



L'uso di legami elasto-plastici incrudenti nelle analisi di sistemi geotecnici

***Il ruolo del comportamento dei terreni a piccole deformazioni
nelle applicazioni sismiche***

Ing. Domenico Gaudio

***Ricercatore in Ingegneria Geotecnica, Dipartimento di Ingegneria
Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma***



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

***Vicepresidente Commissione Geotecnica - Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Roma***

1. comportamento dei terreni a piccole deformazioni
2. determinazione parametri meccanici

1. comportamento dei terreni a piccole deformazioni
2. determinazione parametri meccanici
3. modello costitutivo *HS small*
4. determinazione parametri costitutivi
5. limiti del modello

1. comportamento dei terreni a piccole deformazioni
2. determinazione parametri meccanici
3. modello costitutivo *HS small*
4. determinazione parametri costitutivi
5. limiti del modello
6. applicazione al caso di una colonna 1D

1. comportamento dei terreni a piccole deformazioni
2. determinazione parametri meccanici
3. modello costitutivo *HS small*
4. determinazione parametri costitutivi
5. limiti del modello
6. applicazione al caso di una colonna 1D
7. sintesi e conclusioni

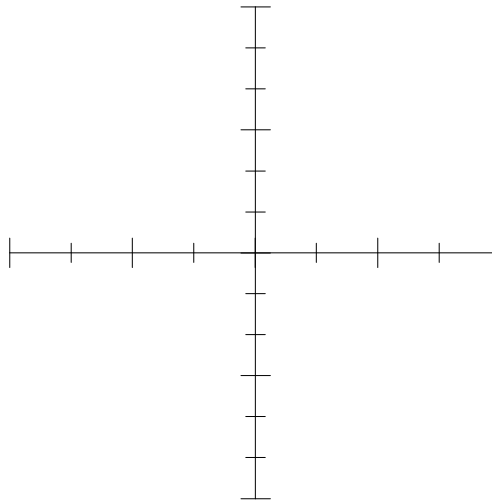
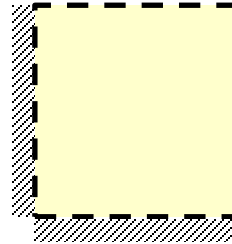


1. comportamento dei terreni a piccole deformazioni



comportamento dei terreni a piccole deformazioni

elemento infinitesimo soggetto a sforzo di taglio ciclico 1D

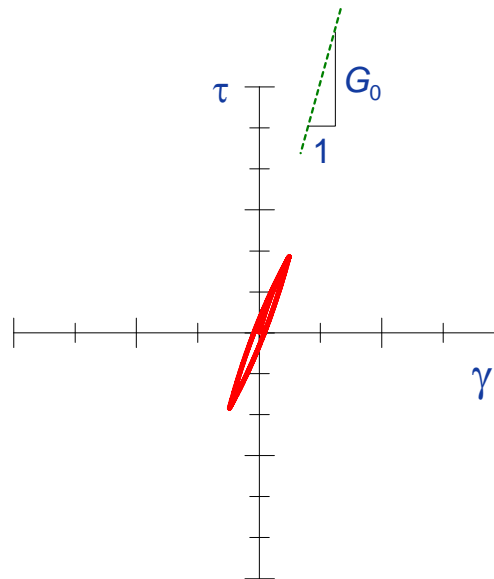
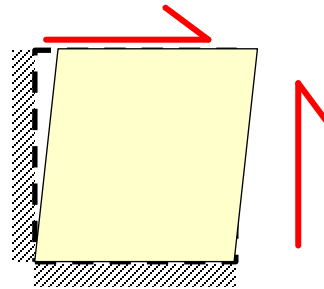


Seed e Idriss (1970)



comportamento dei terreni a piccole deformazioni

elemento infinitesimo soggetto a sforzo di taglio ciclico 1D



$$\frac{\tau}{\gamma} \cong G_0$$

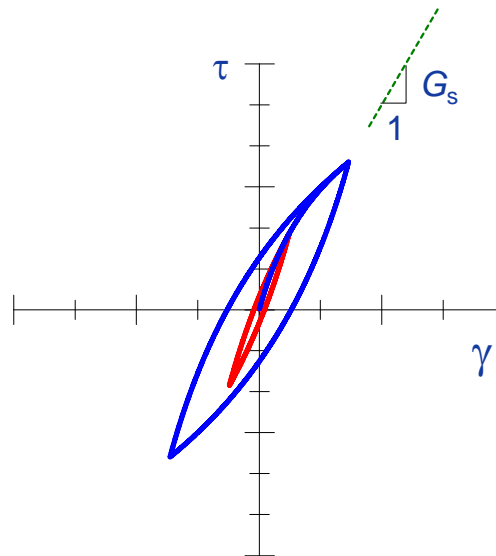
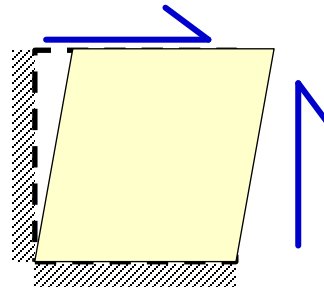
$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S} = 0$$

Seed e Idriss (1970)



comportamento dei terreni a piccole deformazioni

elemento infinitesimo soggetto a sforzo di taglio ciclico 1D



$$\frac{2\tau_c}{2\gamma_c} = G_s$$

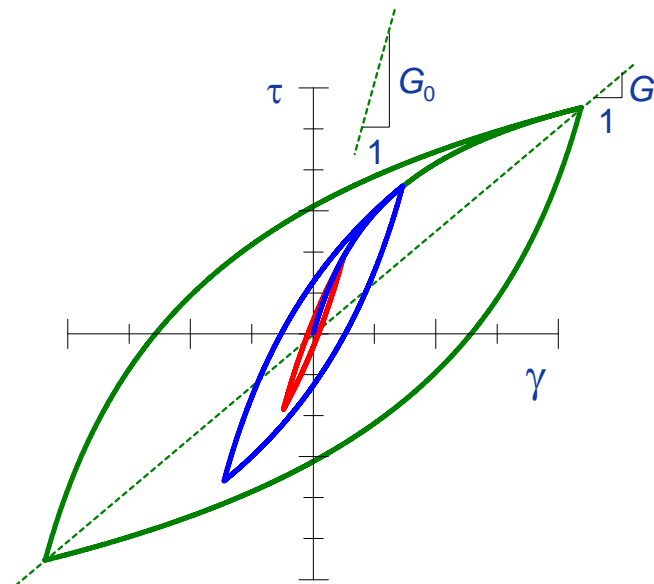
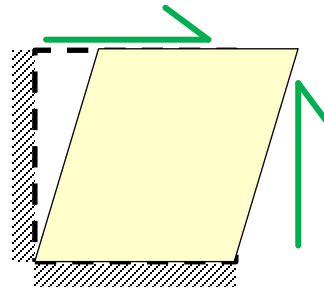
$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_s}$$

Seed e Idriss (1970)



comportamento dei terreni a piccole deformazioni

elemento infinitesimo soggetto a sforzo di taglio ciclico 1D



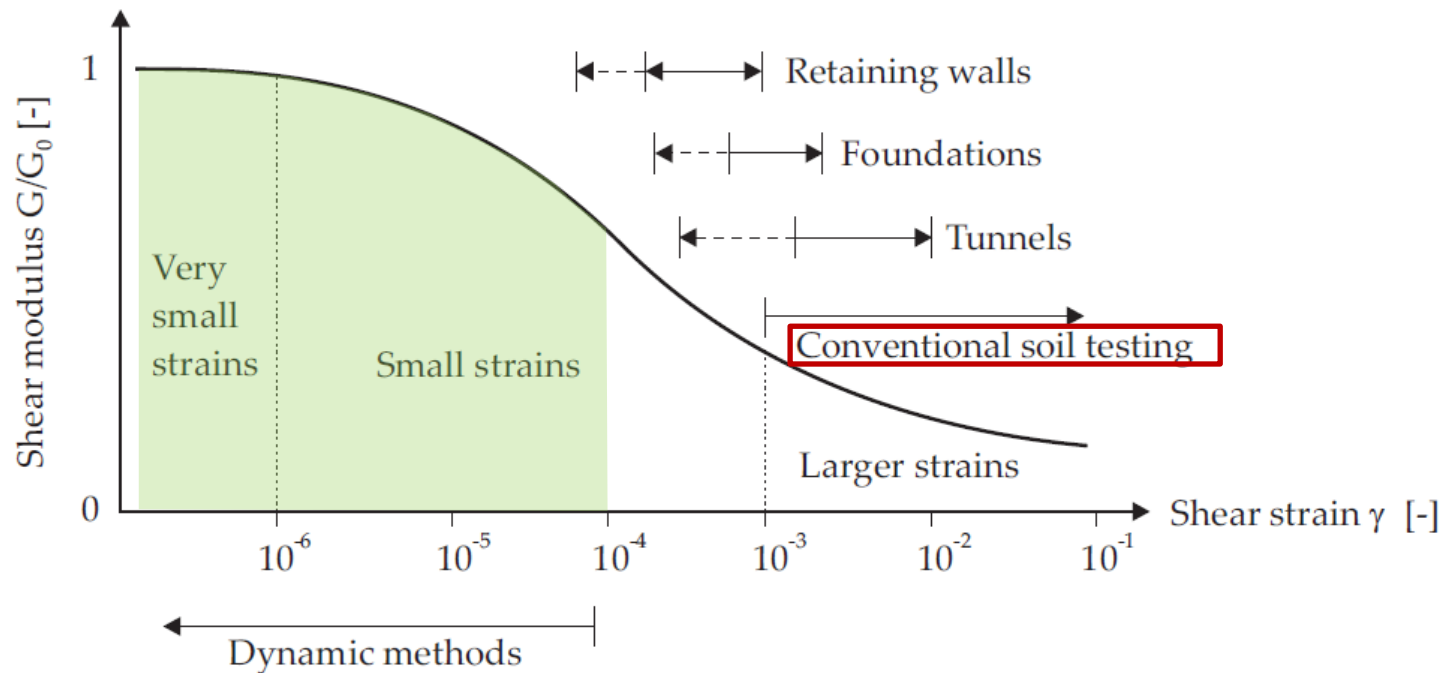
$$\frac{2\tau_c}{2\gamma_c} = G_s$$

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_s}$$

Seed e Idriss (1970)

comportamento dei terreni a piccole deformazioni

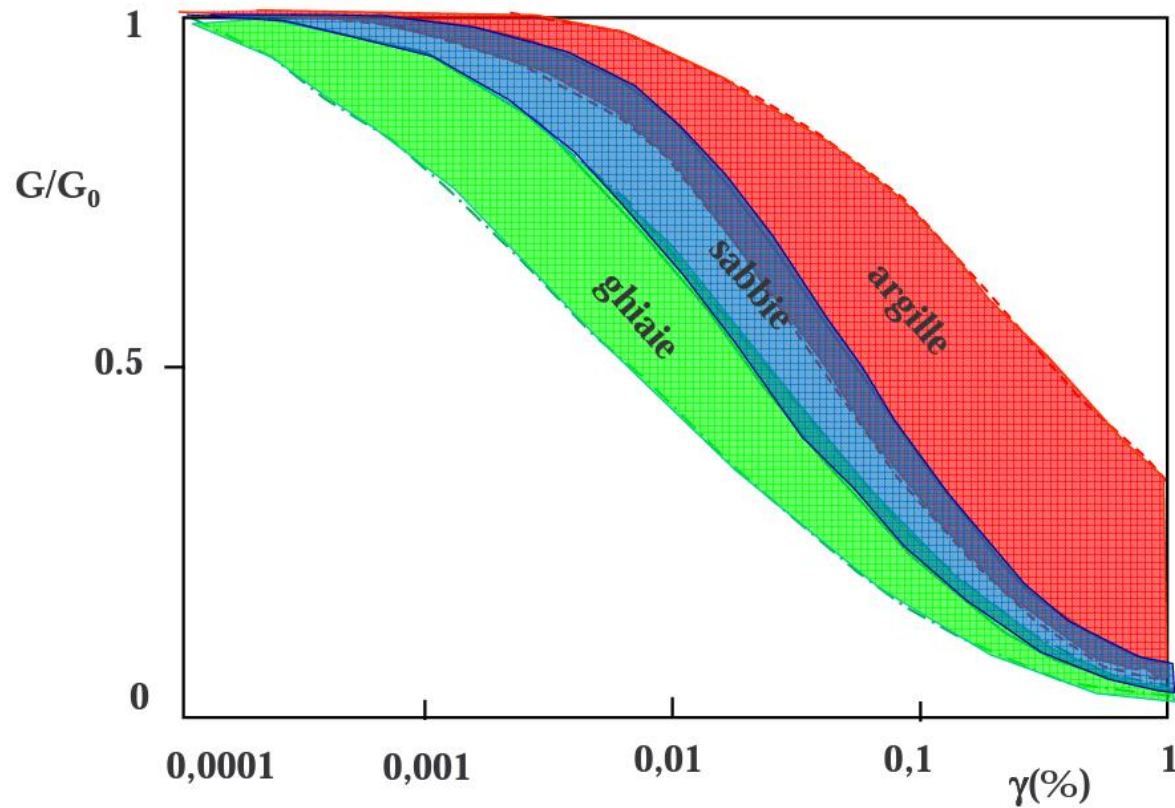
curva di decadimento del modulo di taglio



