L’uso di legami costitutivi elasto-plastici incrudenti nell’analisi di sistemi geotecnici

Modelli non lineari per
Analisi di Risposta Sismica Locale

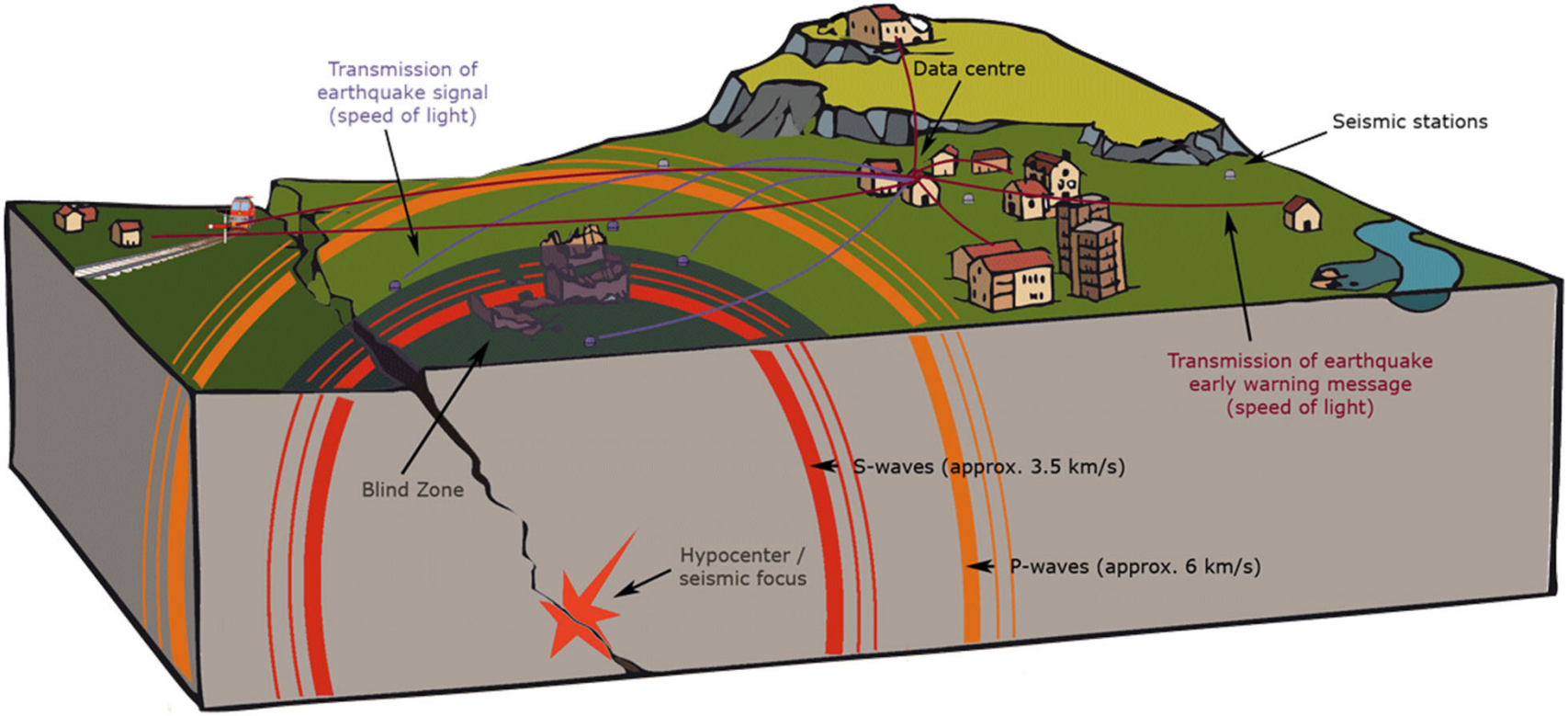
Prof. Ing. Riccardo Conti
Professore Associato, Università degli Studi di Roma Tor Vergata
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Roma, 26 settembre 2023

Indice

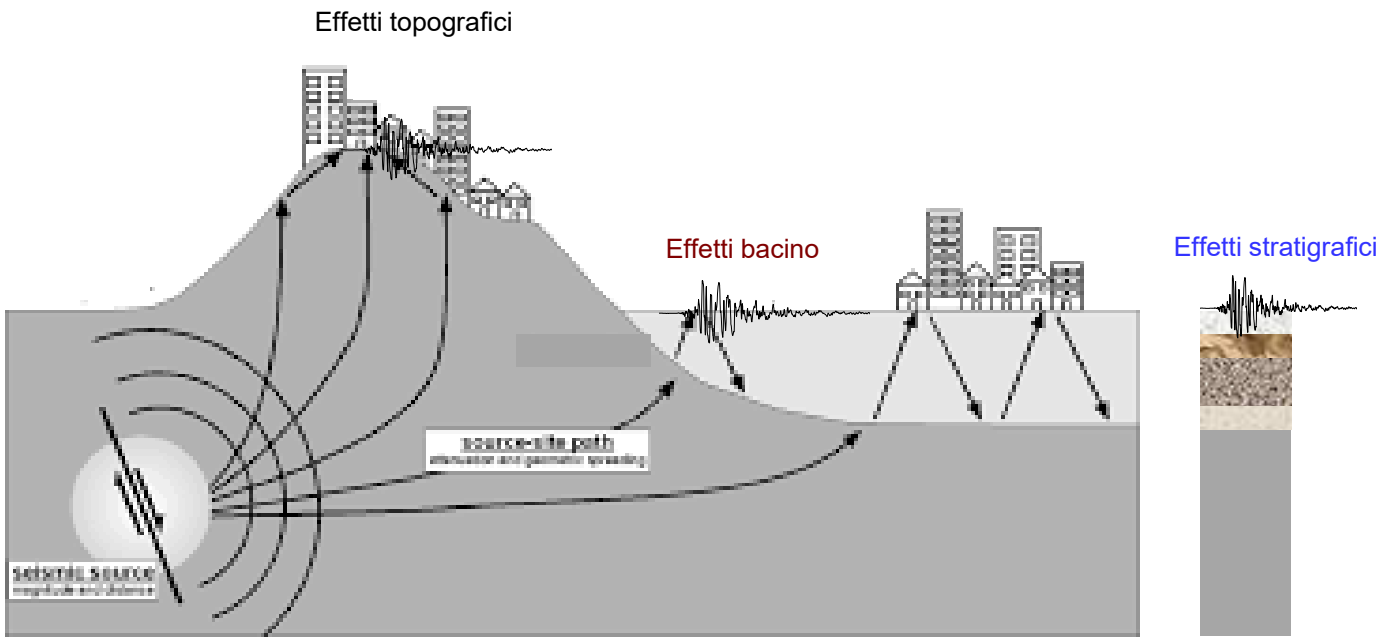
1. Concetti introduttivi
   - Introduzione
   - Caso studio di Città del Messico
   - Ipotesi semplificative
2. Comportamento meccanico dei terreni
   - Comportamento del terreno sotto azioni cicliche
   - Effetti della non linearità
3. Modelli costitutivi nonlineari
   - Modelli iperbolici
   - Regole di Masing
4. Esempi applicativi
   - Napoli Est
   - Viadotto stradale Centro Italia
5. Conclusioni

Risposta Sismica Locale



Ipocentro/Epicentro
Onde di volume (P, S)
Onde di superficie (R, L)

Risposta Sismica Locale



Effetti topografici
Effetti bacino
Effetti stratigrafici

Risposta Sismica Locale

Analisi della RSL: studio delle modifiche che il moto sismico subisce (in termini di ampiezza, contenuto in frequenza, durata) per effetto delle condizioni locali

Fattori rilevanti:

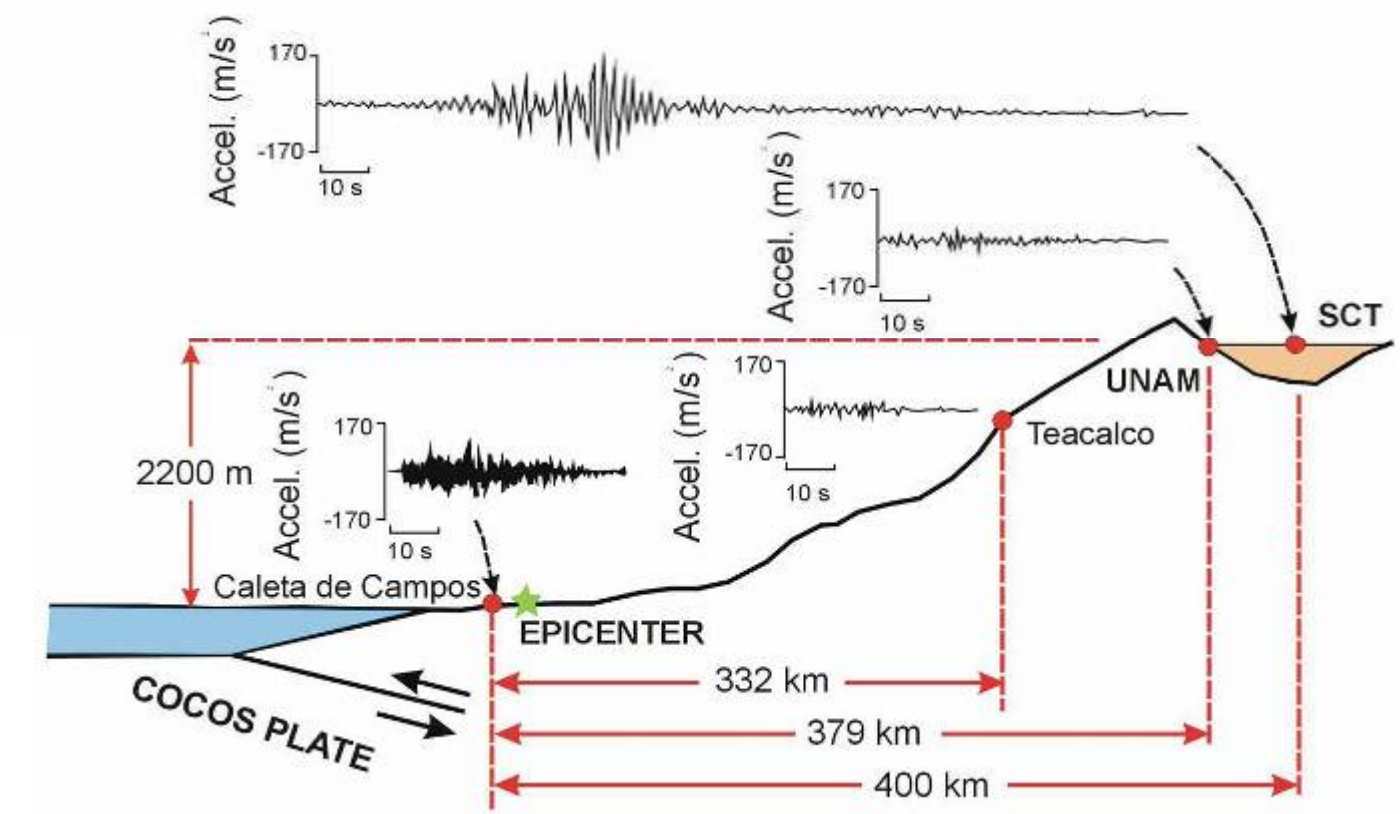
- Geometria/stratigrafia del deposito
- Rigidezza
  amplificazioni
- Smorzamento
  dissipazione di energia

} Proprietà del sistema

- Contenuto in frequenza
  risonanza
- Intensità
  nonlinearità

} Proprietà dell'input sismico

Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)



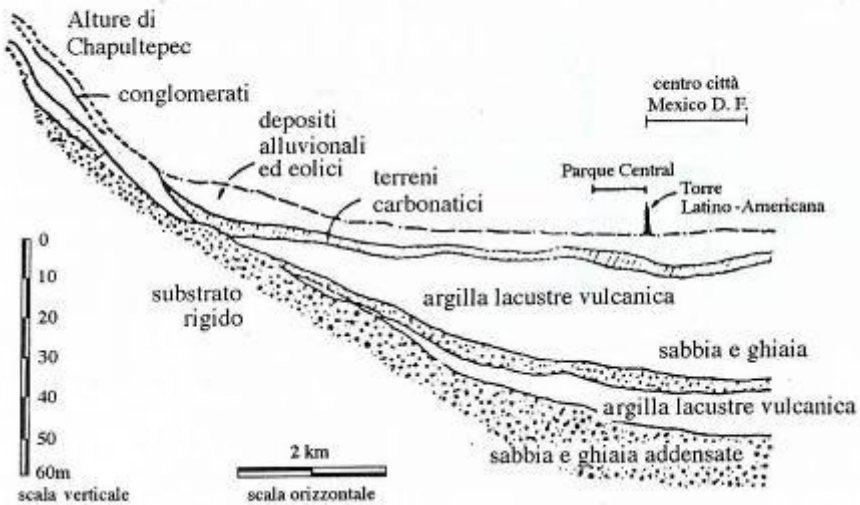
- terremoto di elevata intensità (M=8.1)
- notevole distanza epicentrale (quasi 400 km)
- accelerazioni registrate su affioramento rigido… ridotte (UNAM, a_{max}<0.1*g*)
- accelerazioni registrate su terreno deformabile… elevate (SCT: a_{max}=0.17*g*)

ATTENUAZIONE DELLE ONDE

AMPLIFICAZIONE LOCALE

Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)

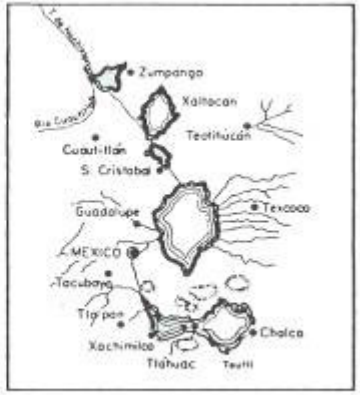
La città è fondata sul deposito di argilla molle e plastica (I_P=200%, V_S=75 m/s) che riempie la depressione dell'antico Lago Texcoco (dove sorgeva Tenochtitlan), a seguito della colmata iniziata dopo la conquista spagnola del XVI secolo.



Approximated limits during the diluvial age

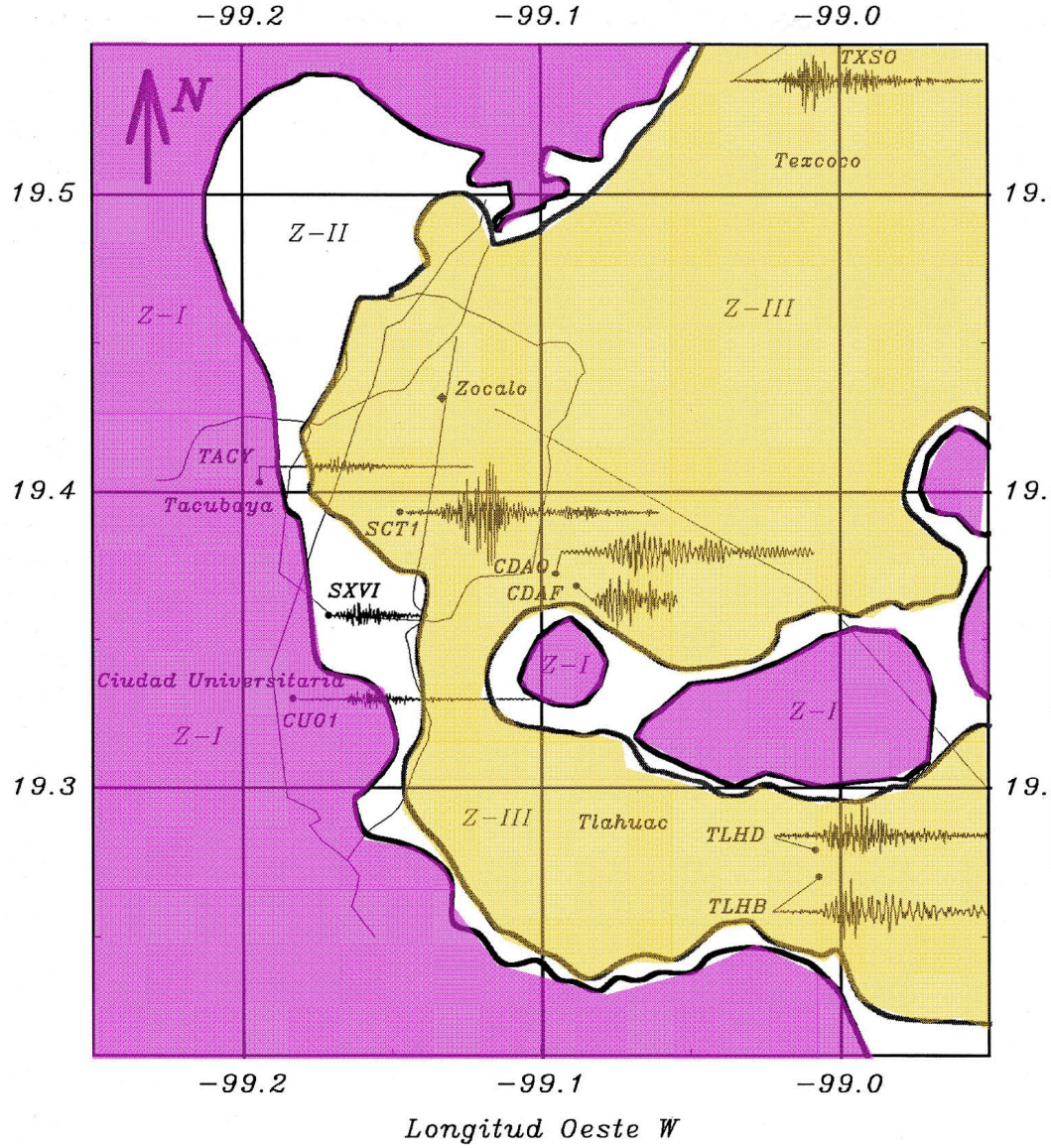
At the beginning of sixteenth century

At the beginning of the nineteenth century



In 1889

Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)



Suolo rigido ("lomas")

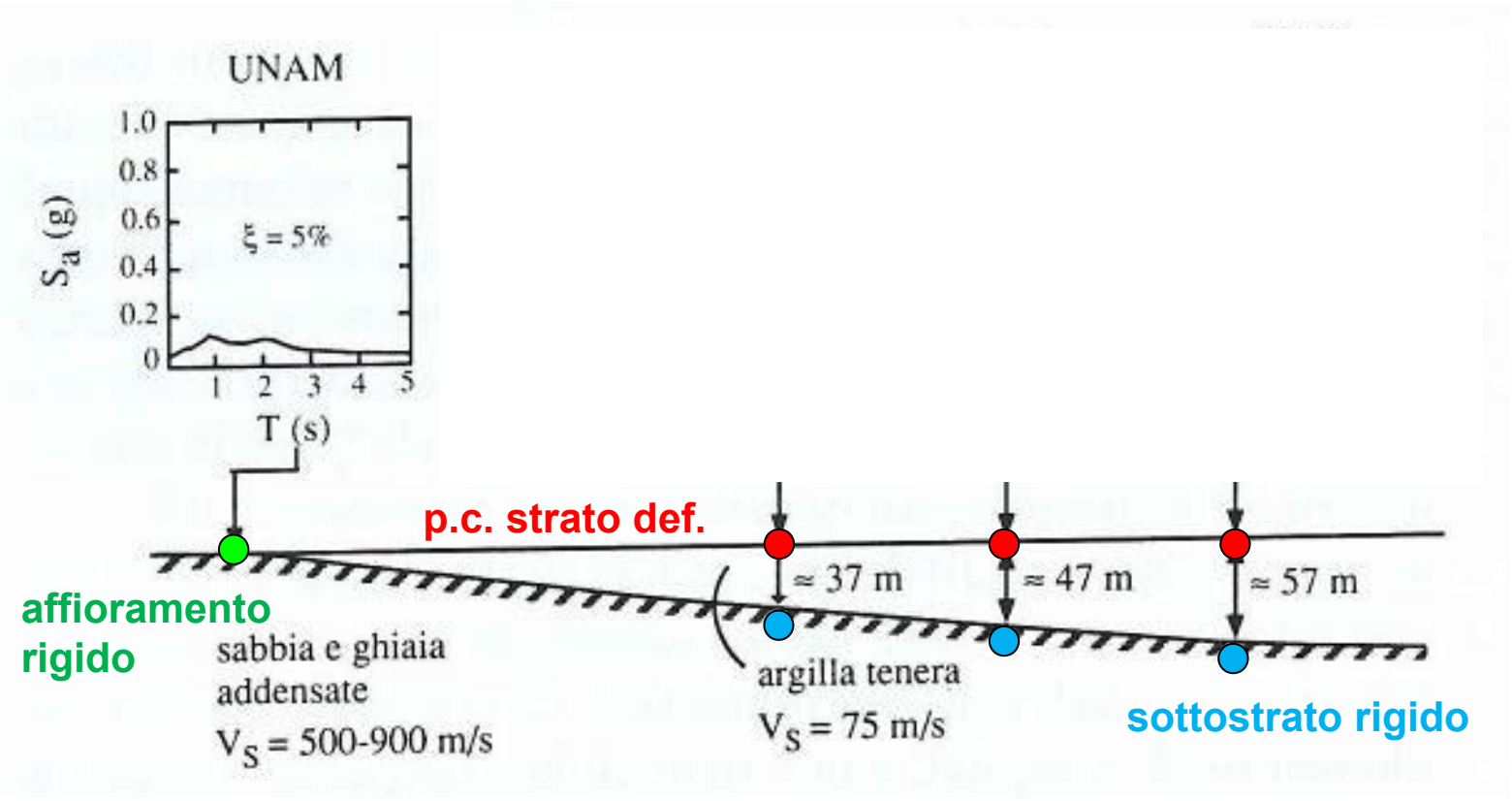
Zona di transizione

Argille (zona del "lago")

