Risposta Sismica Locale Quando?

Quando si presenta il problema?

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

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

Perché la Risposta Sismica Locale

› Lo studio dei terremoti equivale ad una quantificazione del livello di Rischio Sismico ($\Re$) che deve essere fatta mediante la valutazione della Pericolosità Sismica (P) della Vulnerabilità (V) del sistema da analizzare (edificio, terreno, infrastruttura) e del grado di Esposizione (E) della comunità interessata:

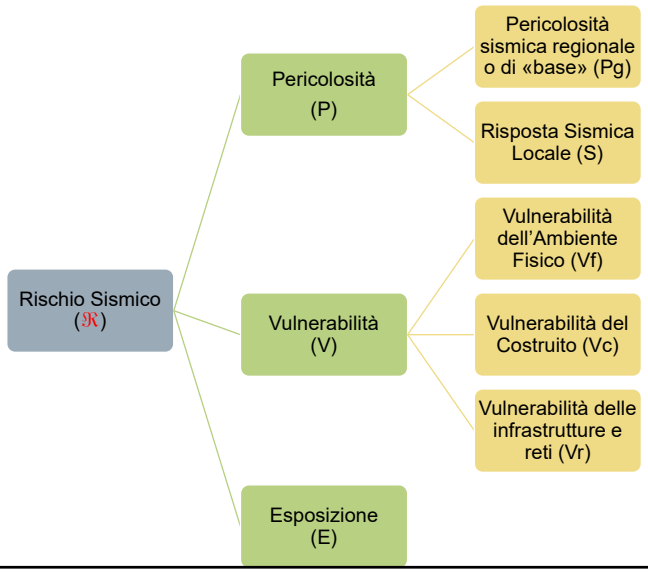
$$\Re = P \times V \times E$$

› Una componente essenziale della pericolosità è costituita dalla Risposta Sismica Locale, cioè la variabilità del moto sismico in fase di affioramento in superfice in relazione alle proprietà dei depositi di terreni attraversati.

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

Rischio Sismico

Elementi necessari per quantificare il Rischio Sismico ($\Re$):



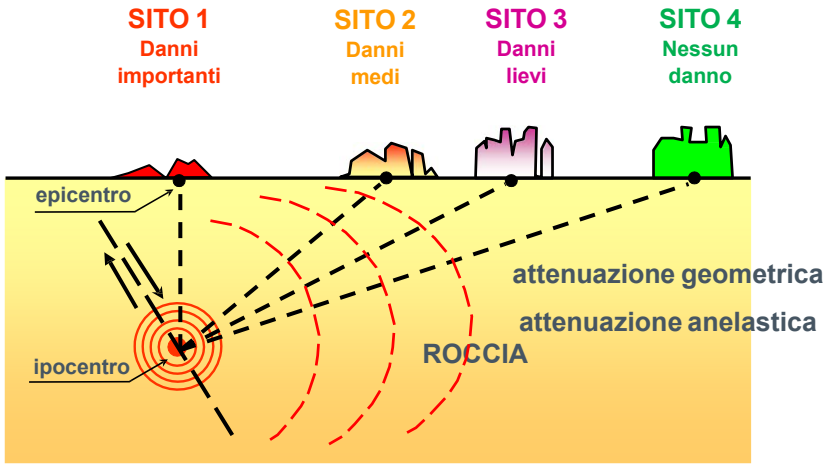
$$\Re = P \cdot V \cdot E =$$
$$= [Pg \cdot S] \cdot [Vf \cdot Vc \cdot Vr] \cdot E$$

3

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

Risposta Sismica Locale

Sottosuolo rigido (roccia) con piano campagna orizzontale

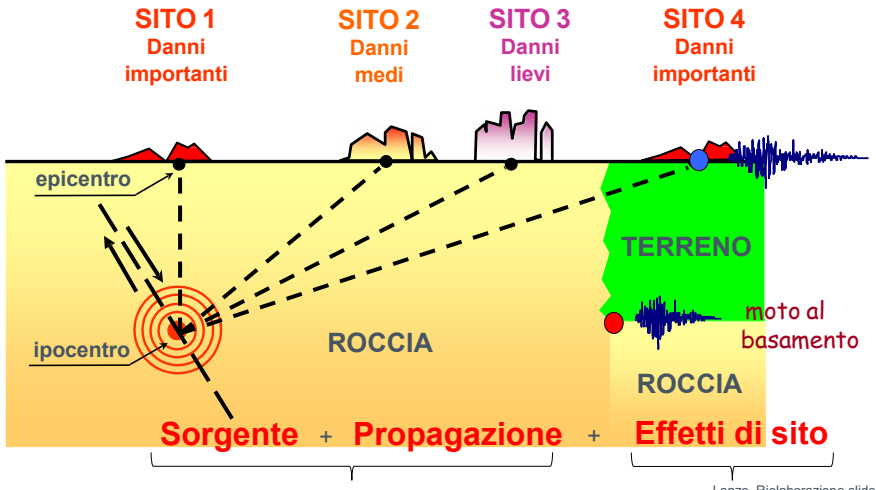


Lanzo, Rielaborazione slide corso
4

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

Risposta Sismica Locale

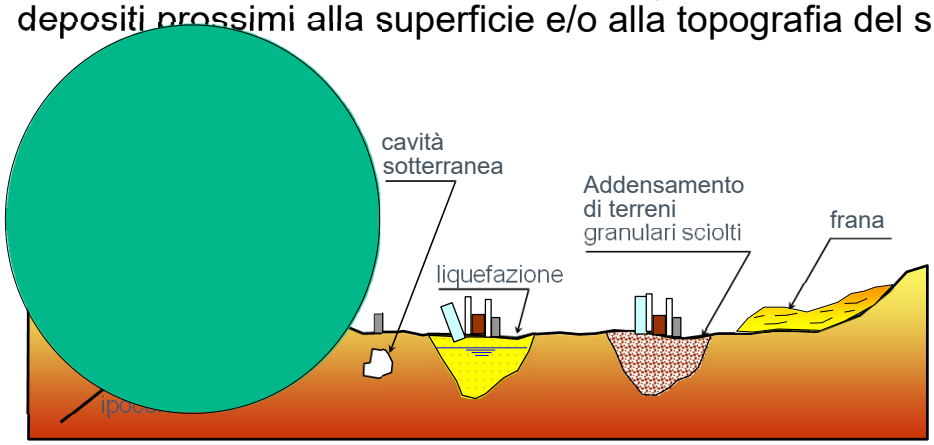
Sottosuolo generico con piano campagna orizzontale



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

Risposta Sismica Locale

› L'analisi di RSL ha lo scopo di valutare, in un sito specifico, l'insieme di variazioni che il moto sismico subisce in relazione alle proprietà meccaniche e geometriche dei depositi prossimi alla superficie e/o alla topografia del sito.