Atkinson e Sallfors (1991)

comportamento dei terreni a piccole deformazioni

curva di decadimento del modulo di taglio

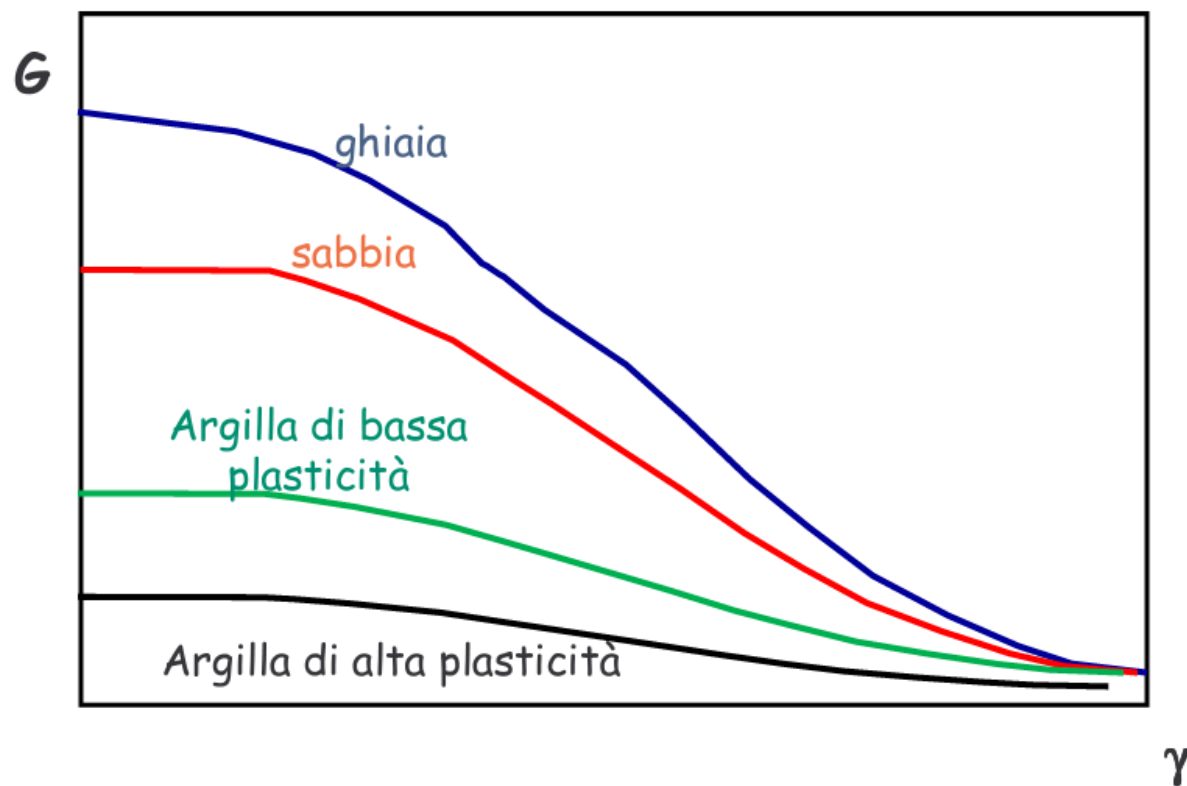


Lanzo (2012)



comportamento dei terreni a piccole deformazioni

curva di decadimento del modulo di taglio

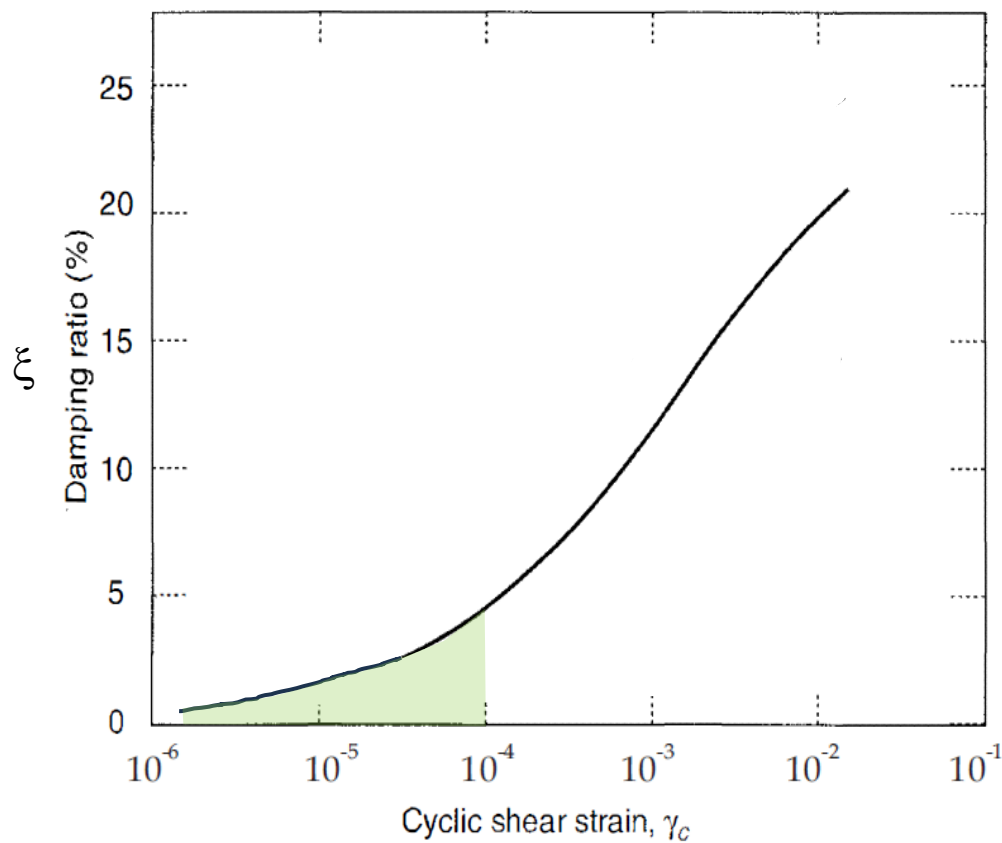


Lanzo (2012)



comportamento dei terreni a piccole deformazioni

curva di incremento del rapporto di smorzamento



Vucetic e Dobry (1991)

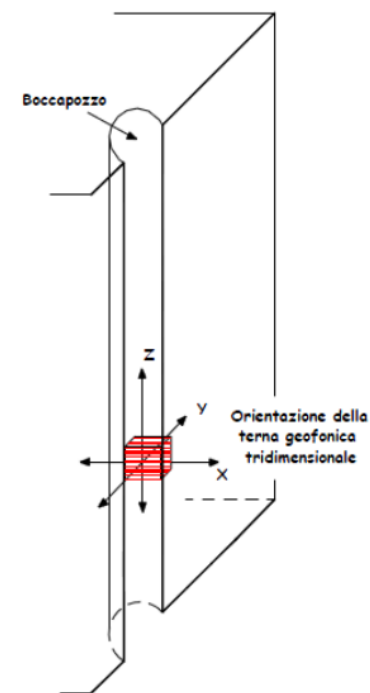
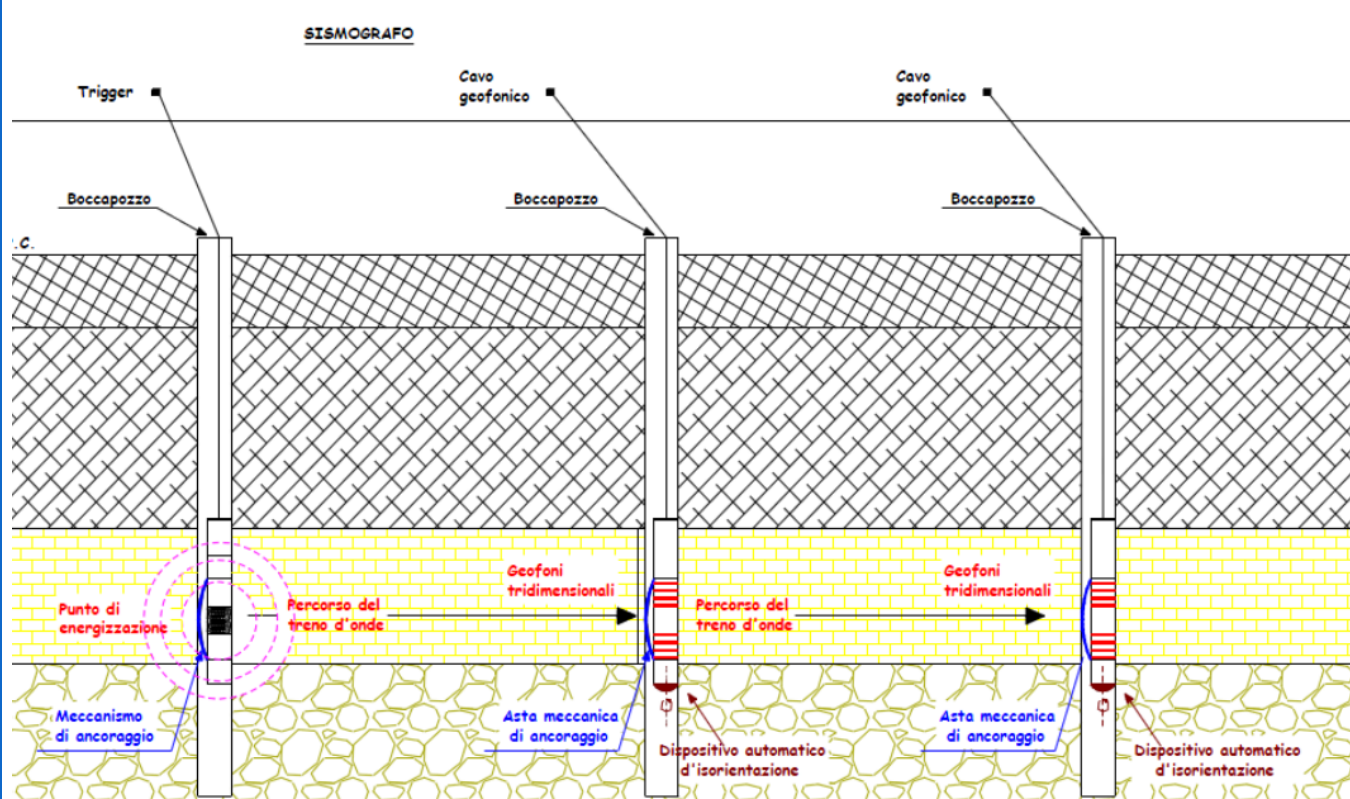


2. determinazione parametri meccanici

modalità	tipologia	output
prove <i>in situ</i>	CH, DH, MASW, etc...	$G_0(z)$
prove di laboratorio	<i>bender elements</i> , colonna risonante, taglio torsionale	$G_0(e, p', I_p, OCR)$ $G/G_0(\gamma)$ $\xi(\gamma)$
relazioni empiriche e abachi	<i>upper bound</i> , media, <i>lower bound</i>	$G_0(z, e, p', I_p, OCR, D_R)$ $G/G_0(\gamma)$ $\xi(\gamma)$

determinazione parametri meccanici

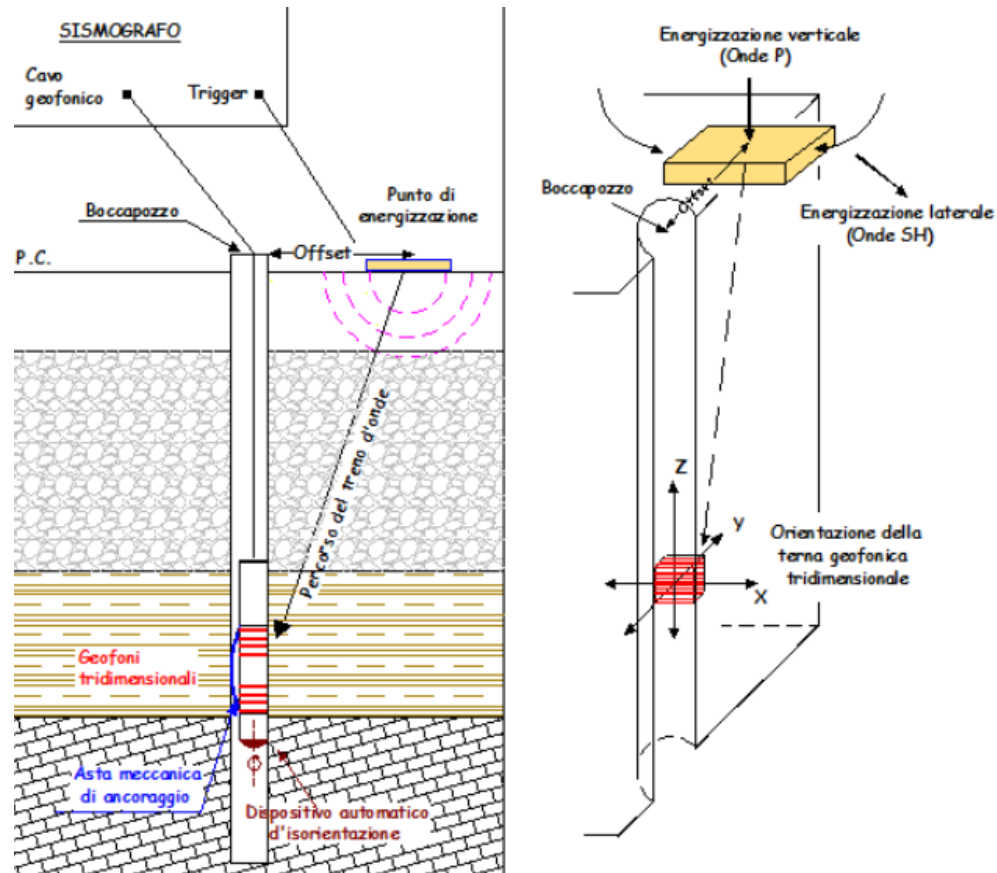
prove *in situ* – Cross Hole (CH)



GE. Co. DMC. (2023)

determinazione parametri meccanici

prove *in situ* – Down Hole (DH)

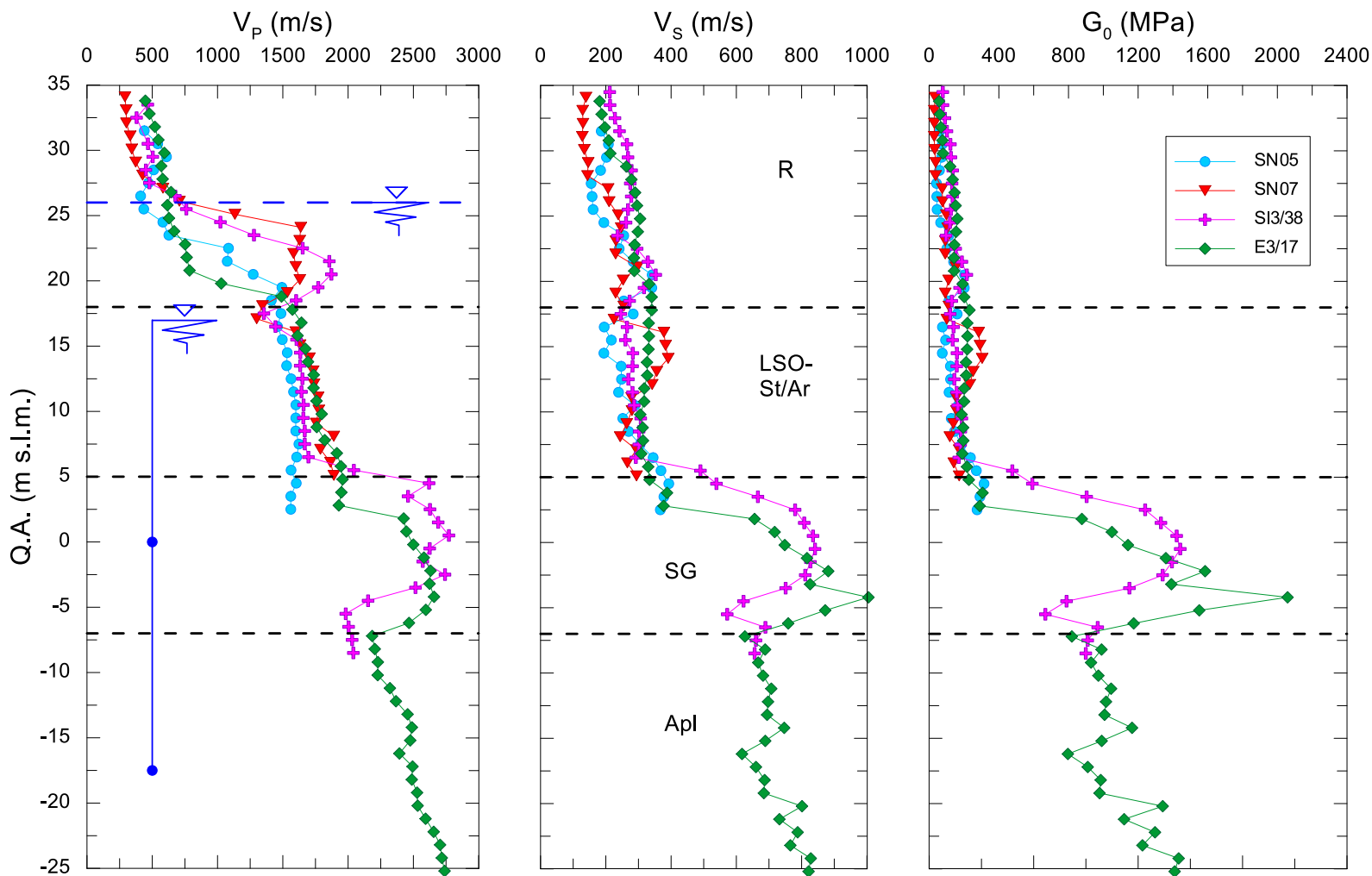


GE. Co. DMC. (2023)