Faccioli e Paolucci (2005)

Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)

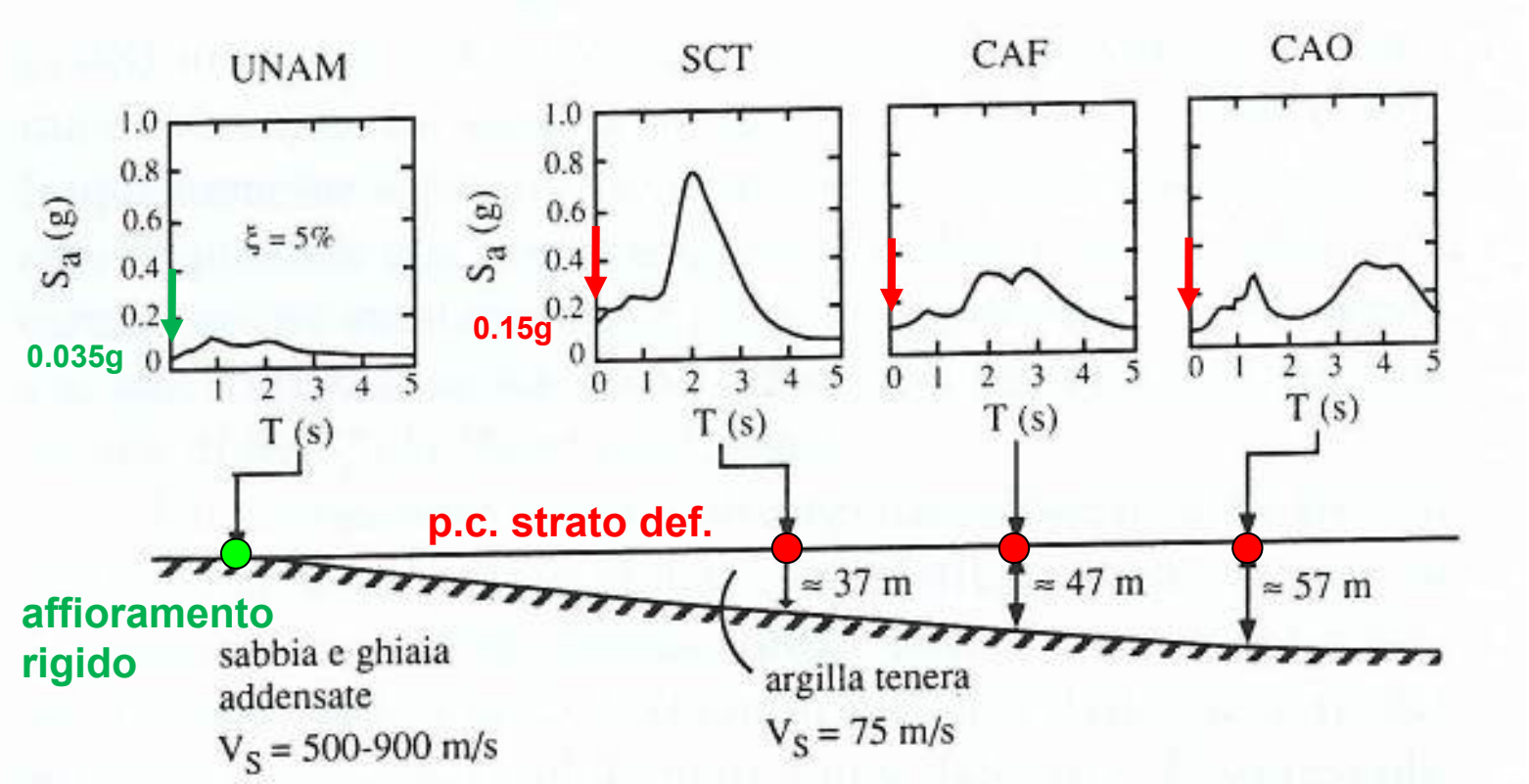
… dunque, cosa dicono le registrazioni accelerometriche:



Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)

… dunque, cosa dicono le registrazioni accelerometriche:

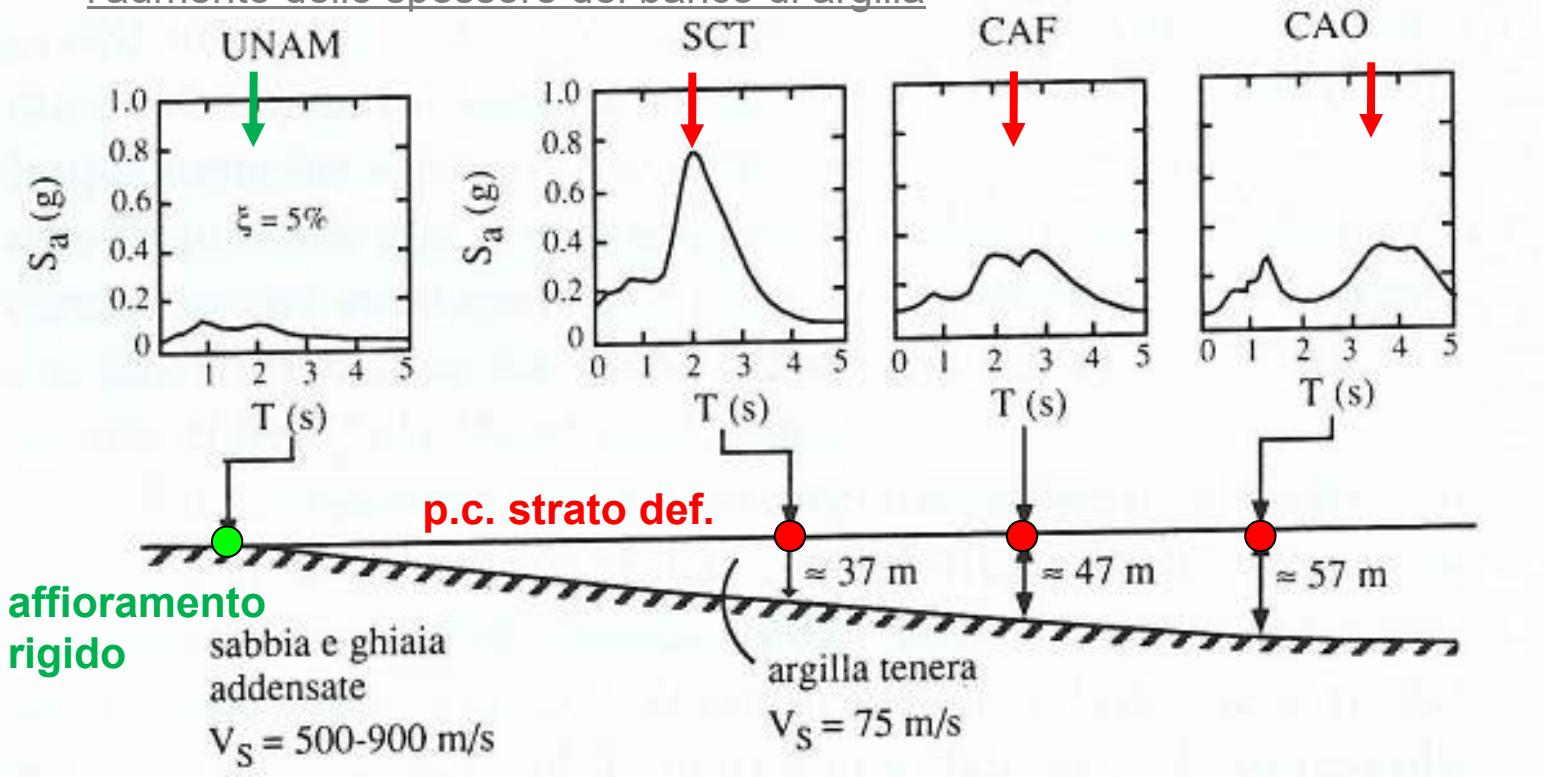
- amplificazione delle accelerazioni
  (rispetto ad affioramento rigido)



Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)

… dunque, cosa dicono le registrazioni accelerometriche:

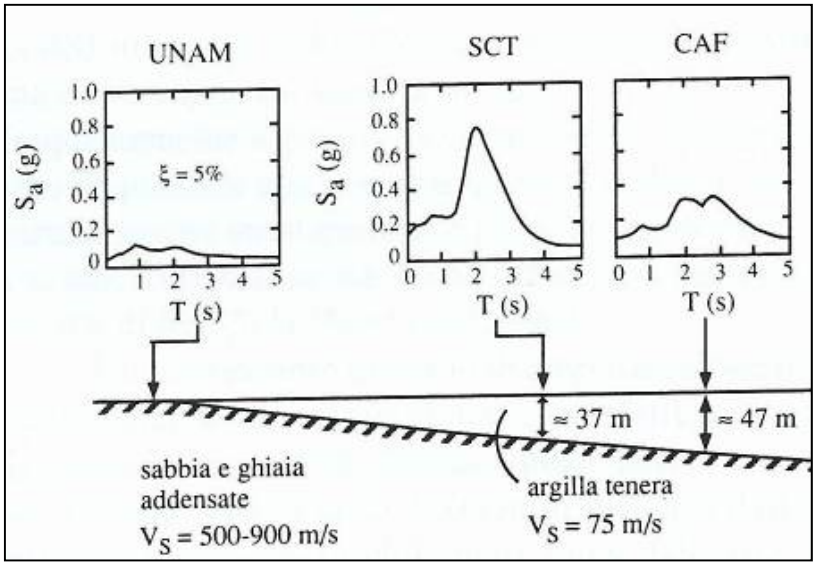
- amplificazione delle accelerazioni
  (rispetto ad affioramento rigido)
- variazione del contenuto in frequenza
  riduzione delle frequenze di risposta del sottosuolo (aumento dei periodi) con l'aumento dello spessore del banco di argilla

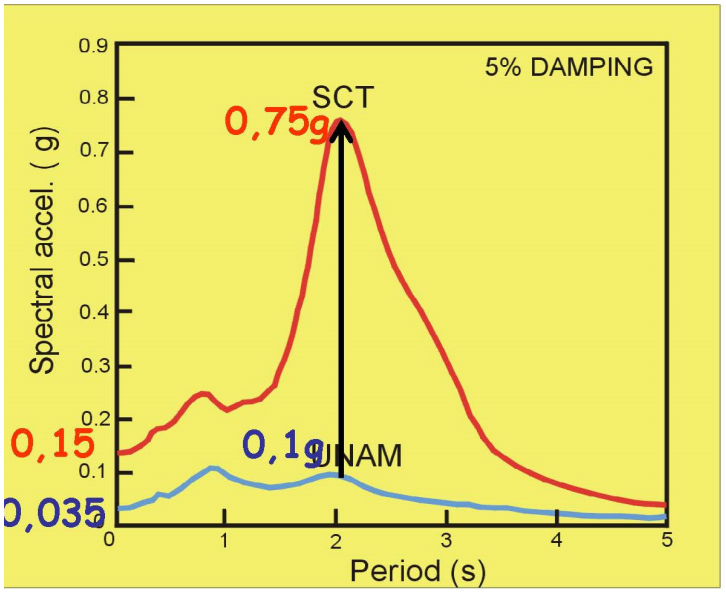


Terremoto di Città del Messico (19/09/1985)

… esattamente come per lo SDOF…

Quando un terremoto (con un certo contenuto in frequenza) ''arriva'' alla base di uno strato di terreno deformabile, questo tende ad amplificare le frequenze prossime alla sua frequenza fondamentale di vibrare (f_s)





Regola del pollice per il sottosuolo:

$$T_S = \frac{1}{f_S} = \frac{4H}{V_S}$$

H = spessore terreno deformabile

V_S = velocità onde di taglio S nel terreno

Fenomeni di risonanza

… ma, risonanza è probabile?

V_s(m/s) H(m)	50	100	200	400	800
5	2,5	5,0	10,0	20,0	40,0
10	1,25	2,5	5,0	10,0	20,0
20	0,62	1,25	2,5	5,0	10,0
50	0,25	0,5	1,0	2,5	4,0
100	-	0,25	0,5	1,0	2,0
200	-	-	0,25	0,5	1,0
500	-	-	-	0,25	0,4

$$T_0 = \frac{4H}{V_S}$$

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

Valori tipici della
frequenza fondamentale [Hz]

Risposta sismica locale

Ipotesi generalmente assunte nella modellazione:

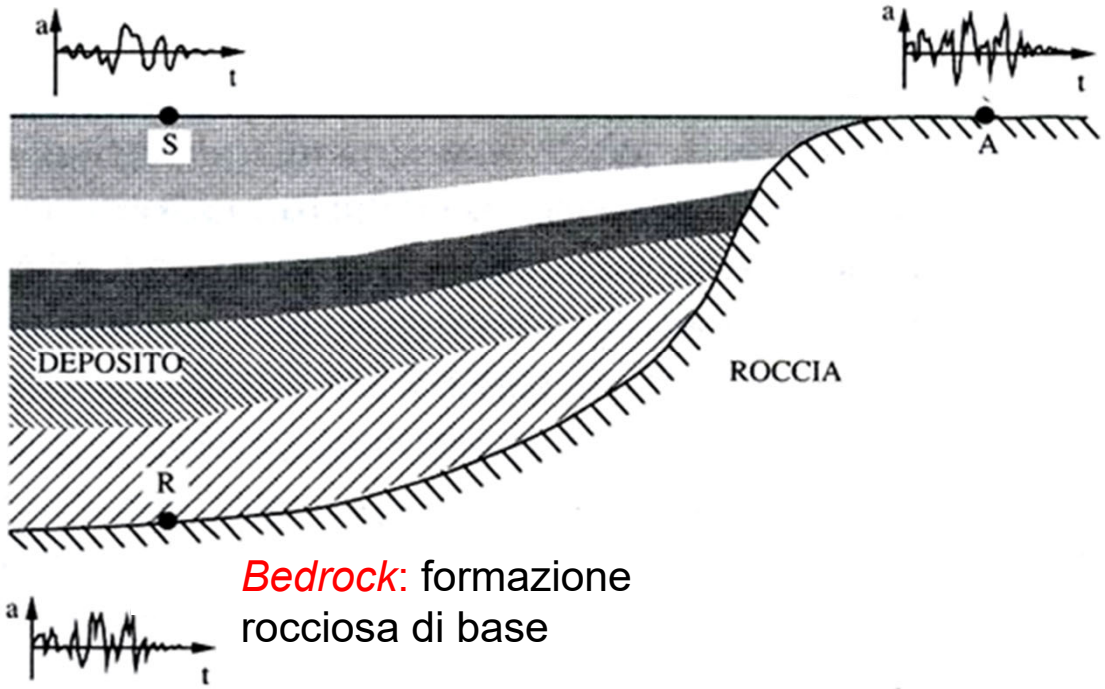
- moto sismico derivante principalmente dalla propagazione di onde di volume — onde di superficie trascurabili
- Stratificazioni e piano campagna orizzontali — Geometria 1D
- terreni naturali sotto falda
- azioni molto rapide nel tempo (CND) — deformazioni volumetriche (onde P) ≈ 0
- rifrazioni successive (strati sempre più deformabili verso la superficie) — onde S propagantisi in direzione ≈ verticale

Problema monodimensionale (1D)
Moto sismico orizzontale
Comportamento a taglio del terreno

Risposta sismica locale

Free-field: in superficie, al di sopra del deposito di terreno

Outcrop: affioramento in superficie della formazione rocciosa di base (*bedrock*)



Bedrock: formazione rocciosa di base

Moto sismico di riferimento (*bedrock/outcrop*)

Moto sismico in superficie, al di sopra del deposito di terreno, in assenza di manufatti (*free-field*)

Risposta sismica locale

Analisi 1D di colonna di terreno stratificato

- Campo di spostamento:

$$\underline{\boldsymbol{u}}(\underline{\boldsymbol{x}}, t) = u(z, t)$$

- Equazioni indefinite di equilibrio:

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

- Condizioni al contorno:
  - *z*=0 (superficie libera)
  - *z*=*H* (dipende da deformabilità *bedrock*)

- Equazione costitutiva:

$$\tau = f(\gamma)$$

Risposta sismica locale

Analisi 1D di colonna di terreno stratificato

Comportamento meccanico del terreno determina:

- Fenomeno fisico
  (amplificazioni, dissipazioni di energia, …)
- Scelta del modello costitutivo
  (elastico, nonlineare, avanzato, …)
- Metodo di risoluzione dell'equazione del moto
  (lineare, lineare-equivalente, nonlineare)

- Equazione costitutiva:

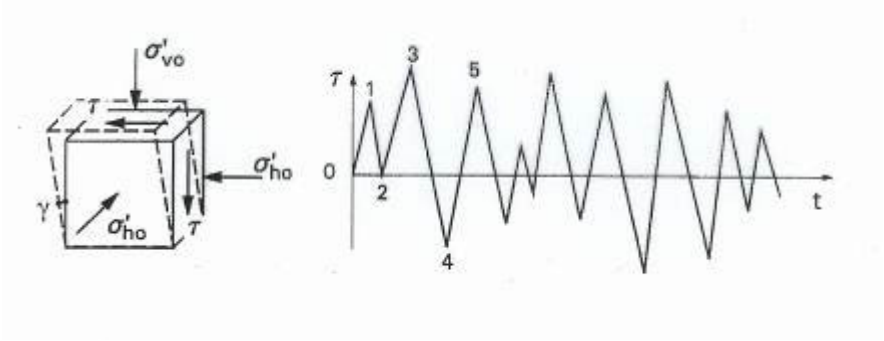
$$\tau = f(\gamma)$$

Indice

1. Concetti introduttivi
   - Definizioni
   - Caso studio di Città del Messico
   - Ipotesi semplificative
2. Comportamento meccanico dei terreni
   - Comportamento del terreno sotto azioni cicliche
   - Effetti della non linearità
3. Modelli costitutivi nonlineari
   - Modelli iperbolici
   - Regole di Masing
4. Esempi applicativi
   - Napoli Est
   - Viadotto stradale Centro Italia
5. Conclusioni

