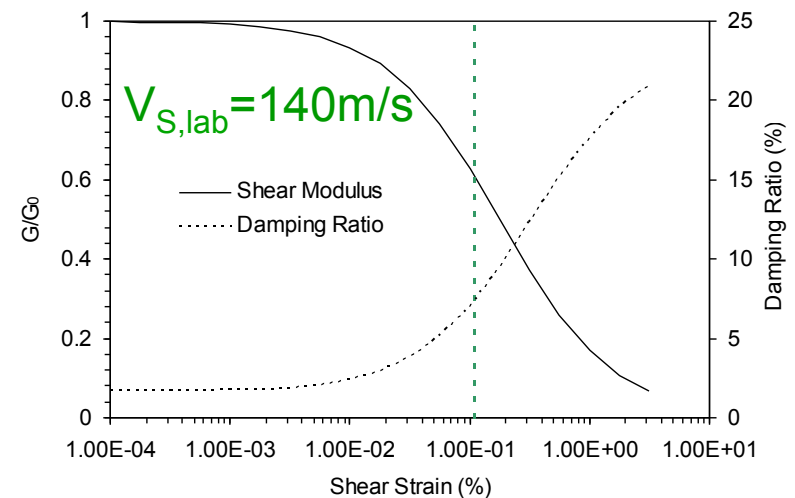
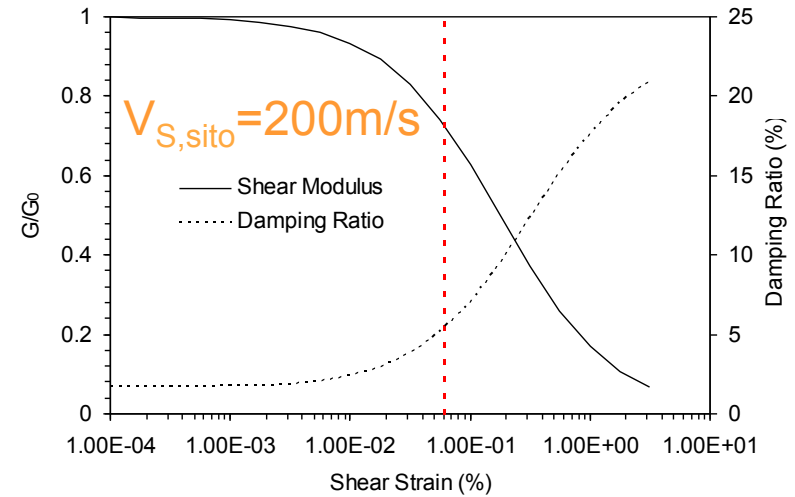
- G_0 dalle prove geofisiche in sito
- $G/G_0(\gamma)$ e $D(\gamma)$ da prove di laboratorio

(cortesia F. Silvestri)

Confronto amplificazione $G_{0,sito} - G_{0,lab}$

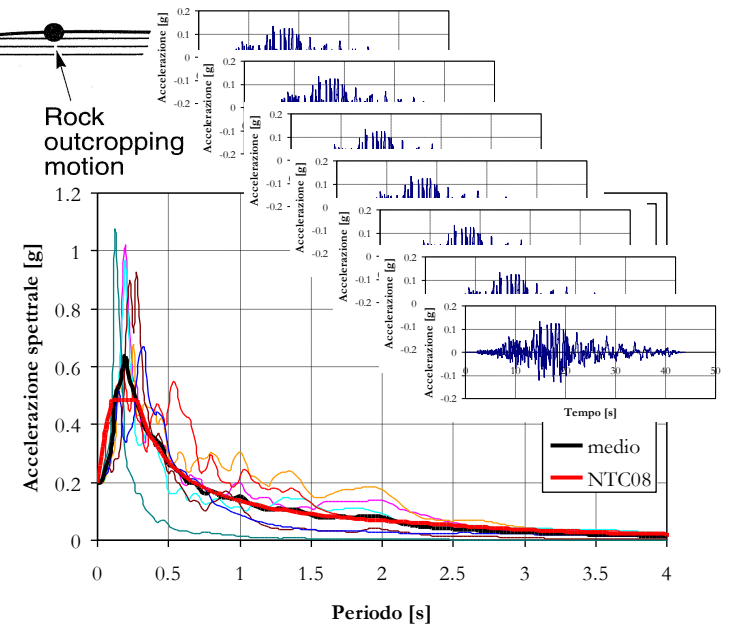
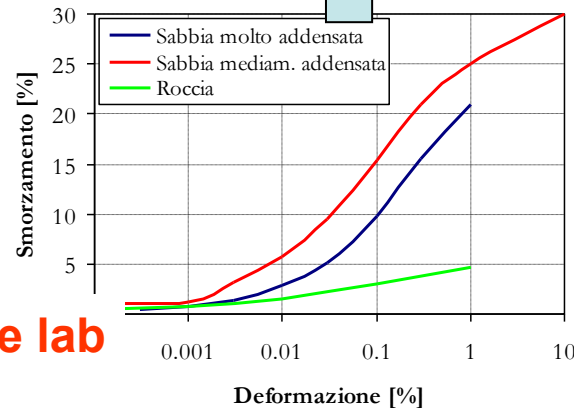
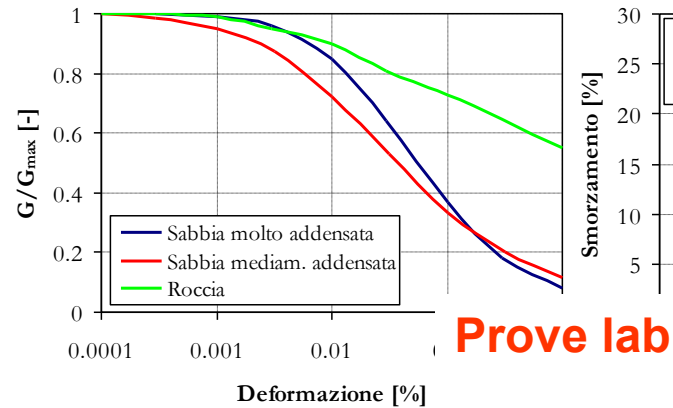
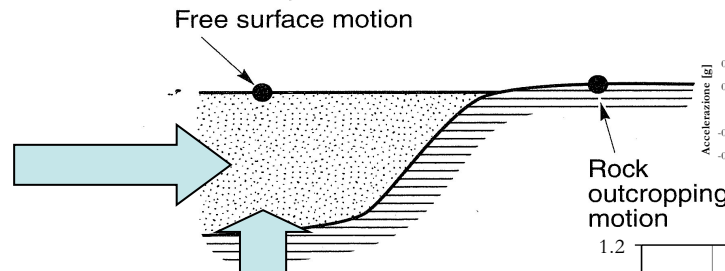
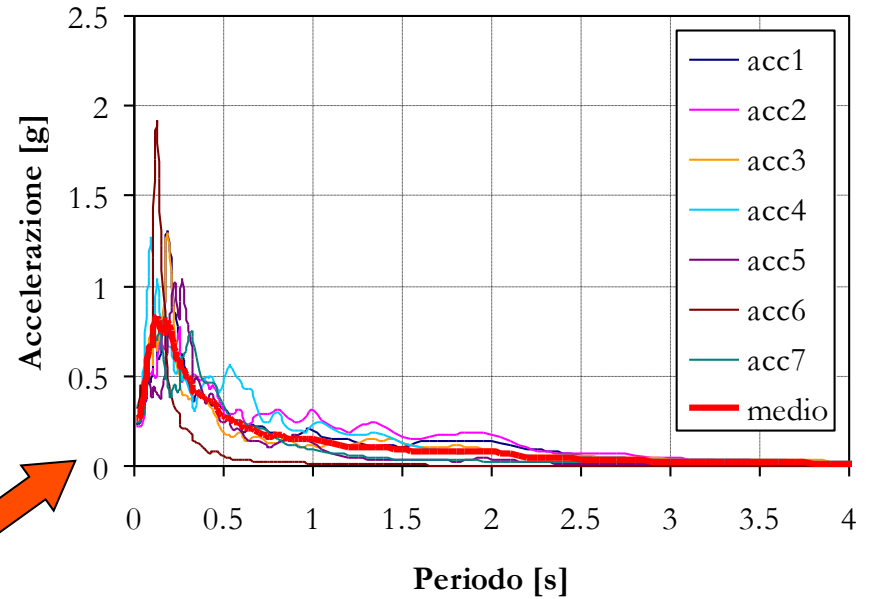
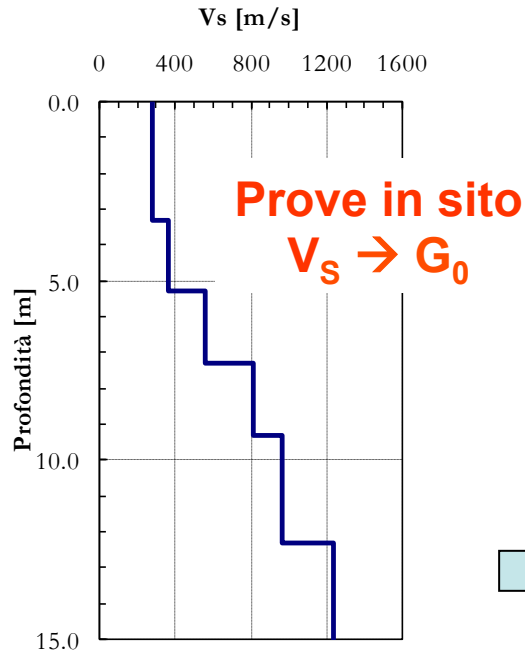