determinazione parametri meccanici

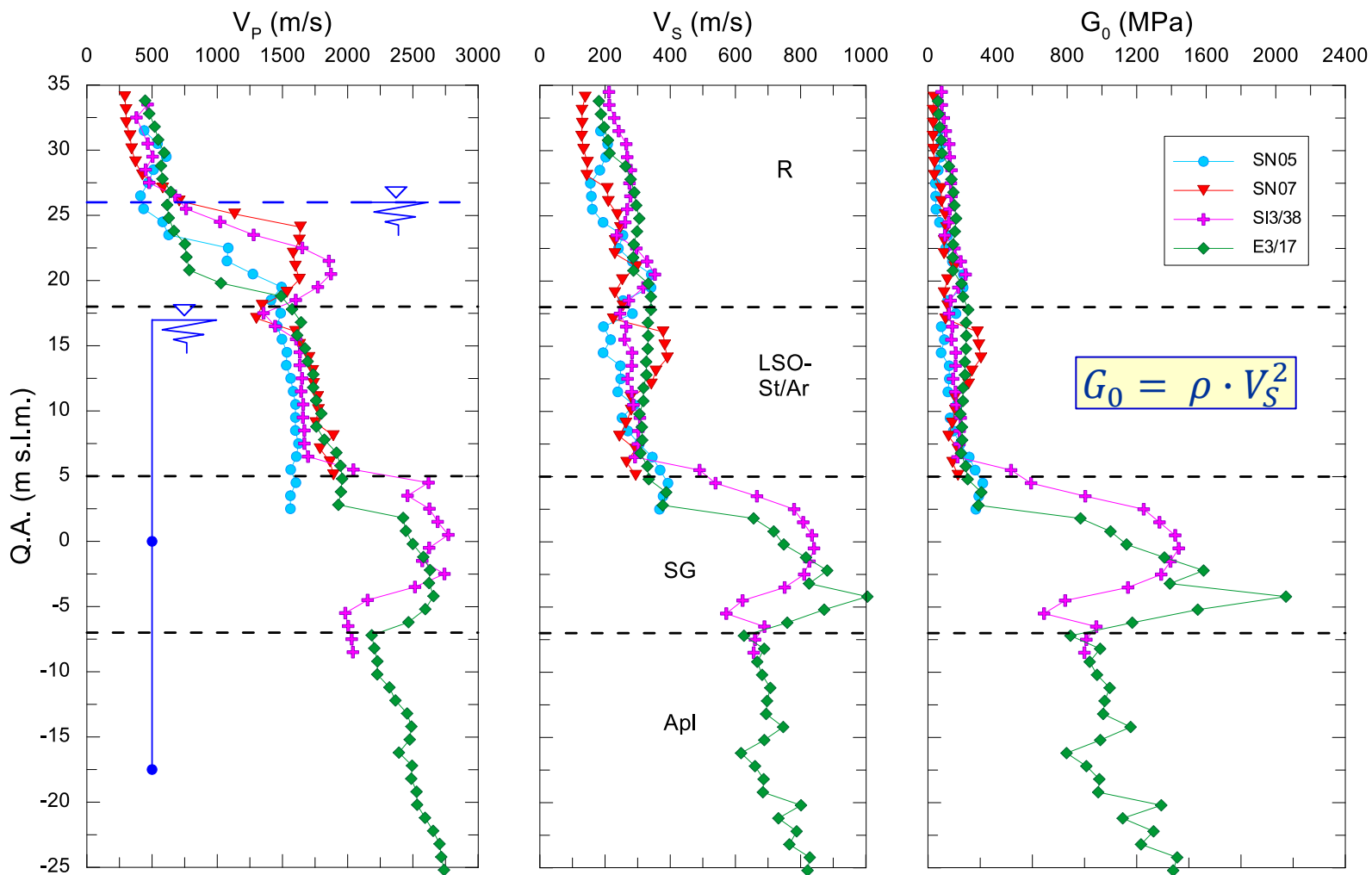
prove in situ – CH, DH





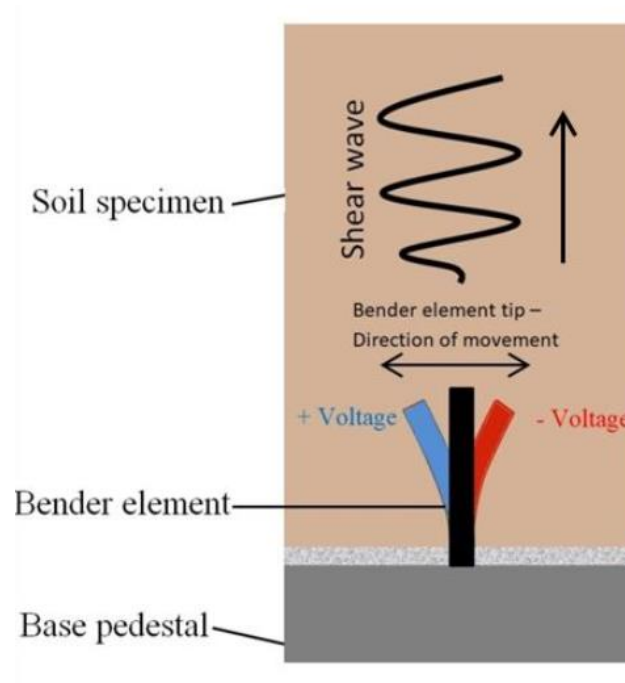
determinazione parametri meccanici

prove *in situ* – CH, DH



determinazione parametri meccanici

prove di laboratorio – *bender elements*

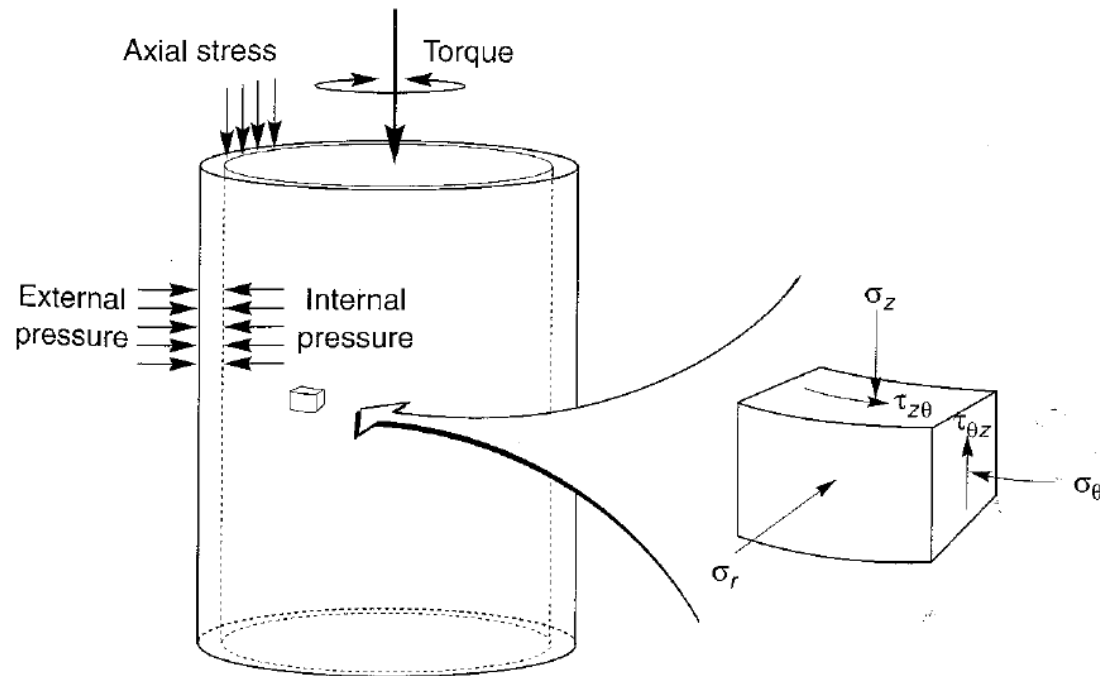


$$G_0 = \rho \cdot V_S^2$$

Vj Tech. (2023)

determinazione parametri meccanici

prove di laboratorio – *taglio torsionale ciclico*

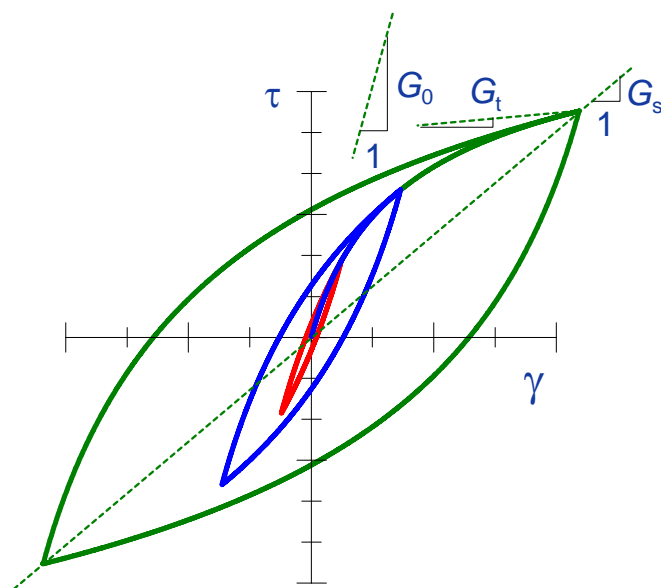


Kramer (1996)



determinazione parametri meccanici

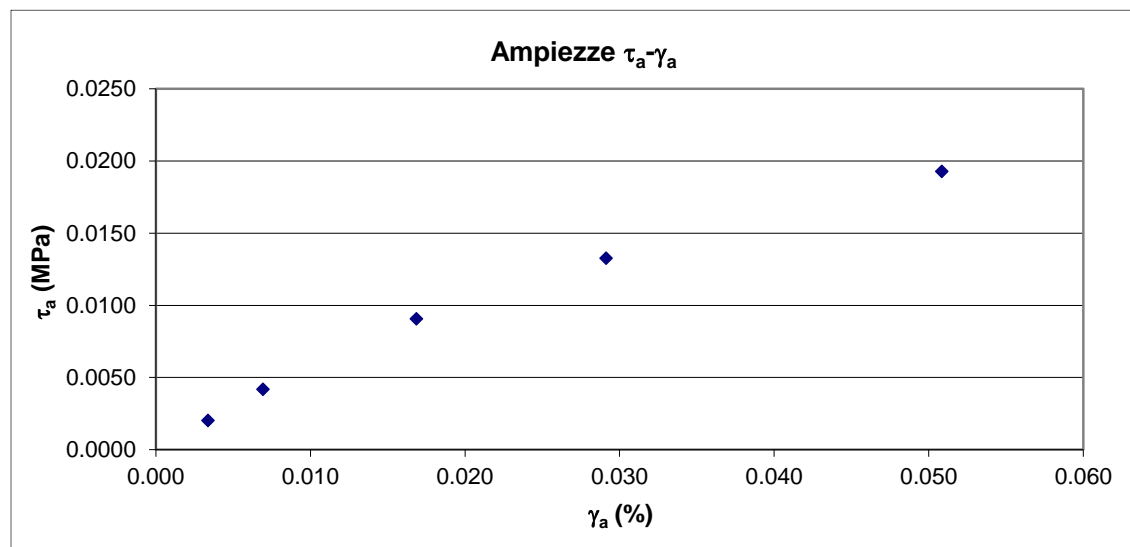
prove di laboratorio – *taglio torsionale ciclico*