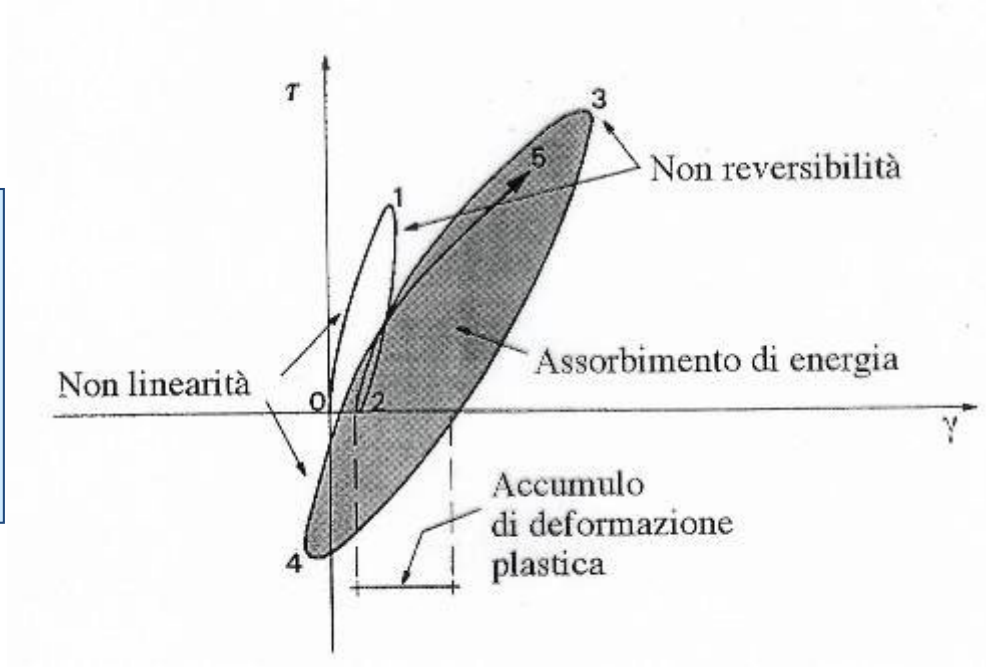
Comportamento meccanico dei terreni

… sotto azioni cicliche o dinamiche…



Comportamento osservato:

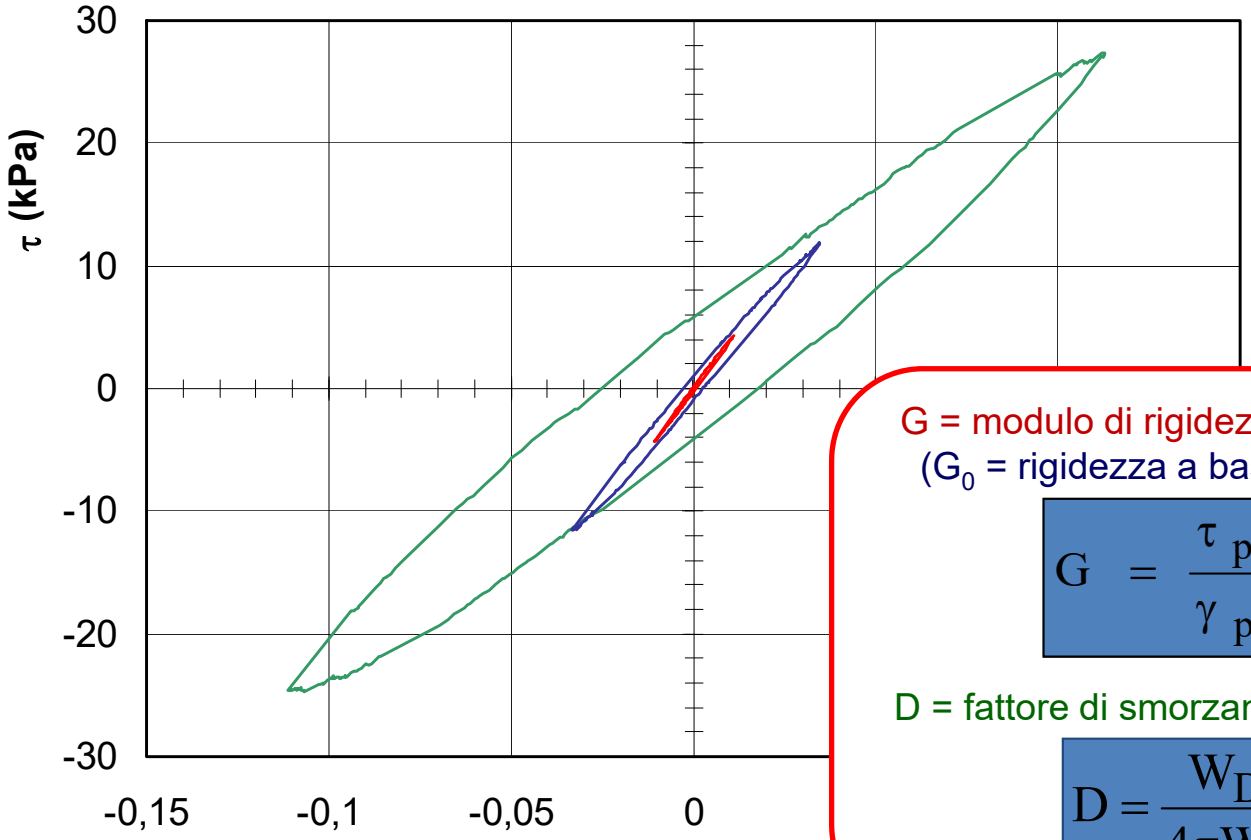
1. non linearità
   (rigidezza)
2. dissipazione di energia
   (smorzamento)
3. irreversibilità
   (resistenza)



Comportamento meccanico dei terreni

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

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



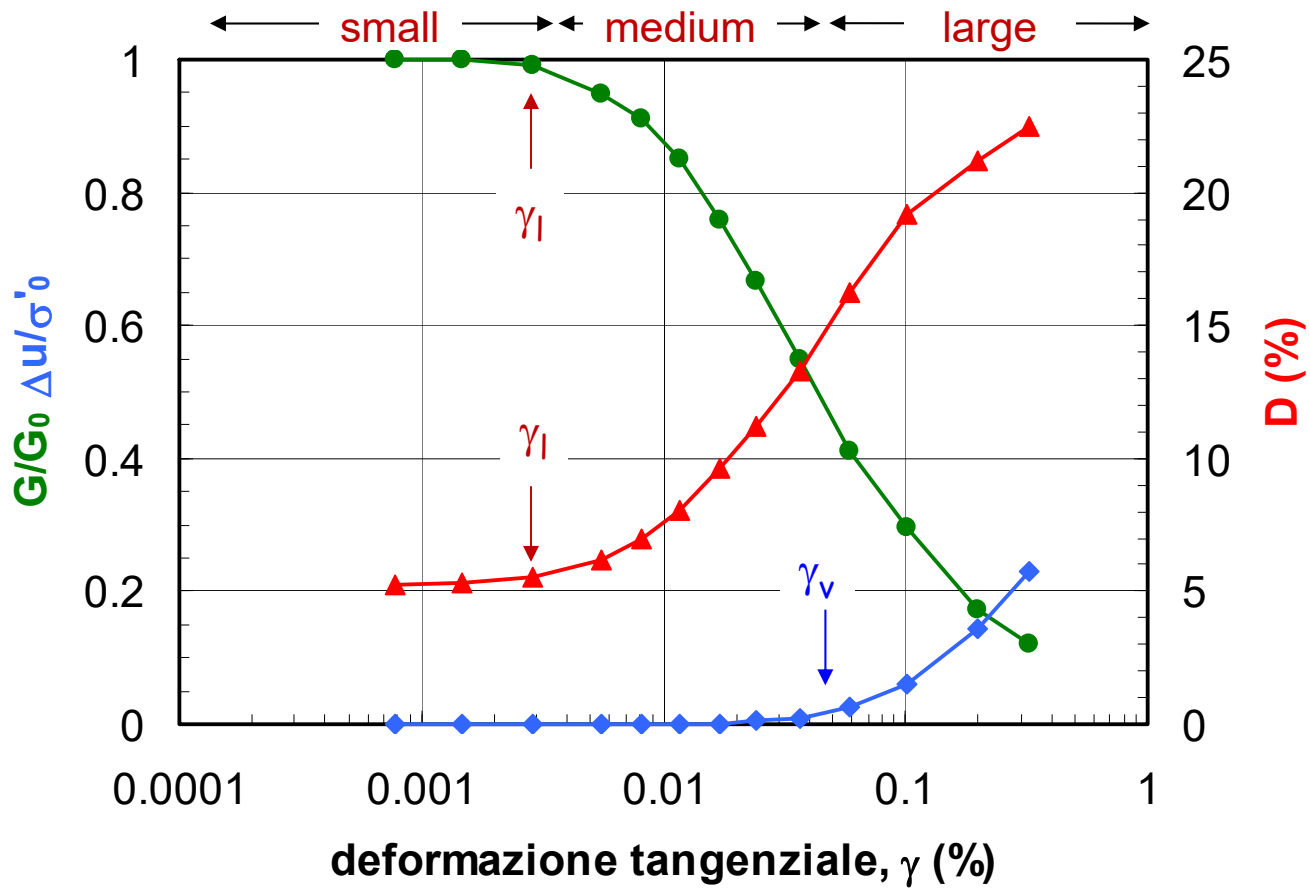
G = modulo di rigidezza a taglio secante
(G_0 = rigidezza a basse deformazioni)

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

D = fattore di smorzamento (*damping*)

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

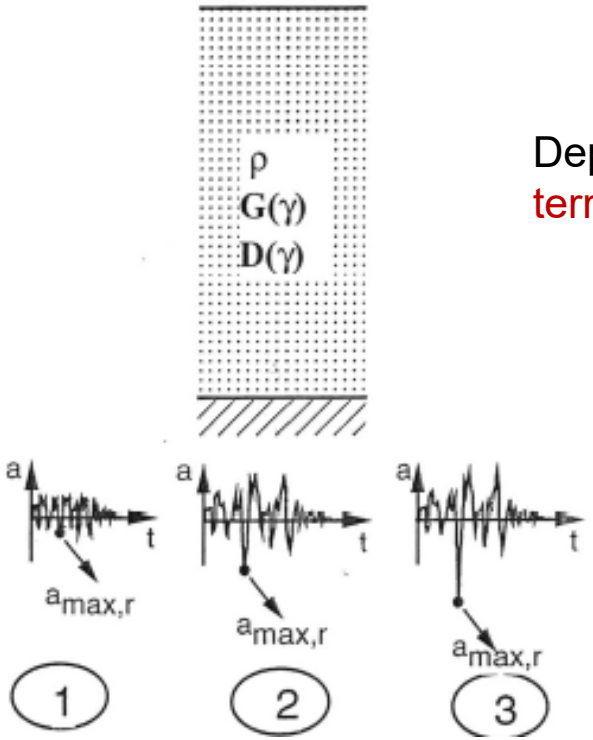
Comportamento meccanico dei terreni



All'aumentare di γ:
- la rigidezza G diminuisce
- lo smorzamento D aumenta
- sviluppo Du (accoppiamento vol.-dev.)

due livelli deformativi di 'soglia':
- una soglia di linearità, γ_l
- una soglia volumetrica, γ_v

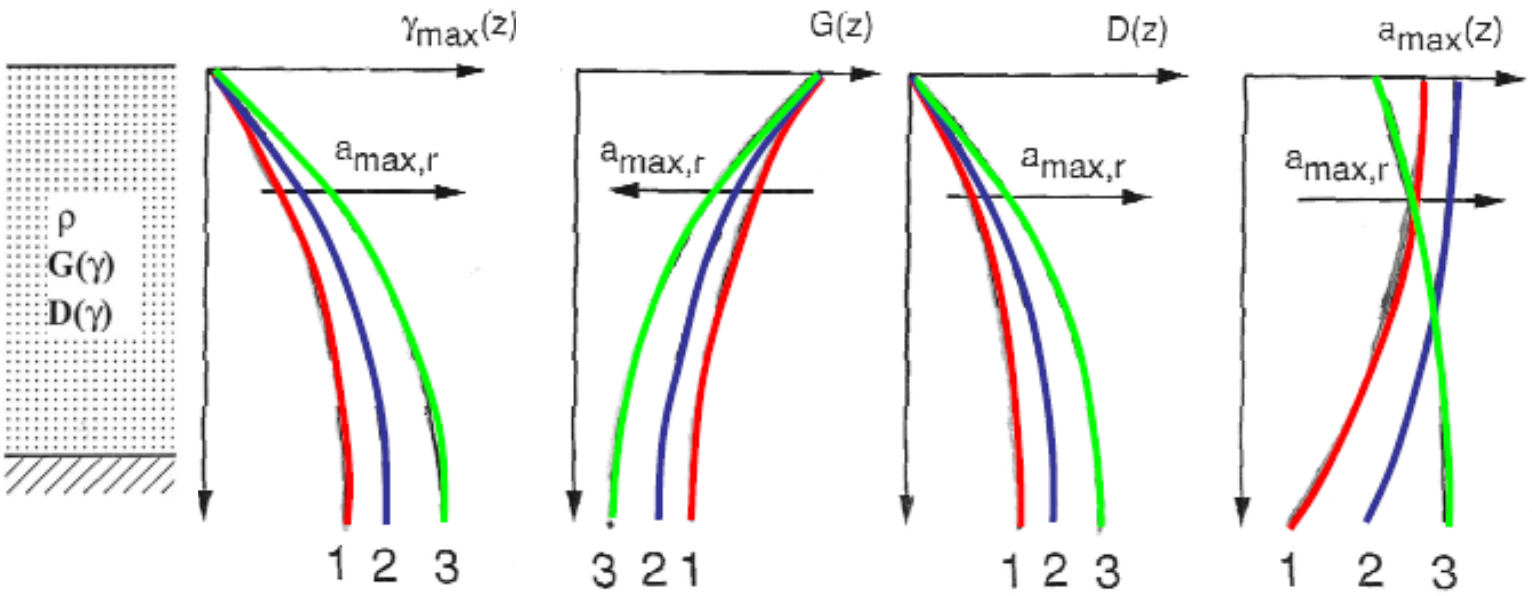
Effetti della non linearità



Deposito ideale di
terreno omogeneo

Cosa succede, quindi, se consideriamo un input sismico al bedrock caratterizzato da valori crescenti dell'accelerazione di picco $a_{max,r}$

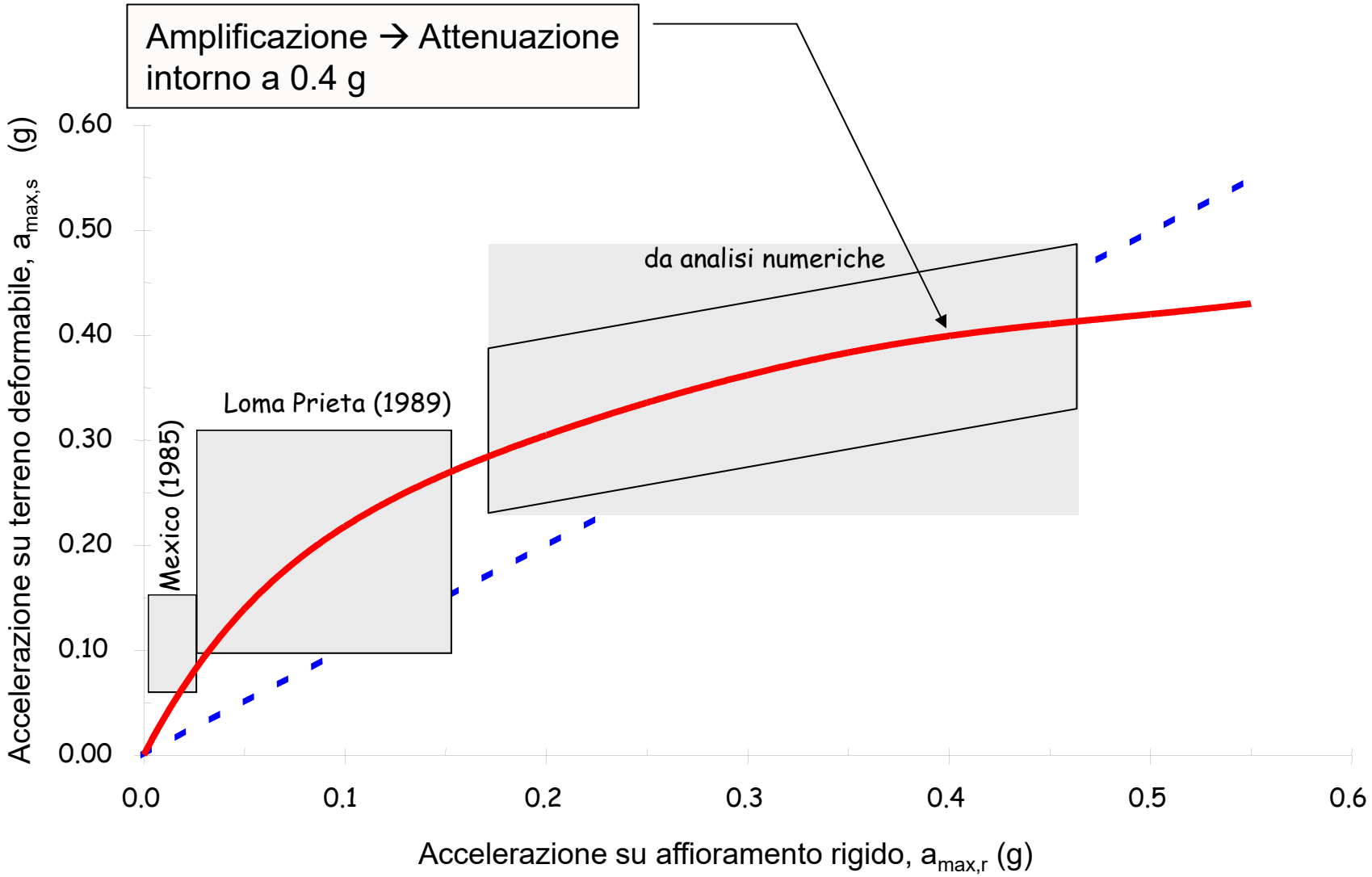
Effetti della non linearità



Al crescere dell'accelerazione su roccia $a_{max,r}$:

- aumentano le γ_{max} …
- … e conseguentemente si verifica una riduzione di G e un aumento di D
- per bassi livelli di energia (curve 1 e 2) l'accelerazione aumenta dal basamento alla superficie
- per elevati livelli di energia (curva 3) l'accelerazione può invece diminuire lungo il profilo

Effetti della non linearità

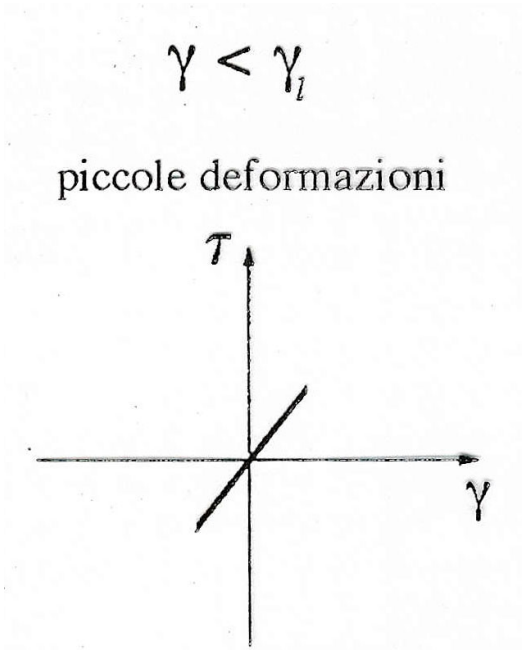


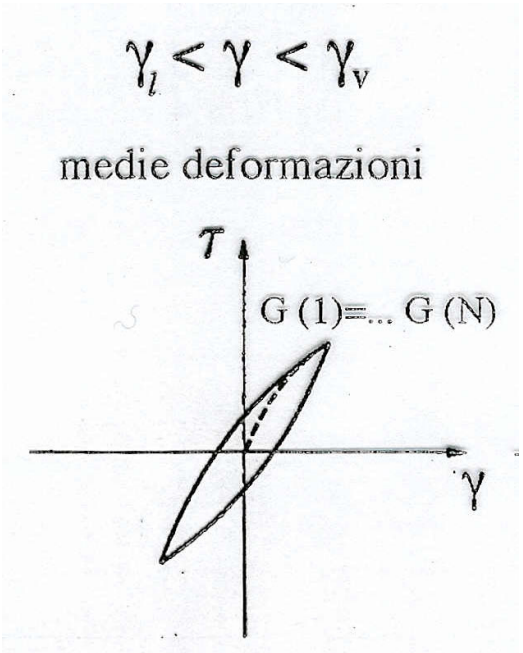
(Idriss, 1990)