Parametri equivalenti in mezzeria strato



Esempio RSL

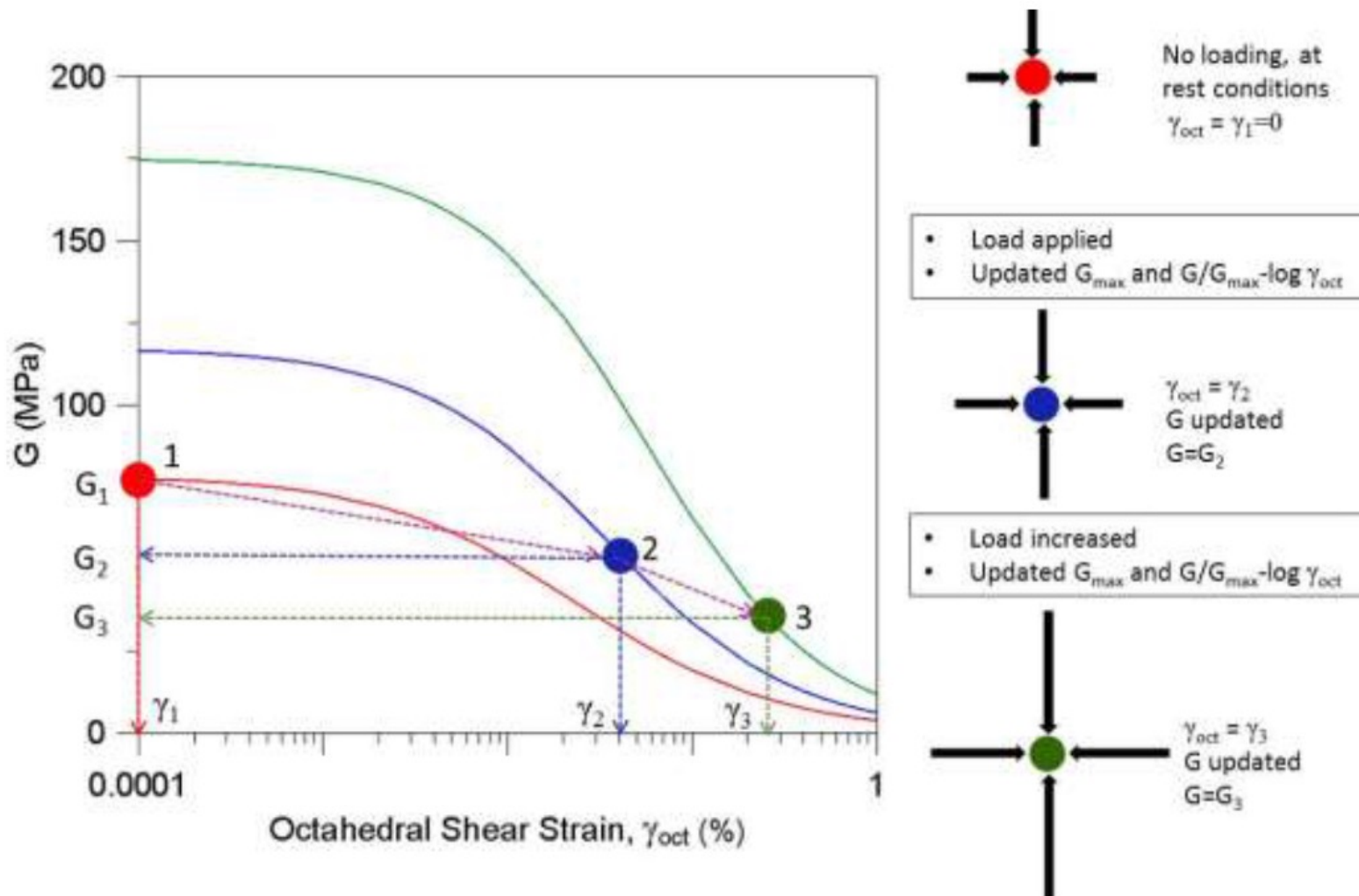
(Lai et al., 2009)