determinazione parametri meccanici

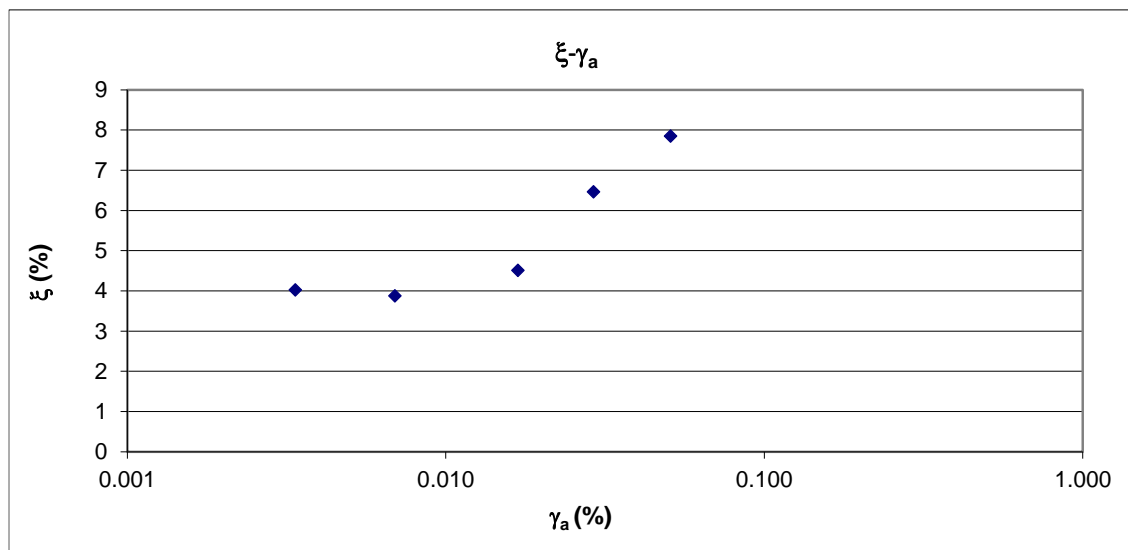
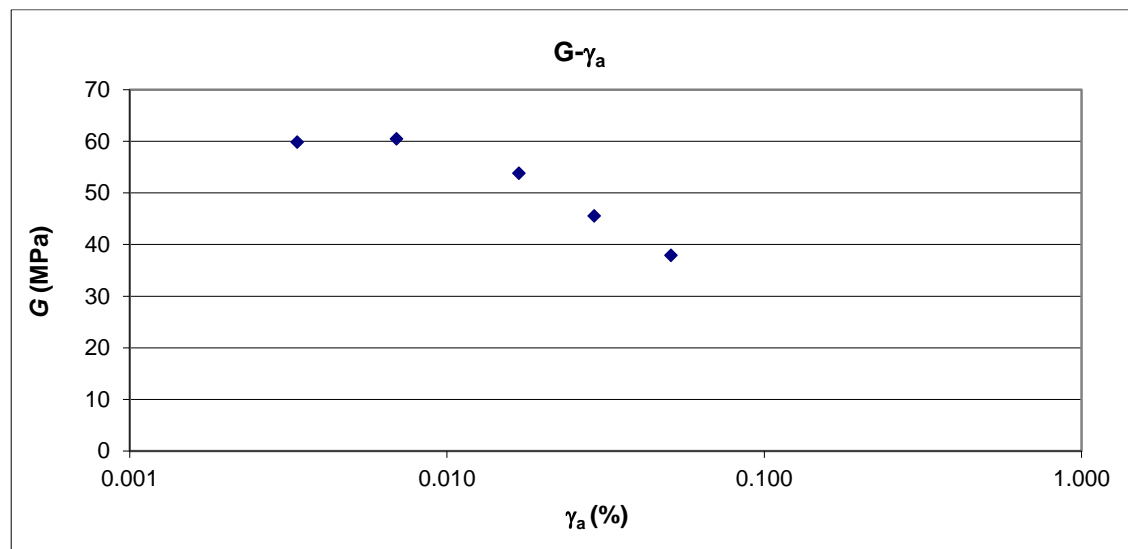
prove di laboratorio – *taglio torsionale ciclico*





determinazione parametri meccanici

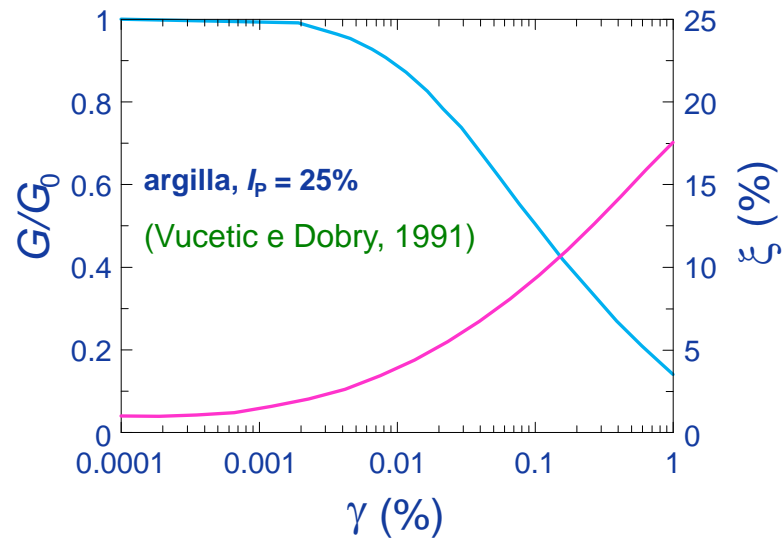
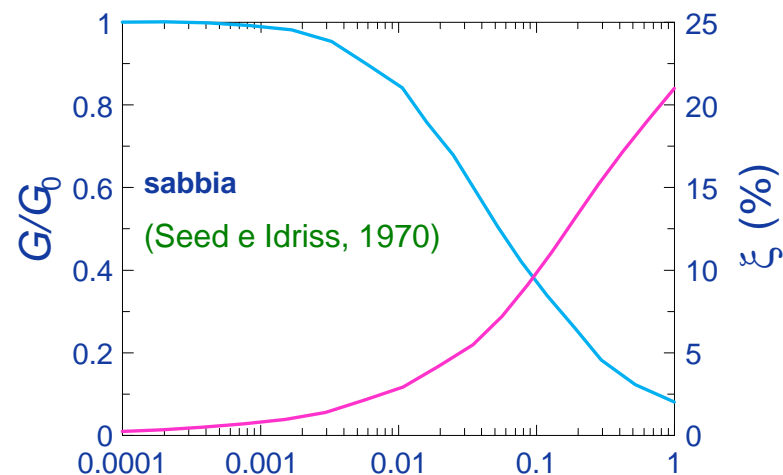
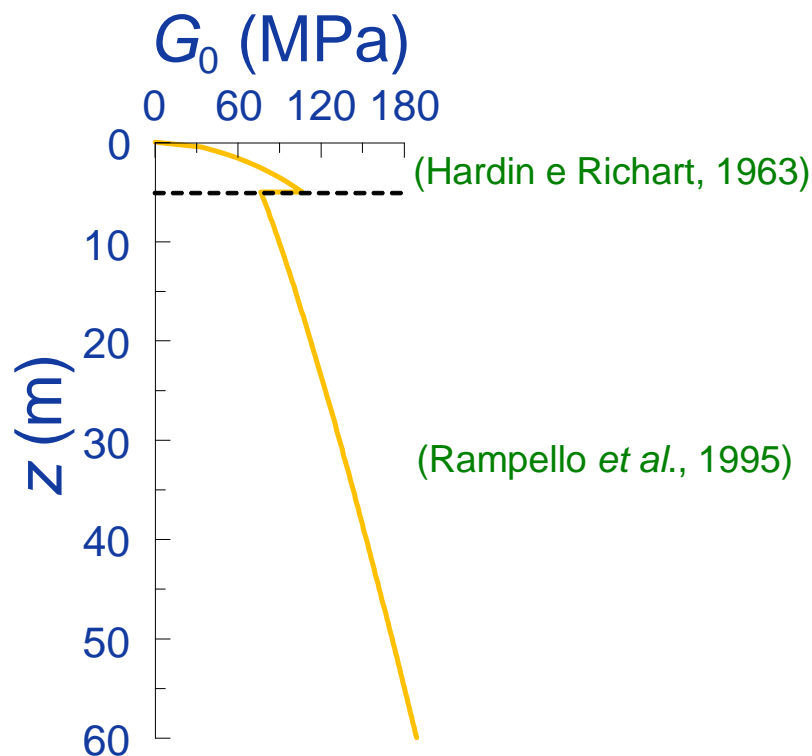
prove di laboratorio – *taglio torsionale ciclico*





determinazione parametri meccanici

relazioni empiriche e abachi





3. modello Hardening Soil with Small-Strain Stiffness

Benz *et al.* (2009)



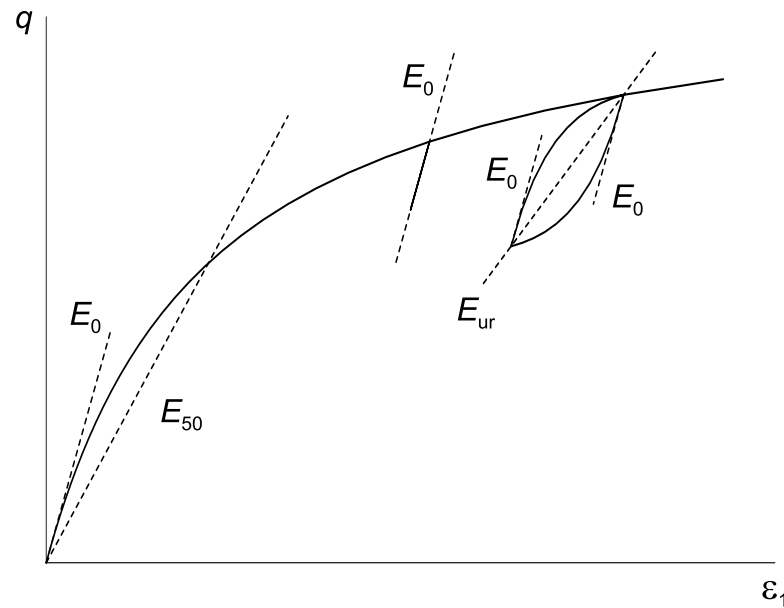
Ing. Domenico Gaudio

Il ruolo del comportamento dei terreni a piccole deformazioni nelle applicazioni sismiche

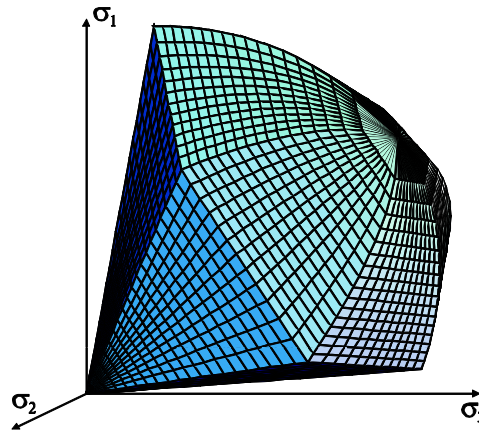
26/09/2023

pag. 27

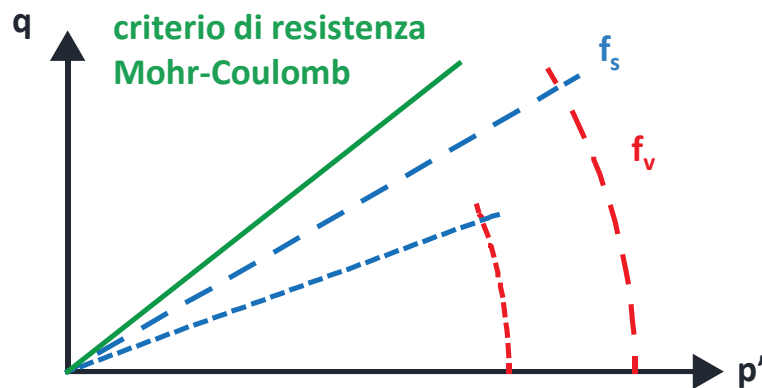
- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione



superficie di snervamento $\left\{ \begin{array}{ll} \text{incrudimento deviatorico} & (\gamma^p) \\ \text{incrudimento volumetrico} & (\varepsilon_v^p) \end{array} \right.$



superficie di snervamento $\left\{ \begin{array}{ll} \text{incrudimento deviatorico} & (\gamma^p) \\ \text{incrudimento volumetrico} & (\varepsilon_v^p) \end{array} \right.$



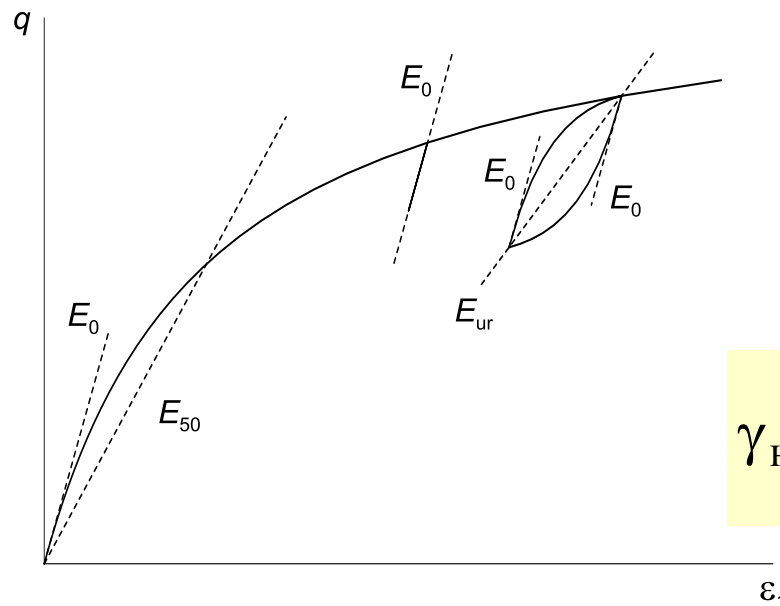


modello *HS small*

- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione
- rigidezza funzione dello stato tensionale efficace

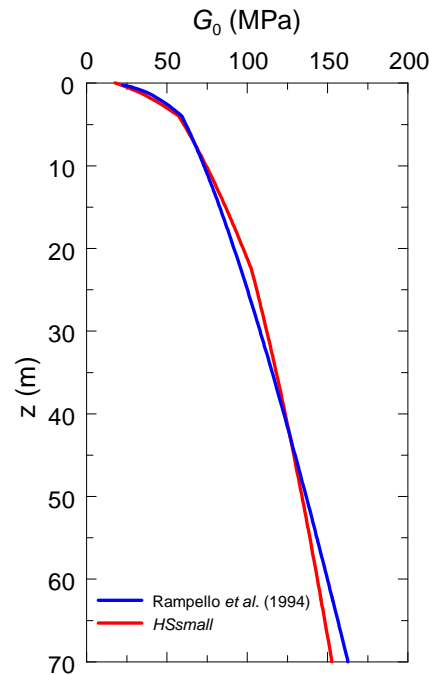
$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cdot \cotg\varphi' + \sigma'_3}{c' \cdot \cotg\varphi' + p^{\text{ref}}} \right)^m$$

- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione
- rigidezza funzione dello stato tensionale efficace
- dipendenza della rigidezza dal percorso di carico



$$\gamma_{\text{Hist}} = \sqrt{3} \frac{\|[\mathbf{H}] \Delta \underline{e}\|}{\|\Delta \underline{e}\|}$$

- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione
- rigidezza funzione dello stato tensionale efficace
- dipendenza della rigidezza dal percorso di carico
- rigidezza a piccole deformazioni (**HSsmall**)



$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cdot \cot \phi' + \sigma'_3}{c' \cdot \cot \phi' + p^{\text{ref}}} \right)^m$$