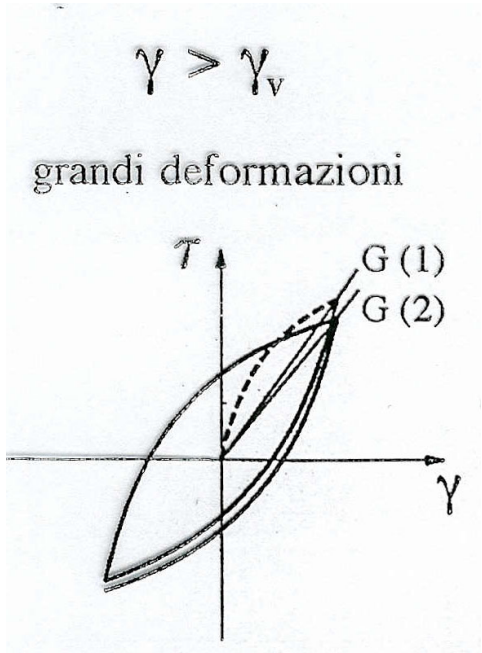
Indice

1. Concetti introduttivi
   - Definizioni
   - Caso studio di Città del Messico
   - Ipotesi semplificative
2. Comportamento meccanico dei terreni
   - Comportamento del terreno sotto azioni cicliche
   - Effetti della non linearità
3. Modelli costitutivi nonlineari
   - Modelli iperbolici
   - Regole di Masing
4. Esempi applicativi
   - Napoli Est
   - Viadotto stradale Centro Italia
5. Conclusioni

Modelli costitutivi





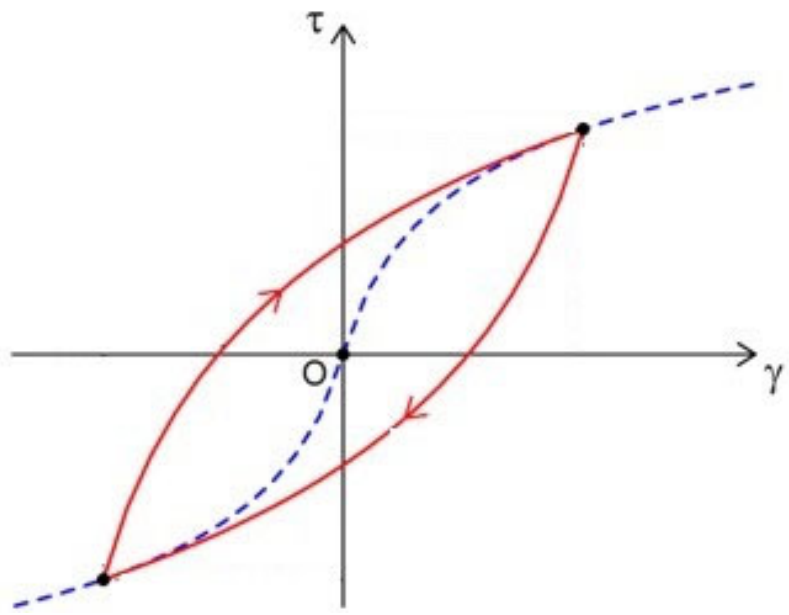


Piccole deformazioni $\gamma < \gamma_l$	Medie deformazioni $\gamma_l < \gamma < \gamma_v$	Grandi deformazioni $\gamma > \gamma_v$
Modelli visco-elastici lineari	Modelli a parametri variabili Modelli non lineari	Modelli elasto-plastici
Tensioni totali		Tensioni efficaci
Analisi lineare (frequenze)	Analisi lineare equivalente (frequenze) Analisi non lineare (tempo)	Analisi non lineare (tempo)

Modelli nonlineari

Nei modelli non lineari è necessario descrivere la risposta del materiale in ogni punto del ciclo di carico, ossia lungo:

- La *backbone*, $\tau = F_b(\gamma)$
- I rami di scarico-ricarico

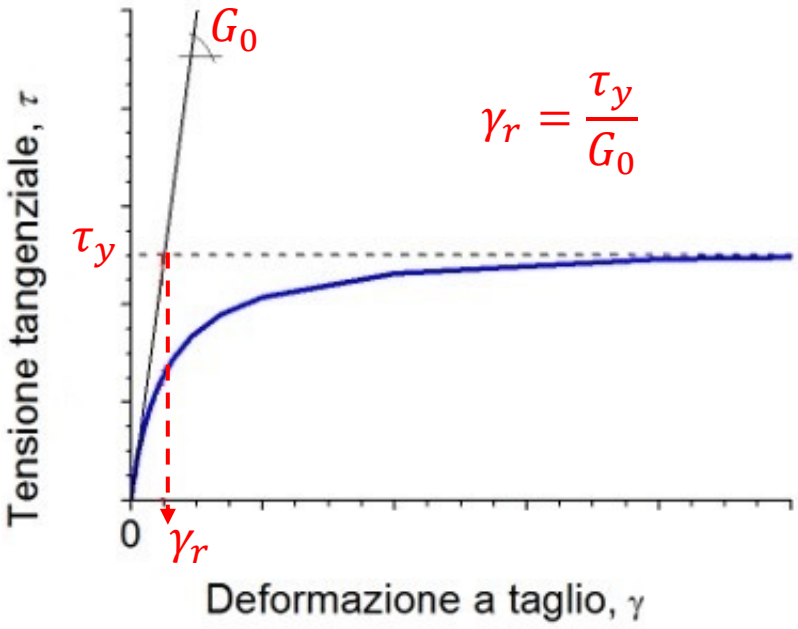


… modelli iperbolici: particolare classe di modelli nonlineari

Modelli iperbolici

backbone, $F_b(\gamma)$

Hardin & Drnevich (1972)



$$\tau(\gamma) = \frac{G_0 \gamma}{1 + |\gamma/\gamma_r|}$$

Equazione costitutiva:

$$\tau(\gamma) = \frac{a\gamma}{b + |\gamma|}$$

Condizioni richieste:

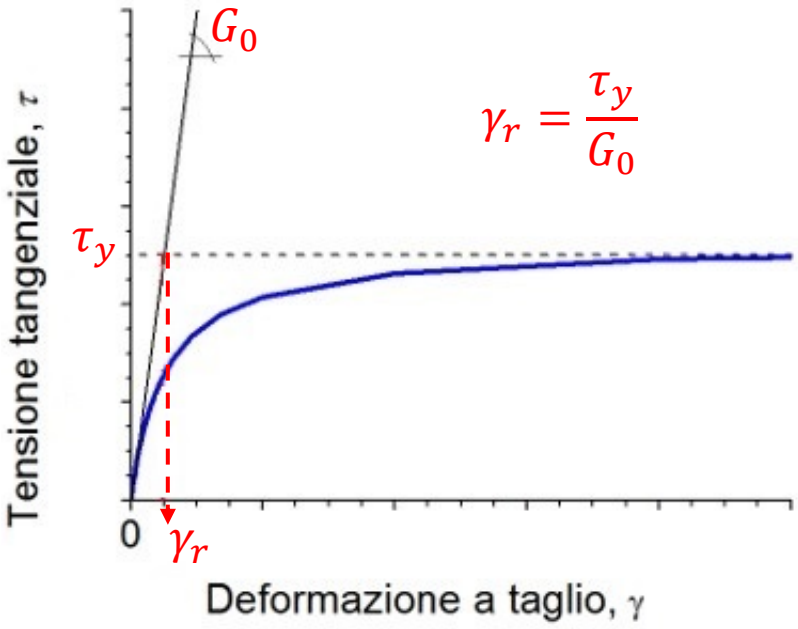
1. $\lim_{\gamma \to \infty} \tau(\gamma) = \tau_y$

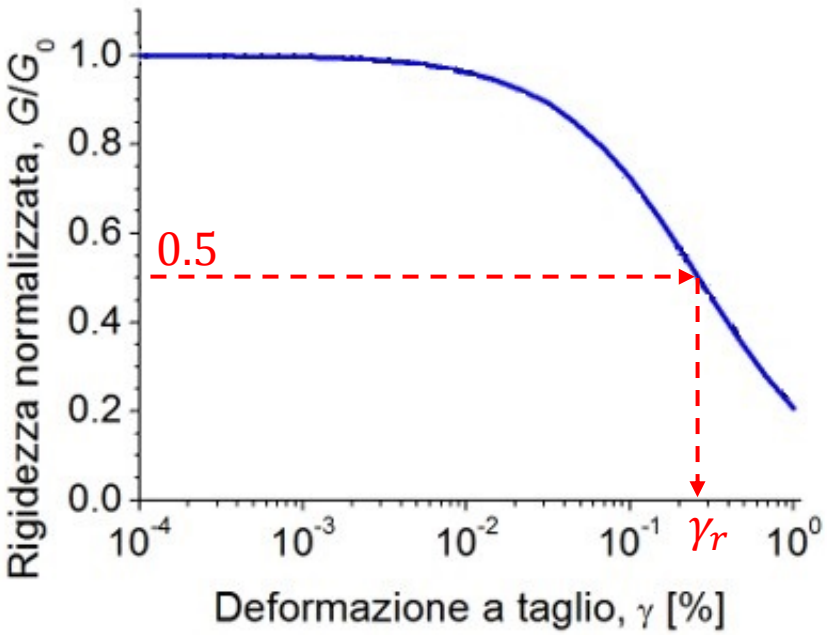
2. $\left.\frac{d\tau}{d\gamma}\right|_{\gamma=0} = G_0$

Modelli iperbolici

backbone, $F_b(\gamma)$

Hardin & Drnevich (1972)





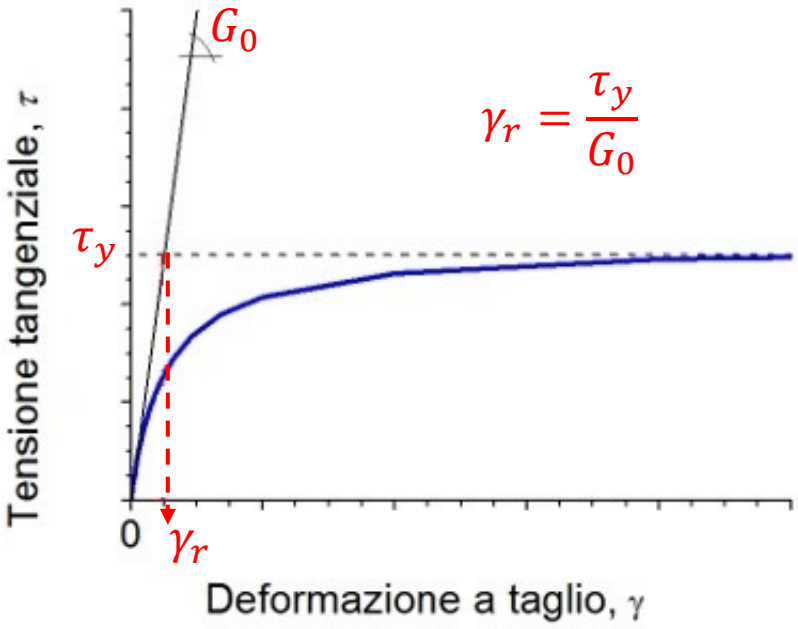
$$\tau(\gamma) = \frac{G_0 \gamma}{1 + |\gamma/\gamma_r|}$$

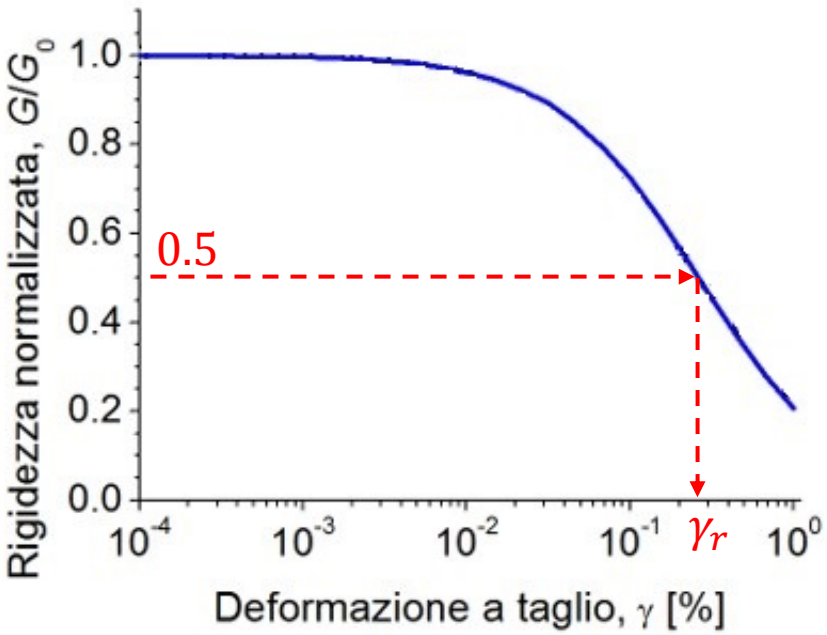
$$\frac{G(\gamma)}{G_0} = \frac{1}{1 + |\gamma/\gamma_r|}$$

Modelli iperbolici

backbone, $F_b(\gamma)$

Hardin & Drnevich (1972)





modello iperbolico classico:

- 2 parametri costitutivi tra G_0, τ_y e γ_r
- Tipicamente si considerano G_0 e γ_r
- γ_r tarato su dati sperimentali di curve di decadimento
- Si perde informazione su resistenza del materiale

$\Rightarrow$ Modelli iperbolici a più parametri

Modelli iperbolici

backbone, $F_b(\gamma)$

Matasovic & Vucetic (1995)

modello iperbolico modificato (MKZ):

- 4 parametri costitutivi: G_0, γ_r, β e s
- γ_r, β e s tarati su dati sperimentali di curve di decadimento
- … anche qui si perde informazione su resistenza del materiale

Curva di primo carico (*backbone*):

$$\tau(\gamma) = \frac{G_0 \gamma}{1 + \beta |\gamma/\gamma_r|^s}$$

Curva di decadimento:

$$\frac{G(\gamma)}{G_0} = \frac{1}{1 + \beta |\gamma/\gamma_r|^s}$$

Modelli iperbolici

backbone, $F_b(\gamma)$

Modello Iperbolico
(Hardin & Drnevich, 1972)

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_r)}$$

Curva di primo carico "backbone":

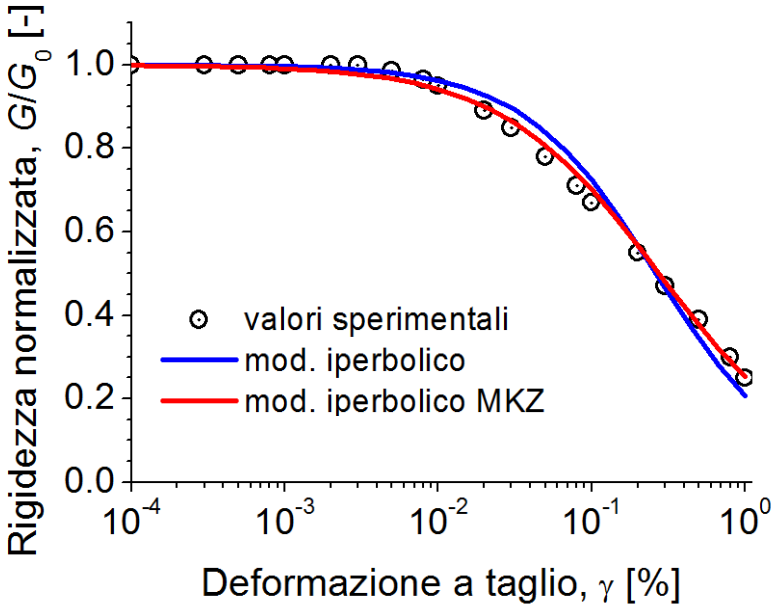
$$\tau = F_{bb}(\gamma) = \frac{\gamma \cdot G_0}{1+(\gamma/\gamma_r)}$$

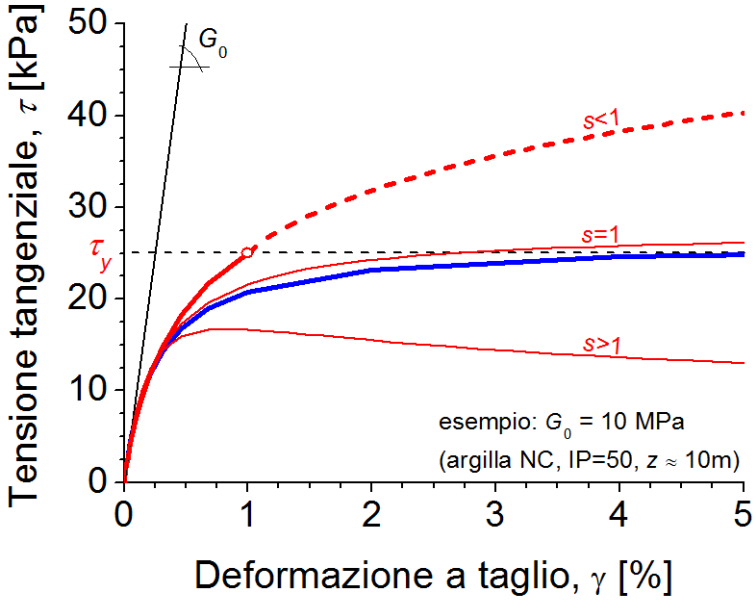
Modello Iperbolico modificato (MKZ)
(Matasovic & Vucetic, 1995)

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1+\beta(\gamma/\gamma_r)^s}$$

Curva di primo carico "backbone":

$$\tau = F_{bb}(\gamma) = \frac{\gamma \cdot G_0}{1+\beta(\gamma/\gamma_r)^s}$$





Modelli iperbolici

backbone, $F_b(\gamma)$

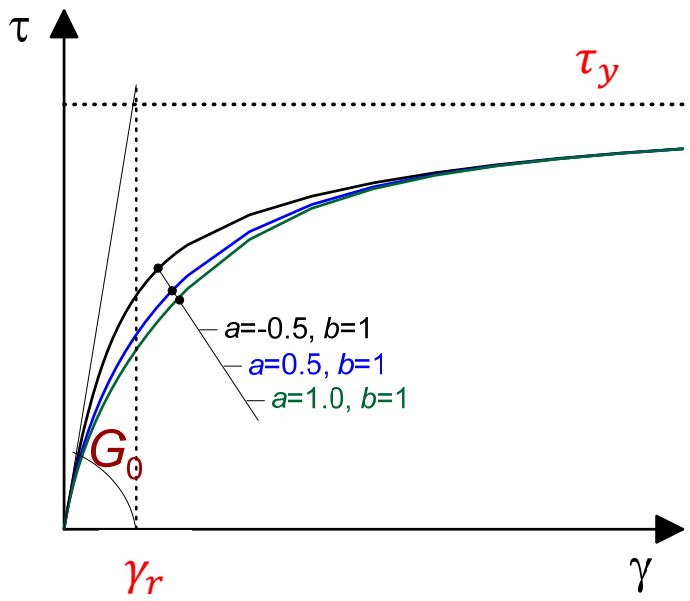
Hardin & Drnevich (1972)
Conti et al. (2020)