Indice

- Modulo di taglio a piccole deformazioni
 - Prove di laboratorio
 - Velocità di propagazione delle onde di taglio V_S
- Risposta sismica locale
 - Evidenza sperimentale
 - Modellazione
 - Il ruolo delle prove geofisiche
- **Varie**
 - **Calcolo dei cedimenti**
 - **Correlazioni**
- Velocità di propagazione delle onde di compressione V_P
 - Teoria di Biot
 - Applicazioni

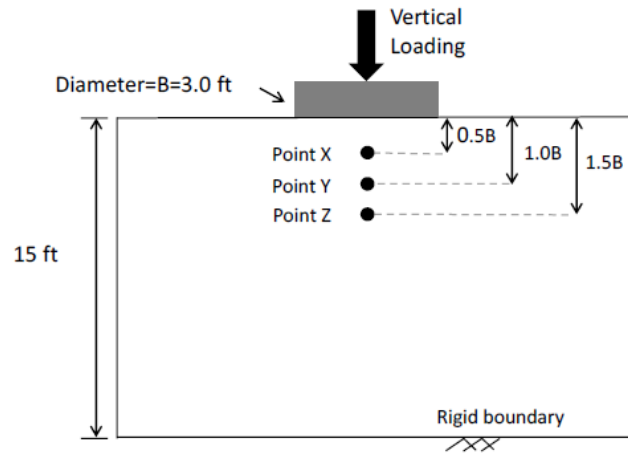
Previsione dei Cedimenti



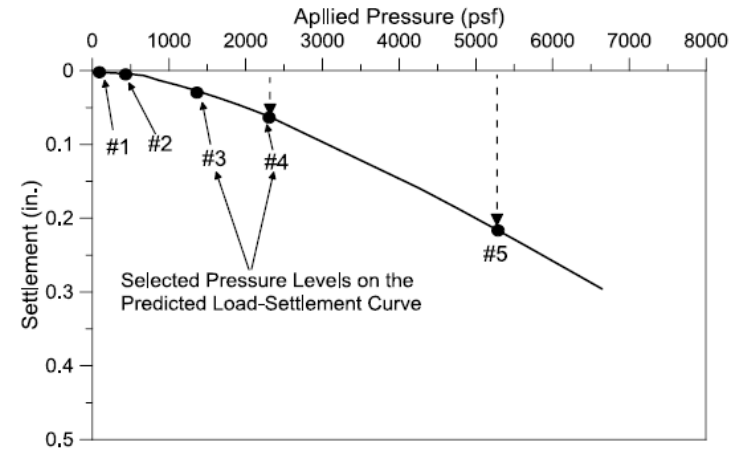
Kacar et al, 2014

Previsione dei cedimenti

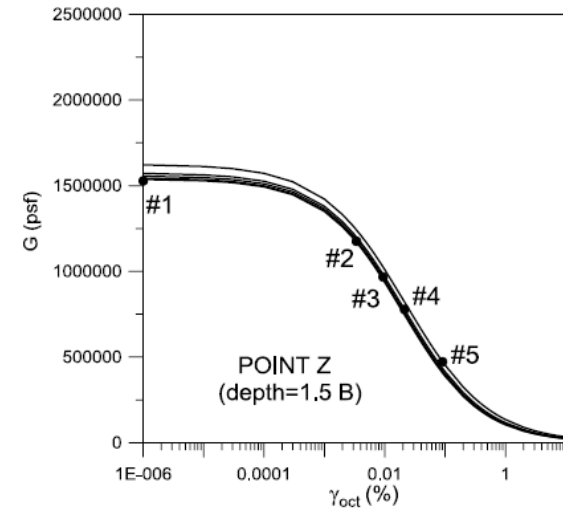
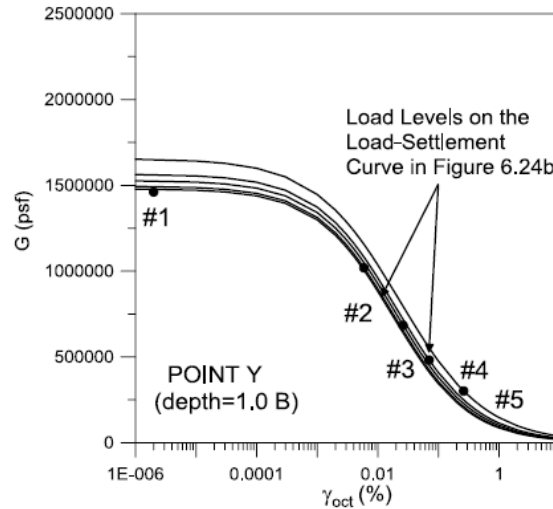
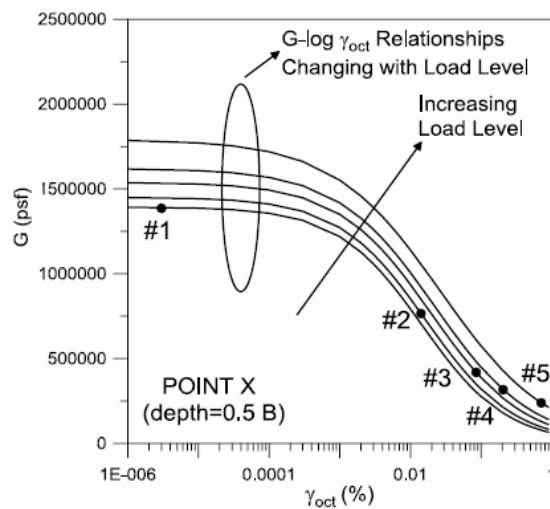
Kacar et al, 2014



