Spoleto, 6-7 aprile 2018

RISPOSTA SISMICA LOCALE

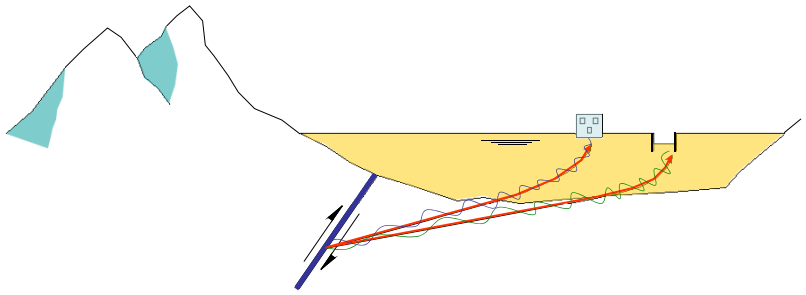
Luigi Callisto

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

analisi della risposta sismica locale

risposta sismica

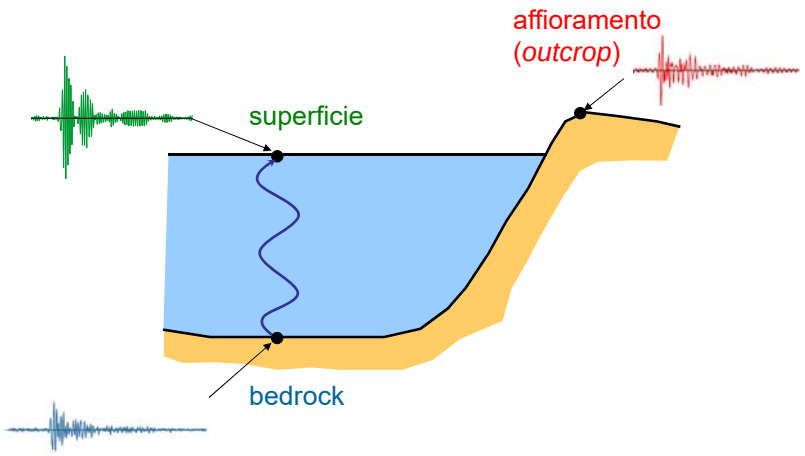
previsione del moto del terreno, in superficie o in profondità, indotto da un evento sismico



rottura lungo una discontinuità (faglia)

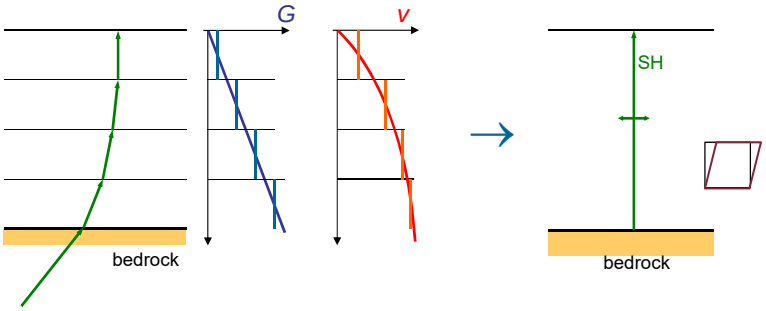
propagazione, sotto forma di onde, dell'energia rilasciata

risposta sismica - definizioni

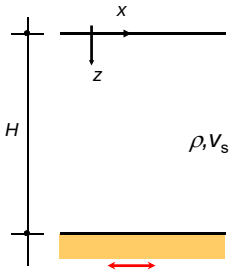


- condizioni monodimensionali

  onde SH - direzione di propagazione verticale



strato elastico lineare - smorzamento assente



equazione del moto $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_s^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$

soluzione

$$u(z,t) = \underbrace{A \cdot e^{i(\omega \cdot t - kz)}}_{\text{verso il basso}} + \underbrace{B \cdot e^{i(\omega \cdot t + kz)}}_{\text{verso l'alto}} \qquad k = \frac{\omega}{v}$$

in superficie:

$$z = 0 \rightarrow \tau(0,t) = 0 \rightarrow \left[\frac{\partial u}{\partial z}\right]_{z=0} = 0 \Rightarrow A = B$$

- moto alla base armonico

$$u = u_0 \cdot e^{i\omega t}$$

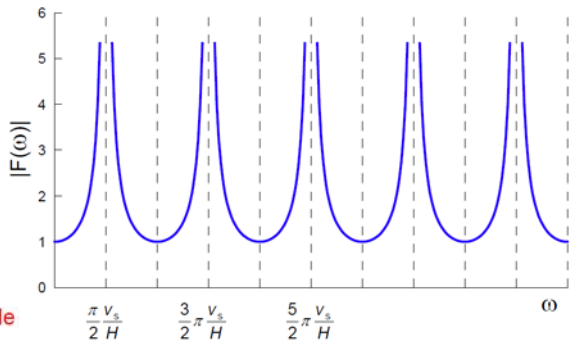
$$u(z,t) = A \cdot e^{i\omega \cdot t}\left(e^{ikz} + e^{-ikz}\right) = 2A \cdot e^{i\omega \cdot t} \cos kz = U(z) \cdot e^{i\omega \cdot t}$$

$$U(z) = 2A \cos kz$$

funzione di trasferimento

$$F(\omega) = \frac{u(0,t)}{u(H,t)} = \frac{2A \cdot e^{i\omega t}}{2A \cdot \cos kH \cdot e^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} = \frac{1}{\cos \frac{\omega H}{v_s}}$$

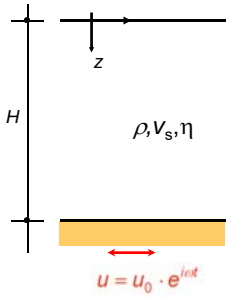
nota: $F(\omega) = \frac{u(0,t)}{u(H,t)} = \frac{\dot{u}(0,t)}{\dot{u}(H,t)} = \frac{\ddot{u}(0,t)}{\ddot{u}(H,t)}$



$\omega_1 = \frac{\pi}{2}\frac{v_s}{H}$ pulsazione fondamentale

$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{4H}{v_s}$ periodo caratteristico

strato elastico lineare - smorzamento presente



equazione del moto $\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\frac{\partial \tau}{\partial z}=G\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+\eta\frac{\partial^3 u}{\partial t\,\partial z^2}$

soluzione

$$u(z,t)=\underbrace{A\cdot e^{i(\omega\cdot t-k^*z)}}_{\text{verso il basso}}+\underbrace{B\cdot e^{i(\omega\cdot t+k^*z)}}_{\text{verso l'alto}}$$

$k^*=\frac{\omega}{v_s^*}=\omega\sqrt{\frac{\rho}{G^*}}$ numero d'onda complesso

$G^*=G+i\omega\eta=G(1+2i\xi)$ modulo di taglio complesso $\eta=\frac{2G}{\omega}\xi$

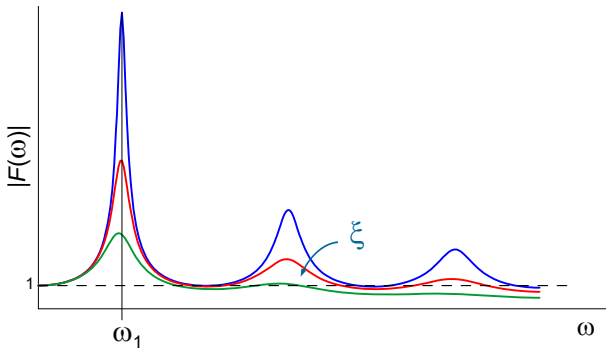
analogamente al caso di smorzamento assente:

$$u(z,t)=U(z)\cdot e^{i\omega\cdot t}$$

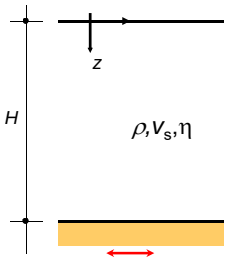
$$U(z)=2A\cos k^*z$$

funzione di trasferimento

$F(\omega)=\frac{u(0,t)}{u(H,t)}=\frac{1}{\cos k^*H}$ $\quad |F(\omega)|\approx\frac{1}{\sqrt{\cos^2 kH+(\xi kH)^2}}$



$\omega_1=\frac{\pi}{2}\frac{v_s}{H}$ pulsazione fondamentale $\quad T_1=\frac{2\pi}{\omega_1}=\frac{4H}{v_s}$ periodo caratteristico