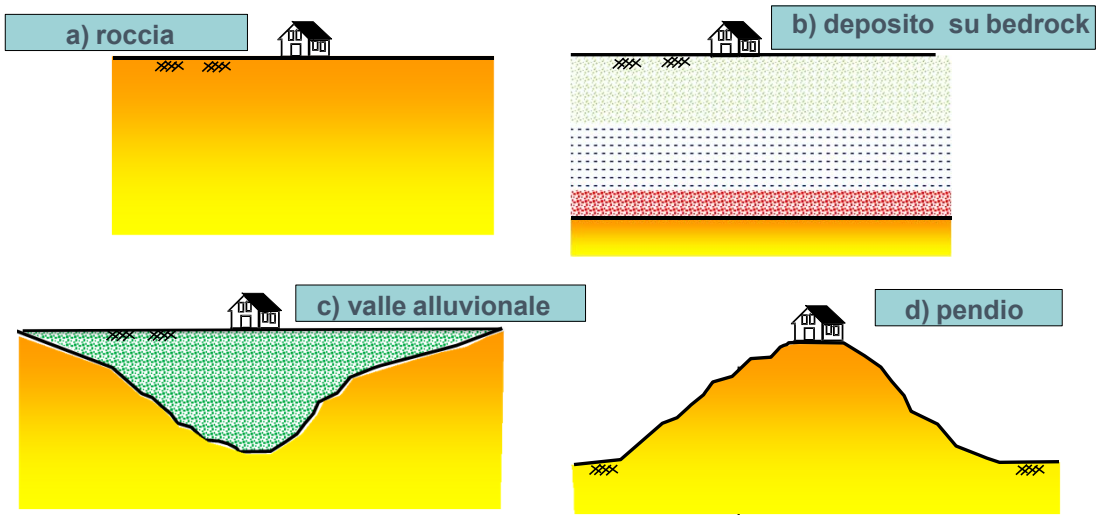


ng. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer/ -+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

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

Risposta Sismica Locale

Diverse condizioni stratigrafiche e morfologiche



Lanzo, Rielaborazione slide corso

7

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

Risposta Sismica Locale

› Cosa devo sapere:

› Caratteristiche morfologiche dei depositi e degli ammassi rocciosi superficiali;

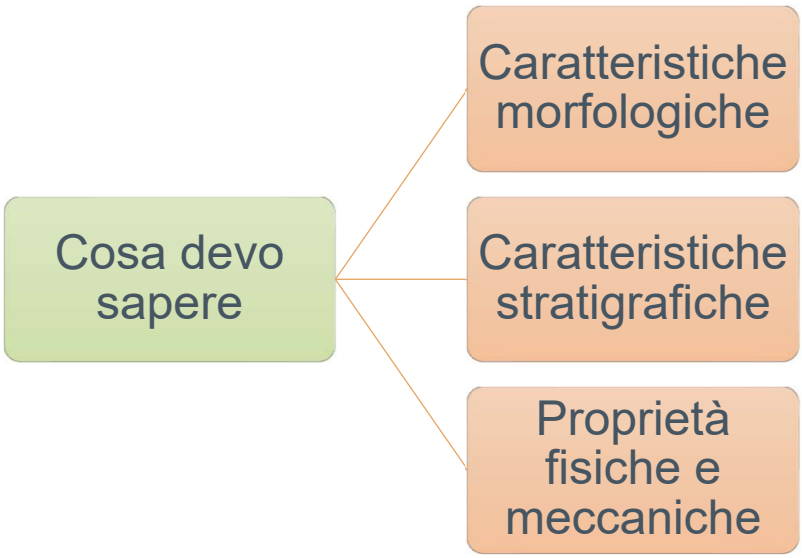
› Caratteristiche stratigrafiche dei depositi e degli ammassi rocciosi superficiali;

› Proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono;

8

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

Risposta Sismica Locale



9

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

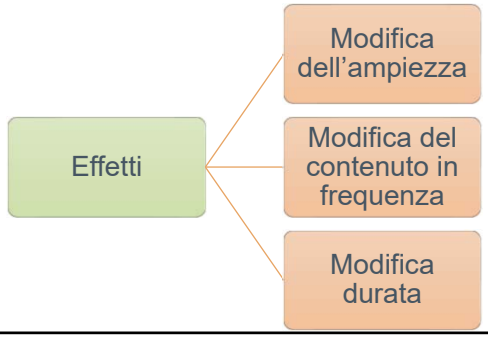
Risposta Sismica Locale

› Effetti:

› Modifica il moto sismico in termini di Ampiezza;

› Modifica il moto sismico in termini di Contenuto in frequenza;

› Modifica il moto sismico in termini di Durata.



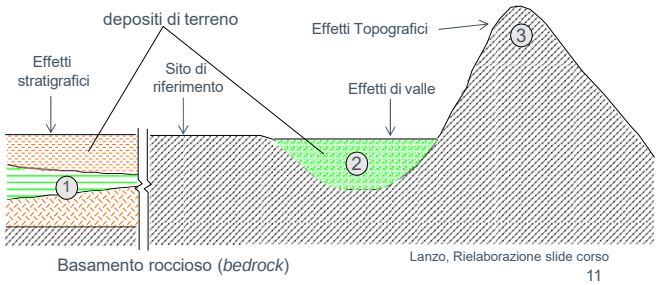
10

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

Risposta Sismica Locale

A seconda dei principali fenomeni fisici responsabili della modifica delle caratteristiche del moto sismico è possibile distinguere effetti di sito:

1. Effetti stratigrafici (1D);
2. Effetti di valle o di morfologia sepolta (2D-3D);
3. Effetti topografici o di cresta (2D-3D).