(a) Geometry of soil-foundation model and reference points

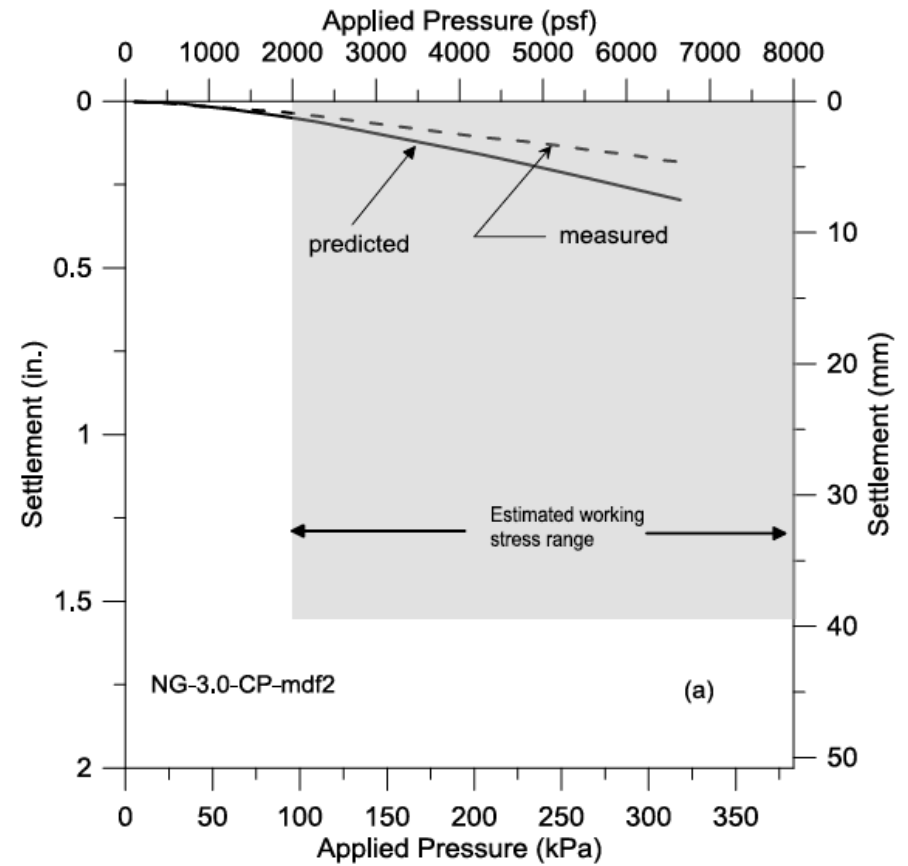
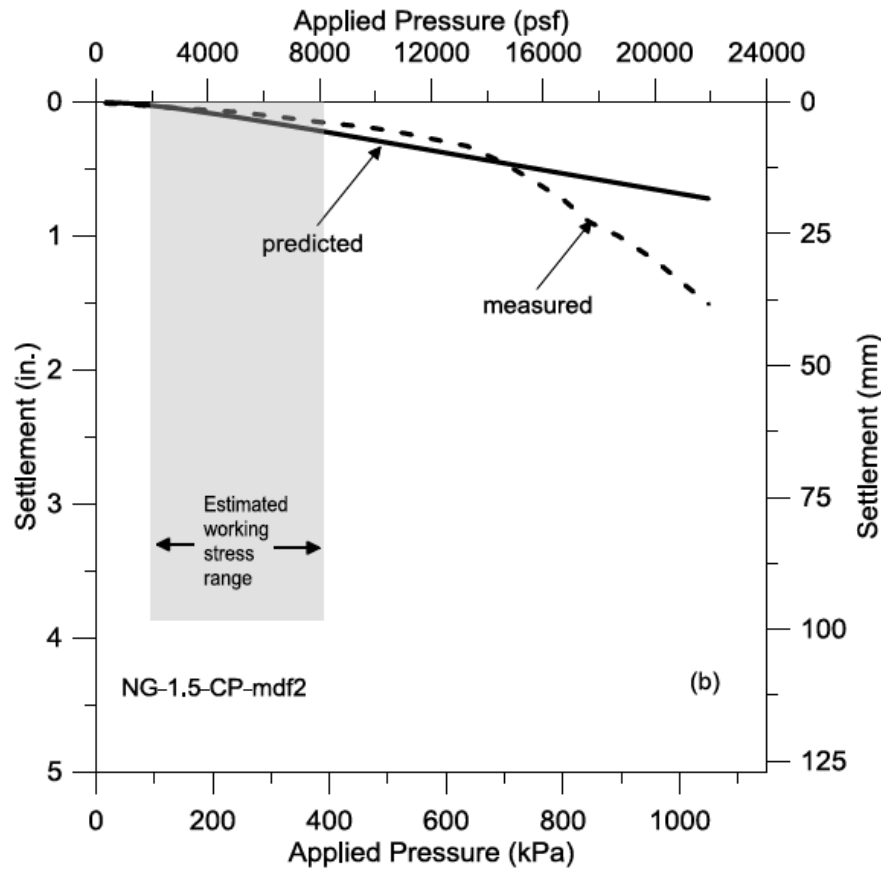