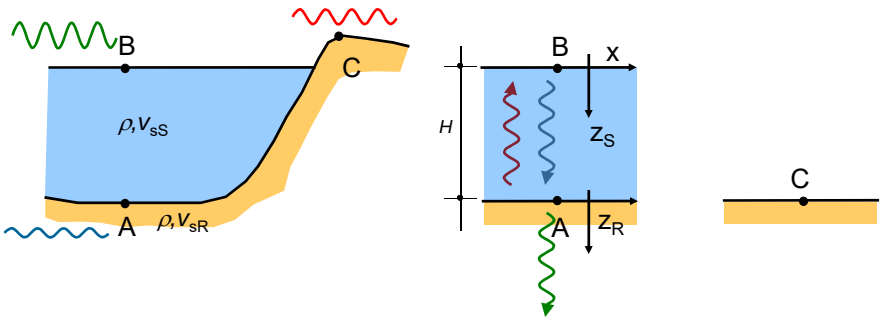
esempio: H = 30 m

$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{4H}{V_s}$ periodo caratteristico

V_s (m/s)	T_1 (s)	f_1 (Hz)
150	0.8	1.25
300	0.4	2.50
600	0.2	5.00
800	0.15	6.67

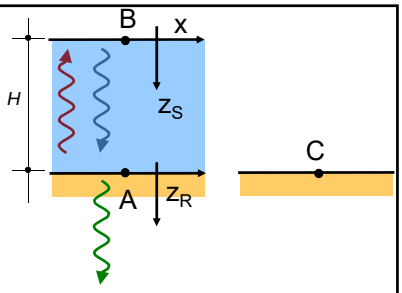
azione simica

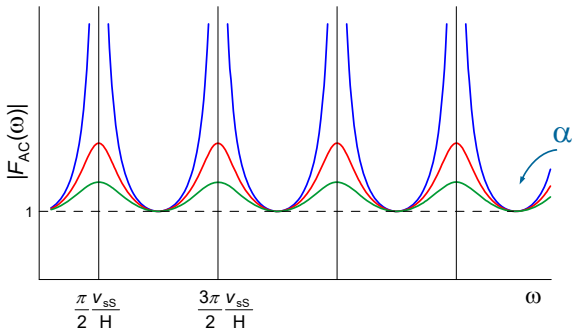
effetto della deformabilità del bedrock



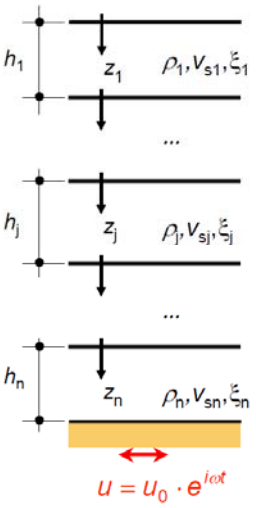
$$\alpha^* = \frac{\rho_S V_{sS}^*}{\rho_R V_{sR}^*}$$

se $\xi = 0$: $$|F_{BC}(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(\cos k_S H)^2 + (\alpha \cdot \text{sen}\, k_S H)^2}}$$





terreno stratificato



$$u_j(z,t) = A_j \cdot e^{i(\omega \cdot t - k_j^* z_j)} + B_j \cdot e^{i(\omega \cdot t + k_j^* z_j)}$$

compatibilità spostamenti

$$u_j(h_j,t) = u_{j+1}(0,t)$$

$$A_{j+1} + B_{j+1} = A_j e^{ik_j^* h_j} + B_j e^{-ik_j^* h_j}$$

$$\alpha_j^* = \frac{\rho_j V_{sj}^*}{\rho_{j+1} V_{sj+1}^*}$$

equilibrio

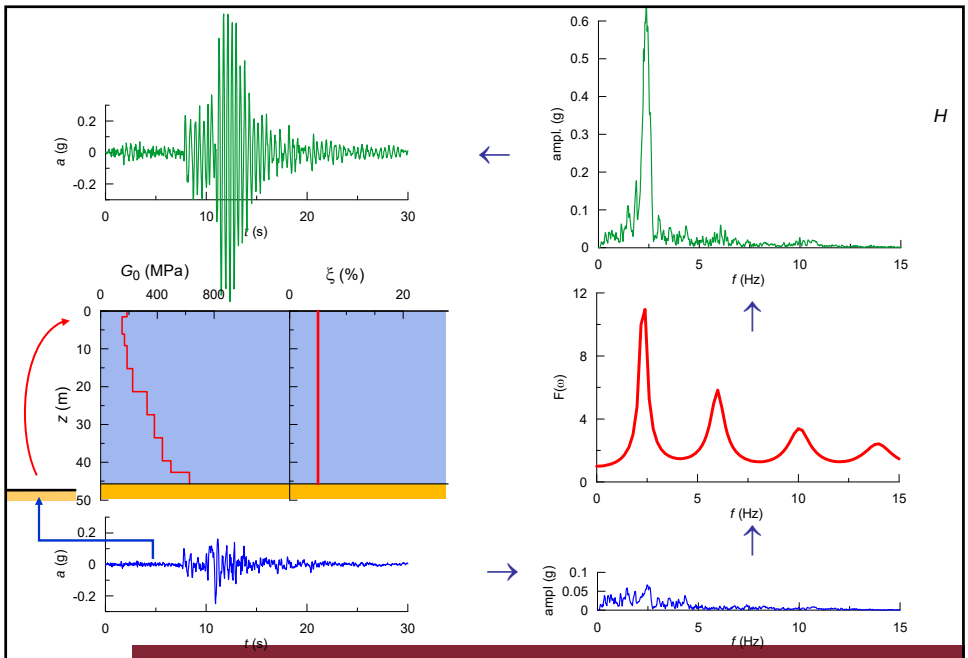
$$\tau_j(h_j,t) = \tau_{j+1}(0,t)$$

$$A_{j+1} - B_{j+1} = \alpha_j^* \left(A_j e^{ik_j^* h_j} - B_j e^{-ik_j^* h_j}\right)$$

sommando e sottraendo:

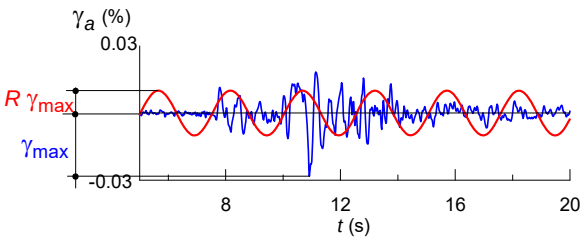
$$2A_{j+1} = A_j e^{ik_j^* h_j}\left(1+\alpha_j^*\right) + B_j e^{-ik_j^* h_j}\left(1-\alpha_j^*\right)$$

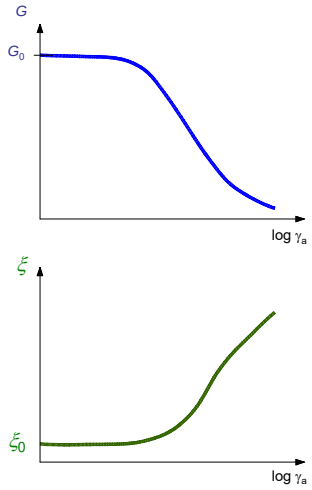
$$2B_{j+1} = A_j e^{ik_j^* h_j}\left(1-\alpha_j^*\right) + B_j e^{-ik_j^* h_j}\left(1+\alpha_j^*\right) \qquad (\ldots)$$



