

Modellazione della Risposta Sismica Locale

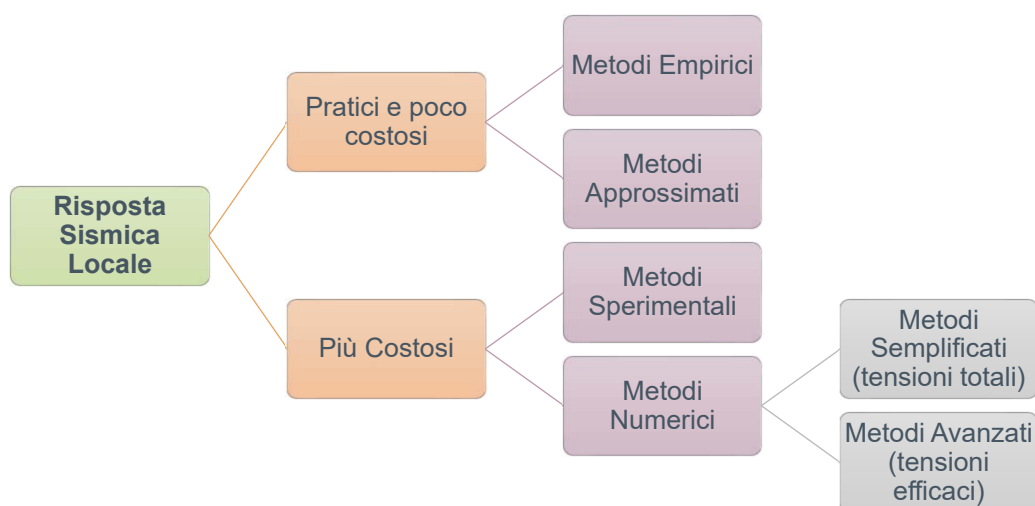
Sembra semplice



Ing. Roberto Di Girolamo
Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
Skype: roberto.di.girolamo – canale telegram: https://t.me/RSL_SISMA2016
<http://www.robertodigirolamo.engineer> – info@robertodigirolamo.engineer
port.: +393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

1

Modellazione della risposta sismica locale



Lanzo, Rielaborazione slide corso

2

Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B - 62032 Camerino (MC)
 http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
 +393356394081 - rdigirolamo66@gmail.com



Metodi Empirici

3

Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B - 62032 Camerino (MC)
 http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
 +393356394081 - rdigirolamo66@gmail.com



Metodi Empirici

Relazione di Ambresys et altri (1966)

$$\log(GMP) = b_1 \cdot b_2 \cdot M_S + b_3 \cdot \log \sqrt{d^2 + h^2} + b_A \cdot S_A + B_S \cdot S_S \pm \sigma$$

b_1, b_2, b_3, h : costanti determinate attraverso regressione di dati sperimentali (registrazioni accelerometriche);

σ : deviazione standard
 GMP : Parametro sismico
 M_S : Magnitudo
 d : distanza minima fra punto e superficie di rottura
 S_A, S_S : coefficienti di sito

Lanzo, Rielaborazione slide corso
 4



Metodi Empirici

Normativa Sismica Italiana:

Accelerazione massima attesa al sito:

$$S = S_S S_T$$

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

S_S = Coefficiente di amplificazione stratigrafica

S_T = Coefficiente di amplificazione topografica

Lanzo, Rielaborazione slide corso

5



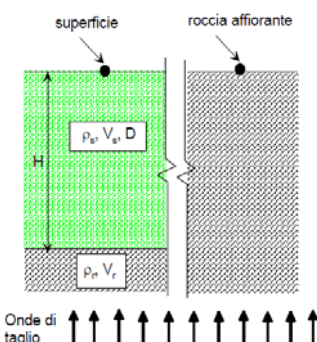
Metodi Approssimati

6

Metodi Approssimati

Relazioni ricavate sulla base di soluzioni analitiche del problema della RSL in condizioni semplici per geometria e proprietà meccaniche.

Caso 1D - deposito di terreno omogeneo visco-elastico lineare su substrato elastico soggetto ad onde di taglio ad incidenza verticale.



descrizione	formulazione	commento
1 media pesata delle Vs	$V = (\sum_{i=1}^{i=n} V_i H_i) / H$ $T_0 = 4H / \bar{V}$	Leggera sovrastima (10-15%)
2 media pesata del modulo di taglio e della densità	$\bar{G} = (\sum_{i=1}^{i=n} G_i H_i) / H$ $\bar{\rho} = (\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i H_i) / H$ $T_0 = 4H / \sqrt{\bar{G} / \bar{\rho}}$	Leggerissima sovrastima (5%)
3 Somma dei periodi naturali di ogni strato	$T_0 = \sum_{i=1}^{i=n} 4H_i / V_i$	Ampia sovrastima 25-30%
4 Approssimazione lineare della forma modale fondamentale	$\omega_4^2 = (3 \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2 H_i) / H_3$ $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_4}$	Leggerissima sovrastima (5%)

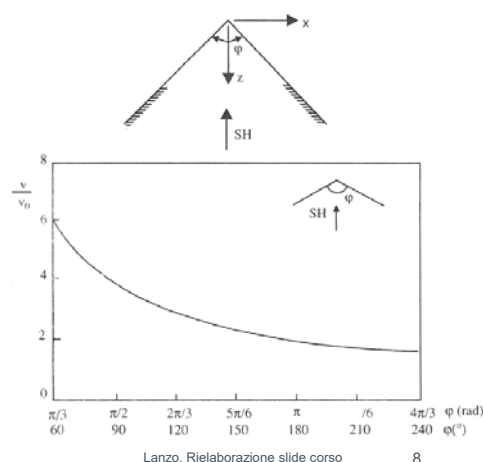
Metodi Approssimati

Caso bidimensionale

cuneo indefinito, costituito da un materiale elastico, omogeneo e isotropo, soggetto ad onde incidenti verticalmente di tipo SH.