(b) Load-settlement curve and five load levels



Esempi su fondazioni modello

Kacar et al, 2014



Correlazioni $V_s - N_{SPT}$

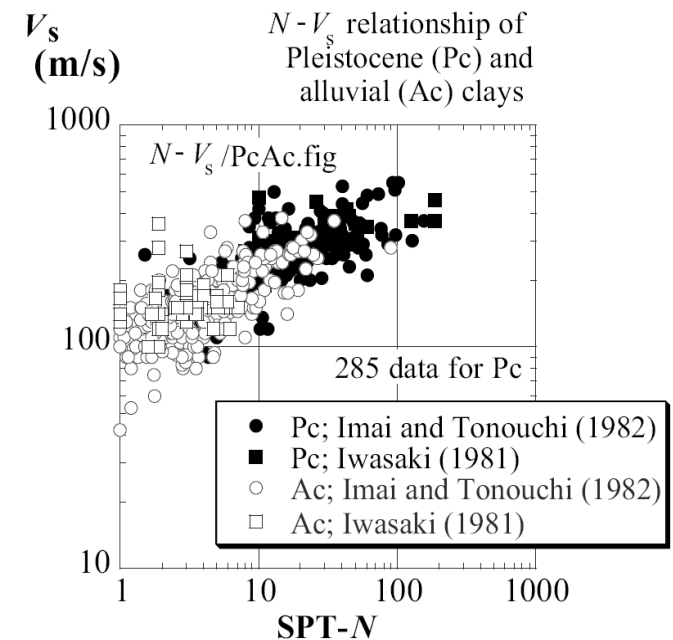
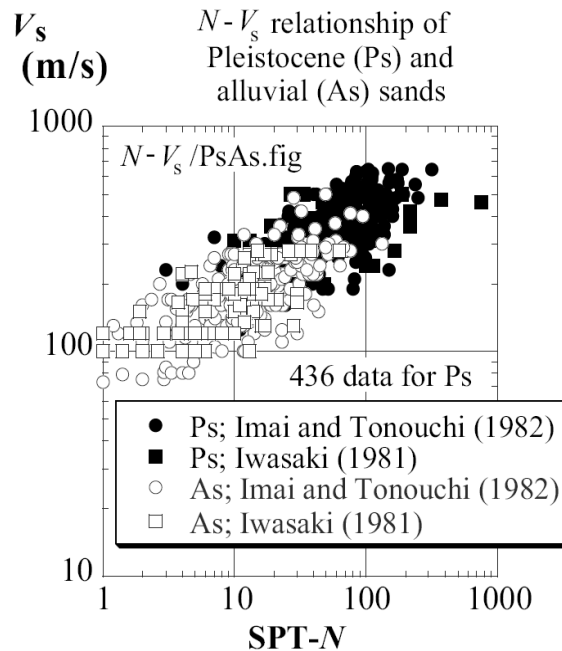
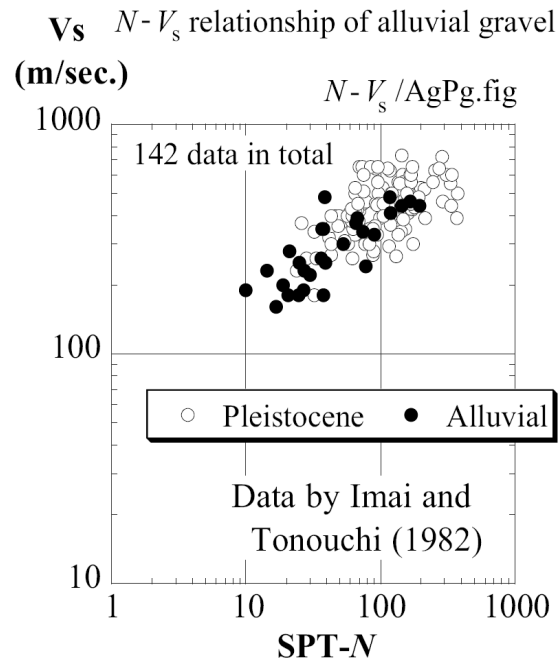
Per Esempio: Formula di Otha e Goto (1978)

$$V_s = 69 \cdot (N_{60})^{0.17} z^{0.2} f_A f_G \quad (m/s)$$

$f_G = f(\text{tipo di terreno})$

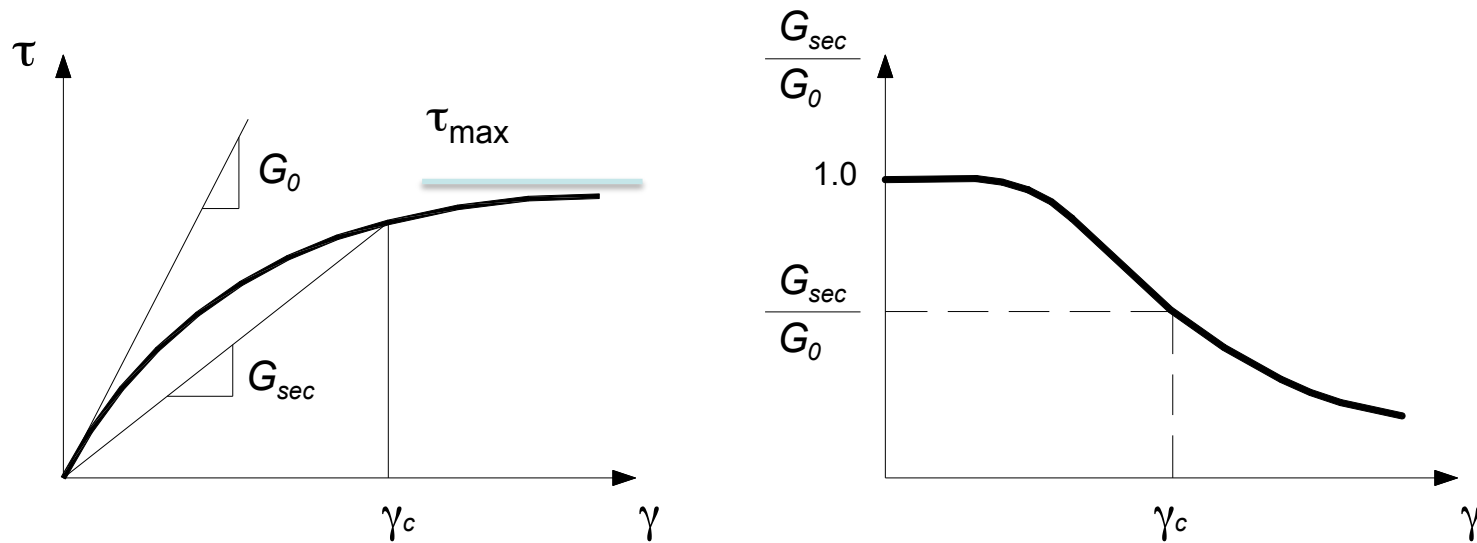
$f_A = f(\text{età del deposito})$

Attenzione alla dispersione dei dati usati per le correzioni → incertezza associata ??



INTERVALLI DI VARIAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI MOLTO AMPI
→ Sconsigliato il ricorso a correlazioni empiriche per grandezze misurabili !!