effetto della non linearità

G e ξ sono una funzione di γ_a





si definisce una deformazione efficace

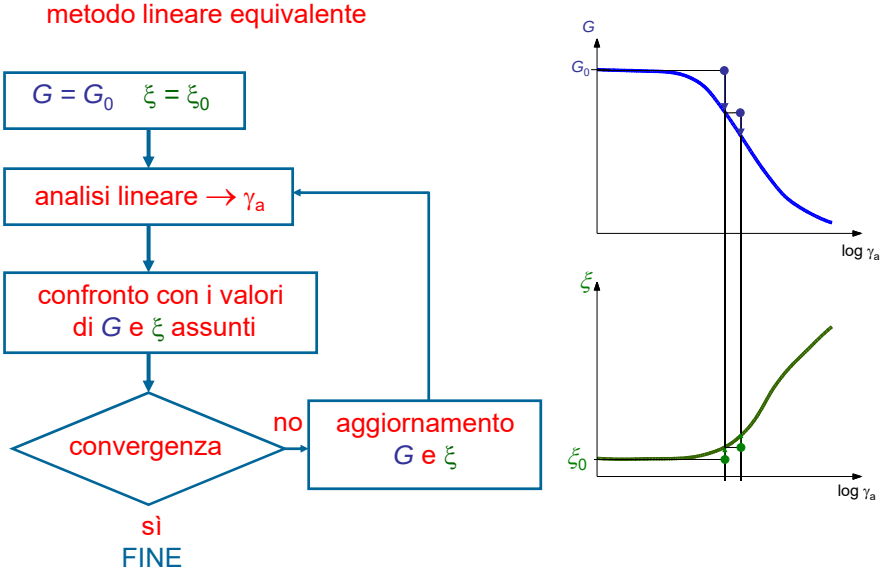
$\gamma_a = R\,\gamma_{max}$

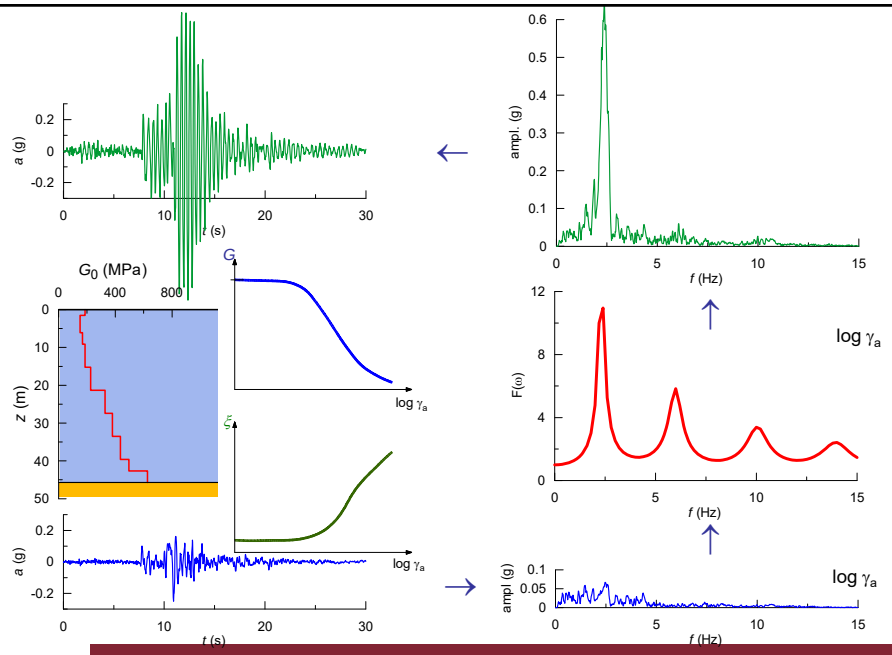
$$R = \frac{M-1}{10} \qquad R \approx 0.65$$

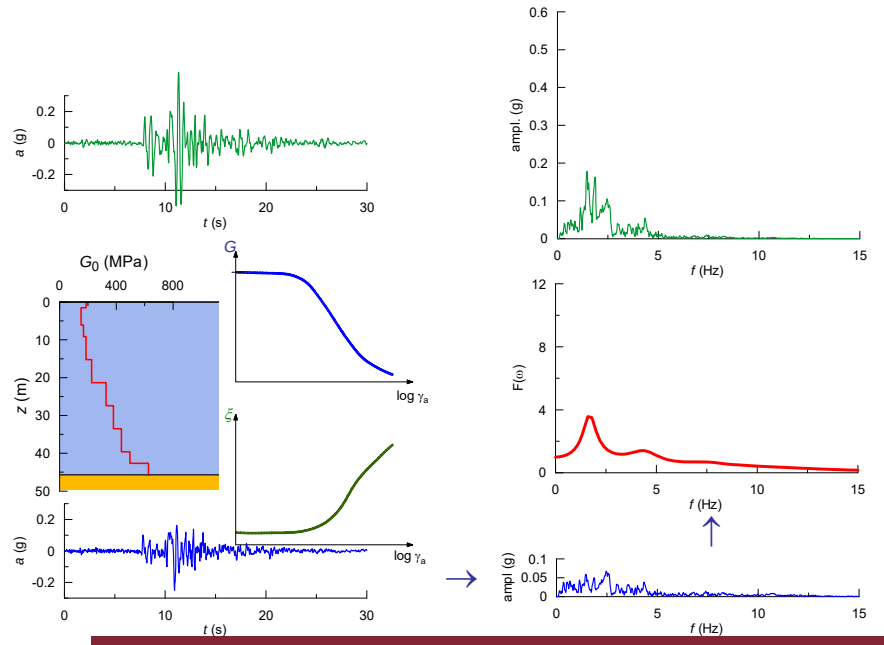
Idriss & Sun (1992)

effetto della non linearità

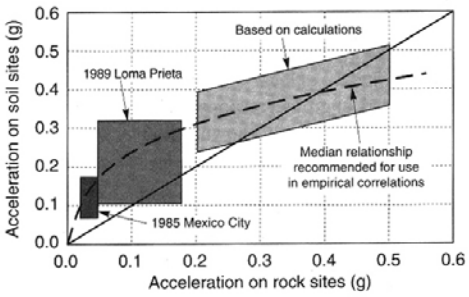
metodo lineare equivalente



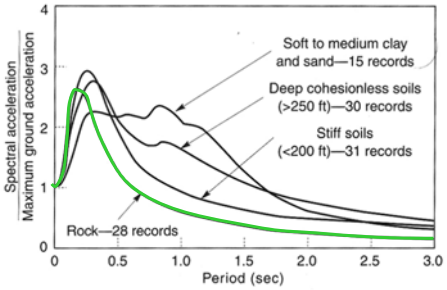




risposta sismica: amplificazione / deamplificazione



Idriss (1990)



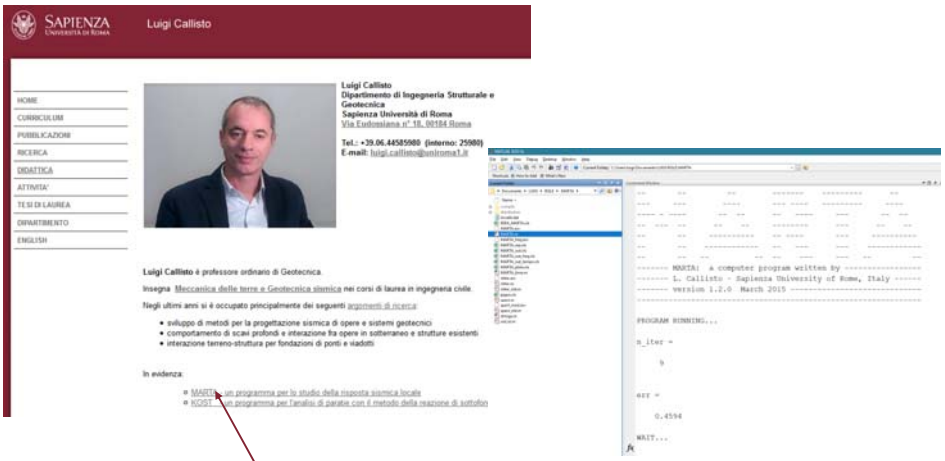
Seed et al. (1976)

metodo lineare equivalente - programmi di calcolo

SHAKE* (dal 1972)	Univ. of California, Berkeley
SHAKE 91*	Univ. of California, Davis
SHAKE 2000	SHAKE91 / Windows
ProSHAKE	SHAKE91 / Kramer
EERA*	Univ. Southern California

(*) freeware

http://luigicallisto.site.uniroma1.it



MARTA – un programma per lo studio della risposta sismica locale

scelta accelerogrammi

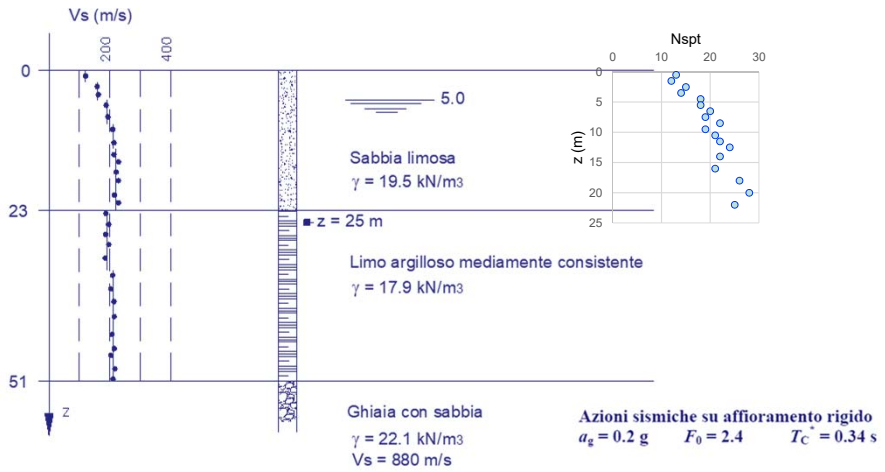
NTC 2018
EC8-5

L'uso di storie temporali del moto del terreno artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici.