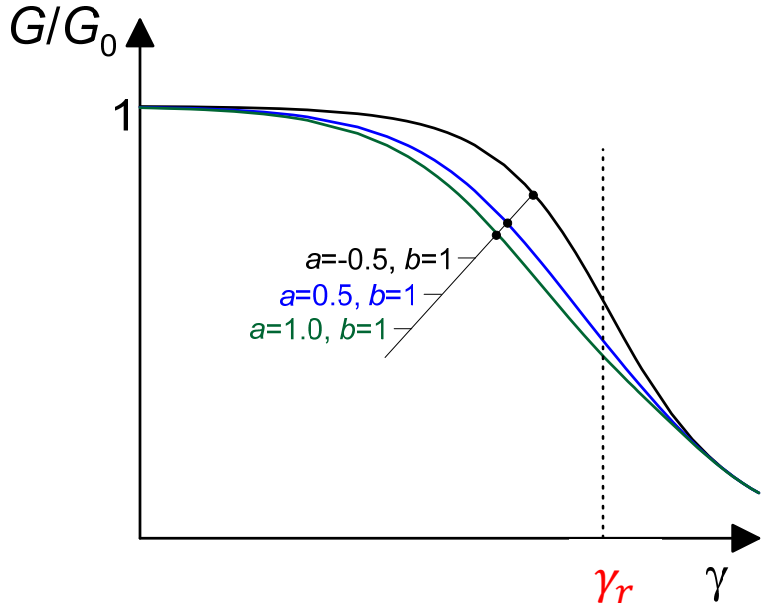
modello iperbolico modificato (MHD):

- 4 parametri costitutivi: G_0, τ_y, a e b
- … sia nonlinearità sia resistenza come ingredienti costitutivi

$$\tau(\gamma) = \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}\left[1 + a \exp\left(-b \frac{\gamma}{\gamma_r}\right)\right]}$$

$$\gamma_r = \frac{\tau_{lim}}{G_0}$$

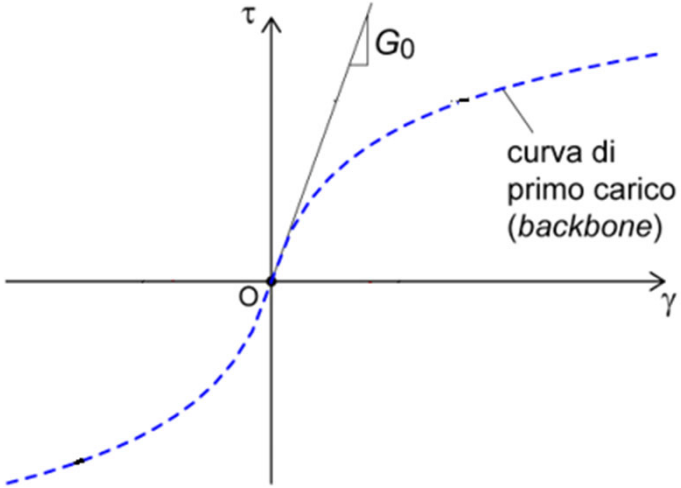




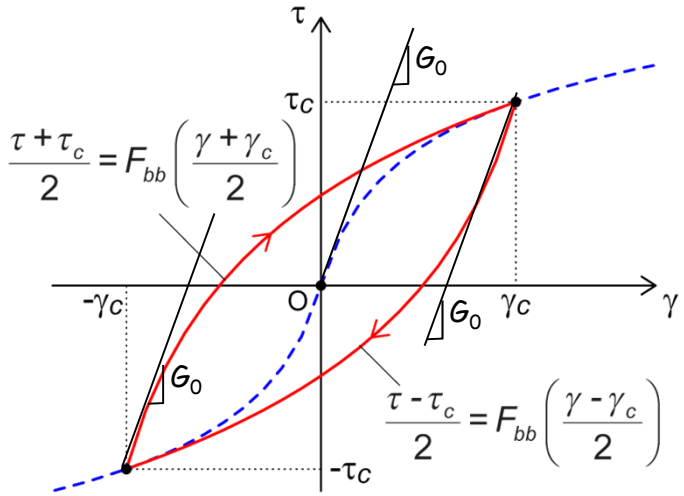
Modelli nonlineari

Regole di Masing

1° criterio di Masing



2° criterio di Masing

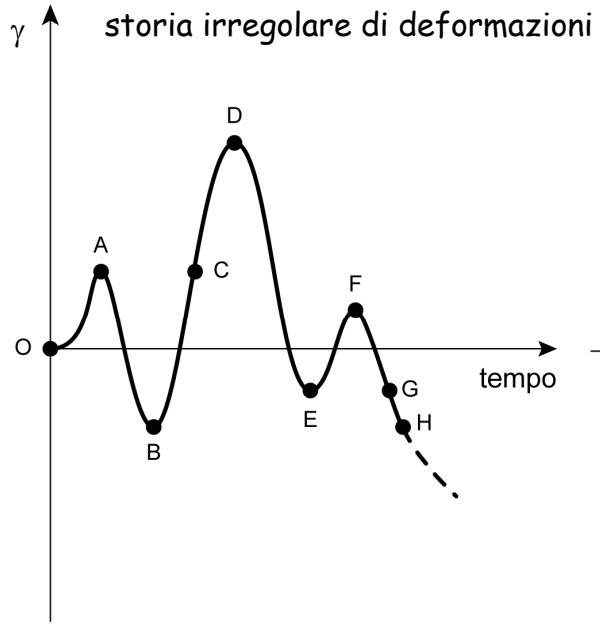


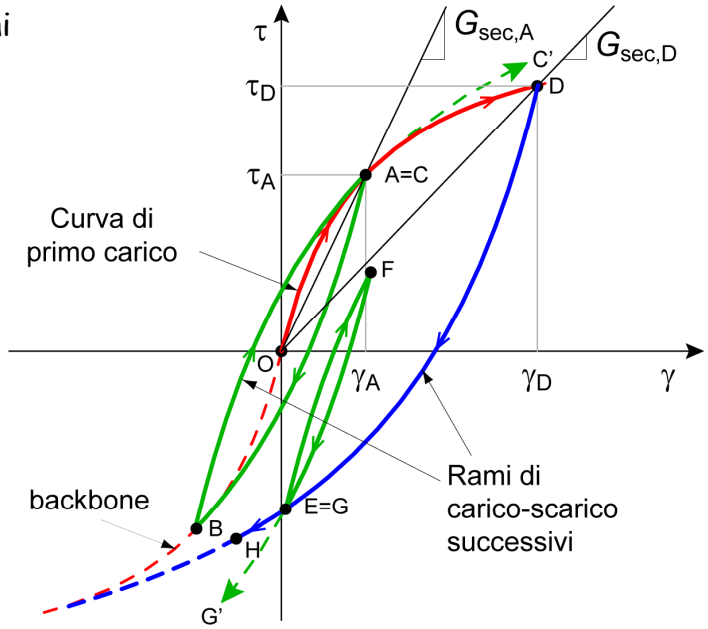
1. In condizioni di primo carico, la curva τ:γ segue la *backbone* $F_{bb}(\gamma)$
2. La curva di scarico-ricarico si ottiene per omotetia (2:1) di τ:γ al primo carico $\Longrightarrow$ il modulo iniziale in scarico-ricarico è pari a G_0

} Sollecitazioni armoniche (laboratorio)

Modelli nonlineari

Regole di Masing





1. In condizioni di primo carico, la curva τ:γ segue la *backbone* $F_{bb}(\gamma)$
2. La curva di scarico-ricarico si ottiene per omotetia (2:1) di τ:γ al primo carico $\Longrightarrow$ il modulo iniziale in scarico-ricarico è pari a G_0
3. Se in un ciclo di scarico-ricarico interseco la *backbone* $\Longrightarrow$ la curva τ:γ segue la *backbone*
4. Se in un ciclo di scarico-ricarico interseco un ciclo precedente $\Longrightarrow$ la curva τ:γ segue il ciclo precedente

Sollecitazioni armoniche (laboratorio)

Sollecitazioni NON armoniche (terremoto)

Regole di Masing

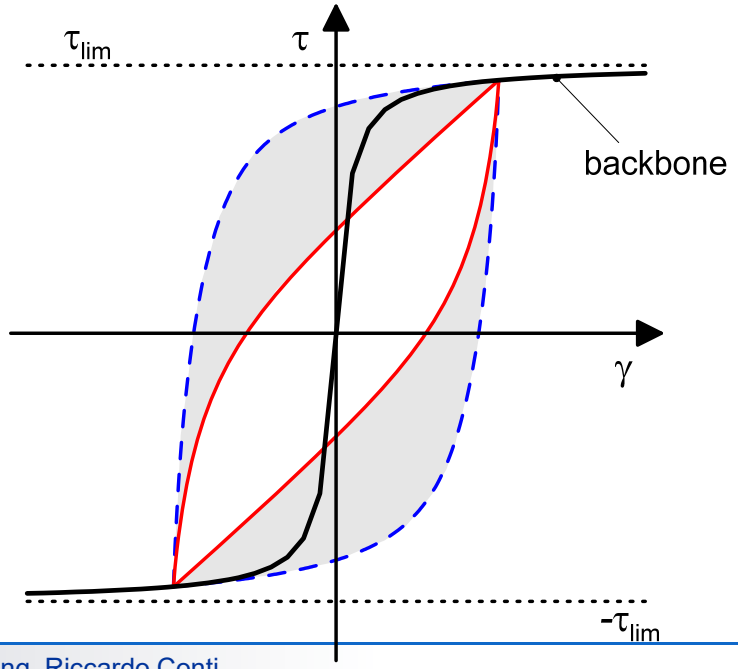
Phillips & Hashash (2009)
Conti et al. (2020)

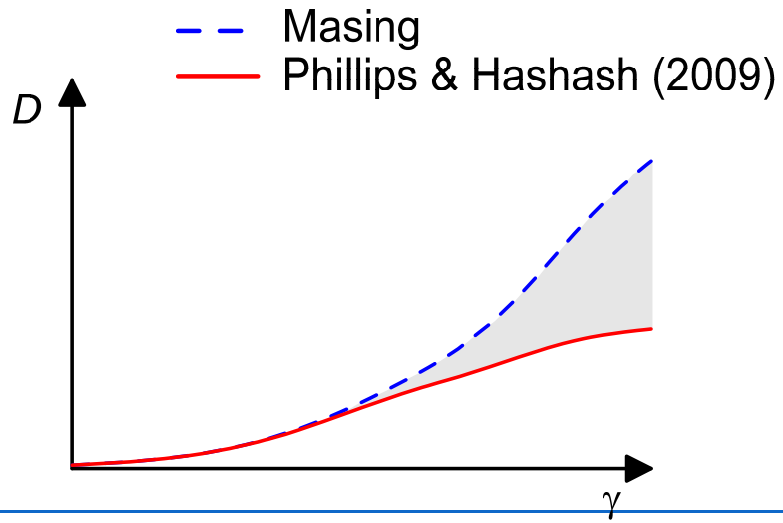
2° Regola di Masing modificata:

$$\tau - \tau_r = 2\alpha(\gamma_m)\Phi\left(\frac{\gamma - \gamma_r}{2}\right) + [1 - \alpha(\gamma_m)]\Psi(\gamma - \gamma_r)$$

$$\alpha(\gamma_m) = 1 - c\left[1 - \frac{G(\gamma_m)}{G_0}\right]^d$$

$\gamma_m = \text{max. def. corrente}$





Modelli nonlineari

Modello	*Backbone*	Parametri costitutivi
HD	$\tau(\gamma) = \dfrac{G_0\gamma}{1 + \lvert\gamma/\gamma_r\rvert}$	❑ G_0 ❑ γ_r
MKZ	$\tau(\gamma) = \dfrac{G_0\gamma}{1 + \beta\lvert\gamma/\gamma_r\rvert^s}$	❑ G_0 ❑ γ_r, β, s
MHD	$\tau(\gamma) = \dfrac{G_0\gamma}{1 + \dfrac{\gamma}{\gamma_r}\left[1 + a\exp\left(-b\dfrac{\gamma}{\gamma_r}\right)\right]}$	❑ G_0 ❑ τ_y ($\gamma_r=\tau_y/G_0$) ❑ a, b

Rigidezza a piccole deformazioni
Nonlinearità
Resistenza

Modelli nonlineari

Regola di inversione

Parametri costitutivi

$$\tau - \tau_r = 2\Phi\left(\frac{\gamma - \gamma_r}{2}\right)$$

$$\tau - \tau_r = 2\alpha(\gamma_m)\Phi\left(\frac{\gamma - \gamma_r}{2}\right) + [1 - \alpha(\gamma_m)]\Psi(\gamma - \gamma_r)$$

$$\alpha(\gamma_m) = 1 - c\left[1 - \frac{G(\gamma_m)}{G_0}\right]^d$$

- c, d

Rigidezza a piccole deformazioni
Nonlinearità
Resistenza
Smorzamento

Modelli nonlineari

Taratura dei parametri costitutivi

- Rigidezza a piccole deformazioni
  G_0

- Resistenza
  $\tau_{lim}=p'\cdot f(\phi', \mathrm{OCR})$
  $s_u=p'\cdot f(IP, \mathrm{OCR})$

- Nonlinearità

- Smorzamento

Prove dinamiche in sito
Prove RC/TS

Prove penetrometriche (CPT/SPT)
Prove di laboratorio standard

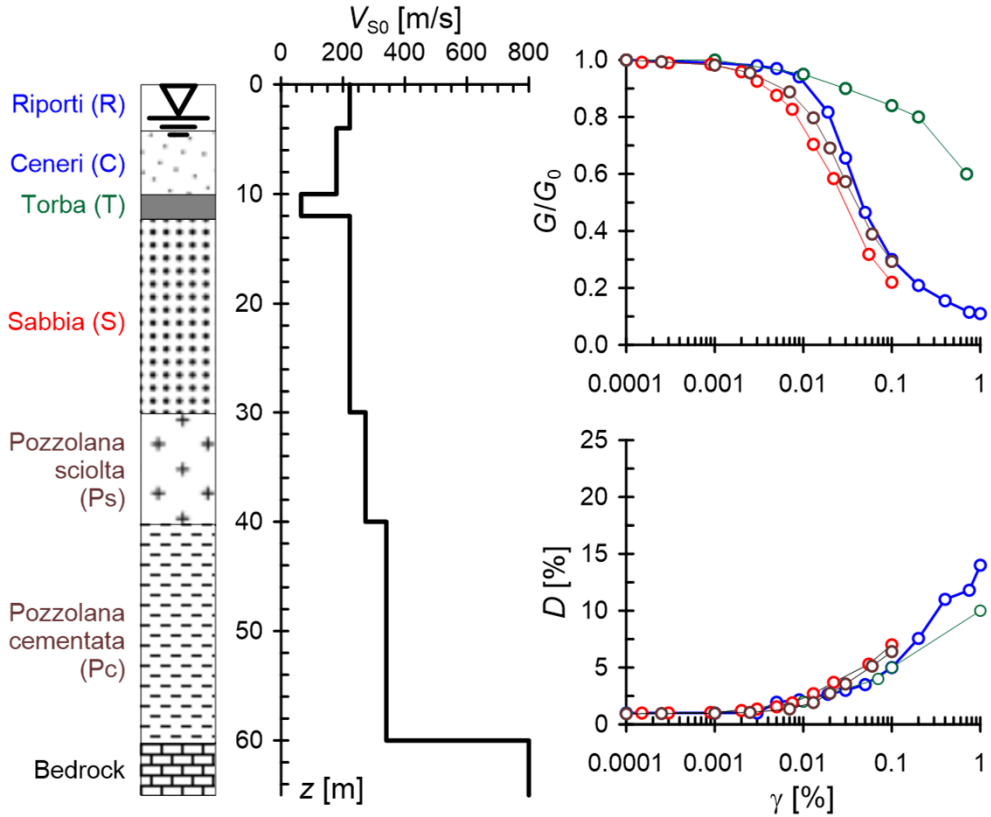
Prove RC/TS
Relazioni empiriche

Indice

1. Concetti introduttivi
   - Definizioni
   - Caso studio di Città del Messico
   - Ipotesi semplificative
2. Comportamento meccanico dei terreni
   - Comportamento del terreno sotto azioni cicliche
   - Effetti della non linearità
3. Modelli costitutivi nonlineari
   - Modelli iperbolici
   - Regole di Masing
4. Esempi applicativi
   - Napoli Est
   - Viadotto stradale Centro Italia
5. Conclusioni

Napoli Est

stratigrafia

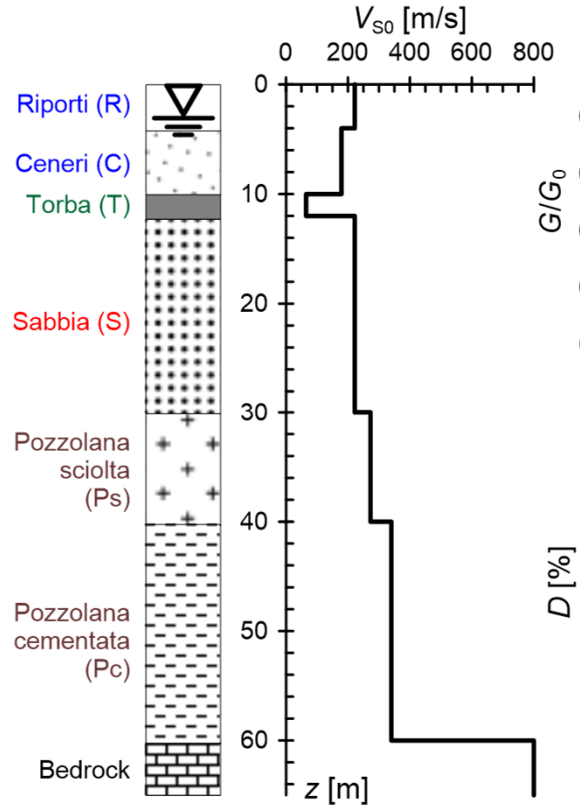


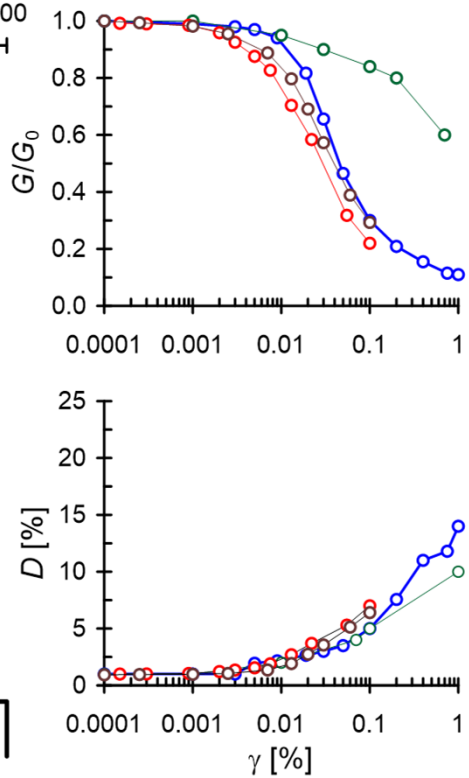
Vinale (1988)
Bilotta *et al.* (2015)

strato	γ [kN/m³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	OCR
R	15	28	10	1.0
C	14	28	10	2.3
T	12	30	0	1.0
S	17	36	0	1.0
Ps	15	37	0	2.3
Pc	15	28	100	3.0