Vs non correlabile con la resistenza



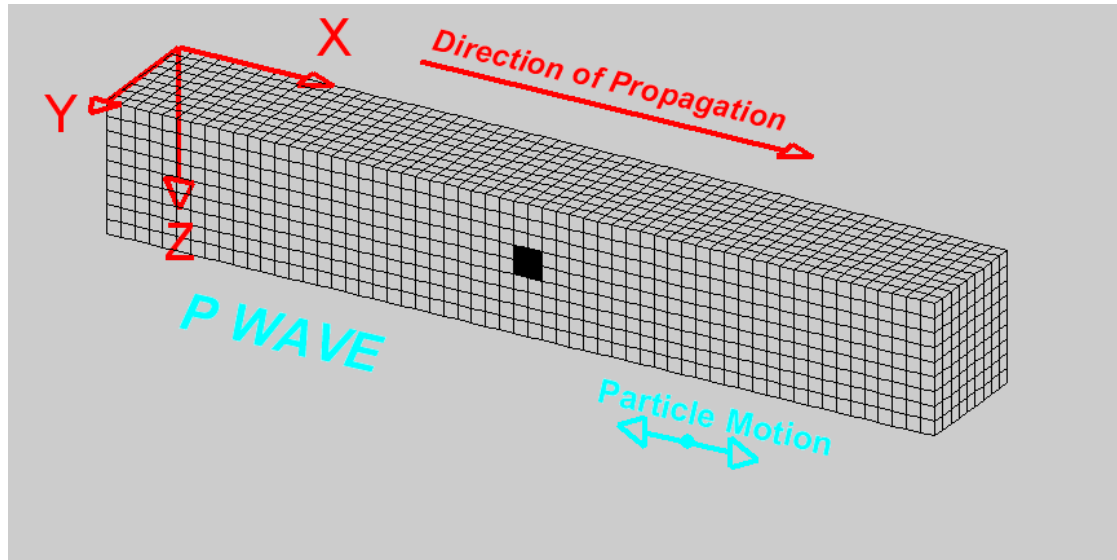
Indice

- Modulo di taglio a piccole deformazioni
 - Prove di laboratorio
 - Velocità di propagazione delle onde di taglio V_S
- Risposta sismica locale
 - Evidenza sperimentale
 - Modellazione
 - Il ruolo delle prove geofisiche
- Varie
 - Calcolo dei cedimenti
 - Correlazioni
- Velocità di propagazione delle onde di compressione V_P
 - Teoria di Biot
 - Applicazioni

Onde di Volume

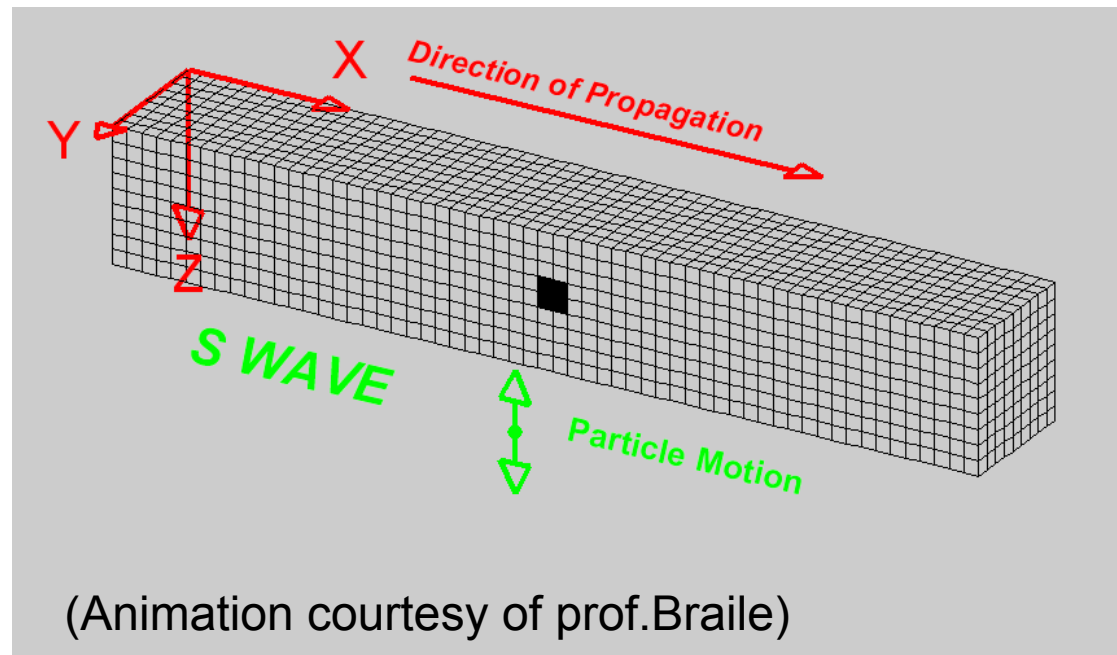
Onda di compressione
(onda Primaria – P)

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$



Onda di taglio
(onda Secondaria – S)

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



Onde di Volume

Mezzo omogeneo elastico lineare isotropo

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

V_S : Velocità di propagazione dell'onda di taglio

V_P : velocità di propagazione dell'onda di compressione

ρ : densità di massa

$$V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

G : modulo di taglio

M : modulo longitudinale (confinamento lateralmente)

Nota: nei terreni saturi V_P è fortemente influenzata dalla compressibilità del fluido interstiziale (acqua) $\rightarrow V_P > 1480 \text{ m/s}$

Nelle prove in sito, considerata la frequenza caratteristica delle onde sismiche, il comportamento è sempre non drenato

Equazioni di Biot: legame V_p, V_s , porosità (indice dei vuoti)

Teoria di Biot

Propagazione delle onde in un mezzo poroso saturo

Approccio macroscopico allo studio del mezzo poroso: il mezzo viene modellato come un continuo binario corrispondente alla sovrapposizione di una fase solida ed una fase fluida che occupano simultaneamente la stessa regione di spazio.

La porosità rappresenta il legame tra le due fasi ($n=V_v/V$).

Ipotesi:

- scheletro solido lineare elastico isotropo
- tutti i vuoti sono saturati da un fluido non-dissipativo compressibile
- assenza di moto relativo tra fase solida e fluida (comportamento non-drenato)
(valida per le basse frequenze)

Scrivendo le equazioni del moto per il mezzo poroso saturo ed applicando la decomposizione di Helmholtz, è possibile dimostrare l'esistenza di due diverse onde di compressione ed un'unica onda di taglio.

L'onda di compressione più veloce è detta onda P del primo tipo, mentre la più lenta è detta del secondo tipo o onda di Biot.

Soluzione approssimata

Introducendo l'ipotesi aggiuntiva di indeformabilità dei grani, l'espressione della propagazione delle onde in un mezzo poroso saturo si riduce a:

$$V_P = \sqrt{\frac{(K^{SK} + \frac{4}{3} \cdot G) + \frac{K^F}{n}}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

dove $\rho = (1 - n) \cdot \rho^S + n \cdot \rho^F$

ρ^S densità dei grani

ρ^F densità del fluido

K^F modulo volumetrico del fluido

K^{SK} modulo volumetrico dello scheletro solido

G modulo di taglio (dello scheletro solido)