11

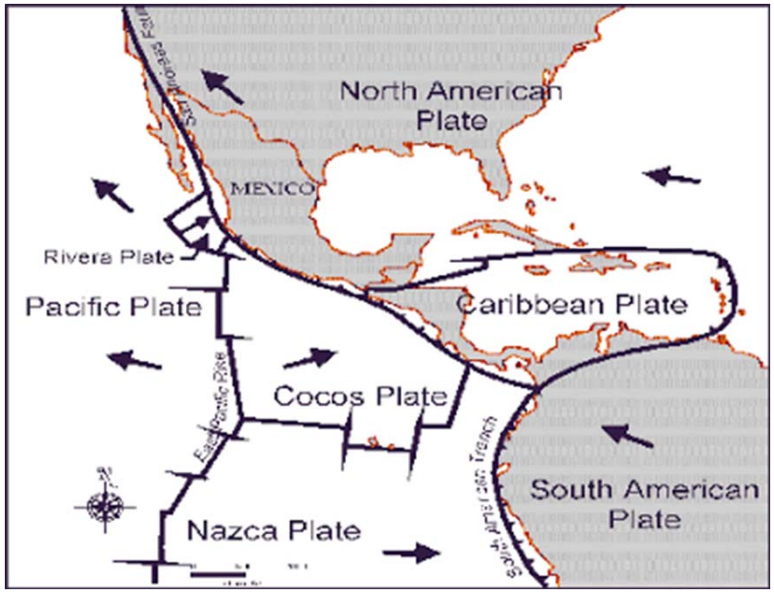
Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

Chiacchiere teoriche o ci sono implicazioni pratiche?

12

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

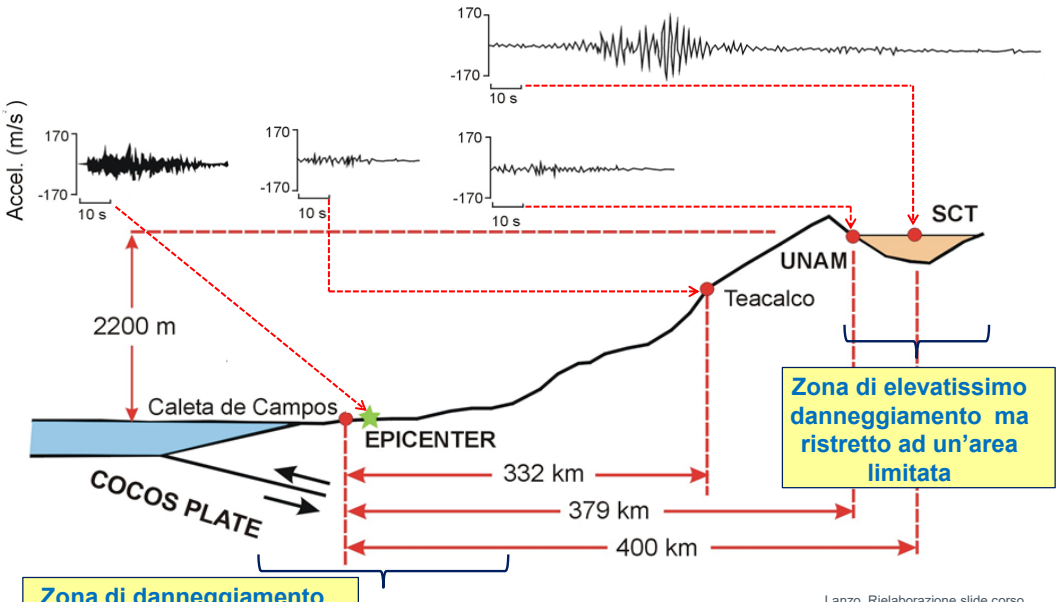
Città del Messico 19.09.1981 – Magnitudo=8.1



13

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

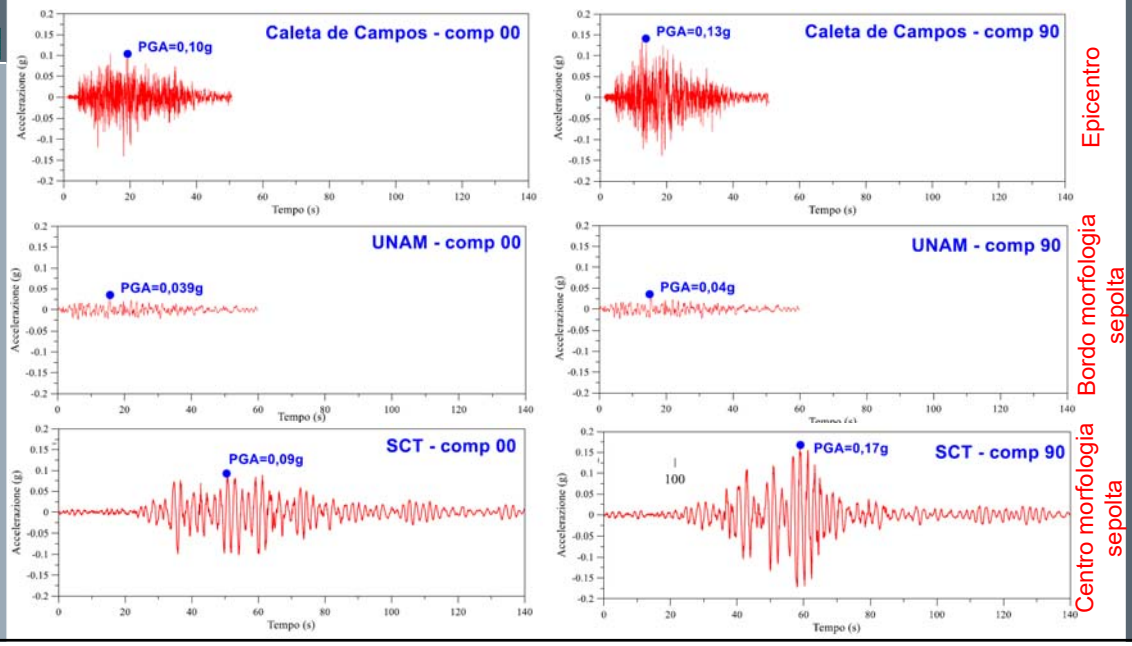
Città del Messico 19.09.1981 – Magnitudo=8.1