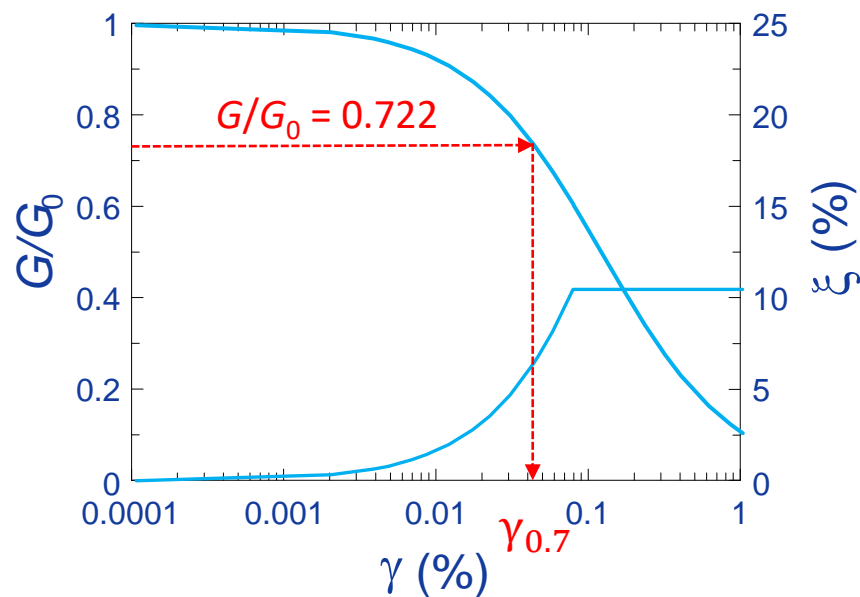
modello *HS small*

- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione
- rigidezza funzione dello stato tensionale efficace
- dipendenza della rigidezza dal percorso di carico
- rigidezza a piccole deformazioni (HSsmall)
- decadimento della rigidezza con il livello di deformazione (**HSsmall**)

Hardin e Drnevich modificata

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + 0.385 \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|}$$

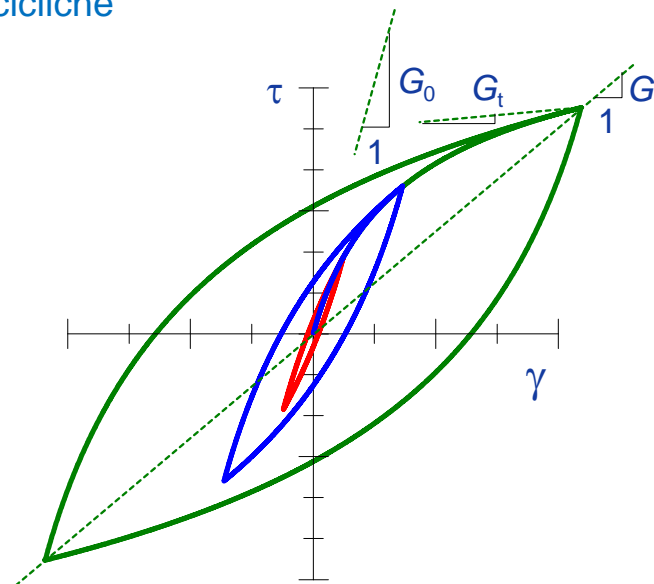
$$\gamma_{\text{cut-off}} = \frac{\gamma_{0.7}}{0.385} \left(\sqrt{\frac{G_0^{\text{ref}}}{G_{\text{ur}}^{\text{ref}}}} - 1 \right)$$





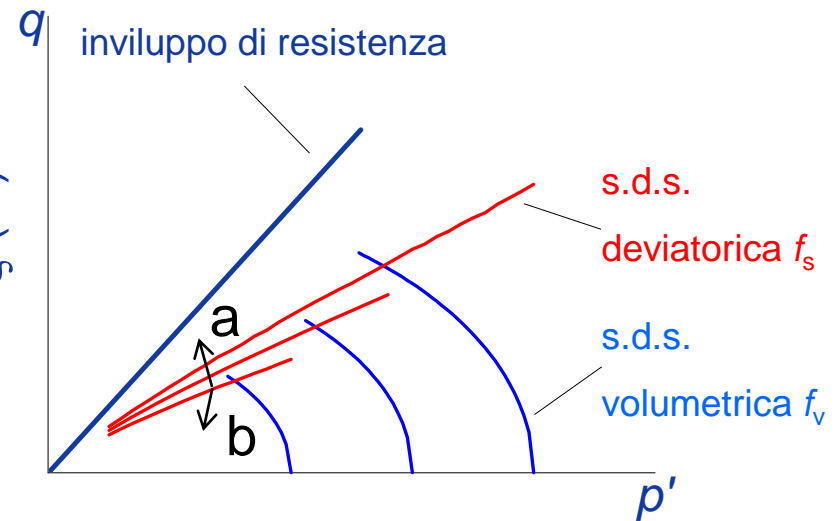
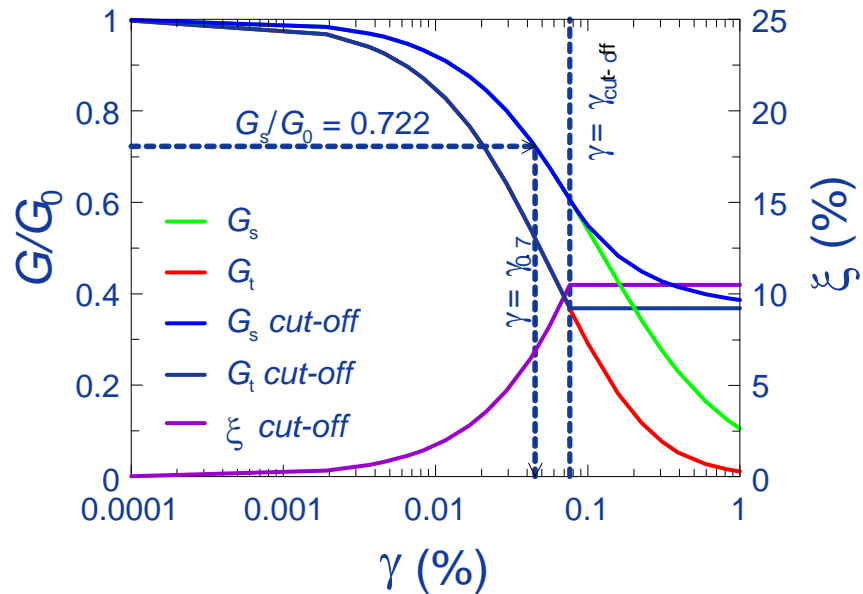
modello *HS small*

- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione
- rigidezza funzione dello stato tensionale efficace
- dipendenza della rigidezza dal percorso di carico
- rigidezza a piccole deformazioni (HSsmall)
- decadimento della rigidezza con il livello di deformazione (HSsmall)
- leggi di Masing in condizioni cicliche



- comportamento non lineare a partire da bassi livelli di deformazione
- rigidezza funzione dello stato tensionale efficace
- dipendenza della rigidezza dal percorso di carico
- rigidezza a piccole deformazioni (HSsmall)
- decadimento della rigidezza con il livello di deformazione (HSsmall)
- leggi di Masing in condizioni cicliche

! parametri di *input* calibrati su prove di sito e laboratorio



G_0^{ref} (MPa)	m	$\gamma_{0.7}$	E_{ur}^{ref} (MPa)	ν_{ur}	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)
----------------------	-----	----------------	-------------------------	------------	-------------------------	--------------------------

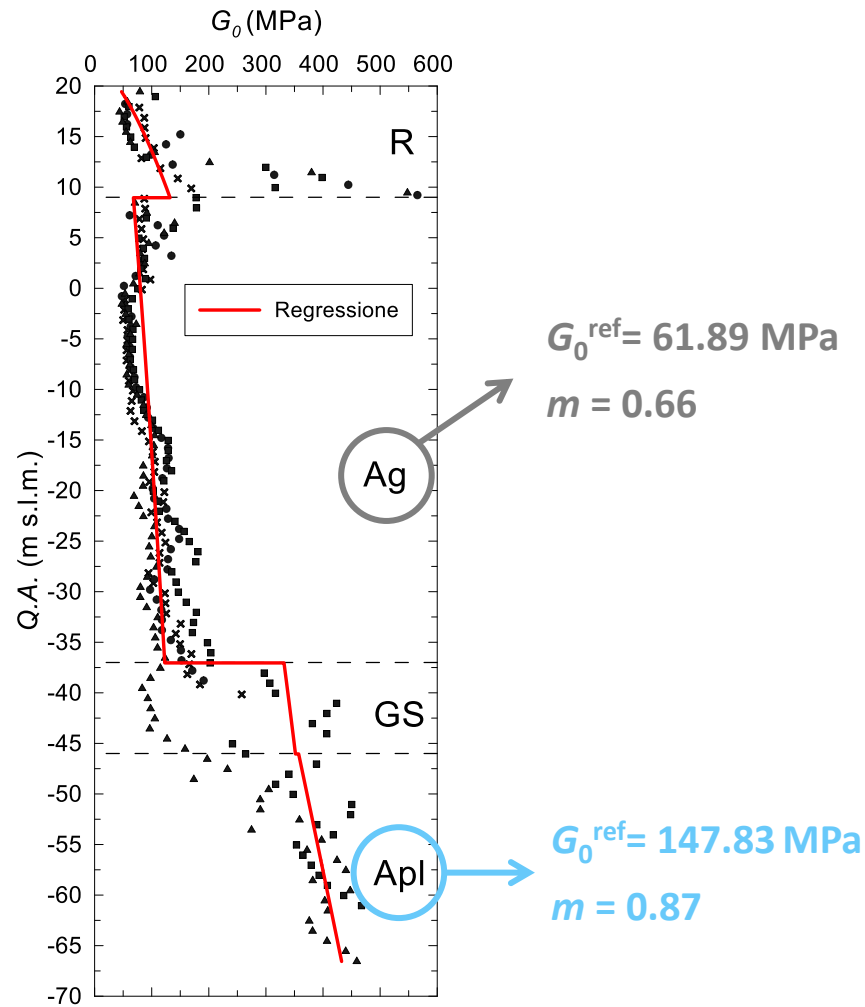


4. determinazione parametri costitutivi HS_{small}

determinazione parametri costitutivi *HSsmall*

calibrazione G_0^{ref} e m - prove Cross-Hole (o relazioni letteratura)

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c' \cot \varphi' + \sigma'_3}{c' \cot \varphi' + p^{\text{ref}}} \right)^m$$

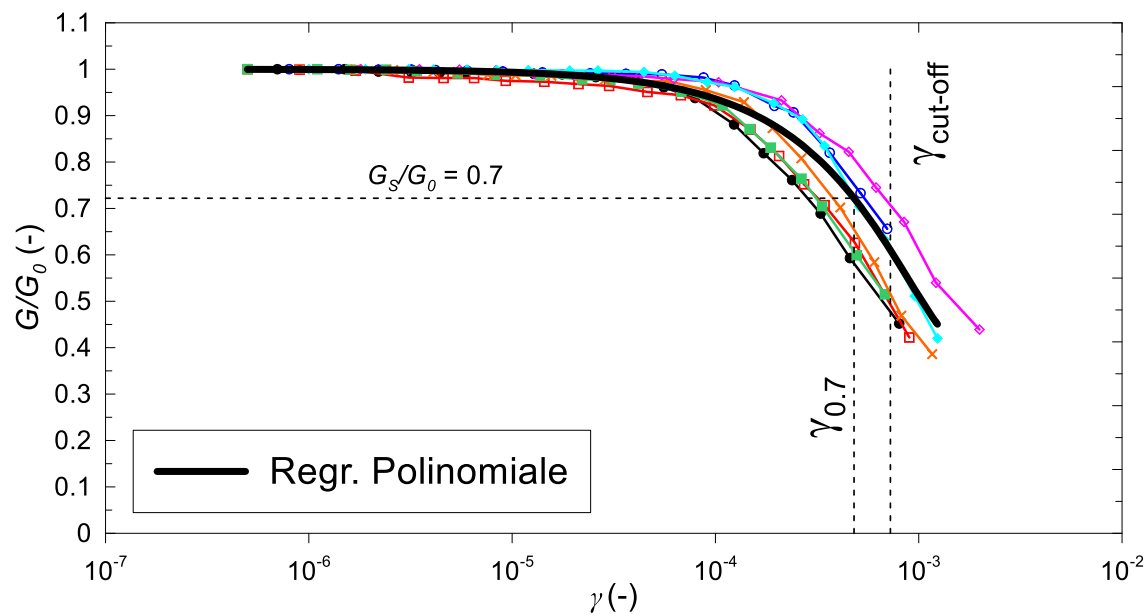


Lavagnini (2022)



determinazione parametri costitutivi *HSsmall*

calibrazione $\gamma_{0.7}$ e G_{ur}^{ref} - prove colonna risonante



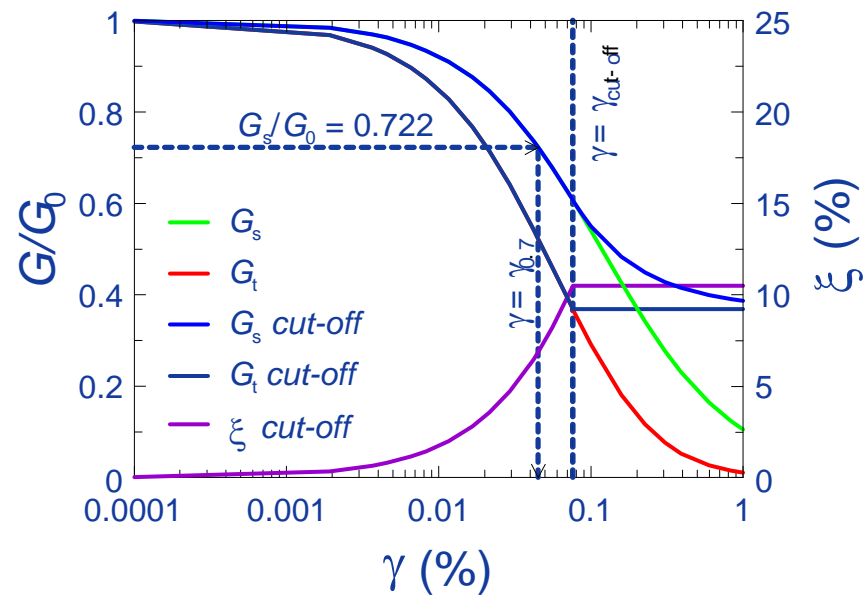
Lavagnini (2022)



determinazione parametri costitutivi *HSsmall*

calibrazione $\gamma_{0.7}$ e G_{ur}^{ref} – curve di letteratura

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + 0.385 \left| \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}} \right|}$$