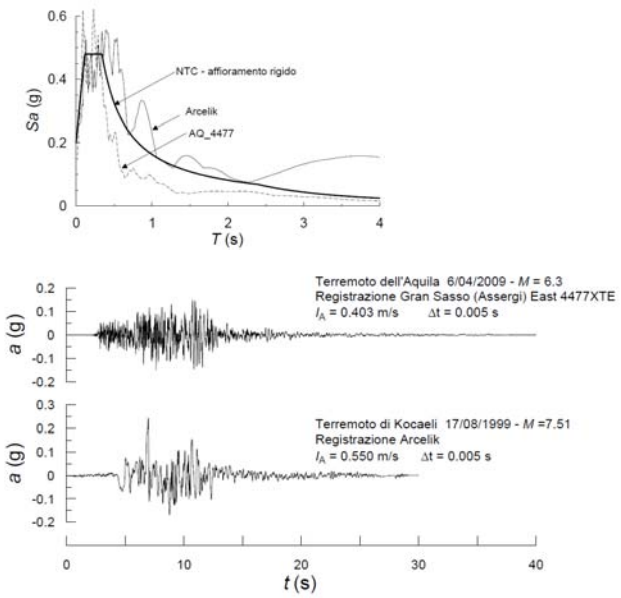
L'uso di storie temporali del moto del terreno generate mediante simulazione del meccanismo di sorgente e della propagazione è ammesso a condizione che siano adeguatamente giustificate le ipotesi relative alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente e del mezzo di propagazione e che, negli intervalli di periodo sopraindicati, l'ordinata spettrale media non presenti uno scarto in difetto superiore al 20% rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico.

L'uso di storie temporali del moto del terreno naturali o registrate è ammesso a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.

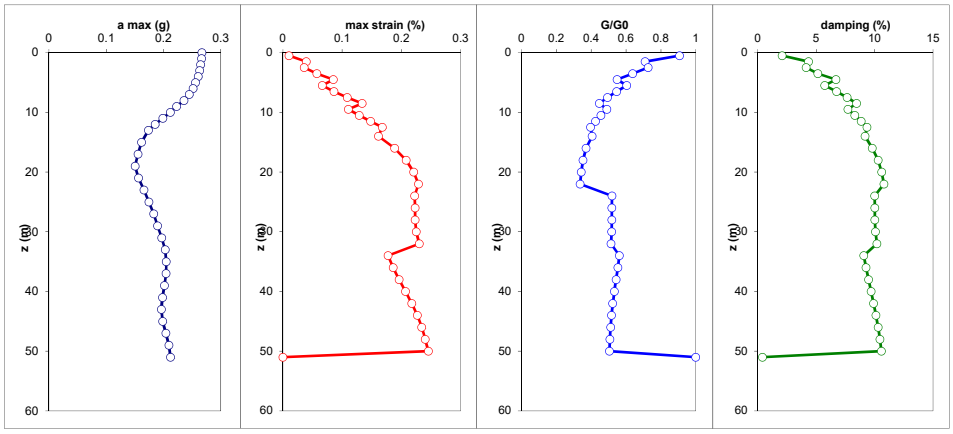
Le storie temporali del moto del terreno registrate devono essere selezionate e scalate in modo tale che i relativi spettri di risposta approssimino gli spettri di risposta elastici nel campo dei periodi propri di vibrazione di interesse per il problema in esame. Nello specifico la compatibilità con lo spettro di risposta elastico deve essere verificata in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi associati alle storie per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%. L'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% ed uno scarto in eccesso superiore al 30%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico in alcun punto dell'intervallo dei periodi propri di vibrazione di interesse per l'opera in esame per i diversi stati limite.

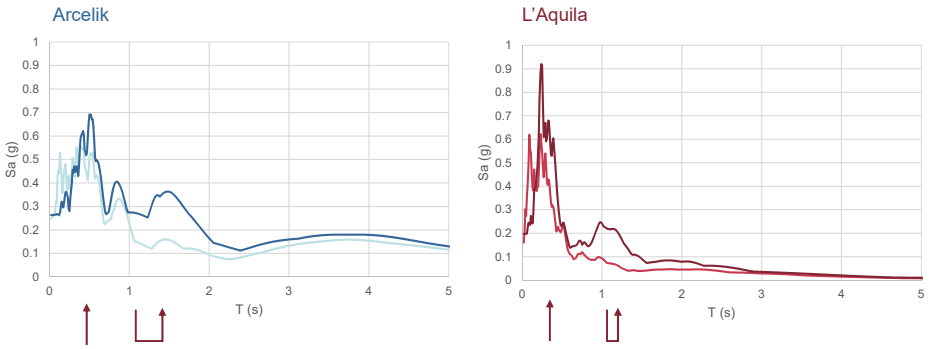


Azioni sismiche su affioramento rigido
$a_g = 0.2$ g $F_0 = 2.4$ $T_C^* = 0.34$ s



ESEMPIO USO MARTA





metodo lineare equivalente - limitazioni

durante ciascuna iterazione l'analisi è **lineare**:
le proprietà meccaniche G e ξ sono **costanti nel tempo**

non è possibile portare in conto:
- degradazione ciclica
- sviluppo di sovrappressioni interstiziali
- resistenza

adatto per:
- magnitudo limitata
- deformazioni inferiori alla soglia volumetrica

3.2.2 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Categorie di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S. I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_S per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

I valori di V_S sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

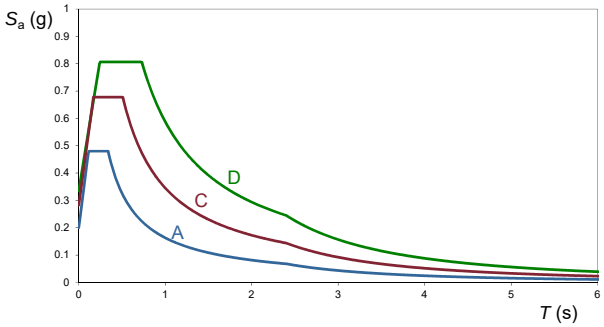
$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^{N} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \qquad [3.2.1]$$

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti*, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	*Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti* con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	*Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti*, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	*Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D*, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