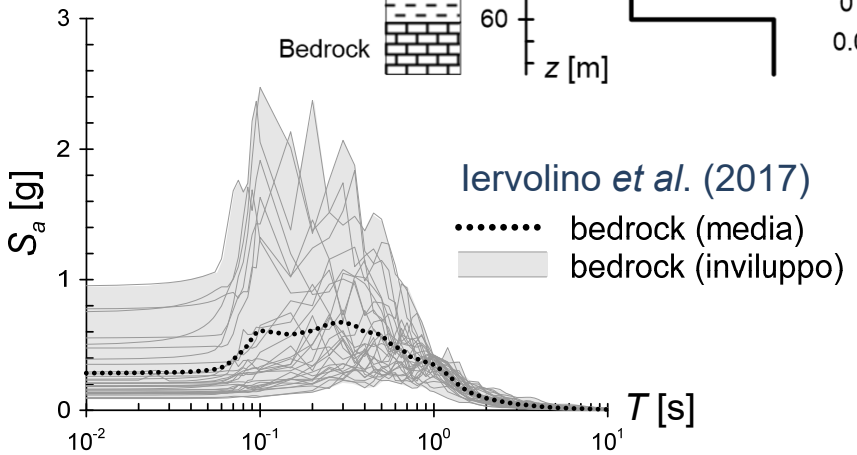
Napoli Est

Input sismico





- R & C (p' = 100 kPa)
- T (p' = 100 kPa)
- S (p' = 100 kPa)
- Ps (p' = 150 kPa)
- Pc (p' = 250 kPa)

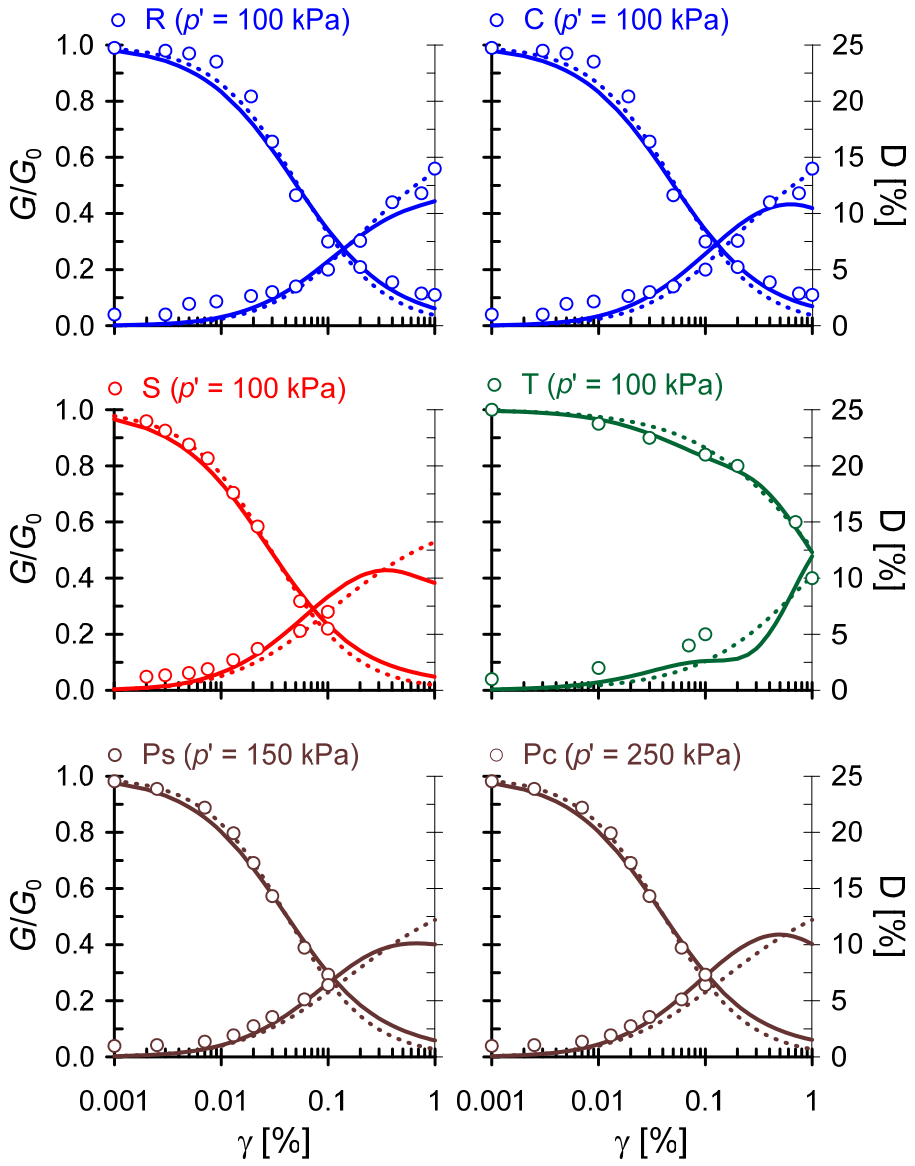


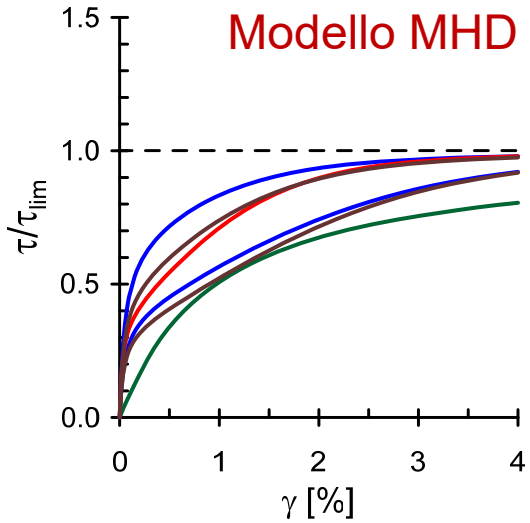
Vinale (1988)
Bilotta *et al.* (2015)

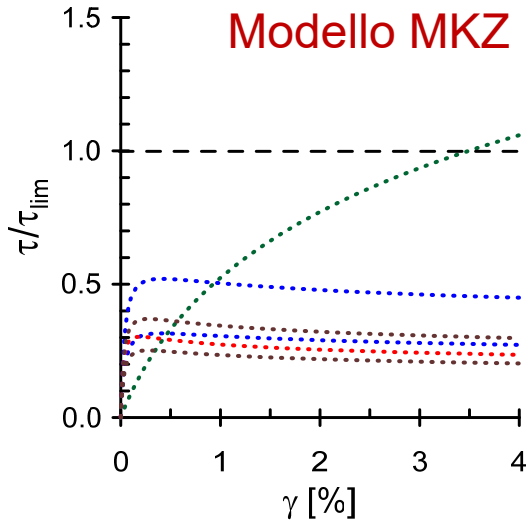
strato	γ [kN/m³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	OCR
R	15	28	10	1.0
C	14	28	10	2.3
T	12	30	0	1.0
S	17	36	0	1.0
Ps	15	37	0	2.3
Pc	15	28	100	3.0

Napoli Est

taratura modelli

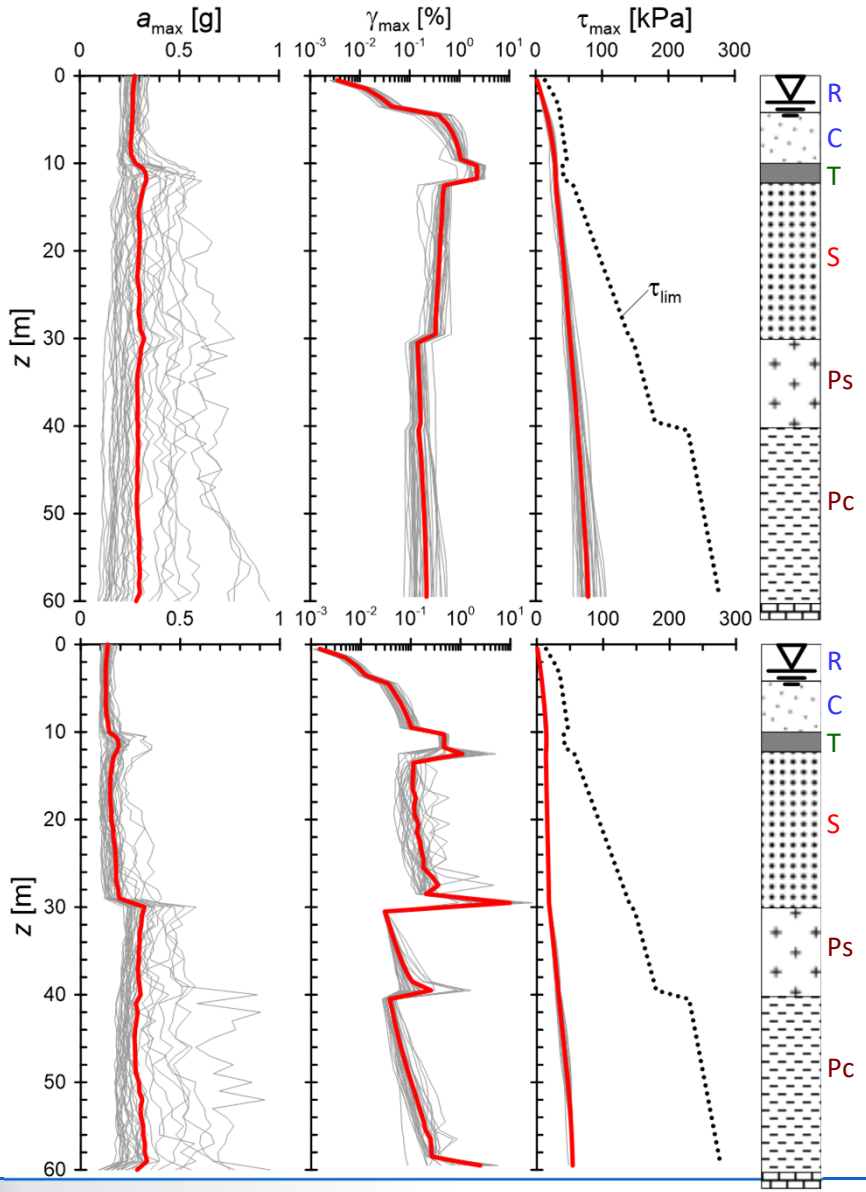




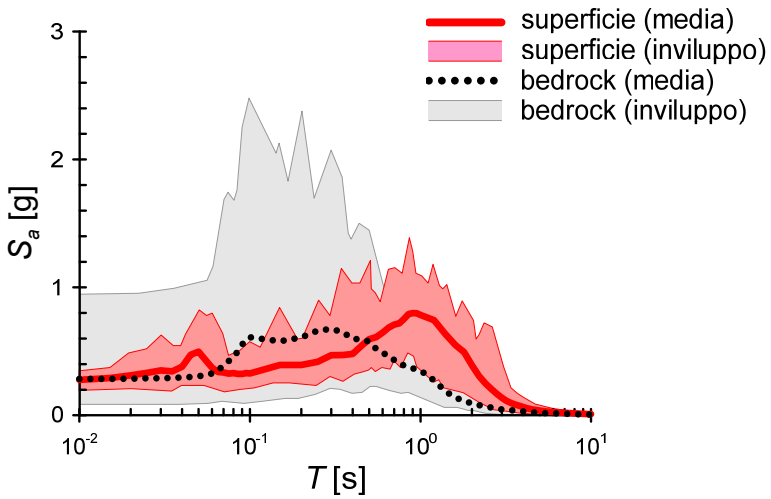


Napoli Est

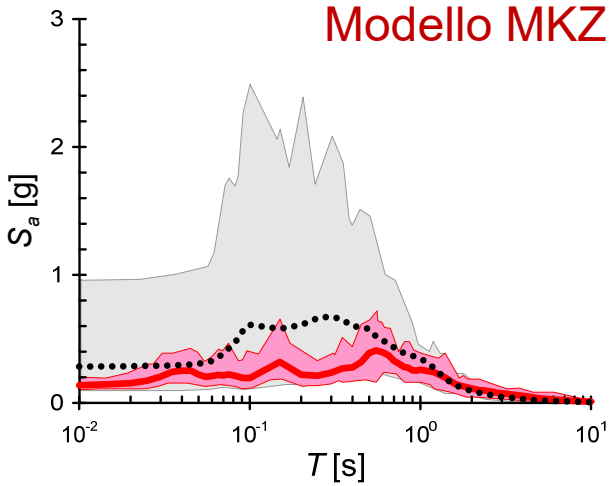
risultati



Modello MHD



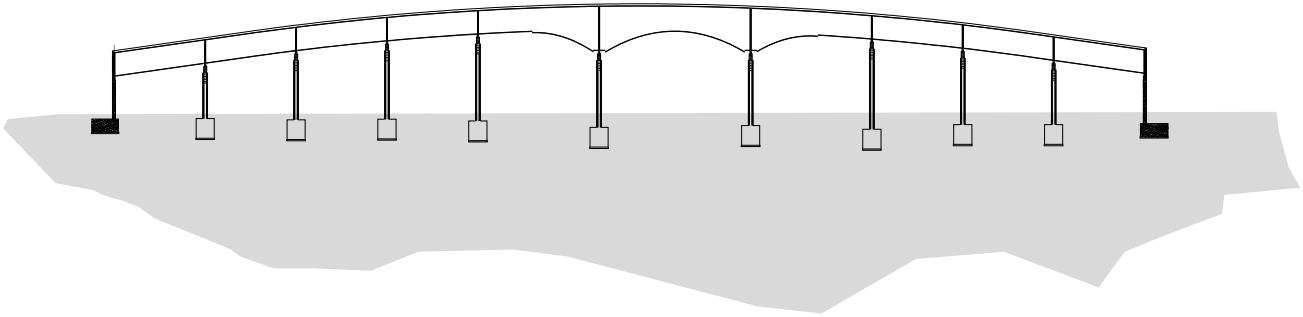
Modello MKZ



Viadotto del Centro Italia

Caso studio

Licata et al. (2019)
Conti et al. (2020)

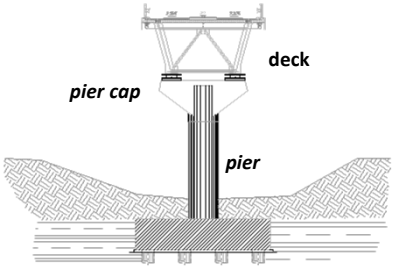


Analisi di RSL

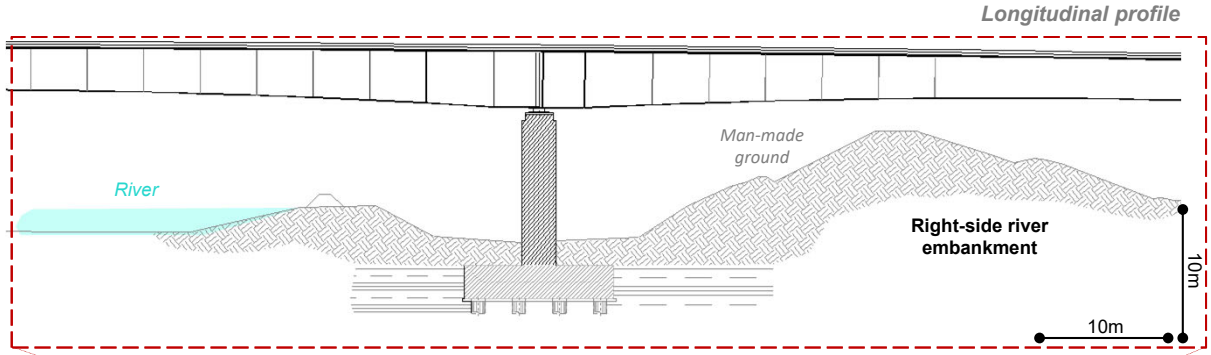
i. Inquadramento dell'opera
ii. Azione sismica di progetto
iii. Definizione del modello geotecnico di sottosuolo (dati sperimentali + HVSR + letteratura)
iv. Selezione degli accelerogrammi (segnale di input)
v. Analisi di RSL Lineare Equivalente & Nonlineare
   i. Moto free-field in superficie (u_{ff0})
   ii. $\gamma_m(z)$, $Vs(\gamma_m)$ e $\xi(\gamma_m)$