Lanzo, Rielaborazione slide corso
14

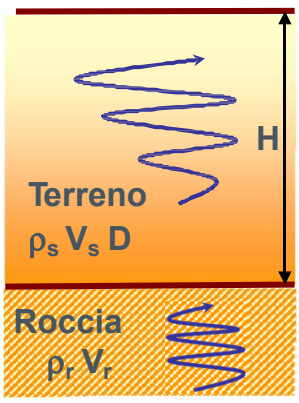
Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

Città del Messico 19.09.1981 – Magnitudo=8.1



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

Risposta Sismica Locale
Parametri Fisici e Meccanici



Materiali

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

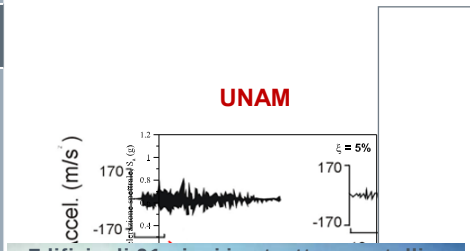
Roccia
- ρ_r = densità
- V_r = velocità onde di taglio
- $\rho_r V_r$ = impedenza sismica

$$I = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s}$$ **rapporto di impedenza roccia-terreno**

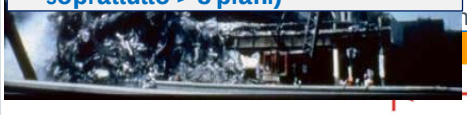
Lanzo, Rielaborazione slide corso
16

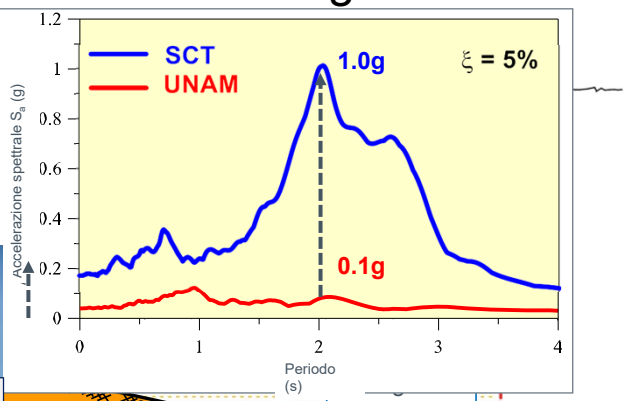
Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

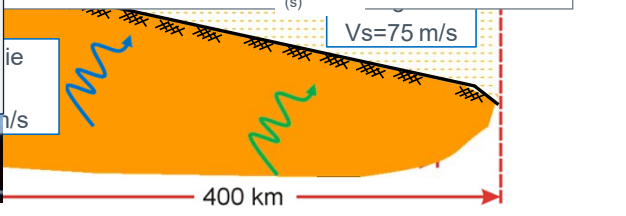
Città del Messico 19.09.1981 – Magnitudo=8.1



- ✓ area di circa 30 km²
- ✓ circa 330 edifici collassati o con danni irreparabili (altezza soprattutto > 8 piani)







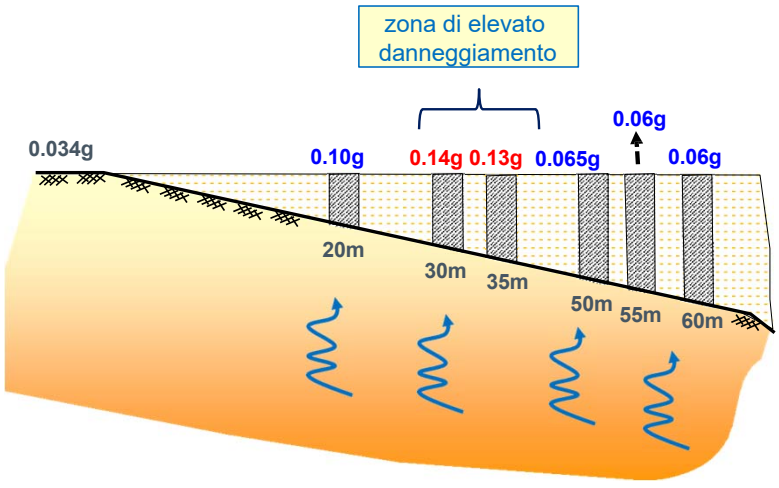
Lanzo, Rielaborazione slide corso

17

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

Città del Messico 19.09.1981 – Magnitudo=8.1

Variazione dell'accelerazione di picco in superficie



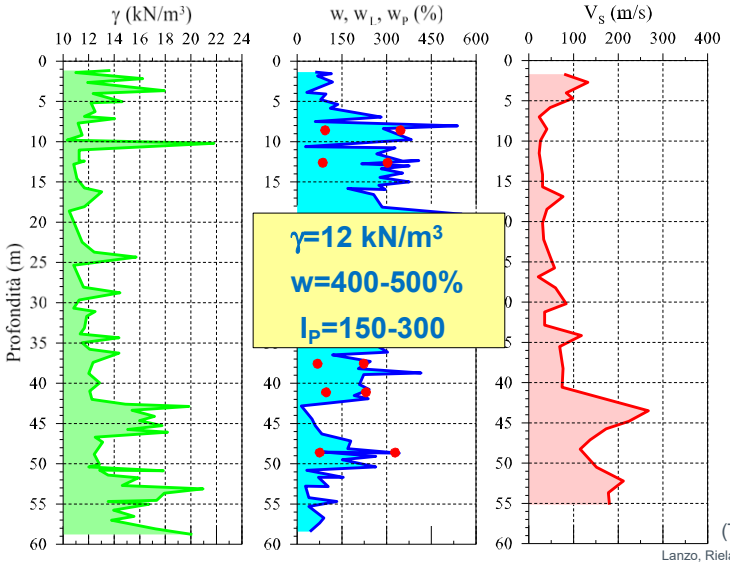
(Romo e Seed, 1986)