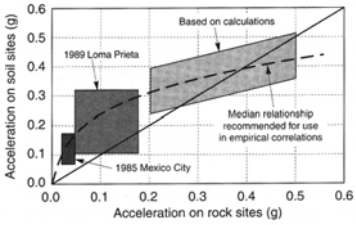
$a_{max}=S_S \times S_T \times a_g$

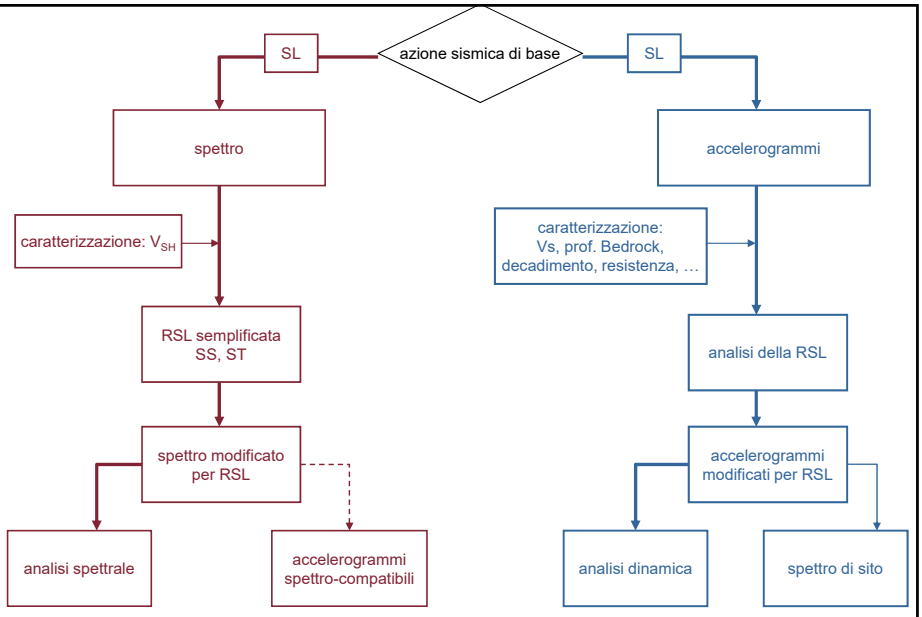
$T_C=C_C \times T_C^*$



Tab. 3.2.IV – *Espressioni di S_S e di C_C*

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1{,}00 \le 1{,}40 - 0{,}40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}20$	$1{,}10 \cdot (T_C^*)^{-0{,}20}$
C	$1{,}00 \le 1{,}70 - 0{,}60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}50$	$1{,}05 \cdot (T_C^*)^{-0{,}33}$
D	$0{,}90 \le 2{,}40 - 1{,}50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}80$	$1{,}25 \cdot (T_C^*)^{-0{,}50}$
E	$1{,}00 \le 2{,}00 - 1{,}10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \le 1{,}60$	$1{,}15 \cdot (T_C^*)^{-0{,}40}$

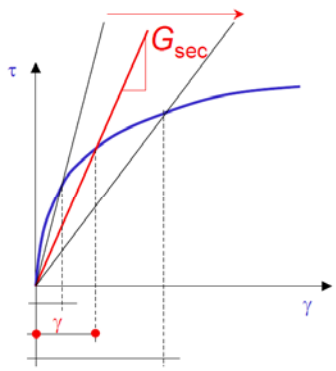


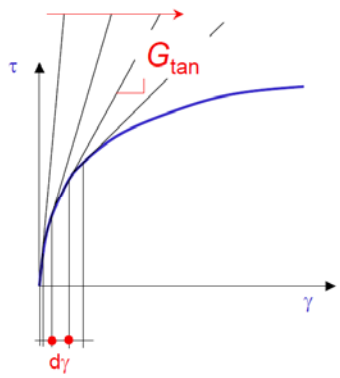


analisi della risposta sismica locale

uso di modelli non lineari

soluzione di un problema non lineare





procedura iterativa
rigidezza secante

procedura incrementale
rigidezza tangente

uso di modelli non lineari

es. modello iperbolico, modello di Ramberg & Osgood

non è valida l'ipotesi di sovrapponibilità degli effetti

integrazione numerica dell'equazione del moto

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

equilibrio

$u(z,t)$

$\tau(z,t)$

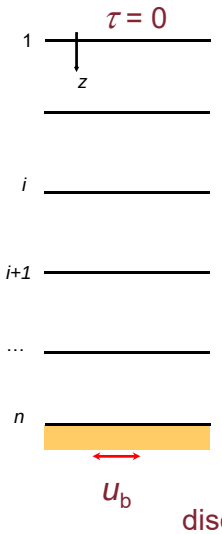
$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\tau_{i+1,t} - \tau_{i-1,t}}{2\Delta z}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{u_{i,t+\Delta t} - u_{i,t} + u_{i,t-\Delta t}}{\Delta t^2}$$

$$u_{i,t+\Delta t} = 2u_{i,t} - u_{i,t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2\rho\Delta z}\left(\tau_{i+1,t} - \tau_{i-1,t}\right)$$

terreno stratificato

$$u_{i,t+\Delta t} = 2u_{i,t} - u_{i,t-\Delta t} + \frac{\Delta t^2}{2\rho\Delta z}\left(\tau_{i+1,t} - \tau_{i-1,t}\right)$$



t = costante

integrazione dal basso

- determinazione u_i
- determinazione γ_i $\quad \gamma_i = \frac{u_{i+1,t} - u_{i-1,t}}{2\Delta z}$
- determinazione $\tau_i = f(\gamma_i)$ ← legame costitutivo
- nuovo tempo $t+\Delta t$