Viadotto del Centro Italia

inquadramento

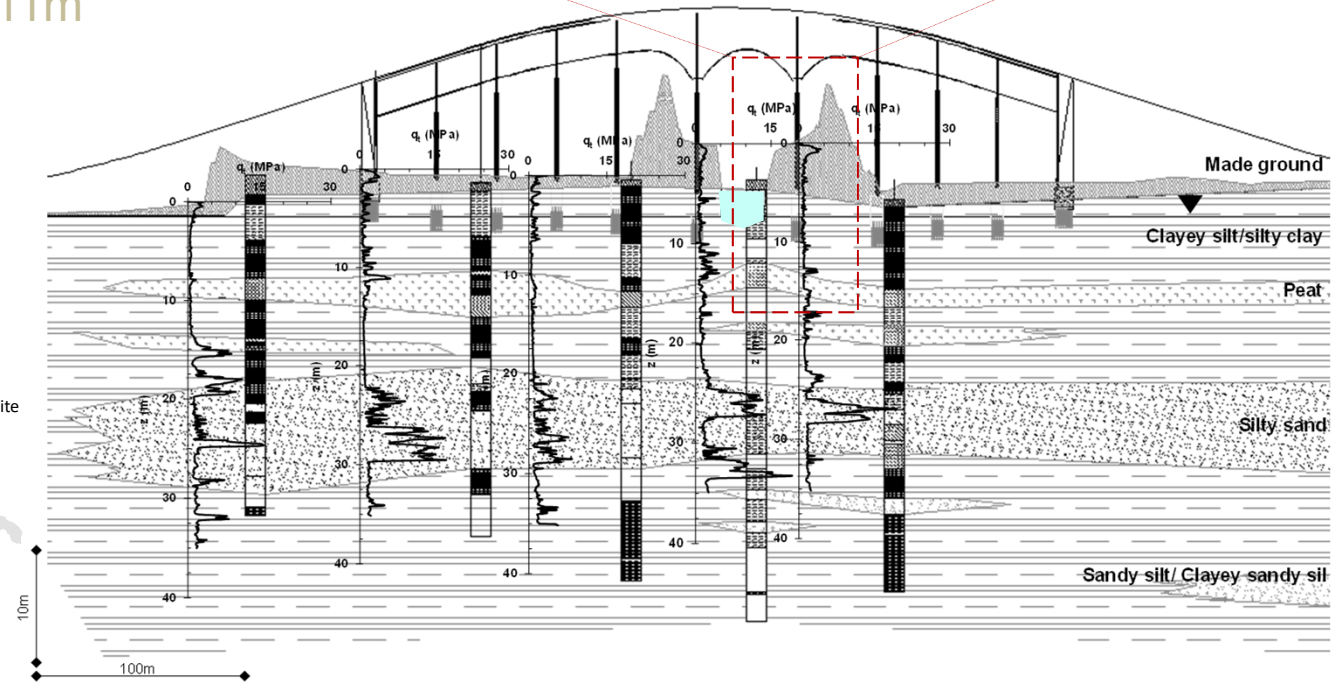


Transversal section



Viadotto 10 campate

Pila centrale 11m

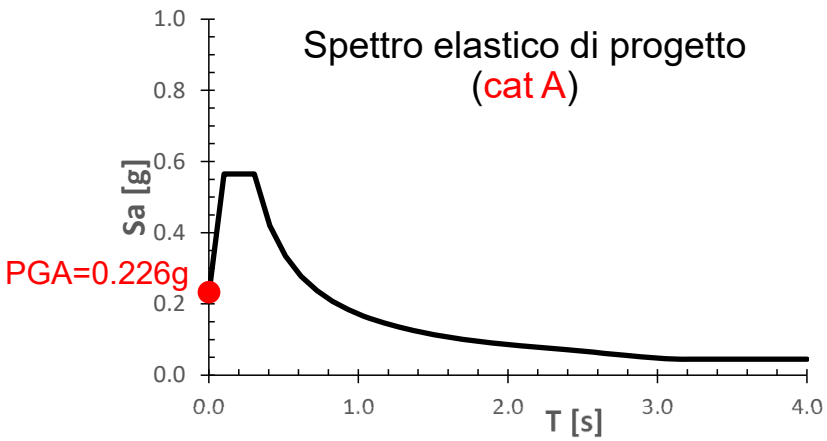


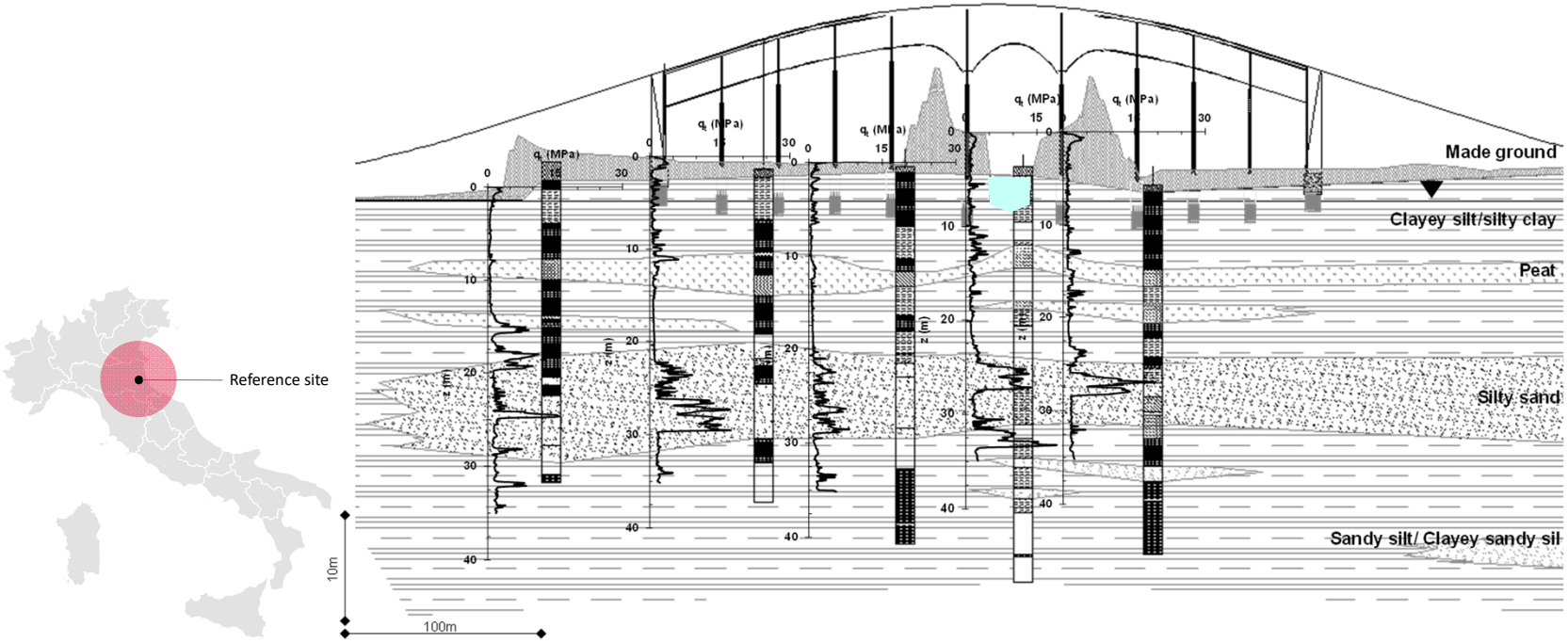
Viadotto del Centro Italia

Azione sismica

Vita nominale: $V_N = 50$ anni
Classe d'uso: IV ($C_U = 2$)
Vita di riferimento:
$V_R = V_N C_U = 100$ anni

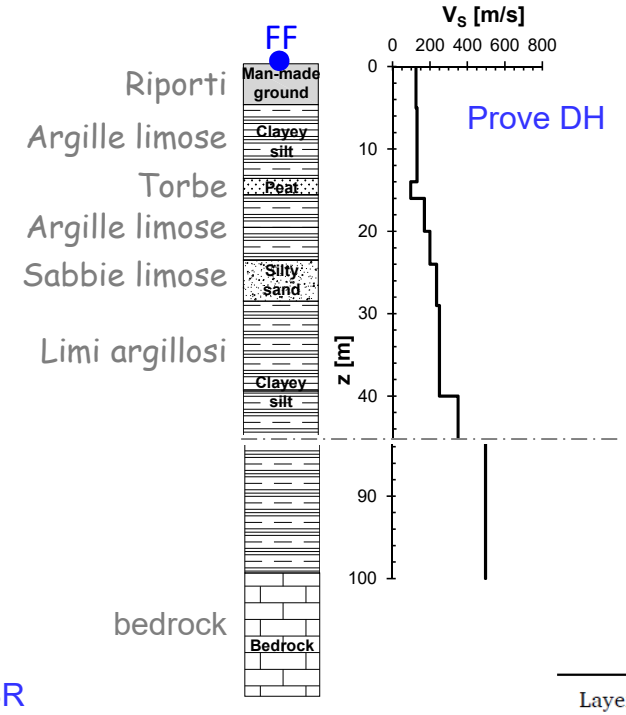
SLV: $P_{VR} = 10\%$
$T_R = 950$ anni

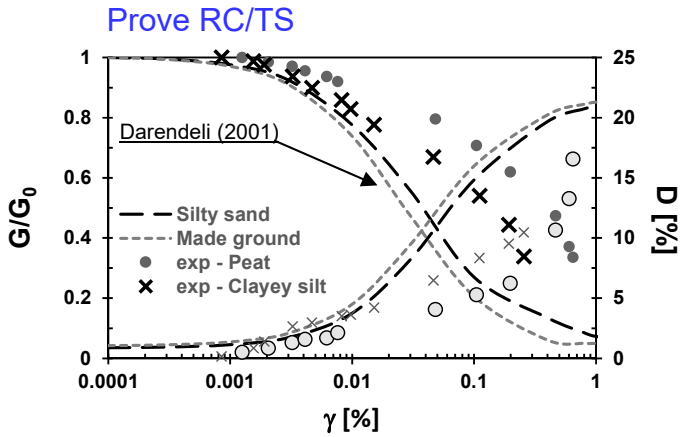


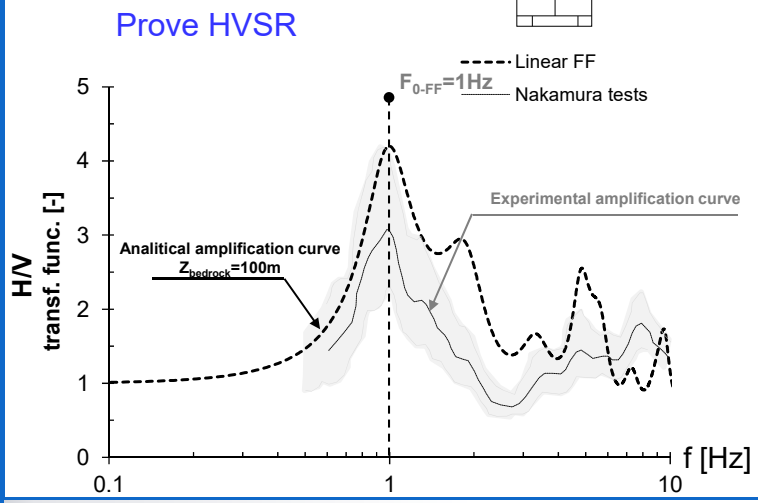


Viadotto del Centro Italia

Modello geotecnico





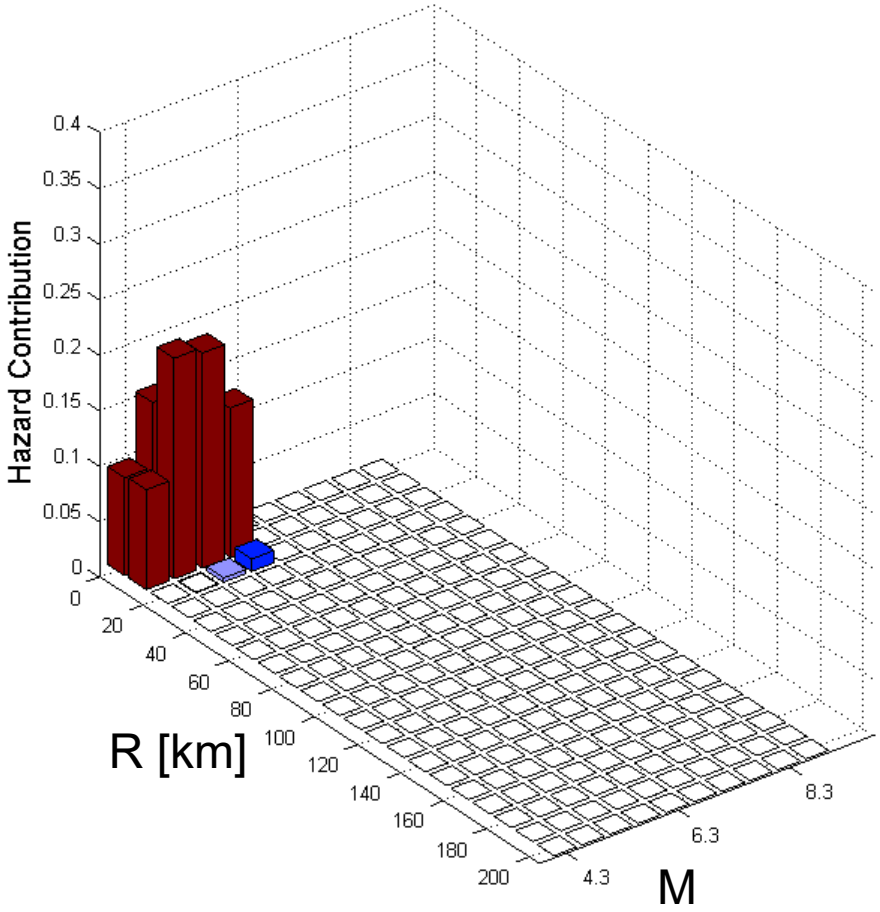


Layer	z [m]	γ [kN/m^3]	V_{S0} [m/s]	c_u [kPa]	φ [°]	PI [%]	OCR	K_0
MG	0–5	18	125	40	23	10	1	0.61
CS	5–14	16	130	50	20	30	1	0.66
P	14–16	12	97	32	28	50	1	0.53
CS	16–20	16	170	120	20	30	1	0.66
	20–24	16	200	120	20	30	1	0.66
SS	24–29	18	235	–	30	5	1	0.50
CS	29–40	18	250	180	22	30	1	0.63
	40–60	18	350	290	22	30	1	0.63
	60–80	18	450	400	22	30	1	0.63
	80–100	18	500	520	22	30	1	0.63
Bedrock	100- …	20	800					

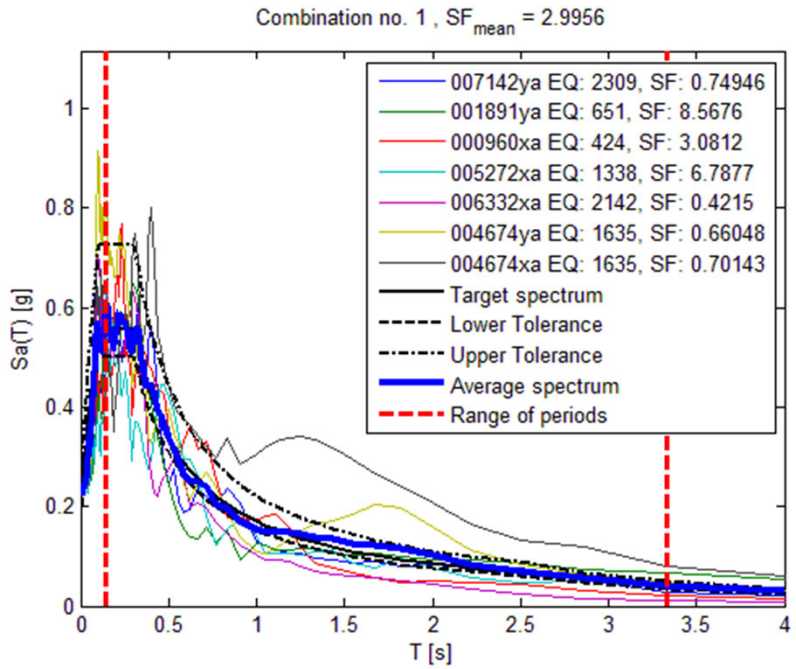
Viadotto del Centro Italia

Selezione accelerogrammi

Analisi di pericolosità sismica
(analisi di disaggregazione, T_R = 950 anni)

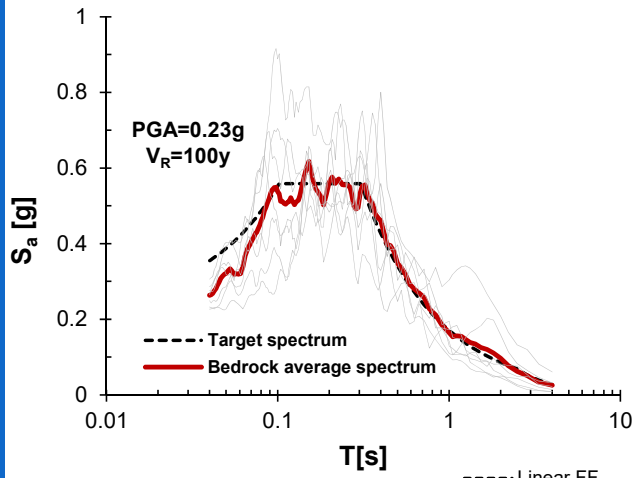


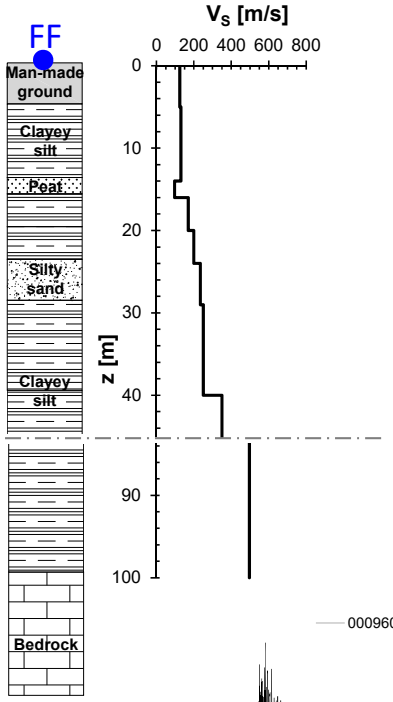
Selezione accelerogrammi spettrocompatibili