Fattore di amplificazione

$$A_t = \frac{v}{v_0} = \frac{2\pi}{\varphi}$$



Lanzo, Rielaborazione slide corso

8



Metodi Sperimentali

9

Metodi Sperimentali

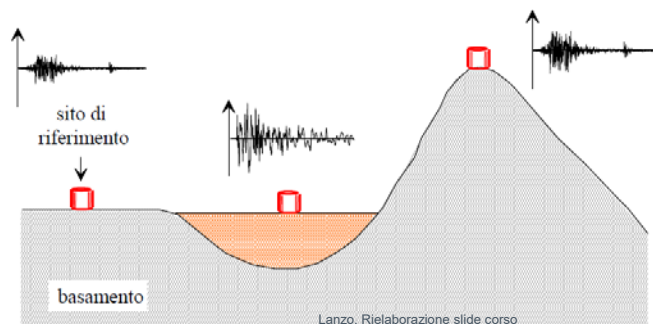


Analisi attraverso rapporti spettrali delle registrazioni di segnali sismici che possono essere generati da:

- terremoti ad elevato contenuto energetico (strong motion)
- terremoti deboli (weak motion)
- sorgenti sismiche artificiali (esplosioni)
- disturbi ambientali e naturali (microtremori)

sito di riferimento ideale

affioramento piano del basamento roccioso privo di effetti di sito (sia stratigrafici che topografici)

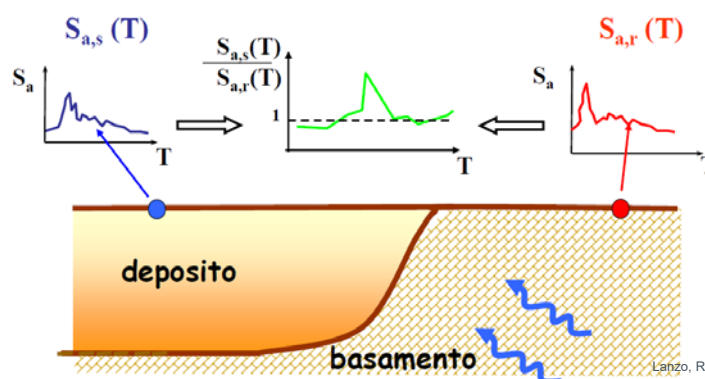


Lanzo, Rielaborazione slide corso

Metodi Sperimentali

Tecnica SSR (Standard Spectral Ratio)

Rapporto tra lo spettro di Fourier o lo spettro di risposta relativo al sito da caratterizzare e quello relativo ad un sito roccioso di riferimento, per la stessa componente del moto e per lo stesso evento sismico.

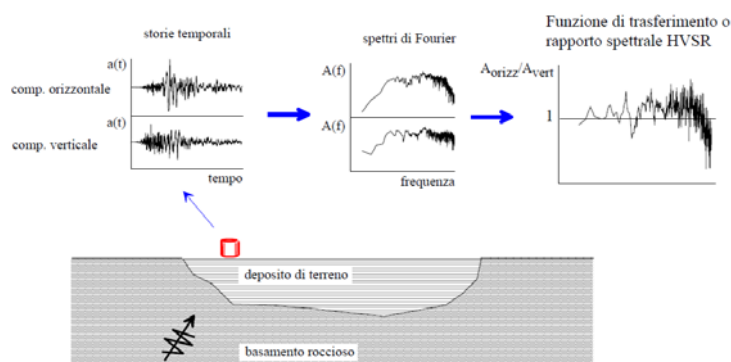


Lanzo, Rielaborazione slide corso 11

Metodi Sperimentali

Tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)

E' una tecnica più molto impiegata e consiste nel calcolare il rapporto tra gli spettri di Fourier della componente orizzontale e di quella verticale del moto in una data stazione con riferimento ad un dato evento.



Lanzo, Rielaborazione slide corso 12



Metodi Sperimentali

Tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)

Applicazione dei microtremori (metodo Nakamura)

- › Manca di una robusta e univocamente accettata giustificazione teorica.
- › Le tecnica HVSR si mostra generalmente efficace nella previsione della **frequenza fondamentale del sito**.
- › Le tecnica HVSR **non può essere usata per stime quantitative dell'amplificazione**.
- › La tecnica HVSR fornisce valori dell'amplificazione comparabili con quelli della SSR solo nei casi di stratificazione orizzontale e assenza di significative variazioni geometriche laterali.

13



Metodi Numerici

14

Metodi Numerici

I metodi numerici consentono di modellare in maniera dettagliata situazioni molto complesse per **morfologia superficiale e/o profonda**.

I metodi numerici consentono di modellare il comportamento dei terreni **non linearità** inclusa.

I metodi numerici richiedendo in ingresso una **conoscenza dettagliata del sito**.

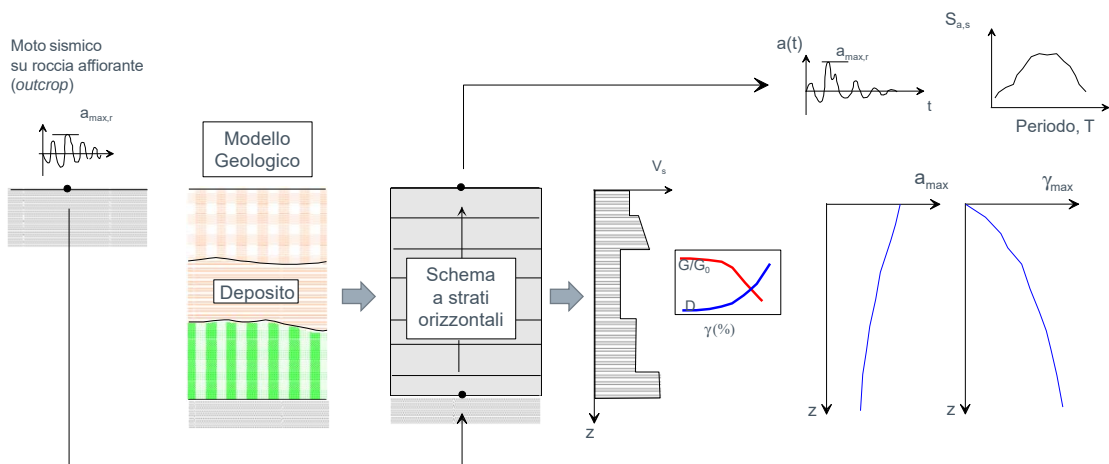
I metodi numerici richiedendo una conoscenza delle proprietà geotecniche dei terreni, **leggi sforzi-deformazioni in campo ciclico**.

I metodi numerici necessitano da parte dell'utilizzatore di una piena consapevolezza delle potenzialità e delle limitazioni del modello numerico utilizzato.

15

Metodi Numerici

Analisi 1D



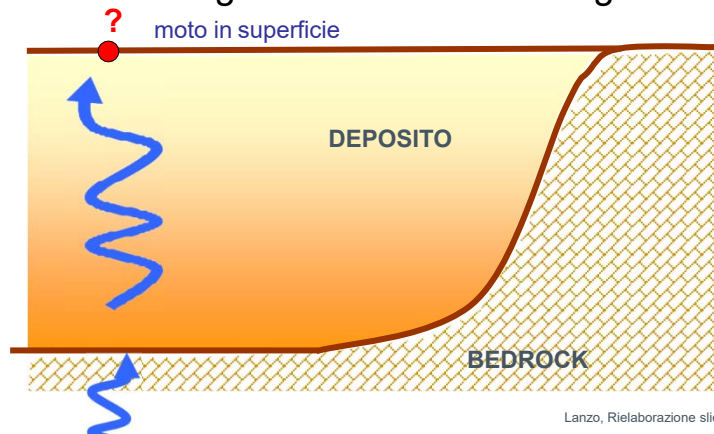
Lanzo, Rielaborazione slide corso

16

Metodi Numerici

Analisi 2D

Simulano la propagazione delle onde sismiche dal basamento all'interno del deposito in situazioni complesse dal punto di vista della geometria e della stratigrafia.