discretizzazione spaziale: $\Delta z < \frac{\lambda}{6}$

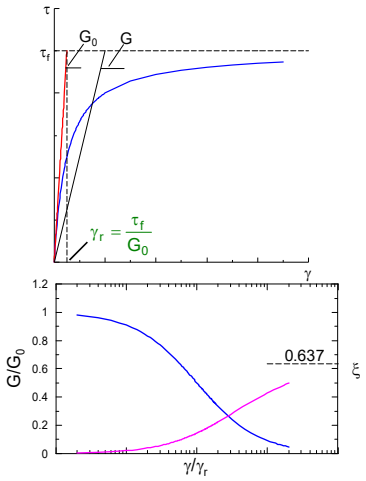
ESEMPIO USO ROSA

CALIBR.p Gamma_ref = 0.1 %

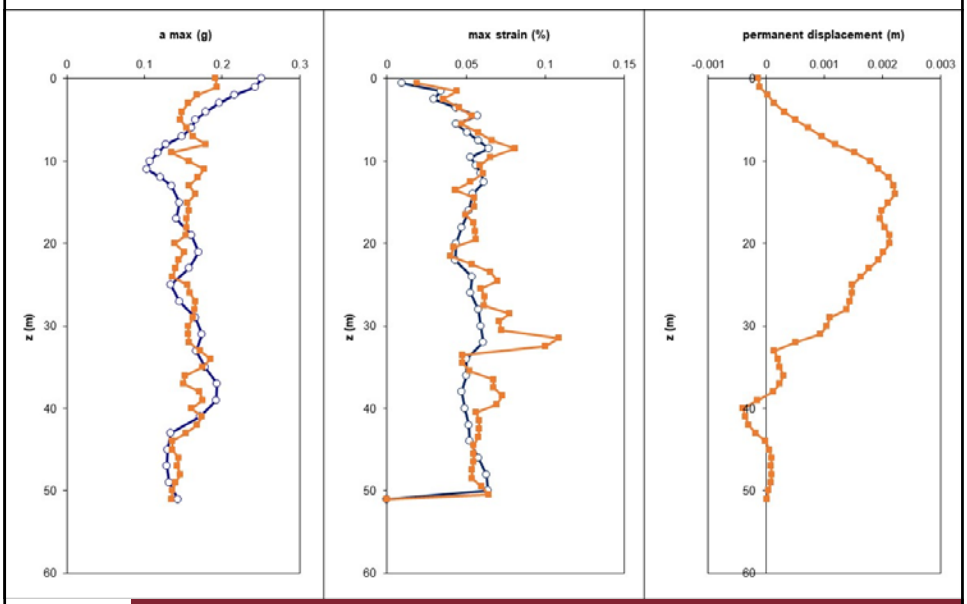
Rosa_inp.xls

Rosa.p

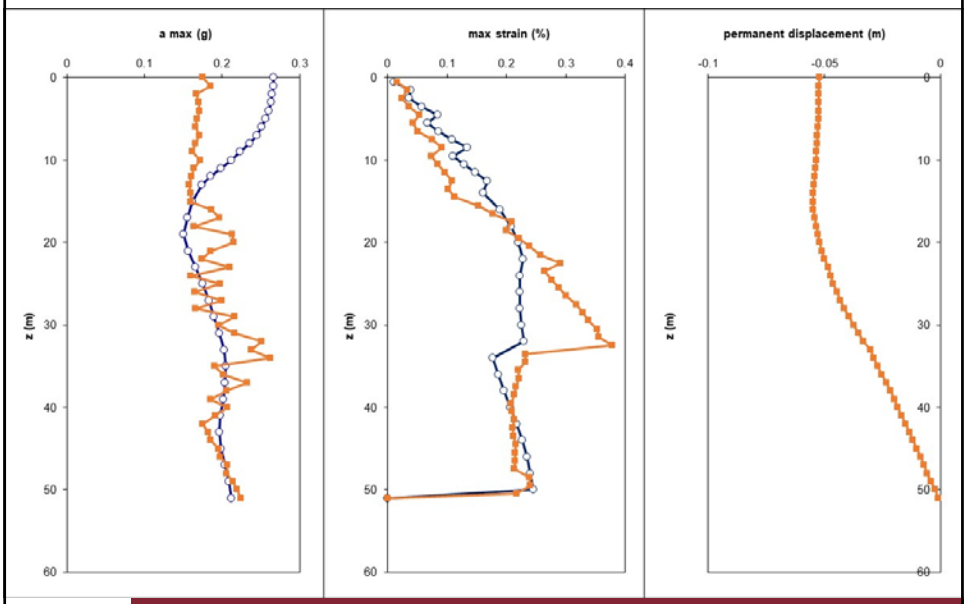
Rosa_out.xls



L'Aquila

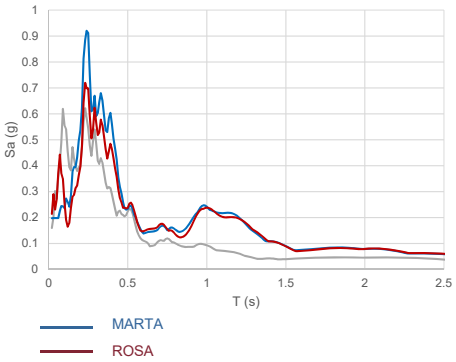


Arcelik

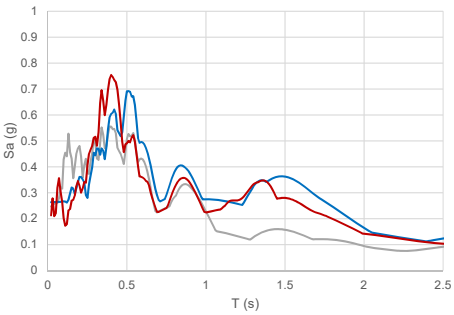


confronto a z = 3m

L'Aquila

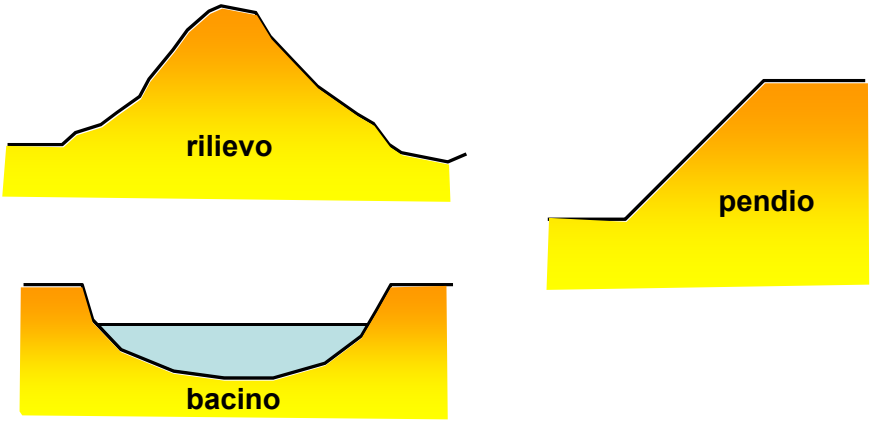


Arcelik



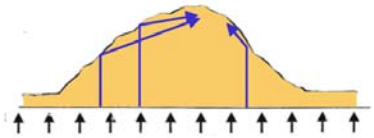
effetti topografici

deviazioni dalle condizioni monodimensionali

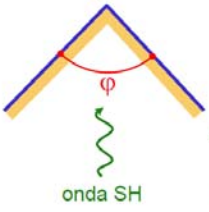


rilievo

focalizzazione delle onde sismiche

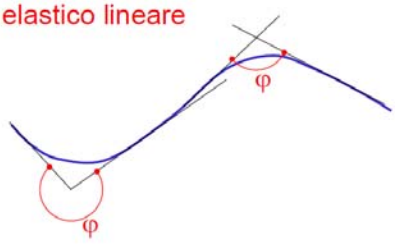


cuneo omogeneo - mezzo elastico lineare

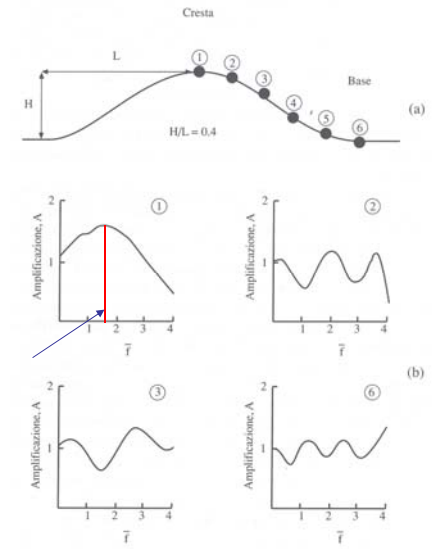


amplificazione

$$A = \frac{2\pi}{\varphi}$$



risultati di analisi 2-D



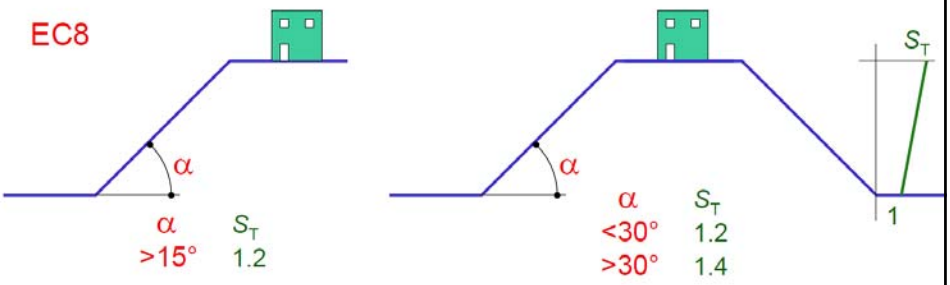
amplificazione in cresta

amplificazione / attenuazione lungo i fianchi

$$\bar{f} = \frac{2L}{\lambda} = f\frac{2L}{v_s}$$

Geli et al. 1988

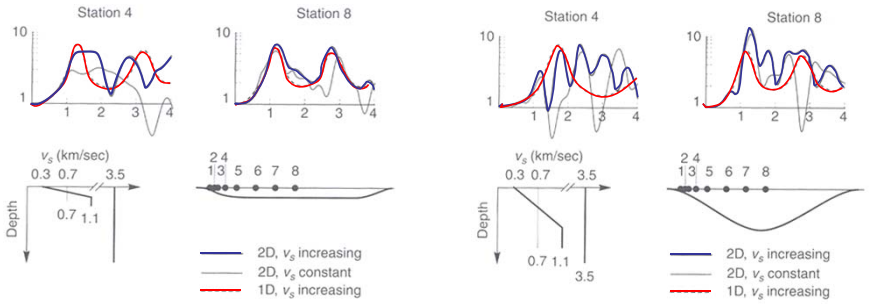
EC8



α	S_T
>15°	1.2

α	S_T
<30°	1.2
>30°	1.4

risultati di analisi 2-D



Bard & Gabriel 1986

analisi della risposta sismica locale
modelli bidimensionali e tridimensionali

logica disaccoppiata

analisi risposta sismica
(modello lineare equivalente)

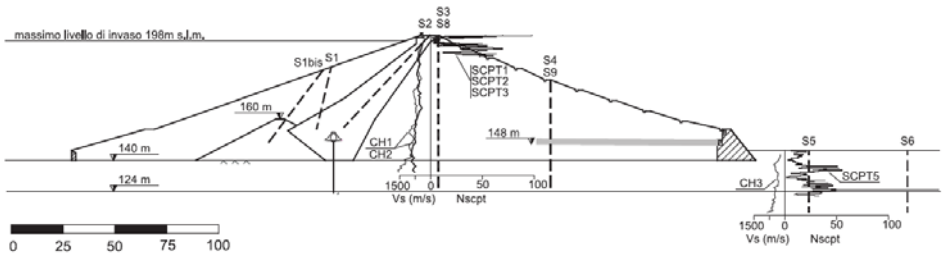
↓

calcolo di azioni equivalenti

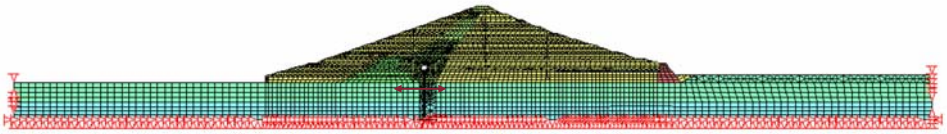
↓

analisi dell'opera
(mezzo plastico)