18

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

Città del Messico 19.09.1981 – Magnitudo=8.1

Proprietà geotecniche dell'argilla di Città del Messico



(Taboada et al, 1999)

Lanzo, Rielaborazione slide corso

19

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

Cesi - Sequenza sismica Umbria- Marche del 1997

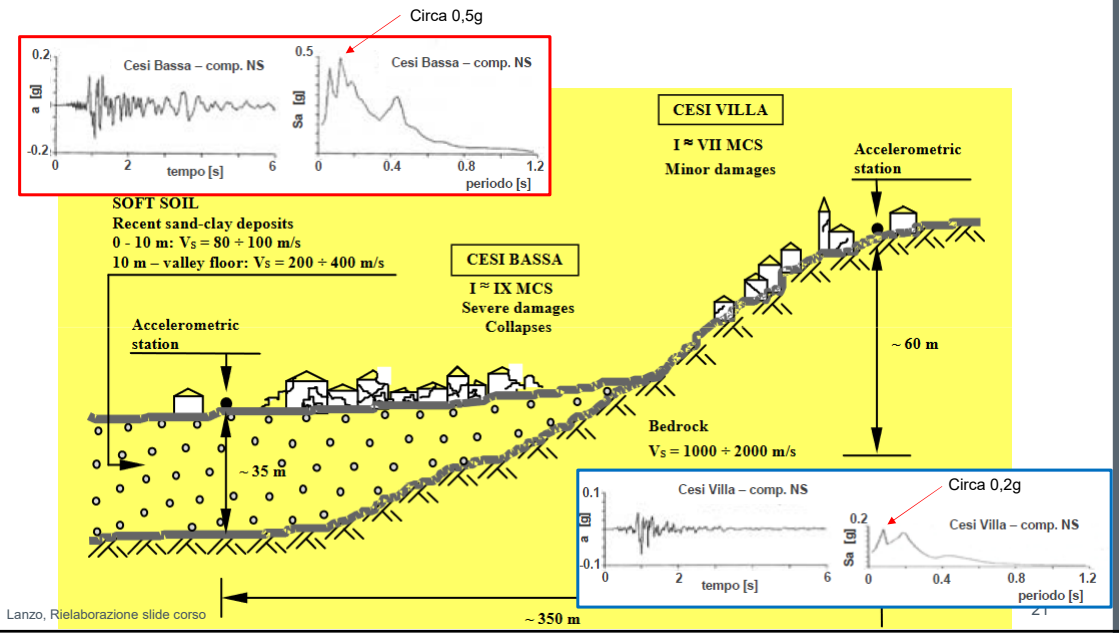
A Cesi Bassa i danneggiamenti corrispondono al IX grado MCS, mentre a Cesi Villa si hanno danni corrispondenti al VII grado MCS.

La distanza tra le due aree è di poche centinaia di metri e le costruzioni non presentano differenze di vulnerabilità tali da spiegare le differenze di intensità macrosismica di due gradi osservate.

20

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

Cesi - Sequenza sismica Umbria- Marche del 1997



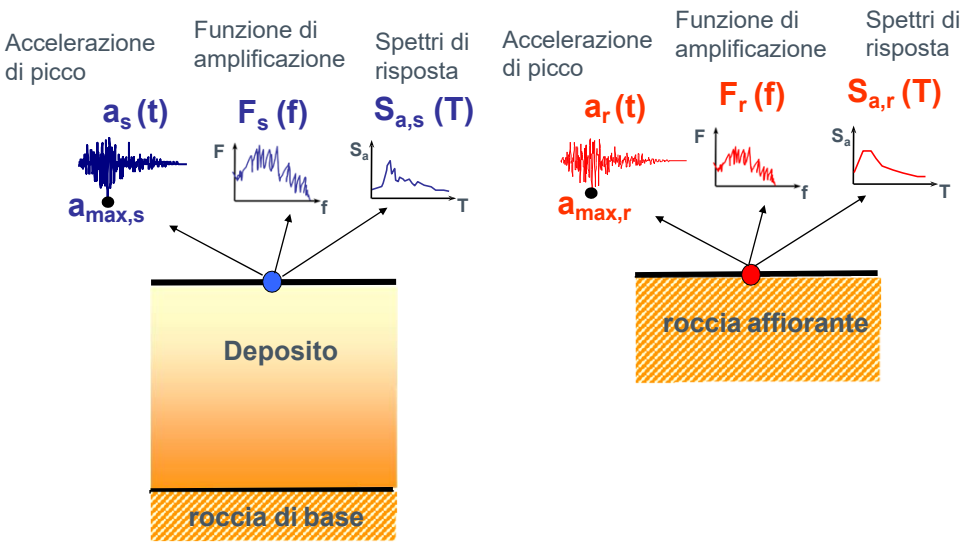
Lanzo, Rielaborazione slide corso

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

Risposta Sismica Locale come si quantifica?

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

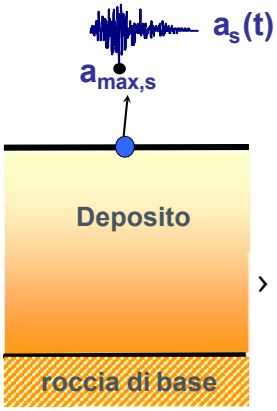
Valutazione della RSL



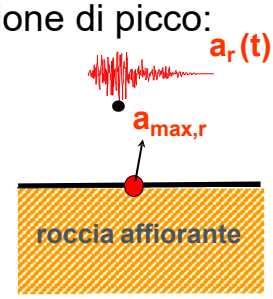
Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