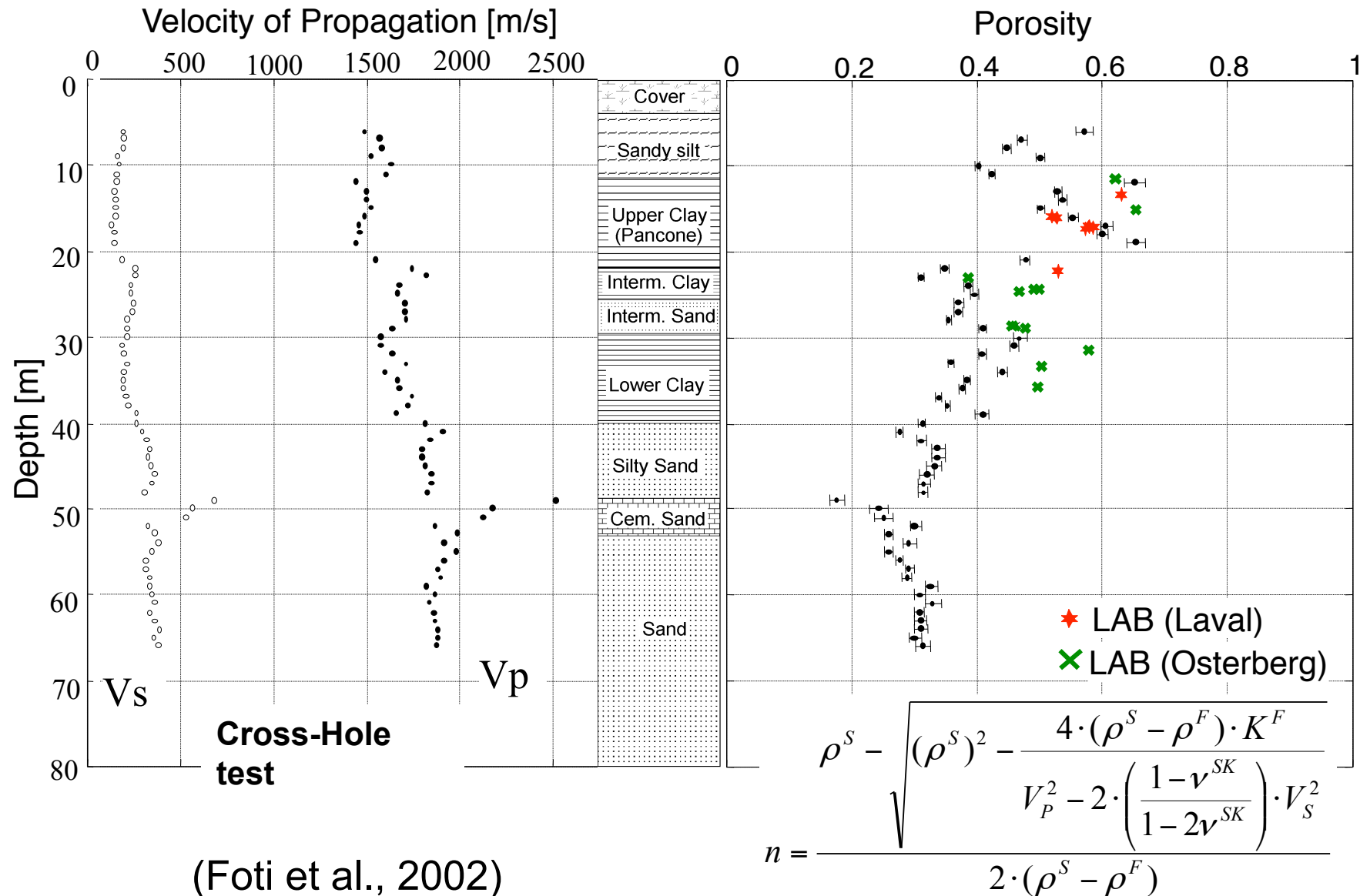
n porosità

ν^{SK} rapporto di Poisson dello scheletro solido

Nota: nei terreni saturi V_P è fortemente influenzata dalla compressibilità del fluido interstiziale (acqua) $\rightarrow V_P > 1450 \text{m/s}$