Lanzo, Rielaborazione slide corso

17

Risposta Sismica Locale 1D

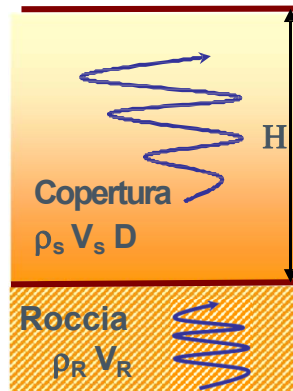
18

RSL – Modello 1D

Parametri Geometrici

Copertura:

H = altezza della copertura



Parametri Fisici e Meccanici:

Copertura:

ρ_s = densità
 V_s = velocità onde di taglio
 $\rho_s V_s$ = impedenza sismica
 D = fattore di smorzamento

Roccia:

ρ_R = densità
 V_R = velocità onde di taglio
 $\rho_R V_R$ = impedenza sismica

$$I = \frac{\rho_R V_R}{\rho_s V_s} \quad \text{Rapporto di impedenza}$$

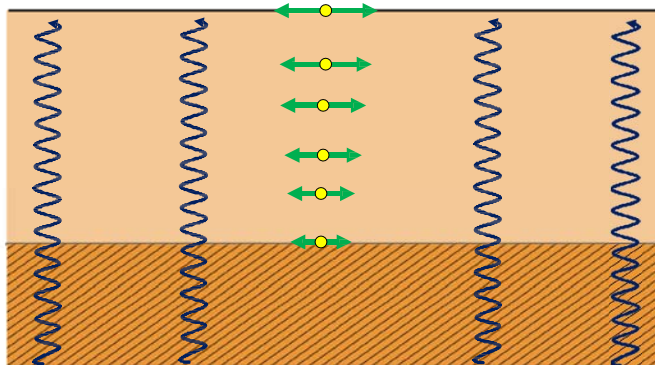
Lanzo, Rielaborazione slide corso

19

RSL – Modello 1D

Ipotesi semplificativa sul moto incidente:

la modellazione numerica della risposta sismica locale è generalmente effettuata nell'ipotesi di onde S che si propagano con direzione verticale all'interno di un deposito poggiante sul basamento.



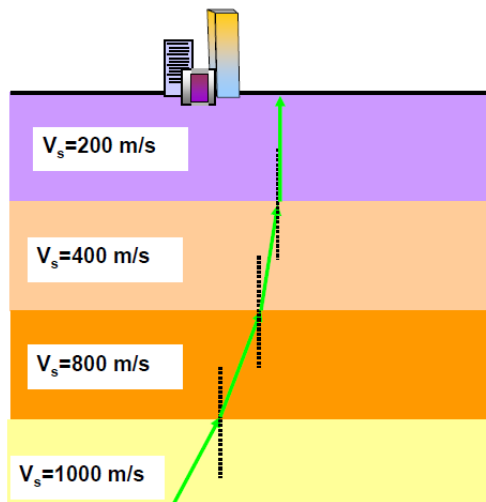
Onde di taglio con direzione di propagazione verticale

Lanzo, Rielaborazione slide corso

20

RSL – Modello 1D

Ipotesi semplificativa sul moto incidente:



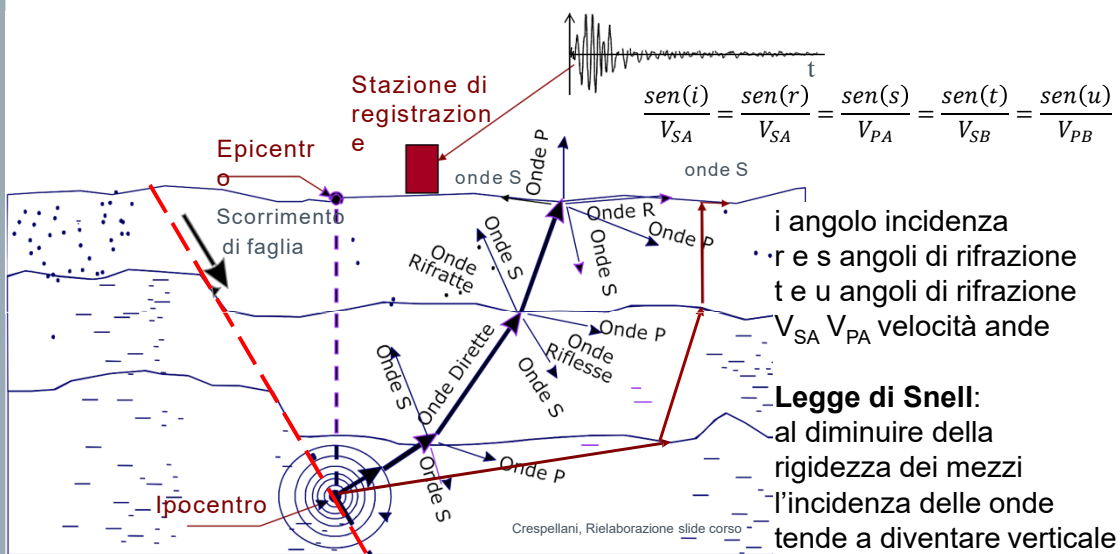
Legge di Snell:
al diminuire della
rigidezza dei mezzi
l'incidenza delle onde
tende a diventare verticale

Lanzo, Rielaborazione slide corso

21

RSL – Modello 1D

Ipotesi semplificativa sul moto incidente:



Crespellani, Rielaborazione slide corso

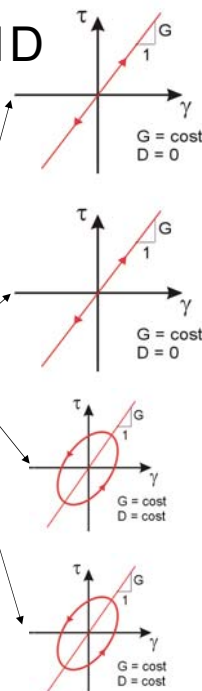


Schemi ideali 1D

23

RSL – Modello 1D

Possibili schemi di
sottosuolo ideale:



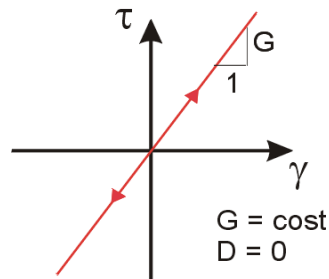
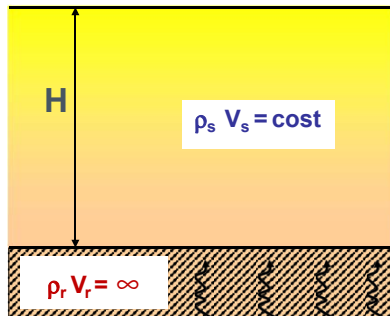
G= cost D=0	1	Strato elastico omogeneo	Substrato rigido
G= cost D=0	2	Strato elastico omogeneo	Sub. deformabile
G= cost D=cost	3	Strato visco-elastico omogeneo	Substrato rigido
G= cost D=cost	4	Strato visco-elastico omogeneo	Sub. deformabile

Lanzo, Rielaborazione slide corso

24

RSL – Modello 1D

1. Strato omogeneo elastico su substrato rigido



onda S incidente sinusoidale di pulsazione $\omega=2\pi f$
 basamento roccioso indeformabile
 terreno a comportamento elastico lineare

Lanzo, Rielaborazione slide corso

25

RSL – Modello 1D

1. Strato omogeneo elastico su substrato rigido

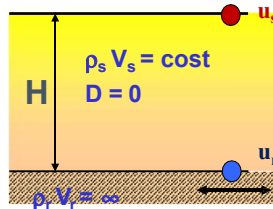
Il caso illustrato pur nella sua semplicità, mette in evidenza:

- › La risposta di un deposito di terreno è influenzato dalla frequenza della eccitazione armonica;
- › Le frequenze in corrispondenza si verificano elevate amplificazioni dipendono dalla geometria (spessore) e dalle caratteristiche fisico-meccaniche (velocità delle onde di taglio) del deposito;
- › La situazione più pericolosa si ha quando l'eccitazione armonica è pari a quella dello strato.

26

RSL – Modello 1D

1. Strato omogeneo elastico su substrato rigido



$$A_r(\omega) = \frac{u_{s,\max}}{u_{r,\max}} \quad A_r(\omega) = \frac{a_{s,\max}}{a_{r,\max}}$$

Se il moto di input è armonico, anche il moto in superficie è armonico. Il rapporto tra spostamenti è uguale al rapporto fra le accelerazioni.

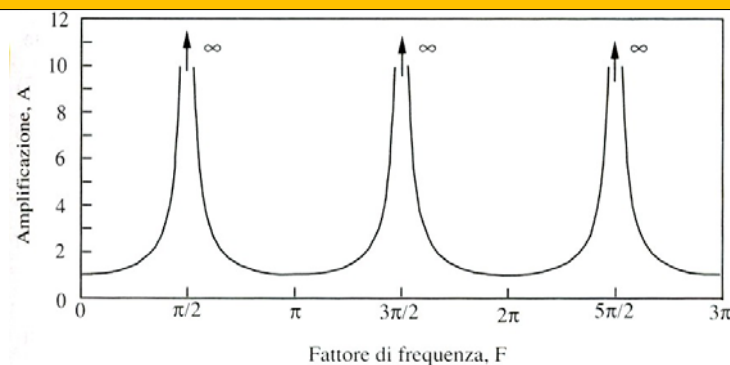
Funzione di amplificazione:
$$A_r(\omega) = \frac{1}{\cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)}$$

Lanzo, Rielaborazione slide corso

27

RSL – Modello 1D

1. Strato omogeneo elastico su substrato rigido



- › A_r ha valori uguali o maggiori dell'unità;
- › A_r vale infinito ad alcuni valori di frequenza;

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{2\pi H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right) \quad n=0,1,2 \dots \infty$$

Lanzo, Rielaborazione slide corso

28

RSL – Modello 1D

1. Strato omogeneo elastico su substrato rigido

Le frequenze corrispondenti ai massimi della funzione di amplificazione si chiamano frequenze naturali di vibrazione dello strato:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{2\pi H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right) \quad n=0,1,2 \dots \infty$$

Analogamente si possono definire i periodi naturali di vibrazione dello strato:

$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{4H}{V_s(2n+1)}$$

$$\text{Primo modo: } T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{4H}{V_s}$$

Lanzo, Rielaborazione slide corso

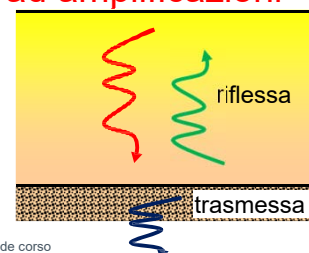
29

RSL – Modello 1D

2. Strato elastico su substrato deformabile

Le onde che si propagano verso il basso, a seguito della riflessione sulla superficie del terreno, **sono in parte riflesse all'interno dello strato** e in parte trasmesse nella roccia sottostante (smorzamento geometrico o di radiazione)

Nel precedente caso di basamento rigido le onde sono invece completamente riflesse dal substrato e restano "imprigionate" nello strato **dando luogo ad amplificazioni irrealistiche**.



Lanzo, Rielaborazione slide corso

30

RSL – Modello 1D

2. Strato elastico su substrato deformabile

La funzione di amplificazione dipende oltre che dalle proprietà meccaniche del terreno, anche da quelle della roccia di base attraverso il rapporto di impedenza I .

Funzione di amplificazione:

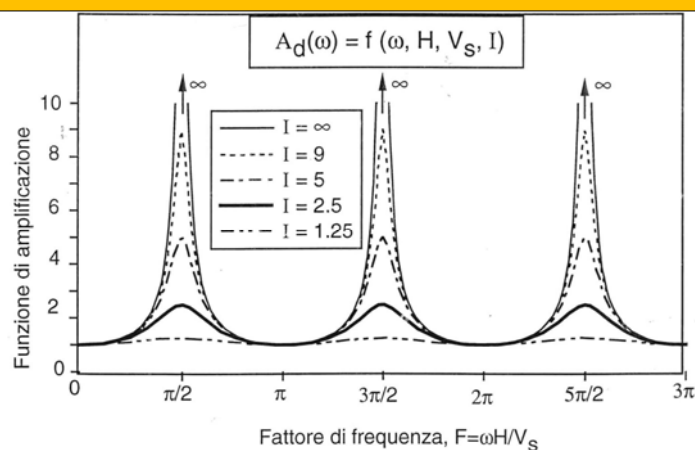
$$A_D(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + \frac{1}{I^2} \sin^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right)}}$$

$$\frac{\omega H}{V_s} = \text{Fattore di Frequenza} \quad I = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s} = \text{Rapporto di impedenze substrato/copertura}$$