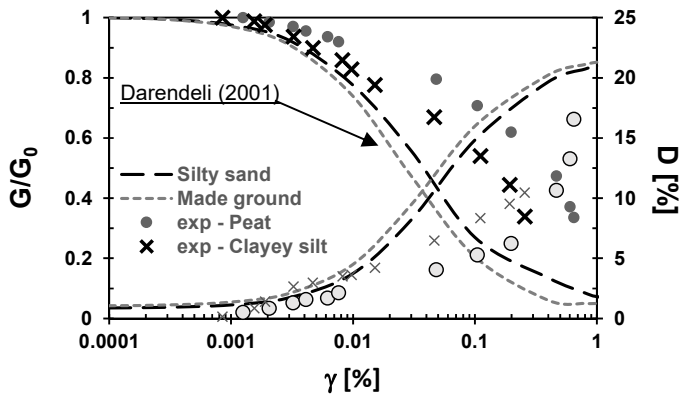


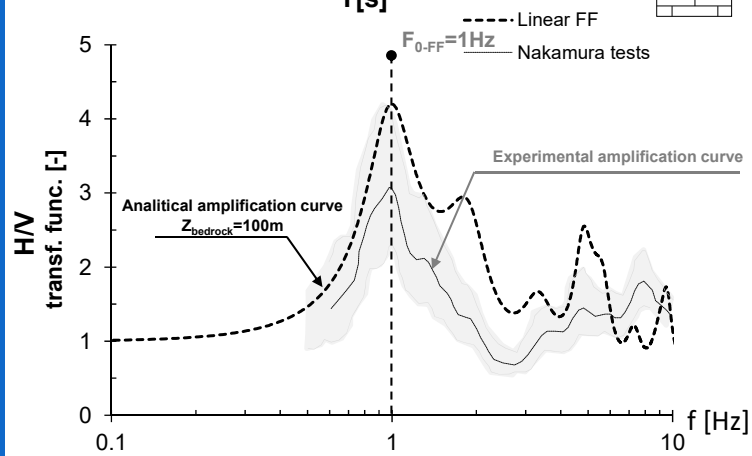
Viadotto del Centro Italia

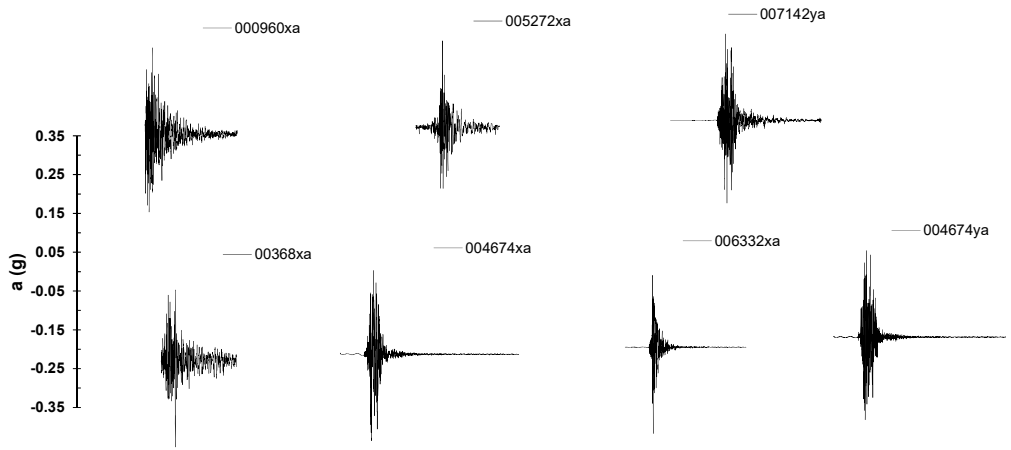
Analisi RSL/input





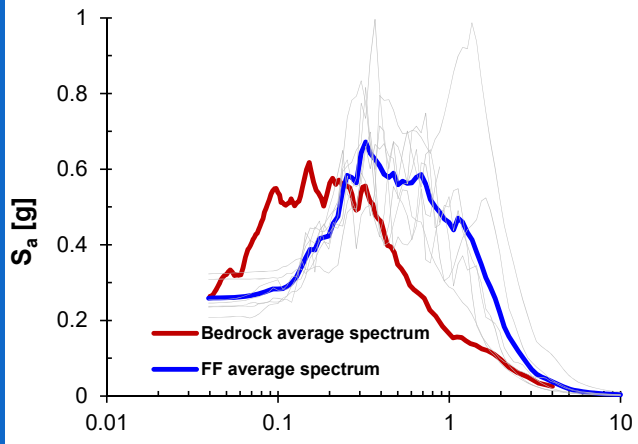


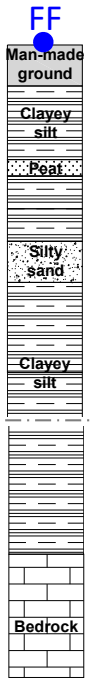


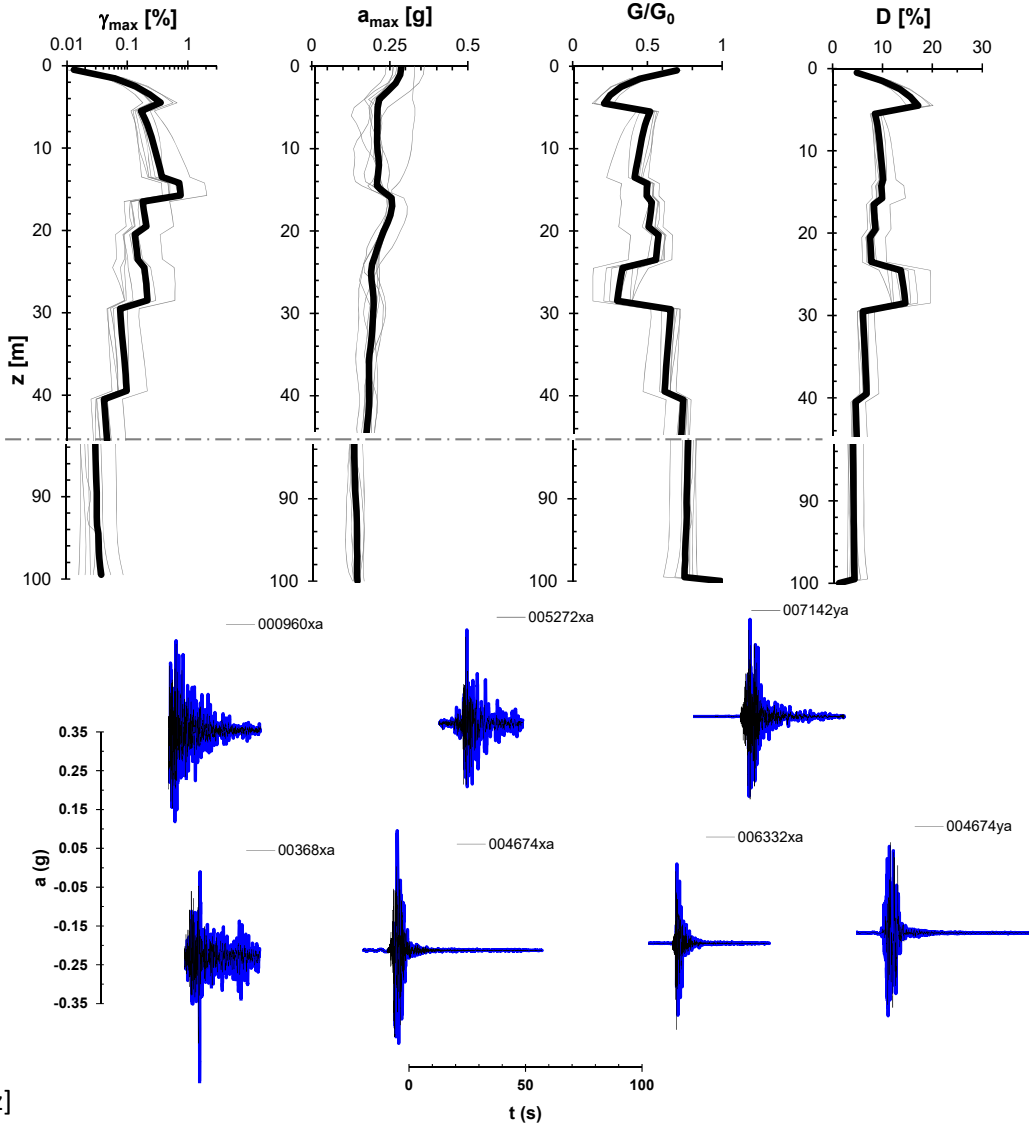


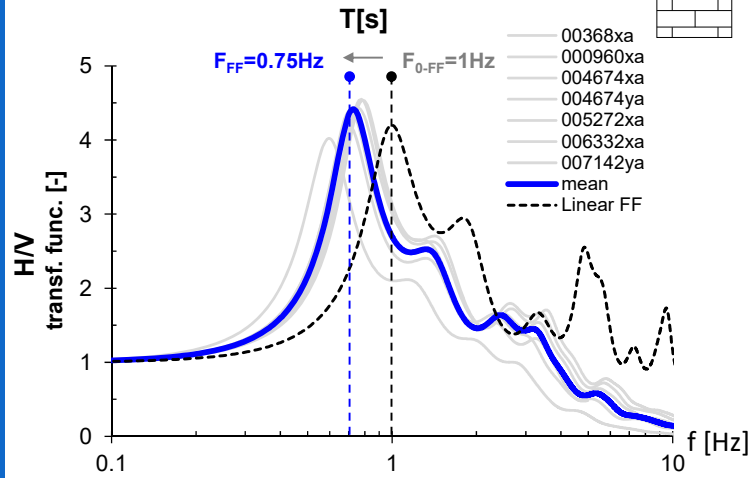
Viadotto del Centro Italia

Analisi RSL Lin. Equiv.



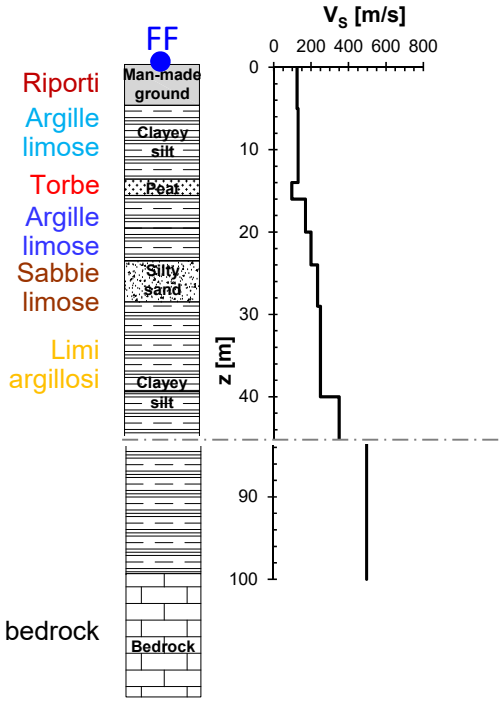






Viadotto del Centro Italia

Analisi RSL nonlineari



Modello Iperbolico modificato (MKZ)
(Matasovic & Vucetic, 1995)

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \beta\left(\gamma/\gamma_r\right)^s}$$

γ_r = deformazione di riferimento
β, s = parametri adimensionali di forma

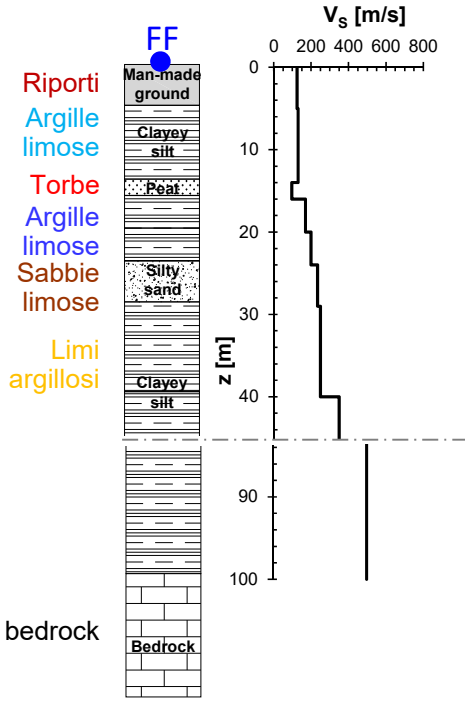
Curva di primo carico "backbone":

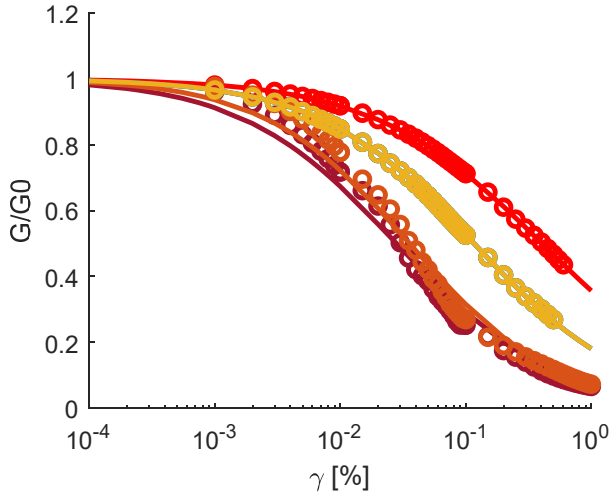
$$\tau = F_{bb}(\gamma) = \frac{\gamma \cdot G_0}{1 + \beta\left(\gamma/\gamma_r\right)^s}$$

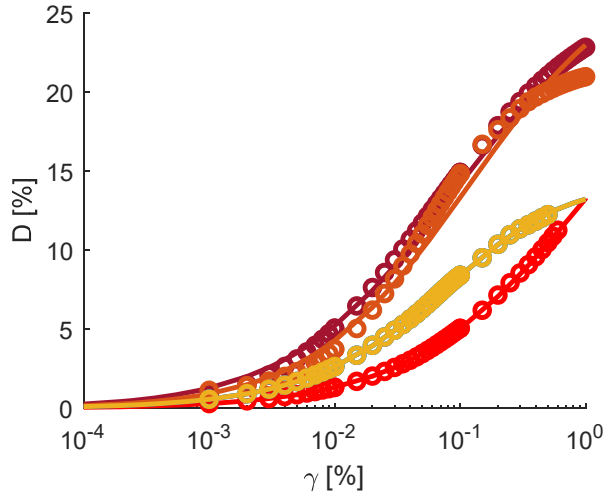
						resistenza	Backbone			Damping + Masing Mod.			
	z [m]	s_u [kPa]	ϕ' [°]	IP [%]	σ'_{v0} [kPa]	τ_{lim} [kPa]	γ_{ref} [%]	β [-]	s [-]	D_0 [%]	P_1 [-]	P_2 [-]	P_3 [-]
Riporti	0-5	40	23	10	54	40	0.035	0.98	0.70	3	1	0.19	0.10
argille limose torbose	5-14	50	20	30	100	50	0.108	0.95	0.70	3	1	0.57	1.80
torbe	14-16	32	28	50	126	32	0.130	0.48	0.65	3	1	0.10	1.80
argille limose torbose	16-24	120	20	30	140	120	0.108	0.95	0.70	3	1	0.57	1.80
sabbie limose	24-29	-	30	5	200	115	0.033	1.00	0.75	3	1	0.25	0.10
argille limose	29-40	180	22	30	264	180	0.108	0.95	0.70	3	1	0.57	1.80

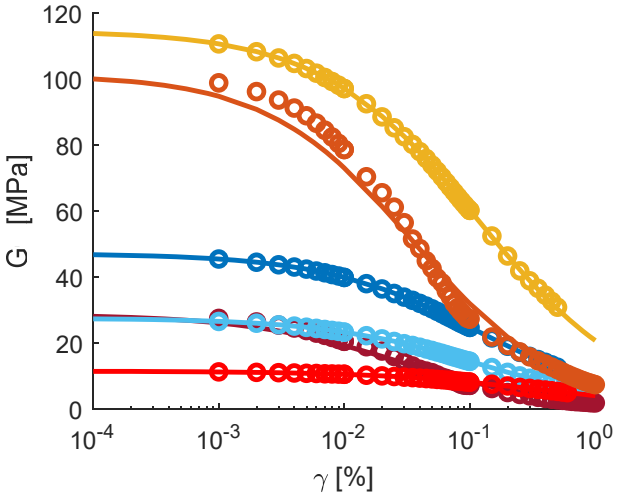
Viadotto del Centro Italia

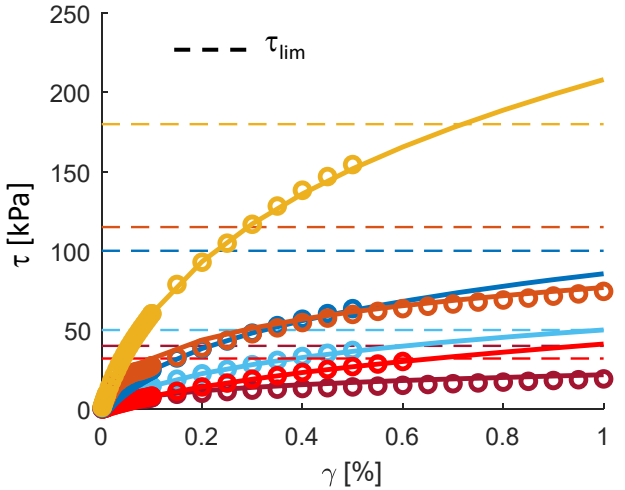
Analisi RSL nonlineari





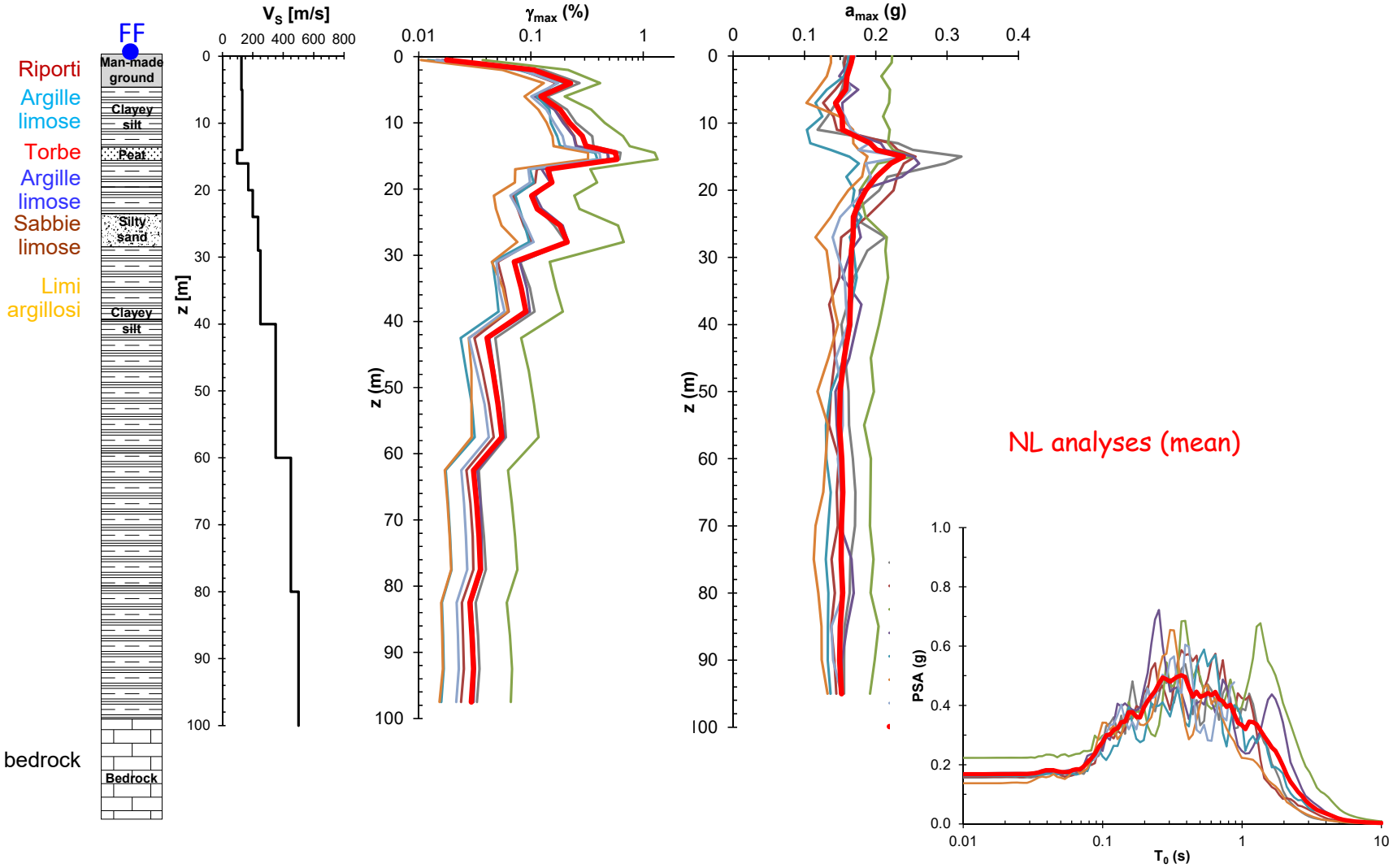






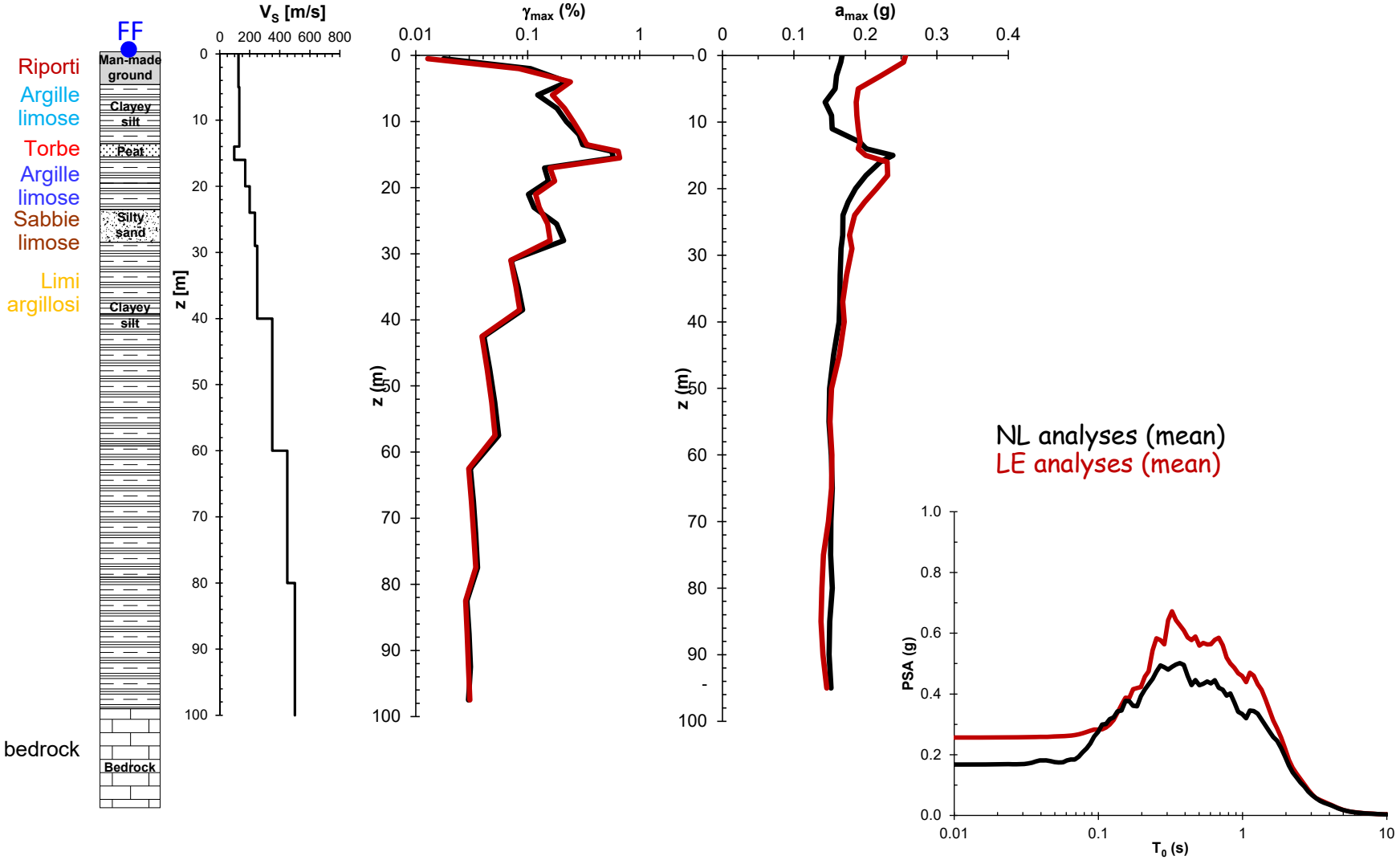
Viadotto del Centro Italia

Analisi RSL nonlineari



Viadotto del Centro Italia

Analisi RSL nonlineari



Conclusioni

Scelta di analisi & modello = *f*(livello deformativo)

Modello nonlineari

- *Backbone*
  (iperbolici HD, MKZ, MHD)
- Leggi di Scarico-ricarico
  (Masing, PH)

Taratura dei parametri costitutivi

- Prove in sito/laboratorio/relazioni empiriche
- Importanza della resistenza

Analisi di RSL

- Riduzione delle accelerazioni in superficie (rispetto ad Analisi LE)
  (sconto sulle azioni… ma più onere per caratterizzazione & calibrazione)
- Importanza della resistenza

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Prof. Ing. Riccardo Conti
riccardo.conti@uniroma2.it