Gaudio e Rampello (2019)

determinazione parametri costitutivi *HSsmall*

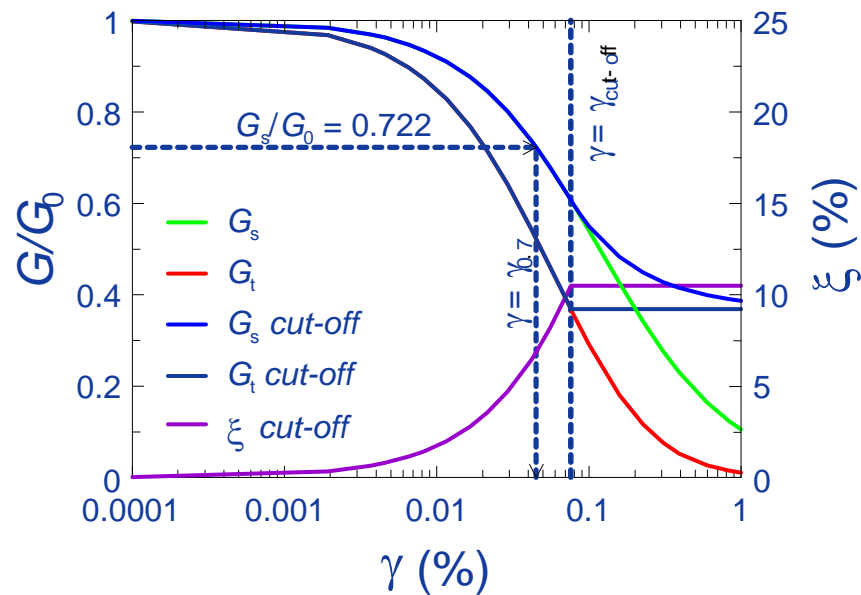
calibrazione $\gamma_{0.7}$ e G_{ur}^{ref} – curve di letteratura

$$\xi = \frac{E_D}{4\pi E_S}$$

$$E_D = \frac{4G_0\gamma_{0.7}}{0.385} \left[2\gamma_c - \frac{\gamma_c}{1 + \frac{\gamma_{0.7}}{0.385\gamma}} - \frac{2G_0\gamma_{0.7}}{0.385} \ln \left(1 + \frac{0.385}{\gamma_{0.7}} \right) \right]$$

$$E_S = 1/2G_S\gamma_c^2$$

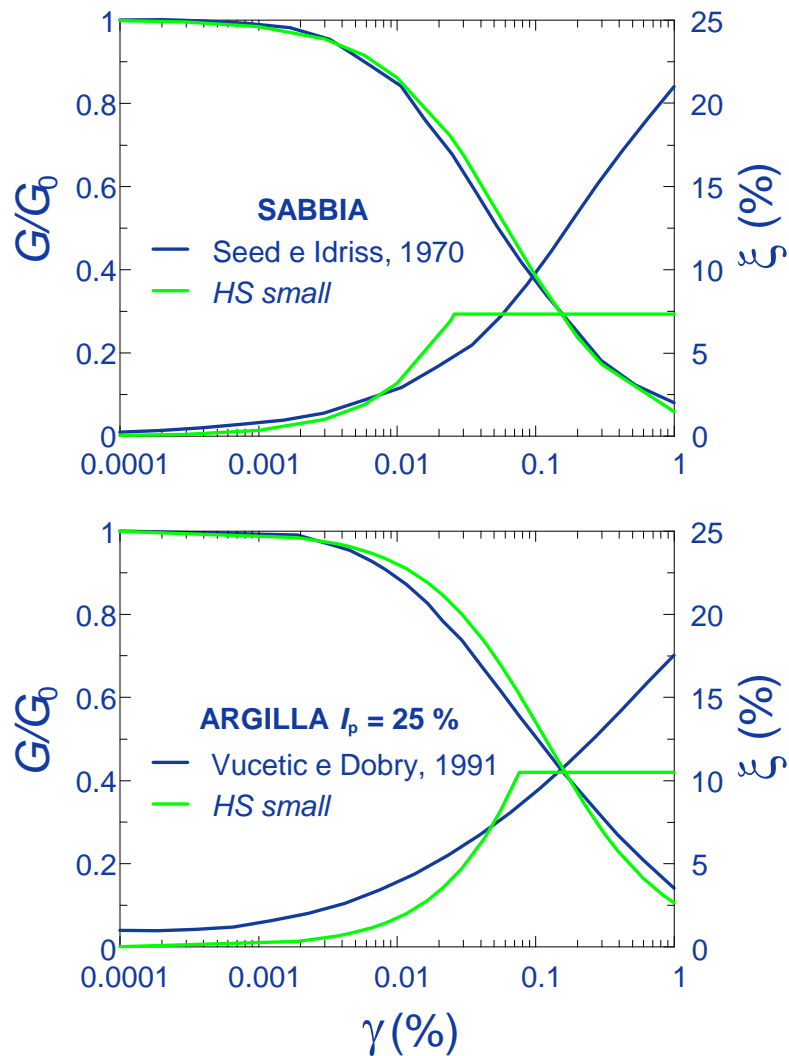
$$\gamma_{cut-off} = \frac{\gamma_{0.7}}{0.385} \left(\sqrt{\frac{G_0^{ref}}{G_{ur}^{ref}}} - 1 \right)$$



Gaudio e Rampello (2019)

determinazione parametri costitutivi *HSsmall*

calibrazione $\gamma_{0.7}$ e G_{ur}^{ref} – curve di letteratura

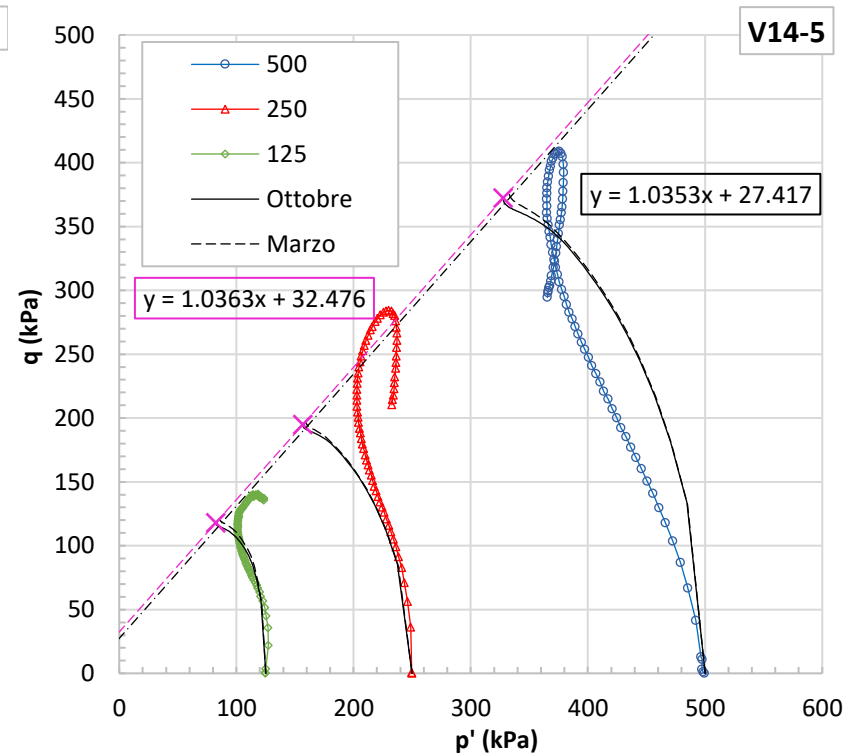
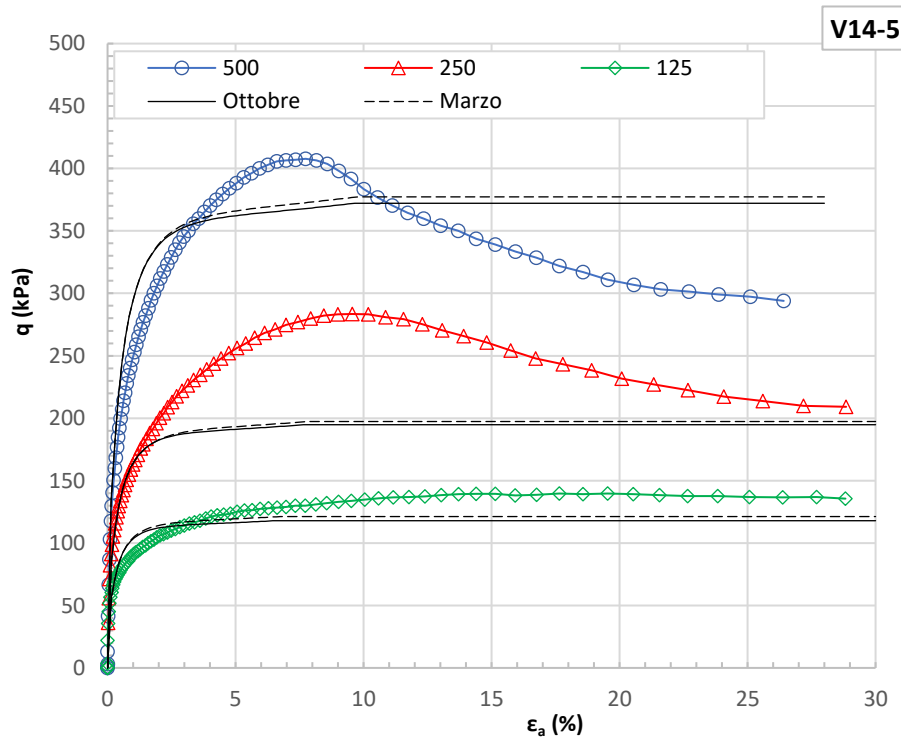


Gaudio e Rampello (2019)



5. limiti HSsmall

a. impossibilità di riprodurre incrudimento negativo (no post-liquefazione)

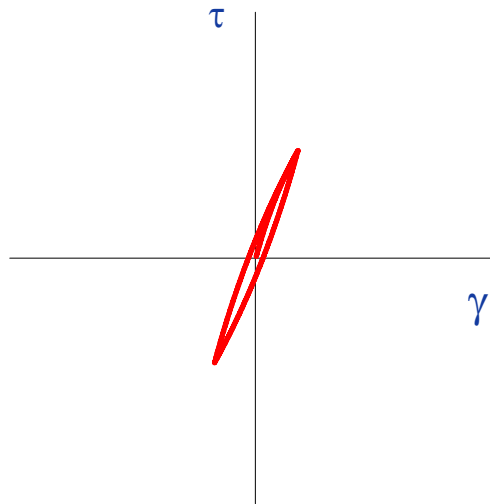


Lavagnini (2022)



limiti *HSsmall*

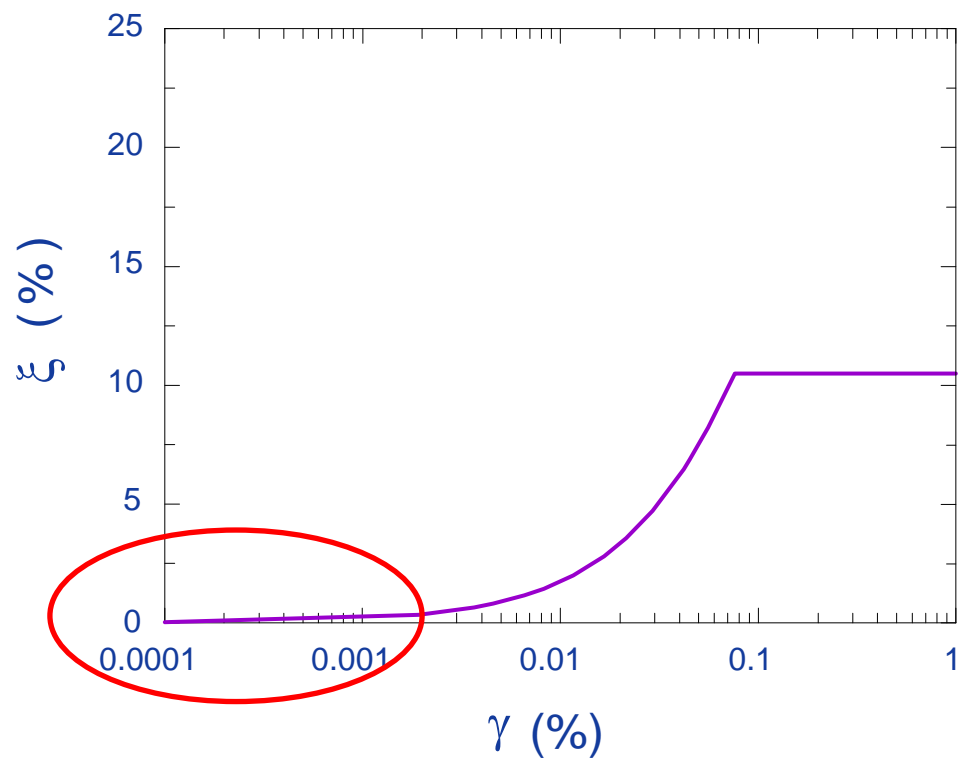
b. dissipazione di energia in campo elastico





limiti HS_{small}

c. no smorzamento alle piccole deformazioni



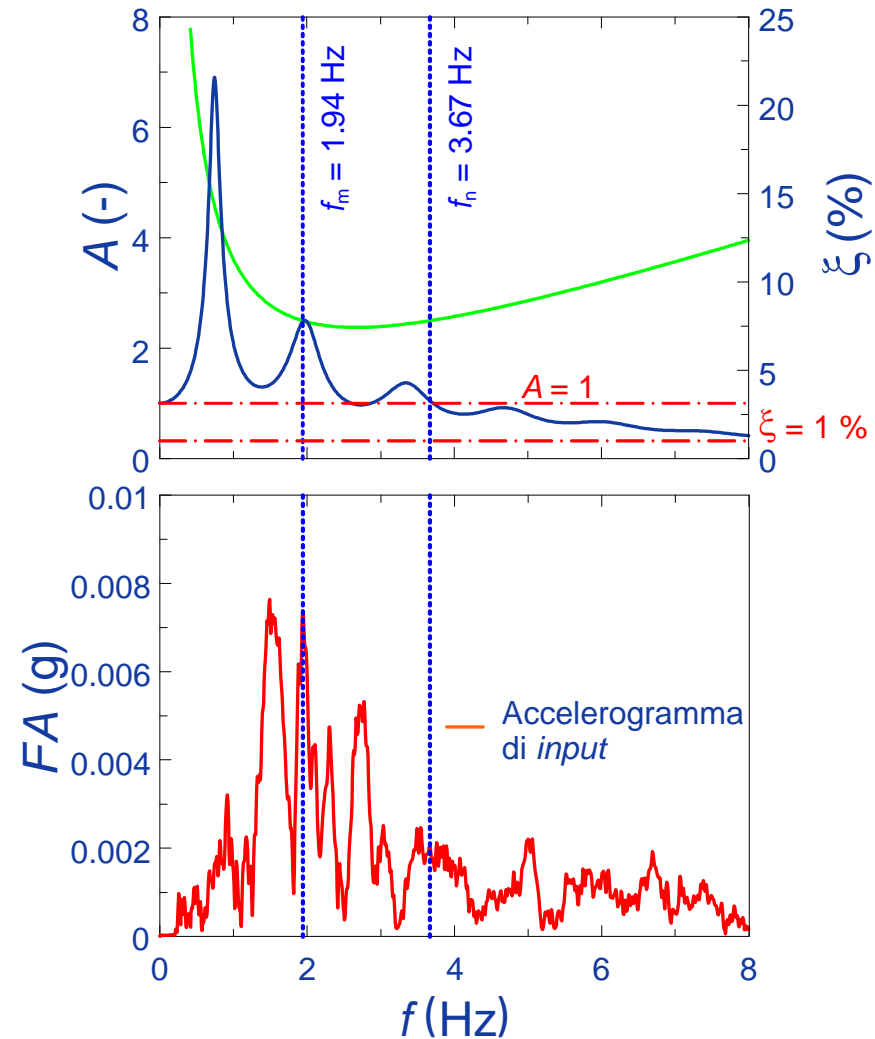


c. no smorzamento alle piccole deformazioni

smorzamento viscoso alla Rayleigh

$$[C] = \alpha_R [M] + \beta_R [K]$$

$$\begin{Bmatrix} \alpha_R \\ \beta_R \end{Bmatrix} = \frac{2\xi}{\omega_m + \omega_n} \begin{Bmatrix} \omega_m \omega_n \\ 1 \end{Bmatrix}$$