Lanzo, Rielaborazione slide corso

31

RSL – Modello 1D

2. Strato elastico su substrato deformabile

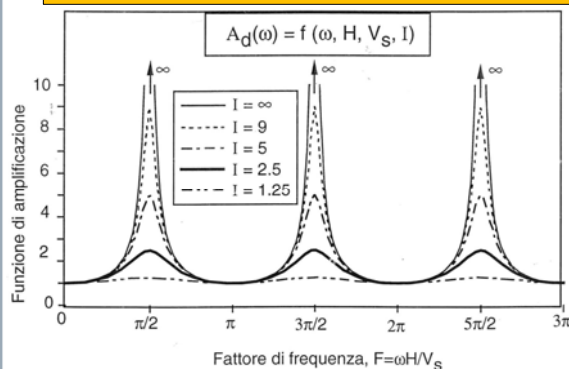
Le frequenze naturali $\omega_n(f_n)$ risultano invariate rispetto al caso precedente e non sono quindi affette dalla deformabilità del substrato

Lanzo, Rielaborazione slide corso

32

RSL – Modello 1D

2. Strato elastico su substrato deformabile



$$A_d(\omega_n) = 1$$

- I valori massimi della funzione di amplificazione assumono valori finiti e sono pari proprio al **rapporto di impedenza**.
- I fenomeni di amplificazione sono tanto più marcati quanto maggiore è il **contrasto di impedenza tra la roccia di base e quella del terreno sovrastante**.

Lanzo, Rielaborazione slide corso

33

RSL – Modello 1D

2. Strato elastico su substrato deformabile

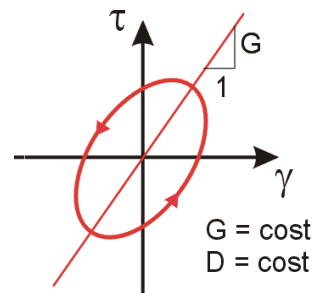
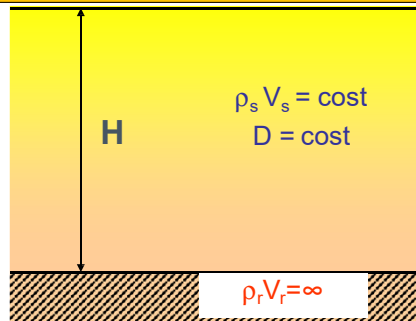
In ipotesi di substrato deformabile:

- › La funzione di amplificazione oltre che dalla proprietà meccaniche del terreno, anche da quelle della roccia in base al rapporto di Impedenza I ;
- › I periodi in corrispondenza dei quali si verificano i massimi della funzione risultano invariati rispetto al caso di substrato rigido;
- › Per un dato rapporto I i massimi di funzione assumono un valore finito, indipendentemente dalla frequenza;
- › L'amplificazione è direttamente proporzionale al contrasto d'impedenza.

34

RSL – Modello 1D

3. Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido



Lanzo, Rielaborazione slide corso

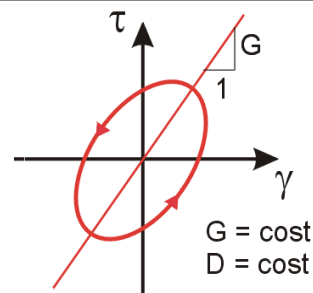
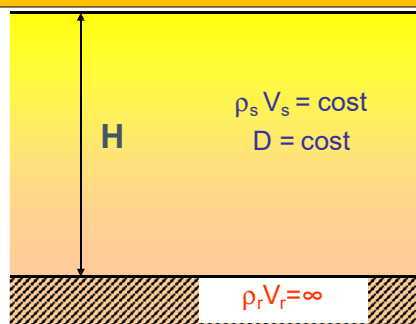
Si introducono le proprietà dissipative del terreno attraverso un modello costitutivo di tipo visco-elastico lineare (mezzo alla Kelvin-Voigt)

Il parametro rappresentativo dei fenomeni di dissipazione per smorzamento interno è il fattore di smorzamento D

35

RSL – Modello 1D

3. Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido



$$A_{r,v}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(F) + (DF)^2}}$$

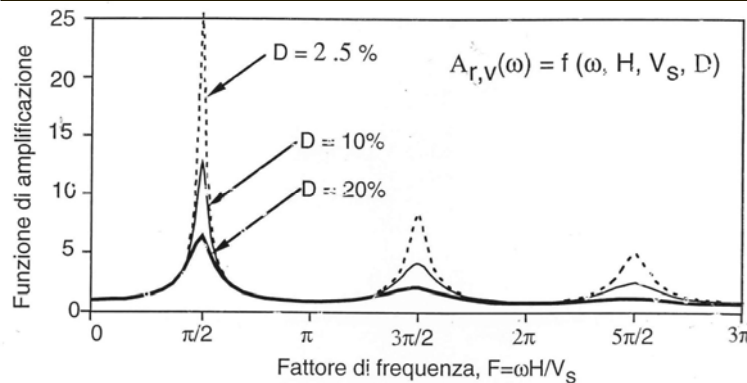
$$F = \frac{\omega H}{V_s} = \text{Fattore di frequenza}$$

D = Fattore di smorzamento

36

Lanzo, Rielaborazione slide corso

RSL – Modello 1D

3. Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido

Il valore massimo di $A_{r,v}(\omega)$ si verifica in corrispondenza della frequenza naturale minore.

Le frequenze naturali restano sostanzialmente invariate.

La funzione di amplificazione presenta valori massimi finiti che si riducono all'aumentare di F (fenomeni di attenuazione alle alte frequenze).

Lanzo, Rielaborazione slide corso 37

RSL – Modello 1D

3. Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido

La prima frequenza naturale è detta frequenza fondamentale del deposito f_0 :

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{2\pi H} \left(\frac{\pi}{2} + n\pi \right) \quad n=0,1,2 \dots \infty$$

Per $n=0$ è associato il periodo fondamentale T_0 :

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{4H}{V_s}$$

Il valore massimo della funzione di amplificazione è pari

$$A_r = \frac{2}{\pi D}$$

L'amplificazione è tanto minore quanto maggiore è il fattore di smorzamento del terreno D .