RSL e fattore di amplificazione

› Fattore di amplificazione dell'accelerazione di picco:



$$A_a = \frac{a_{max,s}}{a_{max,r}}$$

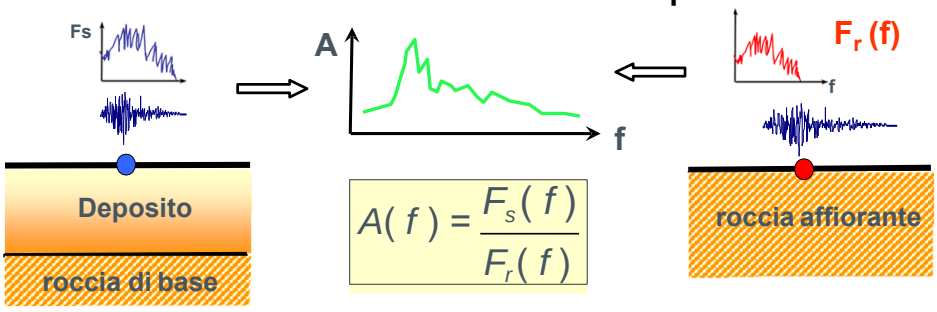


› Il termine "fattore di amplificazione" è in realtà improprio in quanto esso può assumere valori sia maggiori che inferiori all'unità e quindi possono esserci tanto fenomeni amplificativi che deamplificativi del moto.

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

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

RSL in termini di funzione di amplificazione

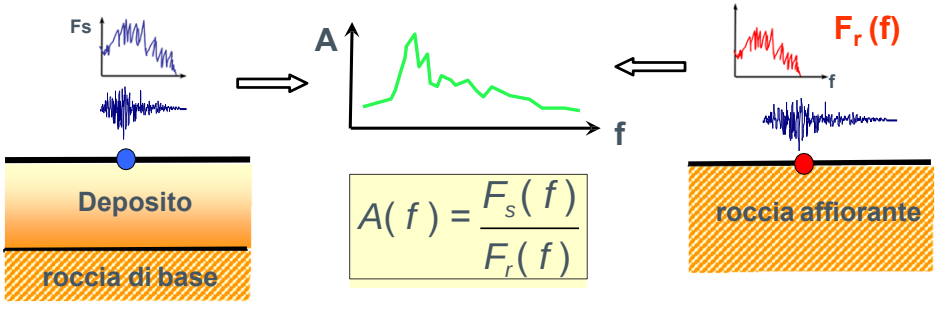


$$A(f) = \frac{F_s(f)}{F_r(f)}$$

› Confronto tra parametri rappresentativi del moto sismico alla superficie del deposito e su roccia affiorante ubicata nelle vicinanze.
Ad es., in termini di Spettro di Fourier F(f)

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

RSL in termini di funzione di amplificazione



$$A(f) = \frac{F_s(f)}{F_r(f)}$$

Funzione di amplificazione A(f)

› A(f) indica quali frequenze del moto sismico sono state amplificate nel passaggio attraverso il terreno, quali sono state smorzate e in quale rapporto.

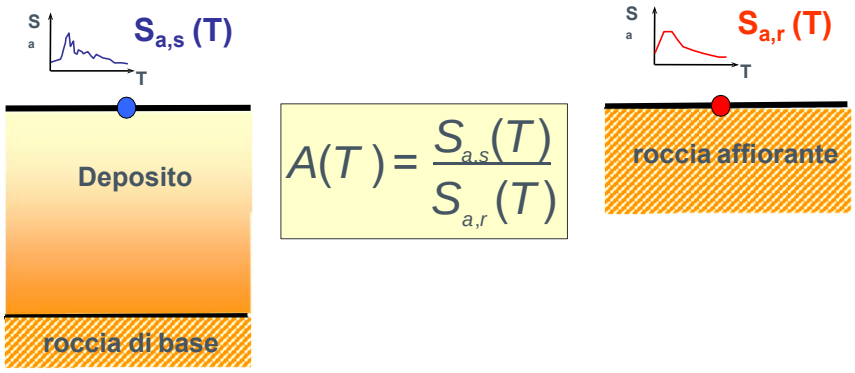
› Fornisce quindi una descrizione sintetica ed efficace dell'**effetto filtrante** esercitato dal terreno sul moto sismico

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

RSL in termini di spettri di risposta

Rapporto spettrale A(T)

Confronto tra gli spettri di risposta del moto sismico alla superficie del deposito e all'affioramento roccioso.



Lanzo, Rielaborazione slide corso

27

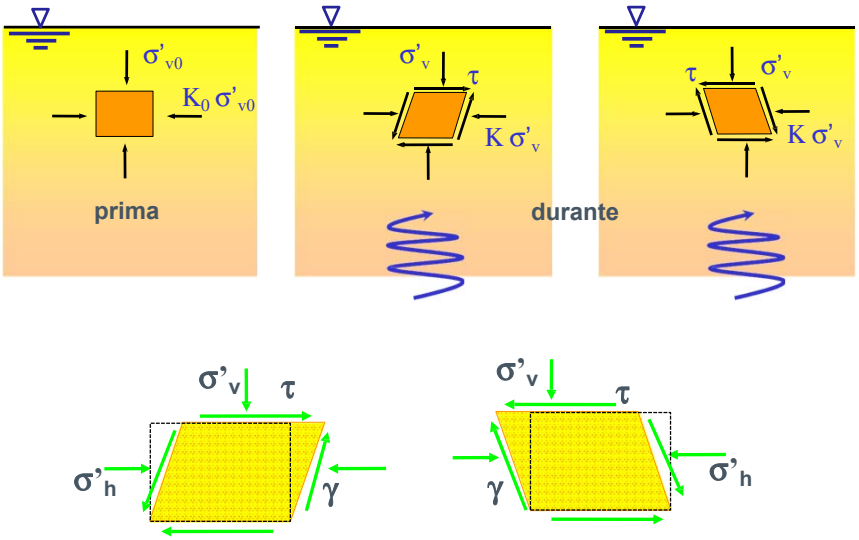
Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

Cosa succede nel terreno durante il sisma?

28

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

Terreno e azioni sismiche



29

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

Terreno e azioni sismiche

Le condizioni di drenaggio

Generalmente nei problemi dinamici riguardanti i terreni saturi la velocità di applicazione delle sollecitazioni è sufficientemente elevata da potere assumere condizioni di drenaggio impedito (condizioni non drenate).