logica disaccoppiata – studio di una diga in terra



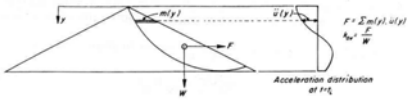
analisi risposta sismica

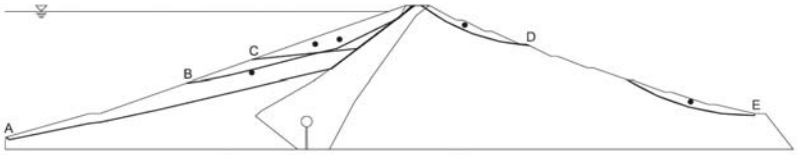


QUAKE/W

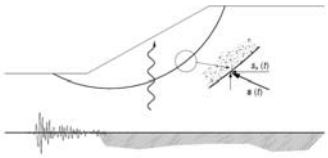
logica disaccoppiata – studio di una diga in terra

valutazione accelerogrammi equivalenti

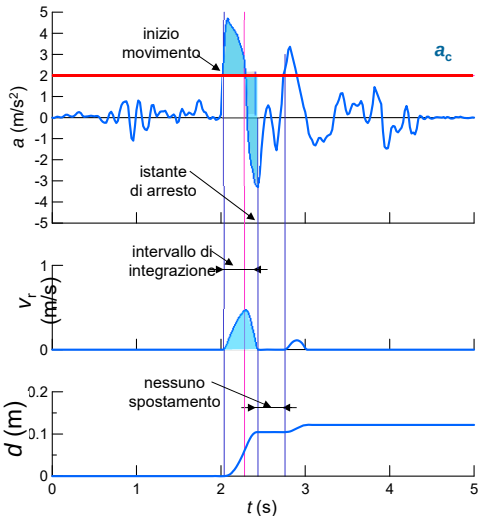




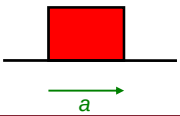
$$a_{ave}(t)=\frac{\sum\left[F_x(t)-F_{x,st}\right]}{m}$$

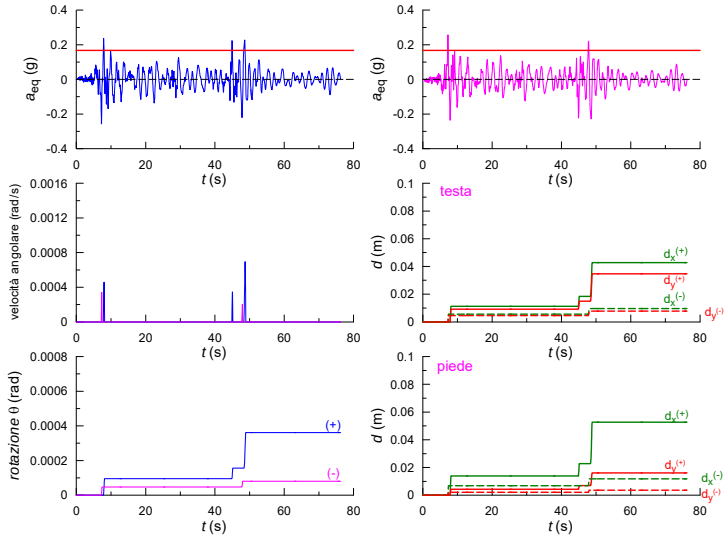


logica disaccoppiata – studio di una diga in terra



valutazione degli spostamenti (mezzo rigido-perfettamente plastico)



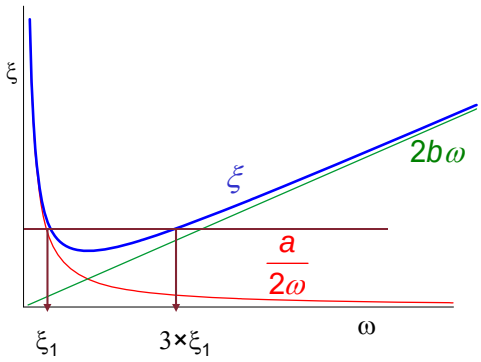


modelli elasto-plastici
smorzamento aggiuntivo (Rayleigh)

equazione del moto $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\mathbf{l}\ddot{u}_B$

matrice di smorzamento $\mathbf{C} = a \cdot \mathbf{M} + b \cdot \mathbf{K}$

$$\xi = \frac{a}{2\omega} + 2b\omega$$



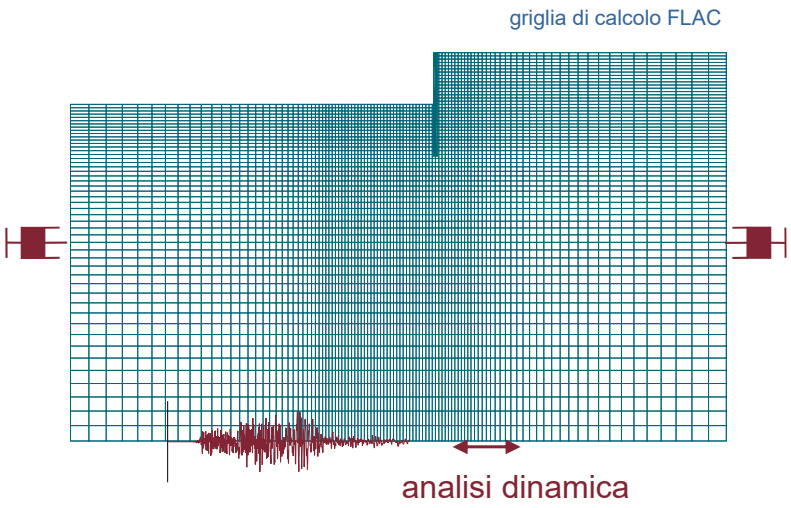
logica accoppiata

analisi dinamica diretta

+

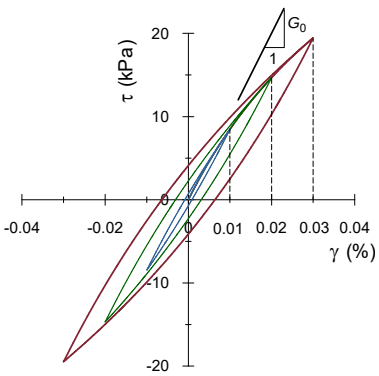
modelli costitutivi non lineari

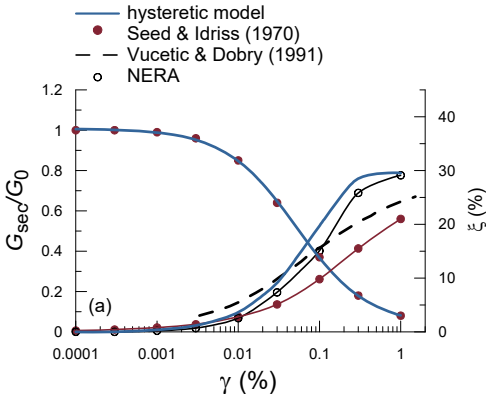
logica accoppiata – risposta sismica di un'opera di sostegno