Lanzo, Rielaborazione slide corso 38



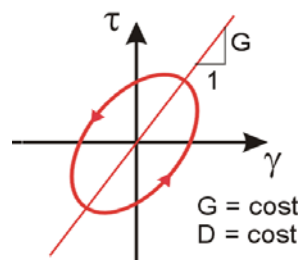
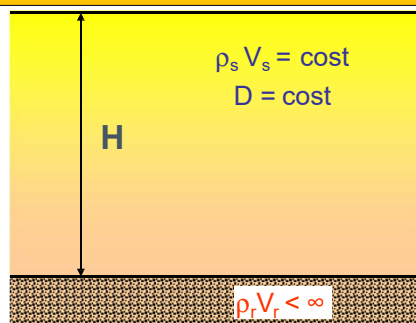
RSL – Modello 1D

3. Strato omogeneo visco-elastico su substrato rigido

- › La funzione di amplificazione presenta valori di massimo finiti;
- › Le frequenze dove le amplificazioni presentano un massimo risultano praticamente invariate;
- › I fattori di amplificazione sono decrescenti con l'indice n ;
- › I massimi si riducono in maniera più marcata quanto maggiore è D ;
- › La prima frequenza è detta frequenza fondamentale del banco;
- › Il valore di massimo dell'amplificazione si per la frequenza di banco e dipende soltanto dallo smorzamento del terreno ed è inversamente proporzionale ad esso.

39

RSL – Modello 1D

4. Strato omogeneo visco-elastico su substrato deformabile

Lanzo, Rielaborazione slide corso

Il terreno ha proprietà dissipative - modello costitutivo di tipo visco-elastico lineare (mezzo alla Kelvin-Voigt), parametro rappresentativo è il fattore di smorzamento D

Il Bedrock in parte riflette all'interno delle coperture e in parte trasmette (smorzamento geometrico o di radiazione).

40

RSL – Modello 1D

4. Strato omogeneo visco-elastico su substrato deformabile

La funzione di amplificazione non può essere espressa in forma semplice;

Il valore di massimo si ottiene in corrispondenza della frequenza fondamentale f_0 e vale:

$$A_{D,v}(f_0) = \frac{I}{1 + \frac{1}{2} \pi D I}$$

L'amplificazione massima cresce al **crescere del rapporto di impedenza I** .

L'amplificazione massima cresce al **decrescere del fattore di smorzamento D del terreno**.

41

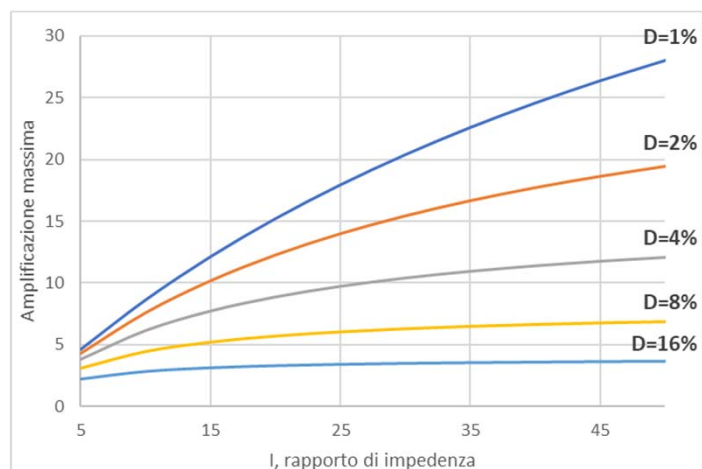
Lanzo, Rielaborazione slide corso

RSL – Modello 1D

4. Strato omogeneo visco-elastico su substrato deformabile

In generale il fattore di amplificazione è minore di 10.

$$A_{D,v}(f_0) = \frac{I}{1 + \frac{1}{2} \pi D I}$$



42

Lanzo, Rielaborazione slide corso

RSL – Modello 1D

4. Strato omogeneo visco-elastico su substrato deformabile

- › Tale caso costituisce la generalizzazione di tutti i casi trattati in precedenza;
- › I valori di massimo della funzione di amplificazione dipendono esclusivamente dal rapporto di impedenza I ;
- › Fissato lo smorzamento $D > 0$ i massimi diminuiscono al diminuire del rapporto di impedenza I ;
- › Fissato il rapporto di impedenza I i massimi diminuiscono all'aumentare dello smorzamento D ;

43

RSL – Modello 1D

Conclusioni

Caso 1 (deposito elastico su basamento rigido) mette in evidenza uno dei motivi fondamentali dell'amplificazione sismica **la risonanza**.

Caso 2 (deposito elastico su basamento deformabile) mette in evidenza l'importanza del **rapporto di impedenza** roccia-terreno (e quindi dello **smorzamento di radiazione**).

Caso 3 (deposito visco-elastico su basamento rigido) evidenzia l'importanza delle capacità dissipative del terreno: **lo smorzamento**.

Caso 4 (deposito visco-elastico su basamento deformabile) rappresenta la generalizzazione di tutti i casi precedenti.

Lanzo, Rielaborazione slide corso 44





Periodi/frequenze possibili

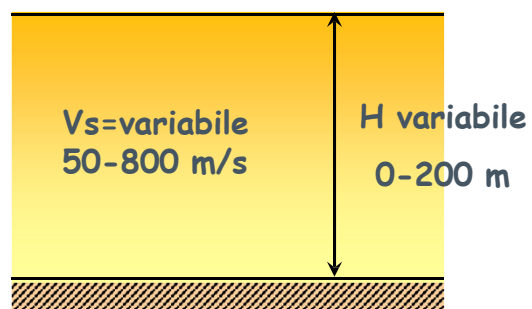
45



RSL – Modello 1D

Quali sono i periodi/frequenze possibili?

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{4H}{V_S}$$



46

Lanzo, Rielaborazione slide corso

RSL – Modello 1D

Quali sono i periodi/frequenze possibili?

frequenze tipiche							periodi tipici						
		V_s							V_s				
		50	100	200	400	800			50	100	200	400	800
$\pm$	5	2.5	5	10	-	-	$\pm$	5	0.4	0.2	0.1	-	-
	10	1.25	2.5	5	10	-		10	0.8	0.4	0.2	0.1	-
	20	0.63	1.25	2.5	5	10		20	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1
	50	0.25	0.5	1	2	4		50	4	2	1	0.5	0.25
	100	-	0.25	0.5	1	2		100	-	4	2	1	0.5
	150	-	-	0.33	0.67	1.33		150	-	-	3	1.5	0.75
	200	-	-	0.25	0.5	1		200	-	-	4	2	1

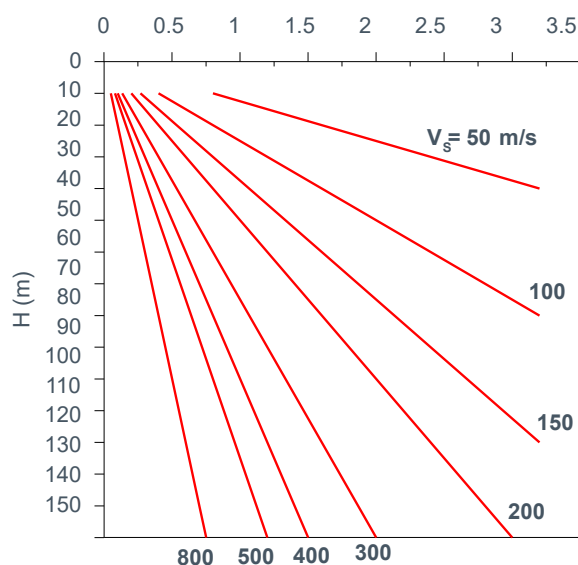
F = 0,25-10 Hz T = 0,1-4 sec.