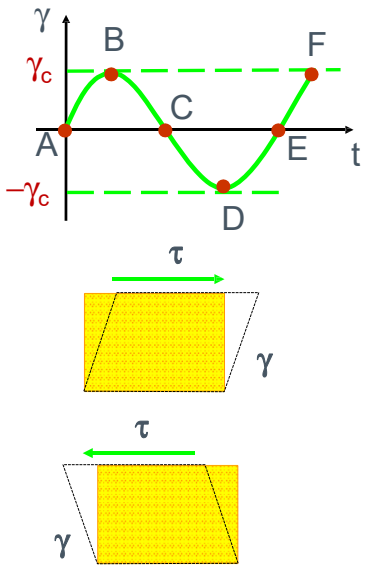
› le deformazioni predominanti sono quelle di pura distorsione.

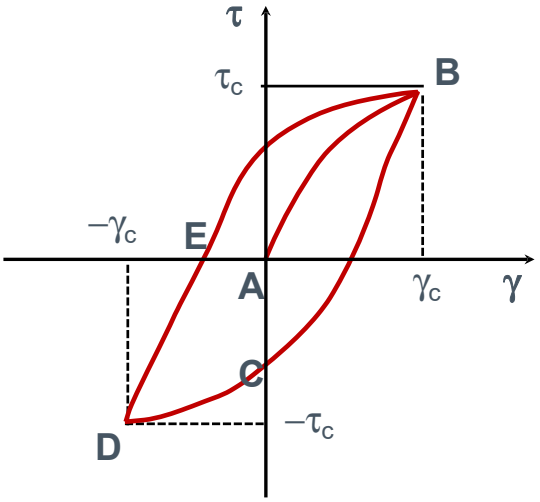
› per la risoluzione dei problemi applicativi è sufficiente tenere conto del legame sforzi tangenziali τ - deformazioni tangenziali γ

30

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

Terreno, azioni sismiche e parametri





31

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

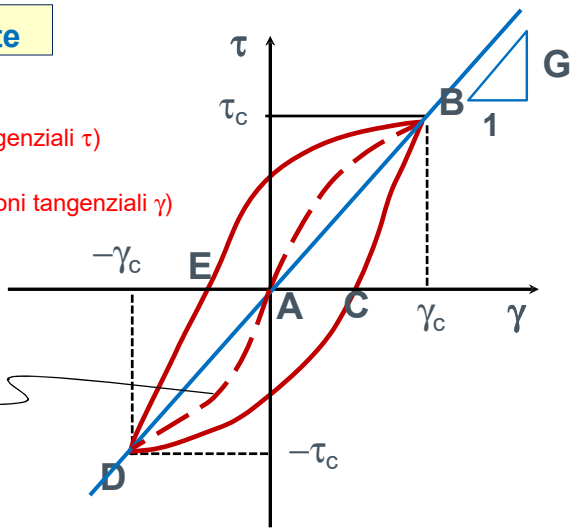
Terreno, azioni sismiche e parametri

Modulo di taglio secante

$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

(τ sforzi tangenziali)

(γ deformazioni tangenziali)



curva scheletro

(backbone curve)

32

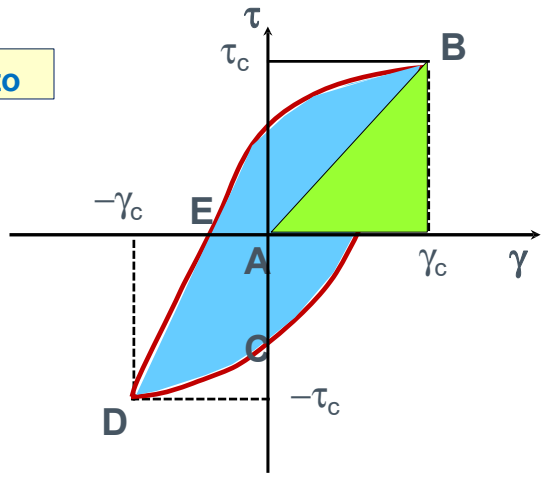
Ing. Roberto Di Girolamo - Via G. di Giovanni 10B – 62032 Camerino (MC)
http://www.robertodigirolamo.engineer - info@robertodigirolamo.engineer
+393356394081 – rdigirolamo66@gmail.com

Terreno, azioni sismiche e parametri

Fattore di smorzamento

$$D = \frac{1}{4\pi}\frac{\Delta W}{W}$$

$$W = \frac{1}{2}\tau_c \gamma_c$$



ΔW =Energia dissipata durante il ciclo

W= Energia elastica immagazzinata durante la fase di primo carico

33

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

Terreno, azioni sismiche e parametri

Sia G sia D variano fortemente al variare del livello di deformazione.

È possibile individuare tre domini in funzione dell'ampiezza della deformazione ciclica γ che è il parametro fondamentale che governa il comportamento dei terreni in dinamica dei terreni:

Si possono distinguere 3 comportamenti:

› piccole deformazioni: $\gamma_c < 0{,}001\%$

› medie deformazioni: $0{,}001\% < \gamma_c < 0{,}1\%$

› elevate deformazioni: $\gamma_c > 0{,}1\%$

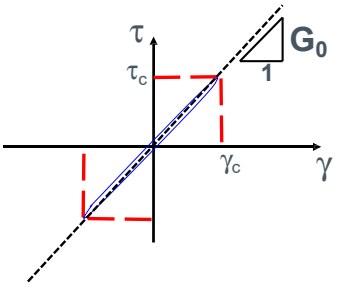
34

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

Comportamento a piccole deformazioni

A piccole deformazioni (γ_c<0,001%) il legame sforzi tangenziali -deformazioni tangenziali è ai fini pratici schematizzabile con un modello elastico lineare

$$G_0 = G_{max} = \rho V_S^2 = \frac{\gamma}{g} V_S^2$$



Modulo di taglio massimo o iniziale

$$G = G_0 = G_{max}$$

Fattore di smorzamento iniziale

$$D = D_0$$

35

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

Comportamento a piccole deformazioni

Dominio a comportamento elastico lineare ($\gamma<\gamma_l$):

› $G=G_0$=cost

› $D=D_0$=cost

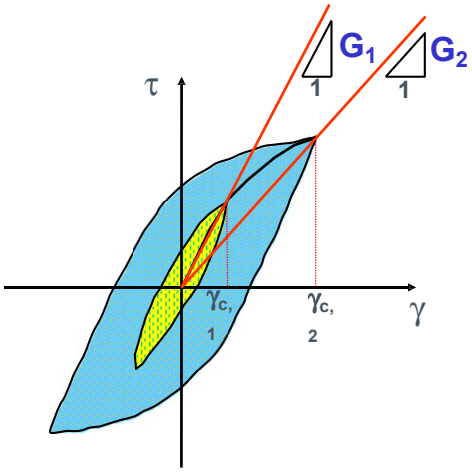
I parametri G_0 e D_0 non variano al variare della deformazione ciclica γ; le deformazioni plastiche sono trascurabili; il rapporto di smorzamento iniziale D_0 assume valori molto piccoli ma non nulli (modesta dissipazione di energia).