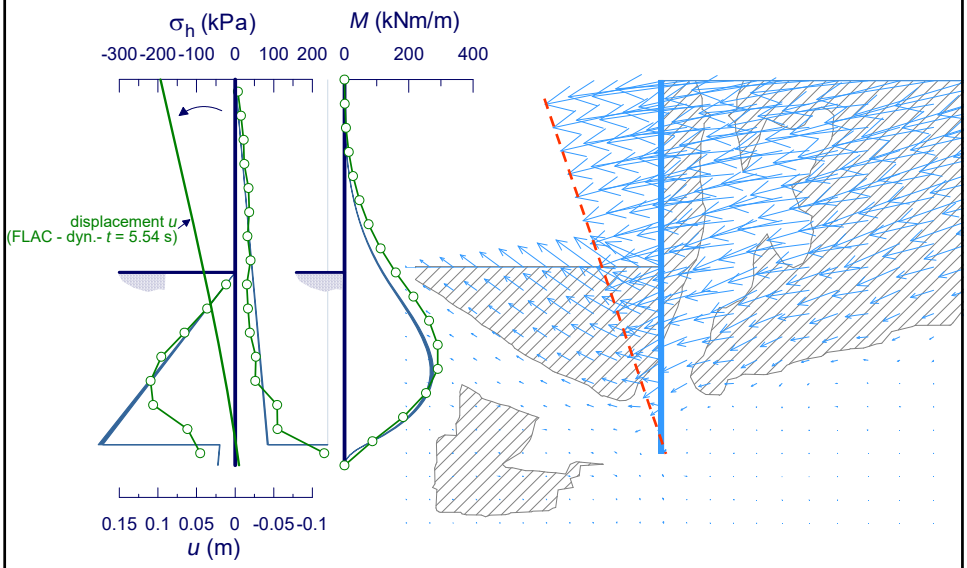


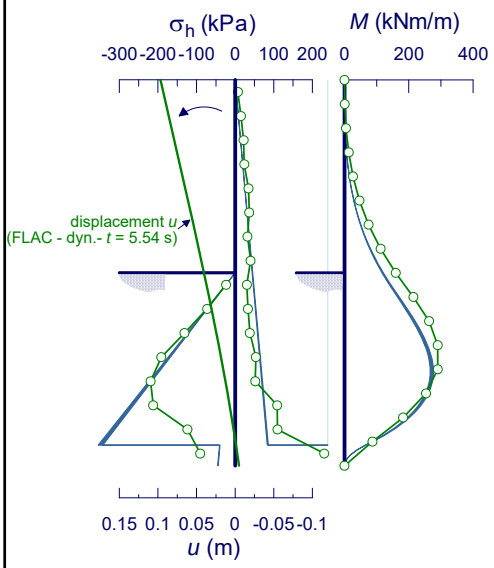
terreni: modello isteretico

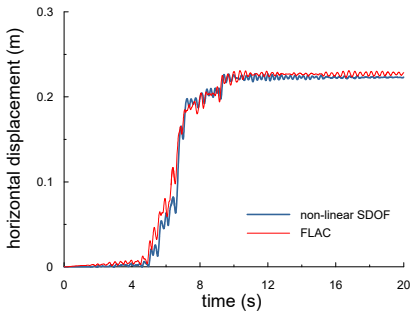
- modifica rigidezza tangente
- inversione delle deformazioni → Masing
- criterio di resistenza di Mohr-Coulomb



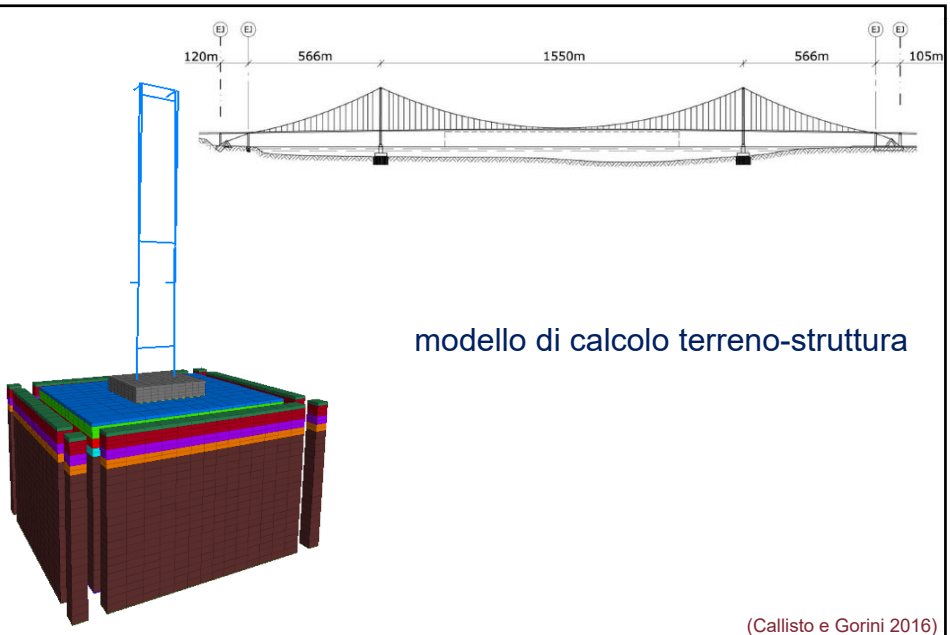








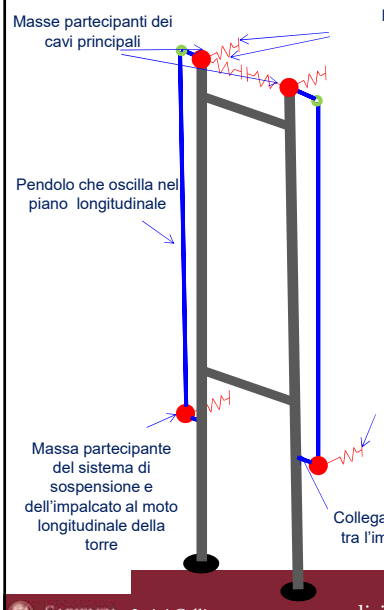
logica accoppiata – analisi sismica di un ponte sospeso



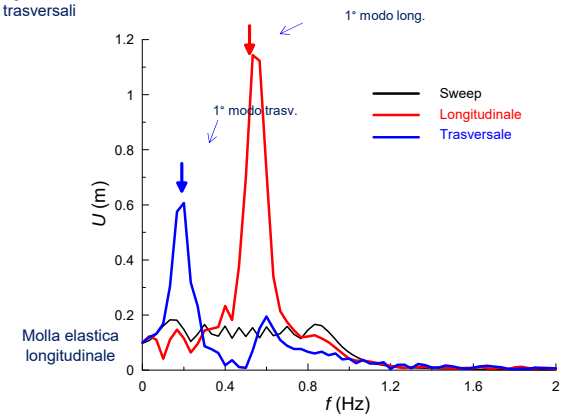
modello di calcolo terreno-struttura

(Callisto e Gorini 2016)

modello di torre equivalente

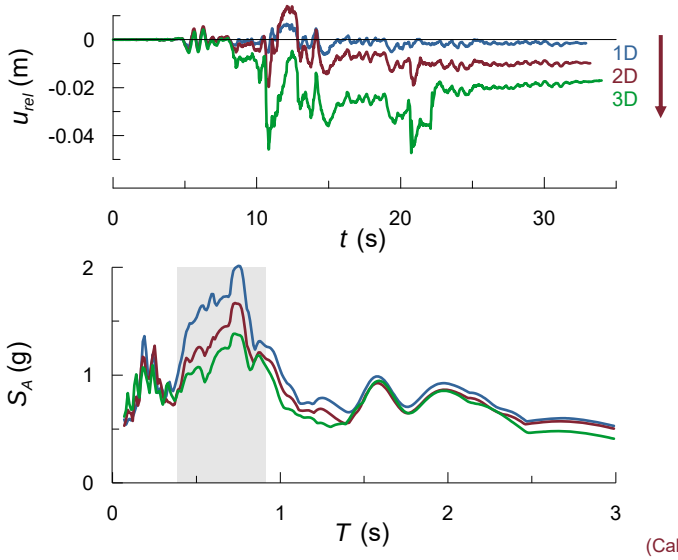


identificazione



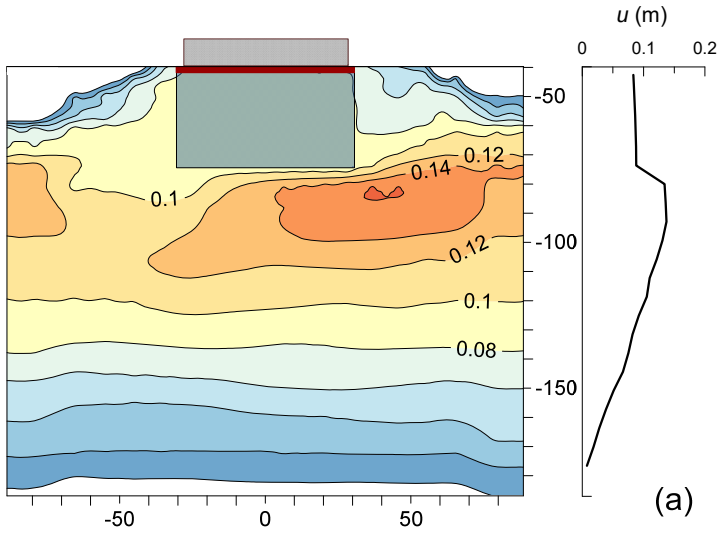
(Callisto e Gorini 2016)

risultati (NCE) effetto delle componenti del moto



(Callisto e Gorini 2016)

risultati (NCE) spostamenti finali



(Callisto e Gorini 2016)