Lanzo, Rielaborazione slide corso

47

RSL – Modello 1D

Quali sono i periodi/frequenze possibili?



$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{4H}{V_s}$$

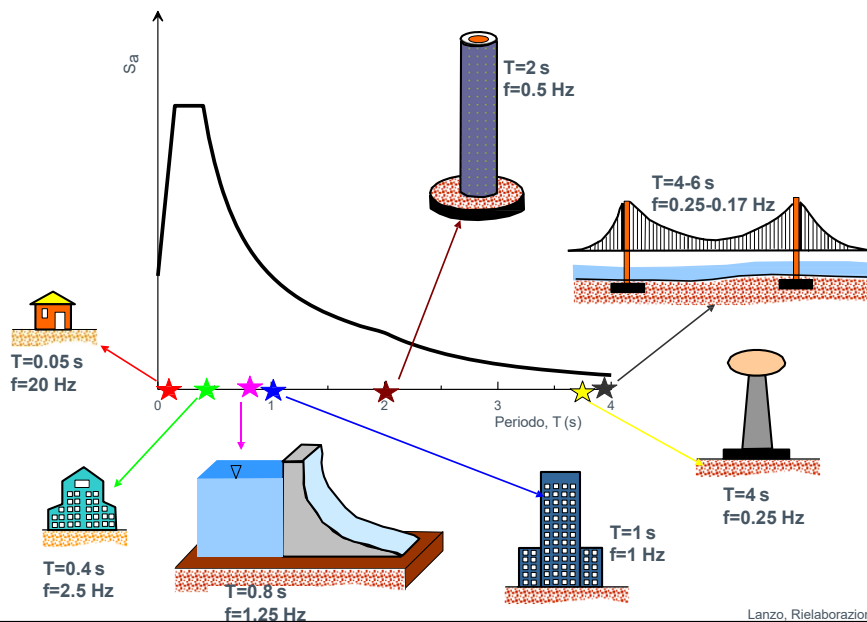
F = 0,25-10 Hz
T = 0,1-4 sec.

**Range di frequenze
predominanti per i
terremoti:
 $f_p = 0,1-20$ Hz**

Lanzo, Rielaborazione slide corso

48

RSL – Periodo fondamentale di diverse strutture



Lanzo, Rielaborazione slide corso

49

Sottosuolo Reale

50



RSL – Sottosuolo reale

Per la valutazione della risposta sismica locale di un sottosuolo reale è necessario tenere conto :

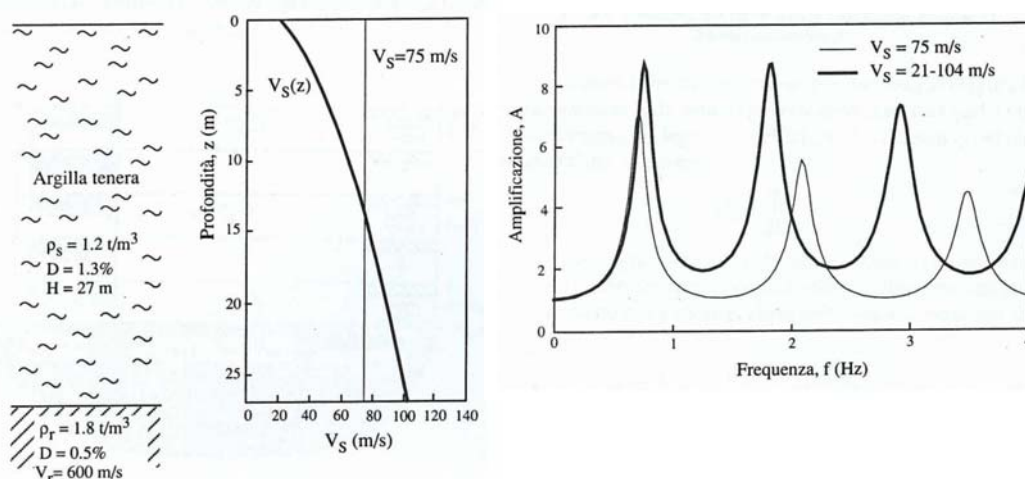
- › **Variazione con la profondità dei parametri di rigidezza e smorzamento** dovuta all'eterogeneità dei terreni costituenti il sottosuolo e alla dipendenza di tali parametri dallo stato tensionale;
- › **Comportamento meccanico dei terreni** che si presenta fortemente non lineare e dissipativo a partire da deformazioni molto piccole;
- › Adeguata caratterizzazione dell'**input sismico** (ampiezza, durata e contenuto in frequenza);
- › **Configurazione morfologica** del contatto basamento-deposito e della topografia (effetti 2D- 3D).

Lanzo, Rielaborazione slide corso

51



RSL – Sottosuolo reale

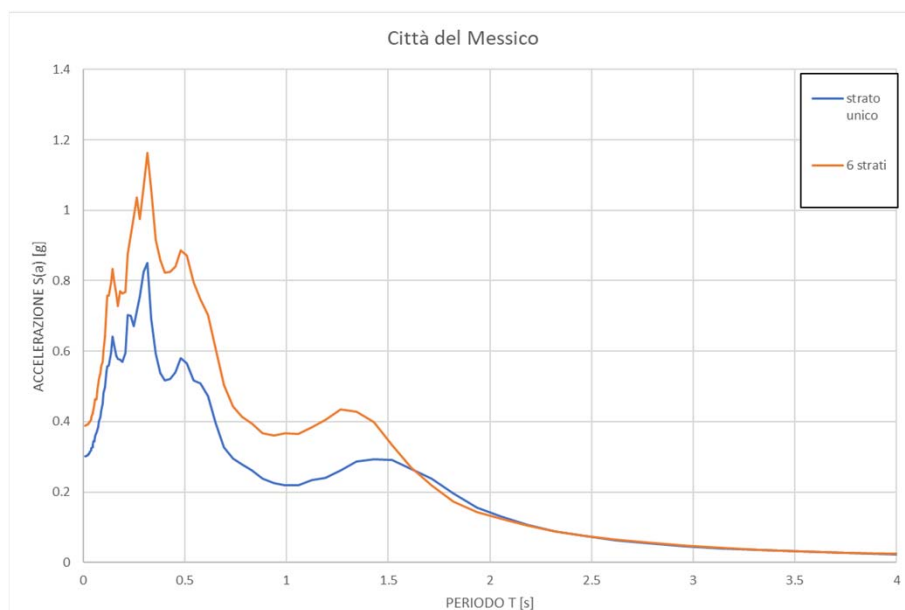


A parità di valori medi, una variazione continua di V_S con z comporta **avvicinamento delle frequenze naturali**