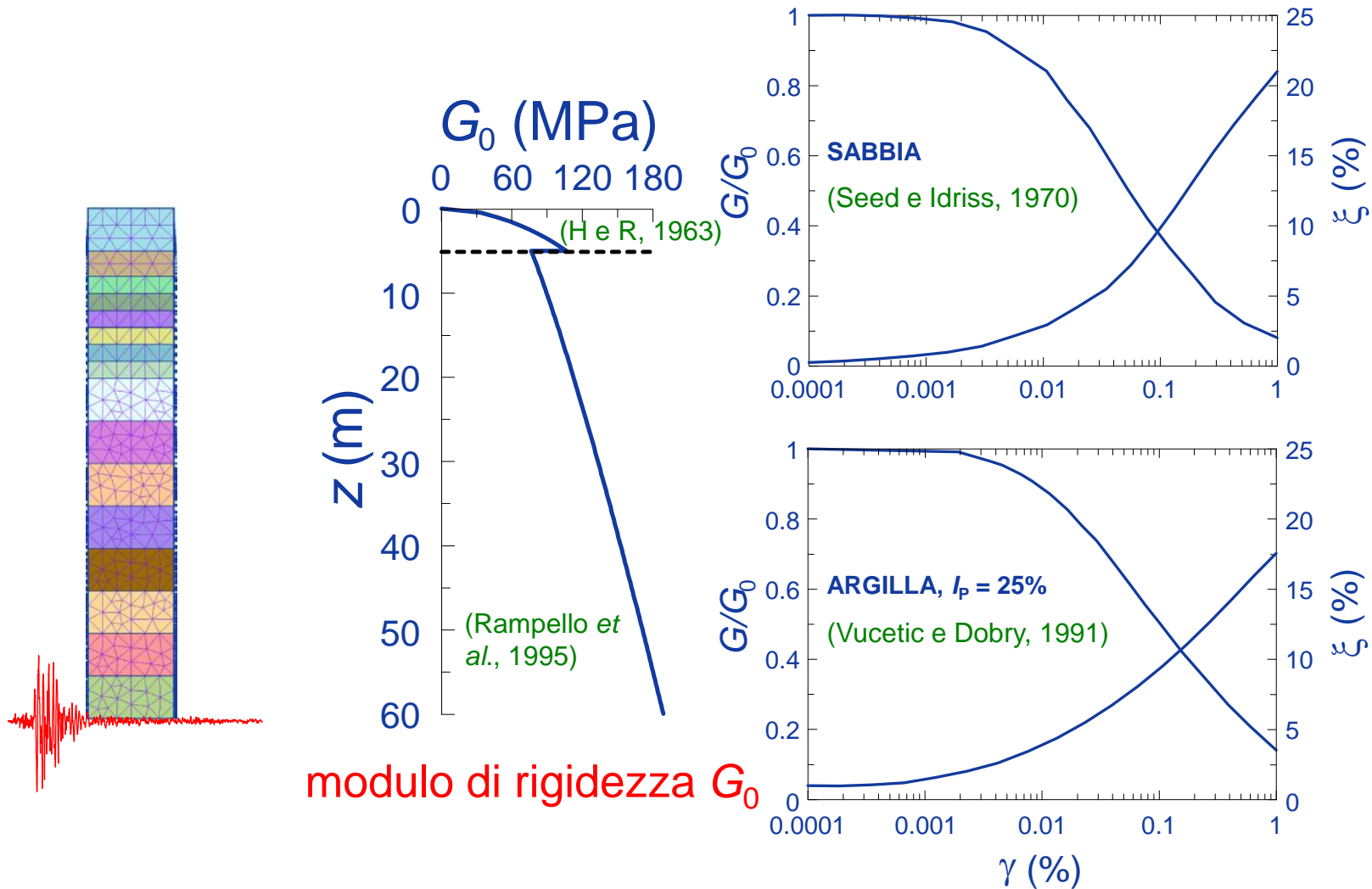
Amorosi *et al.* (2010)



6. applicazione a una colonna 1D

applicazione al caso di una colonna 1D ($H = 60$ m)

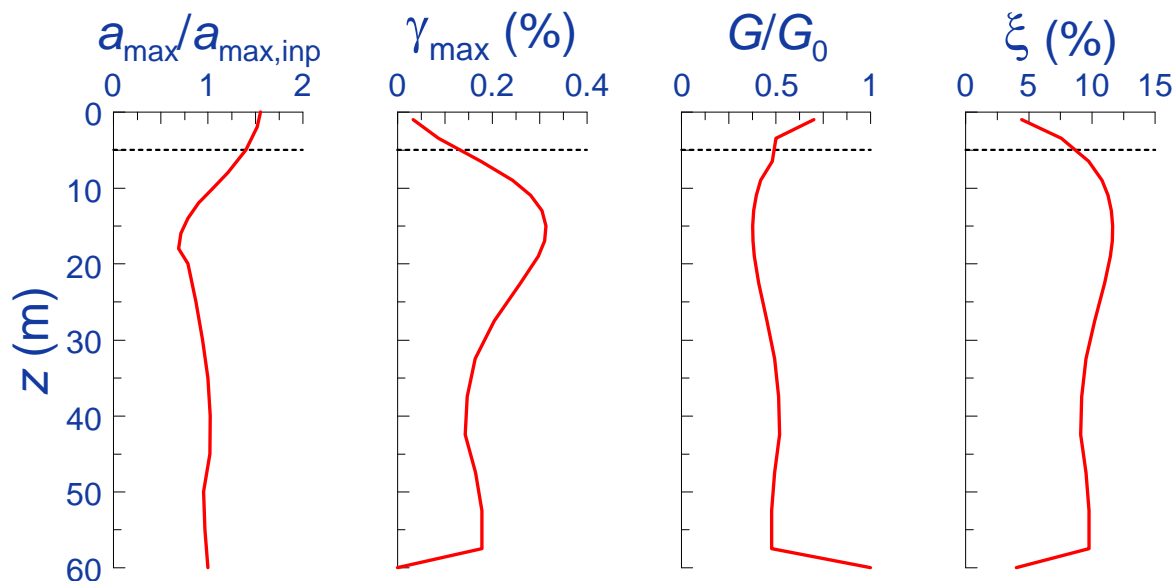
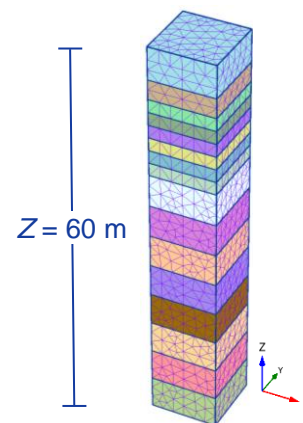
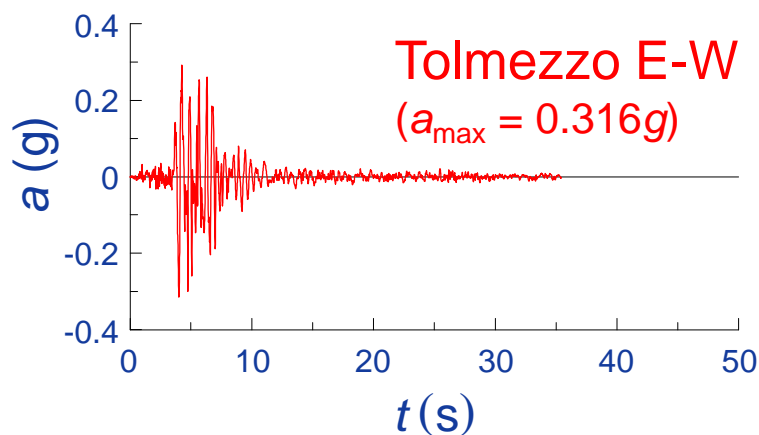
curve di decadimento e smorzamento





applicazione al caso di una colonna 1D ($H = 60$ m)

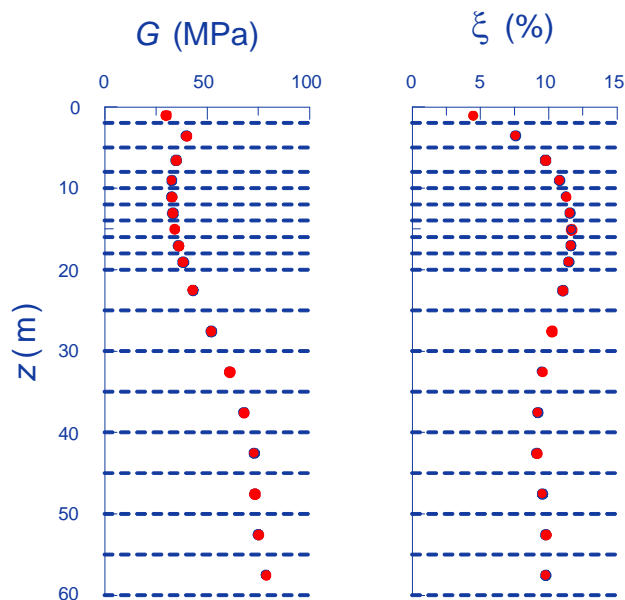
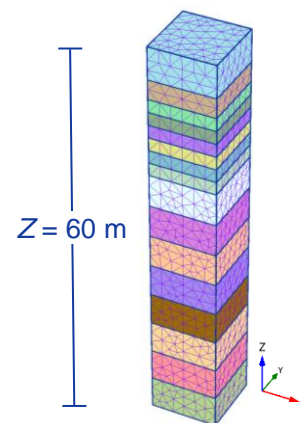
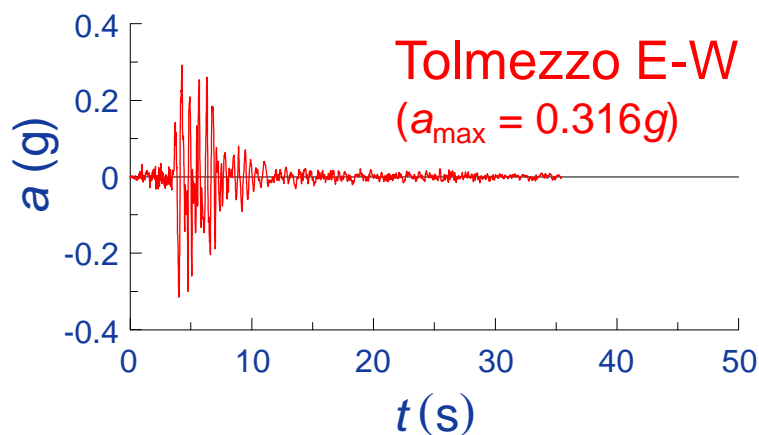
analisi visco-elastica non lineare (EERA; Bardet *et al.*, 2000)





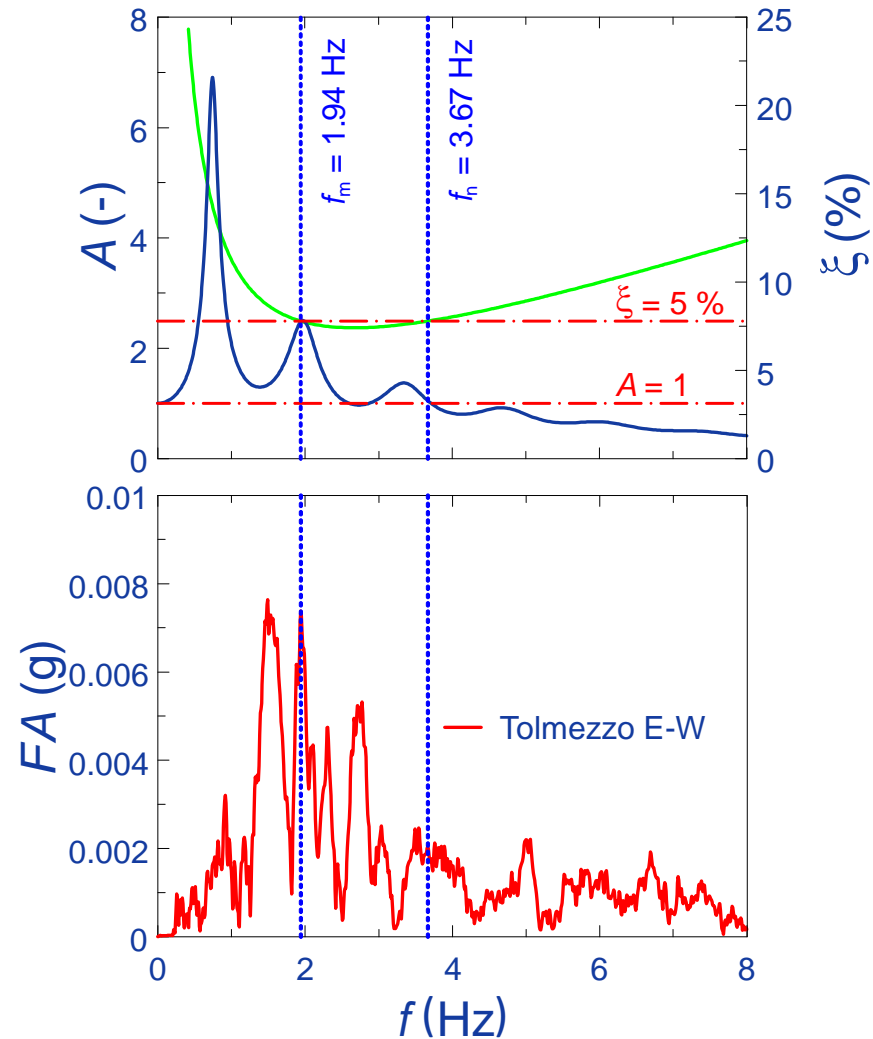
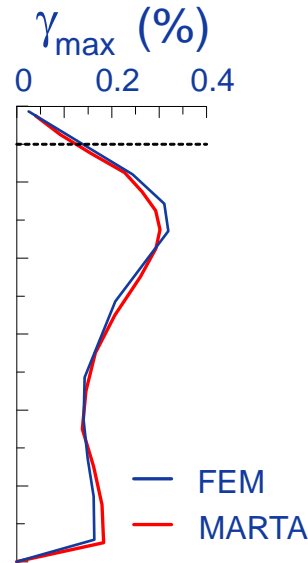
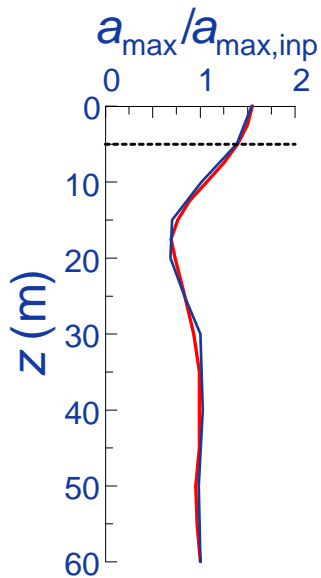
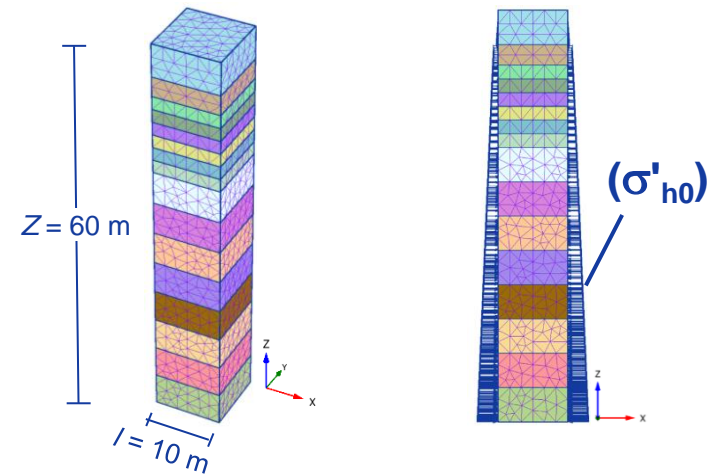
applicazione al caso di una colonna 1D ($H = 60$ m)

analisi visco-elastica non lineare (EERA; Bardet *et al.*, 2000)