Soil porosity from seismic velocities

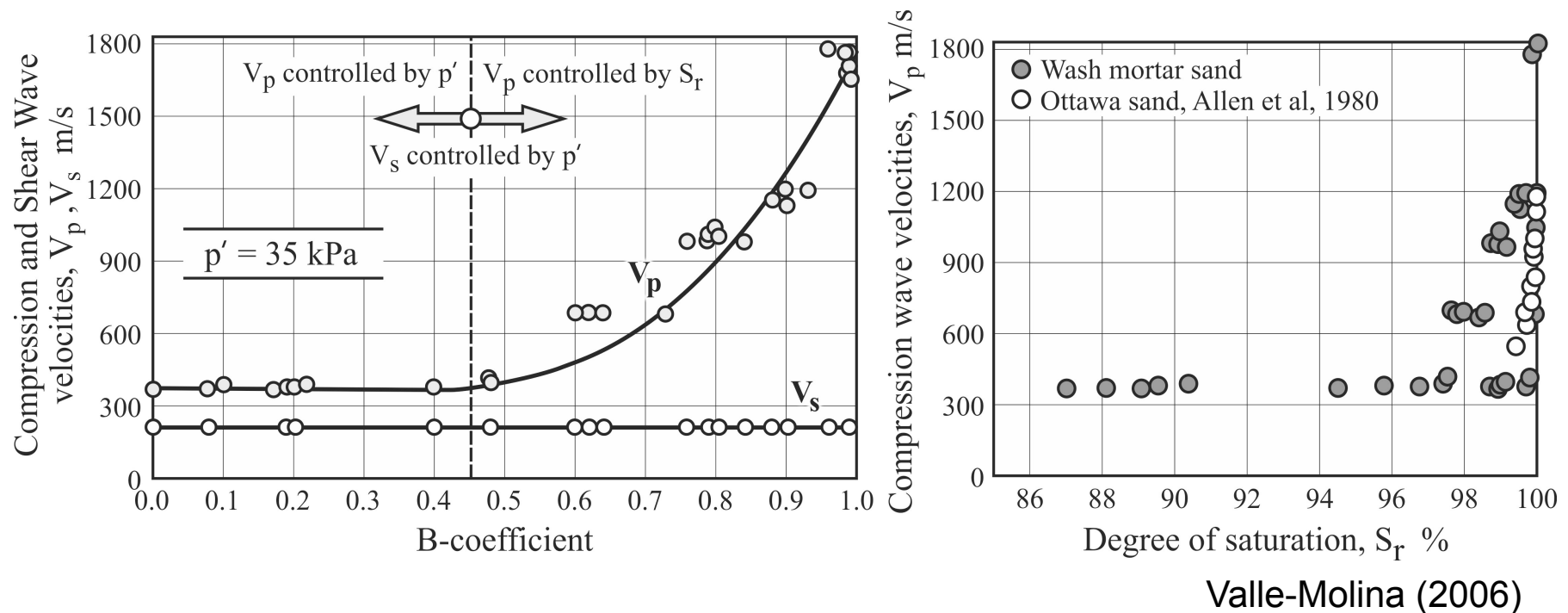
Leaning Tower of Pisa site



Grado di saturazione

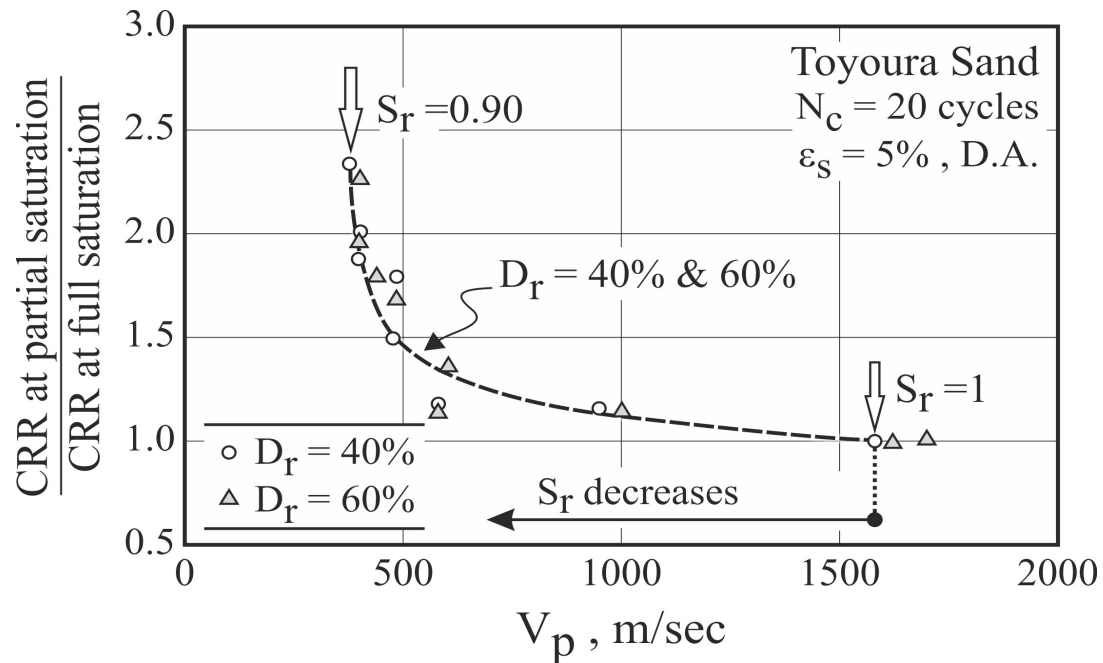
Anche una piccolissima variazione di saturazione ha un effetto marcato sui valori di V_p :

NB la completa saturazione è condizione necessaria per la liquefazione



Influence of degree of saturation on liquefaction resistance

saturation degree strongly affect liquefaction resistance
→ V_p can be used to monitor saturation and exclude liquefaction

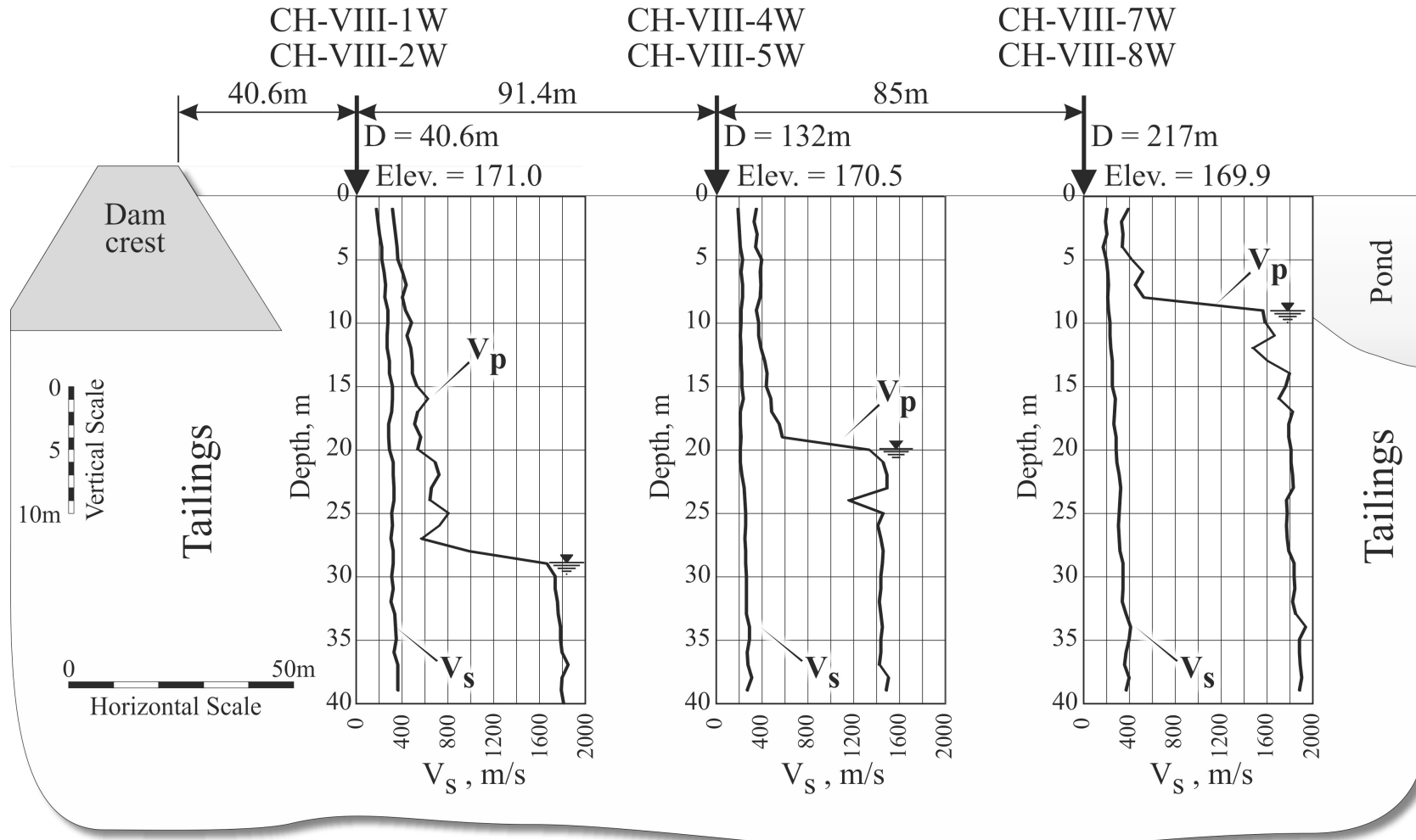


Tsukamoto et al (2006)

Esempio: Zelasny Most tailing dam

Jamiolkowski, 2012

West dam



Grazie per l'attenzione !