Lanzo, Rielaborazione slide corso

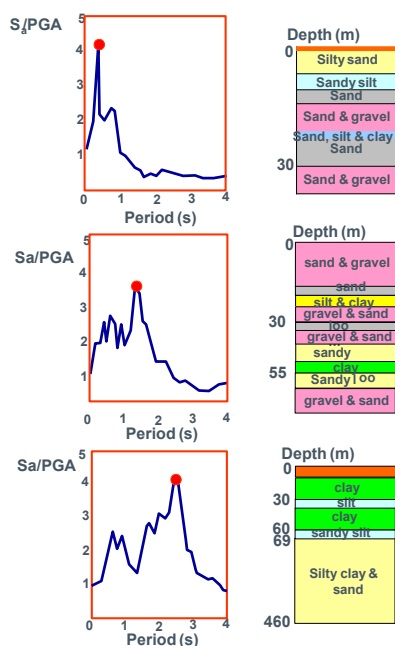
52

RSL – Sottosuolo reale



53

RSL – Sottosuolo reale



Influenza della deformabilità

$$f_n = \frac{(2n+1)V_s}{4H} \quad V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = \frac{4H}{V_s(2n+1)}$$

Gli strati più deformabili (V_s si riduce) esaltano le basse frequenze

(Seed & Idriss, 1969)

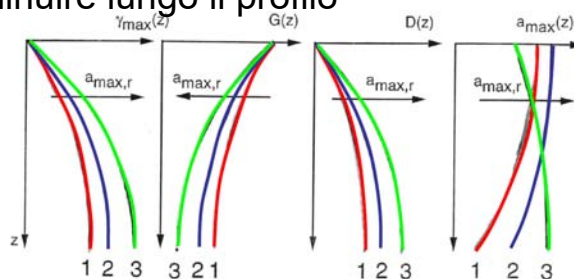
Lanzo, Rielaborazione slide corso

54

RSL – Sottosuolo reale

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

- › Aumentano le $\gamma_{\max}$ 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

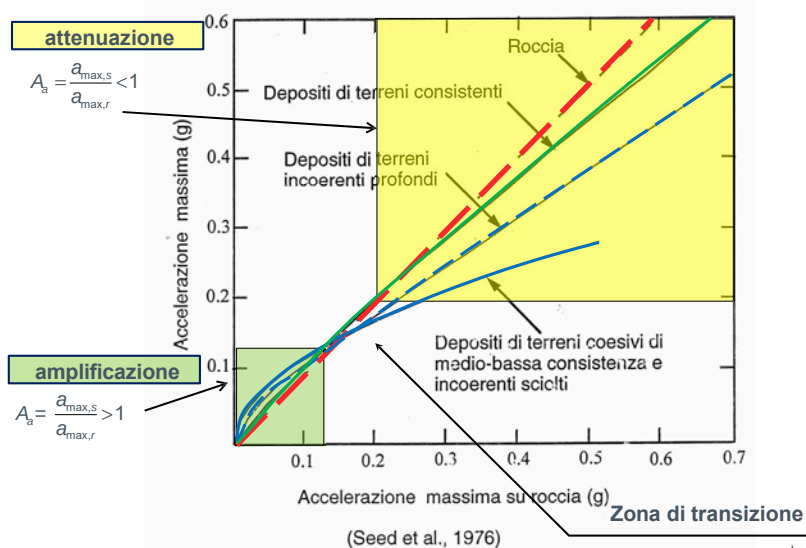


Lanzo, Rielaborazione slide corso

55

RSL – Sottosuolo reale

- › Effetto della non linearità su $a_{\max}$



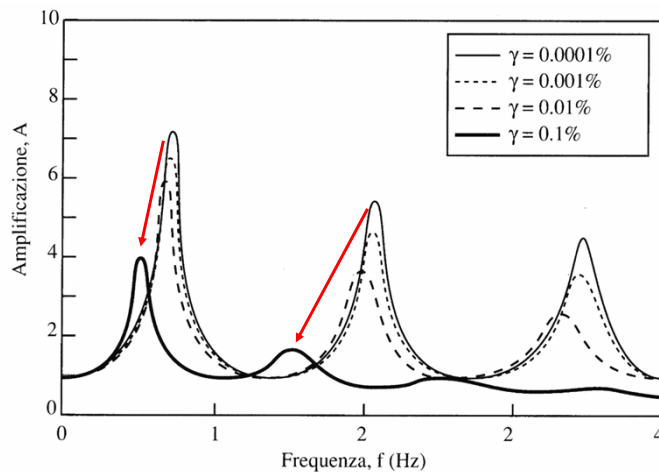
(Seed et al., 1976)

Lanzo, Rielaborazione slide corso

56

RSL – Sottosuolo reale

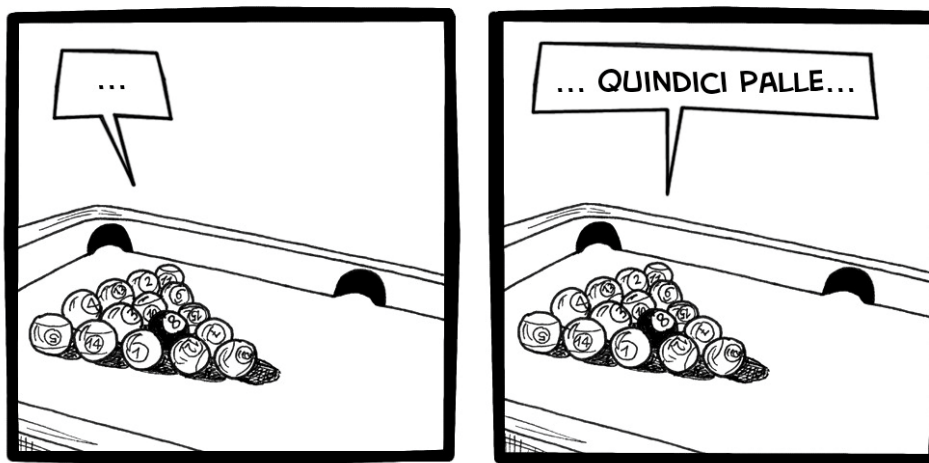
Al crescere dell'intensità del moto sismico i picchi della funzione di amplificazione si riducono e si spostano verso frequenze minori



Lanzo, Rielaborazione slide corso

57

FUMETTI PALLOSI #180



58