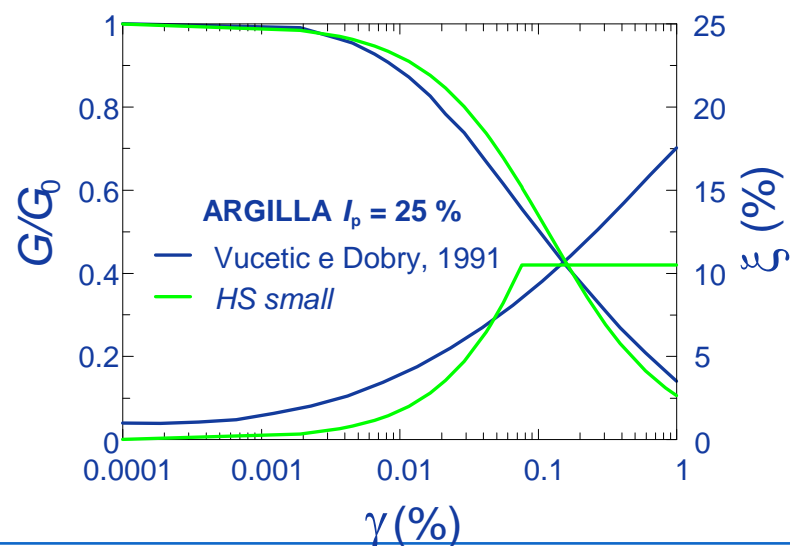
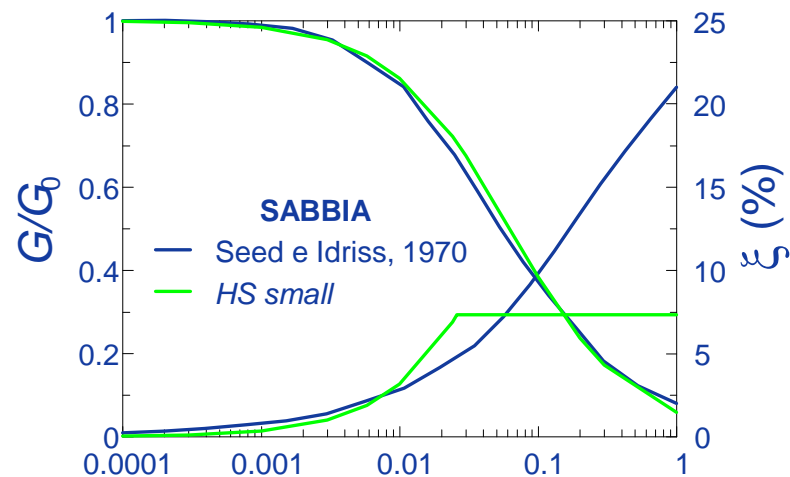
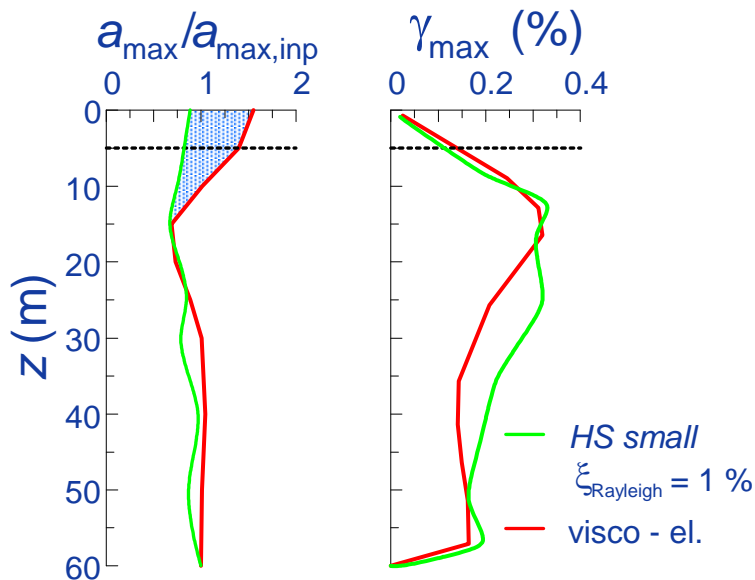
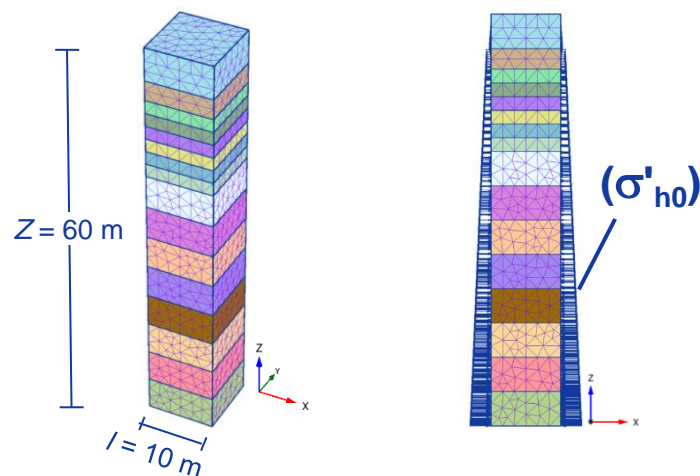
applicazione al caso di una colonna 1D ($H = 60$ m)

analisi visco-elastica lineare (Plaxis)



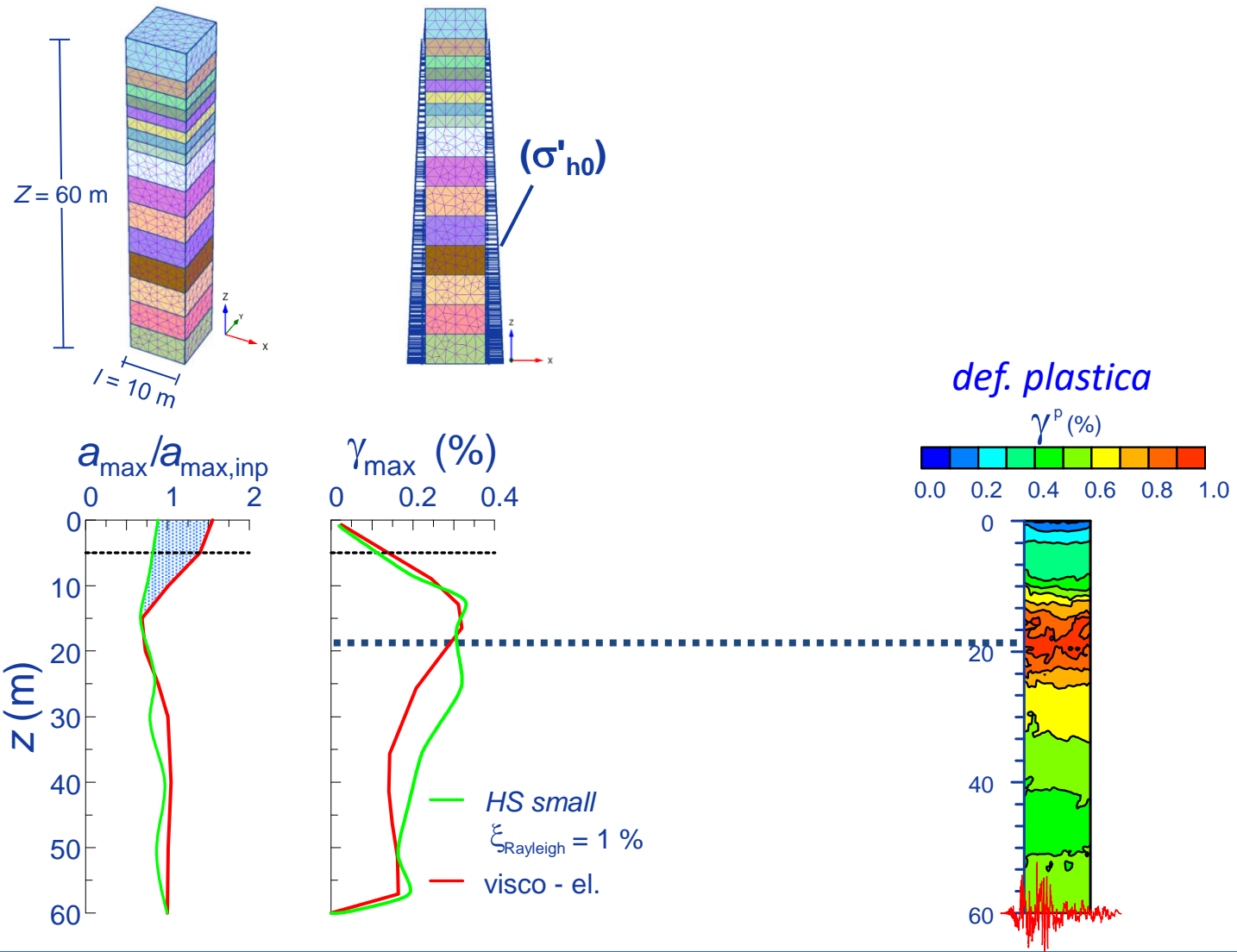
applicazione al caso di una colonna 1D ($H = 60$ m)

analisi elasto-plastica non lineare (Plaxis)



applicazione al caso di una colonna 1D ($H = 60$ m)

analisi elasto-plastica non lineare (Plaxis)





7. sintesi e conclusioni

sintesi e conclusioni

- comportamento dei terreni a piccole deformazioni per $\gamma \leq 10^{-4}$
- i parametri meccanici G_0 , $G/G_0(\gamma)$ e $\xi(\gamma)$ possono essere determinati da prove *in situ*, prove di laboratorio e relazioni empiriche/abachi
- modello costitutivo *HS small* tiene conto di alcuni aspetti della risposta a piccole deformazioni
- determinazione parametri costitutivi da sito/laboratorio, relazz. empiriche
- limiti del modello: no *softening*, dissipazione in campo elastico, $\xi(\gamma = 10^{-6}) \approx 0$
- applicazione a colonna 1D: comportamento a $\gamma > 10^{-3}$ influisce con $a_{\max} = 0.3g$

- Amorosi A, Boldini D e Elia G (2010). Parametric study on seismic ground response by finite element modelling. *Computer and Geotechnics*, **37**, 515-528.
- Atkinson J e Sallfors G (1991). Experimental determination of soil properties (stress-strain-time). In *Proc. 10th Eur. Conf: Soil Mech.*, Florence, **3**, 915.
- Bardet JP, Ichii K e Lin CH (2000). *EERA, A computer program for Equivalent linear Earthquake site Response Analysis of layered soils deposits*. University of Southern California, Los Angeles.
- Benz T, Vermeer, PA, Schwab R (2009). A small-strain overlay model. *Int J Num An Meth Geomech* **33** (1): 25-44.
- Gaudio D, Rampello S (2019). The influence of soil plasticity on the seismic performance of bridge piers on caisson foundations. *Soil Dyn Earthq Eng* **118**: 120-33. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.12.007
- GECO-DMC (2023). *Carotaggi sismici Down-Hole e Cross-Hole (P, SV, SH)*. <https://www.geco-dmc.com/it/seismic-down-hole-and-cross-hole-p-svsh-waves/>
- Hardin BO e Richart FE (1963). Elastic wave velocities in granular soils. *Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, **89**, 33-65.
- Kramer SL (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Engle Wood Cliffs: Prentice Hall.
- Lavagnini F (2022). Determinazione delle proprietà Meccaniche di plate equivalenti a paratie di sostegno in scavi profondi. *Tesi di Laurea Magistrale*, A.A. 21-22, Sapienza Università di Roma.
- Lanzo G (2012). *Caratterizzazione Geotecnica dei terreni sotto azioni dinamiche con prove in sito e laboratorio*. GeoFluid Drilling & Foundations, AGI, Roma.
- Rampello S, Viggiani GMB e Silvestri F (1995). Panelist discussion: The dependence of G₀ on stress state and history in cohesive soils. In: *I International Symposium on Pre-Failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Sapporo, Balkema, 2, 1155-1160.
- Seed HB e Idriss IM (1970). *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*. Report No. EERC 70-10, Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, California.
- Vj Tech (2023). *Bender element testing – an introduction*. <https://www.vjtech.co.uk/blog/introduction-to-bender-element-testing>
- Vucetic M e Dobry R (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, **117** (1), 89-107.



L'uso di legami elasto-plastici incrudenti nelle analisi di sistemi geotecnici

***Il ruolo del comportamento dei terreni a piccole deformazioni
nelle applicazioni sismiche***

Ing. Domenico Gaudio

***Ricercatore in Ingegneria Geotecnica, Dipartimento di Ingegneria
Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma***



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

***Vicepresidente Commissione Geotecnica - Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Roma***



Ing. Domenico Gaudio
domenico.gaudio@uniroma1.it