36

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

Comportamento a medie deformazioni

A medie deformazioni ($0.001\% < \gamma_c < 0.1\%$) il legame τ-γ è non lineare e dissipativo



$$G_2 < G_1$$

$$D_2 > D_1$$

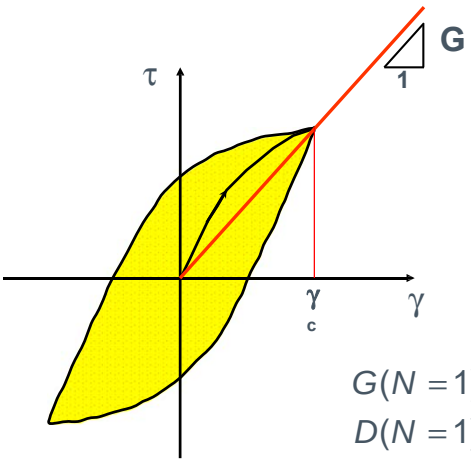
$\gamma_c \uparrow$ $G \downarrow$ $D \uparrow$

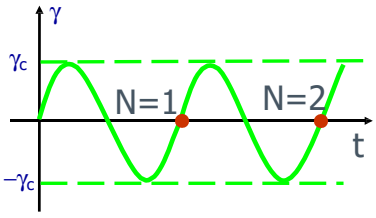
37

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

Comportamento a medie deformazioni

A medie deformazioni il legame τ-γ non è influenzato dal numero dei cicli N





$$G(N=1) = G(N=2) = \ldots\ldots = G(N=n)$$

$$D(N=1) = D(N=2) = \ldots\ldots = D(N=n)$$

38

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

Comportamento a medie deformazioni

Dominio a comportamento isteretico stabile ($\gamma_l<\gamma<\gamma_v$):

› G=G(γ)

› D=D(γ)

Il legame sforzi-deformazioni è non lineare e dissipativo. I parametri G e D variano al crescere della deformazione ciclica γ.

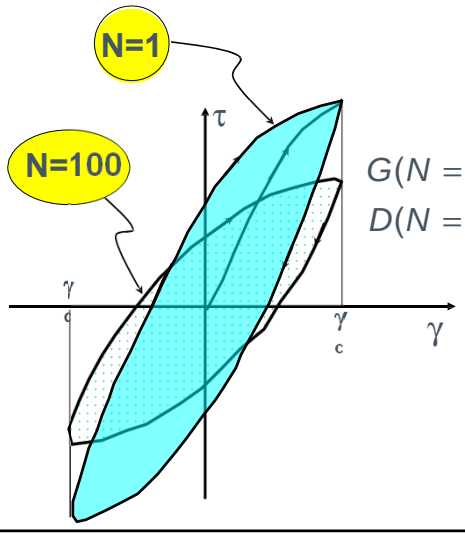
Marcata dissipazione di energia. Al progredire dei cicli di carico, i cicli di isteresi si sovrappongono. Gli eccessi di pressione interstiziale oscillano intorno alle zero. Deformazioni permanenti modeste.

39

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

Comportamento a elevate deformazioni

A deformazioni elevate il legame τ-γ è influenzato dal numero dei cicli N



$$G(N=1) \neq G(N=2) \neq \ldots\ldots \neq G(N=n)$$
$$D(N=1) \neq D(N=2) \neq \ldots\ldots \neq D(N=n)$$

40

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

Comportamento a elevate deformazioni

Dominio a comportamento isteretico instabile ($\gamma>\gamma_v$):

› G=G(γ,N)

› D=D(γ,N)

Il legame sforzi-deformazioni è marcatamente non lineare e dissipativo. Il terreno è interessato da modifiche irreversibili che sono sempre più importanti al crescere del numero dei cicli:

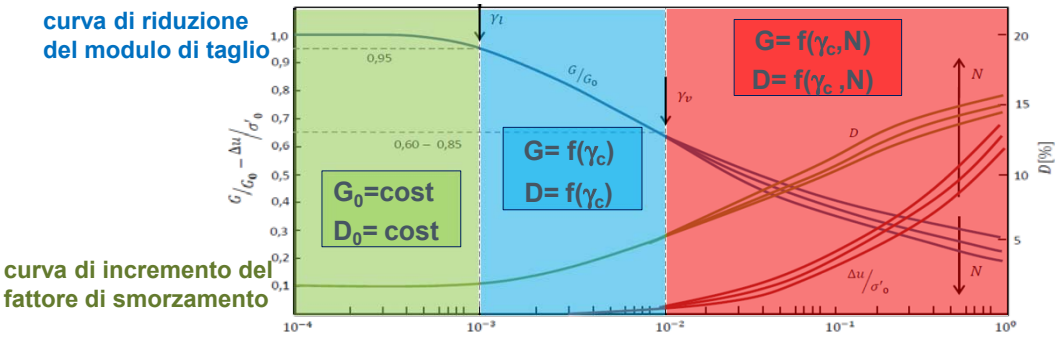
› Nei terreni asciutti si accumulano deformazioni distorsionali e variazioni di volume al crescere del numero dei cicli;

› Nei terreni saturi si accumulano deformazioni distorsionali e sovrappressioni interstiziali al crescere del numero dei cicli.

41

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

Valori delle deformazioni di taglio nei problemi applicativi



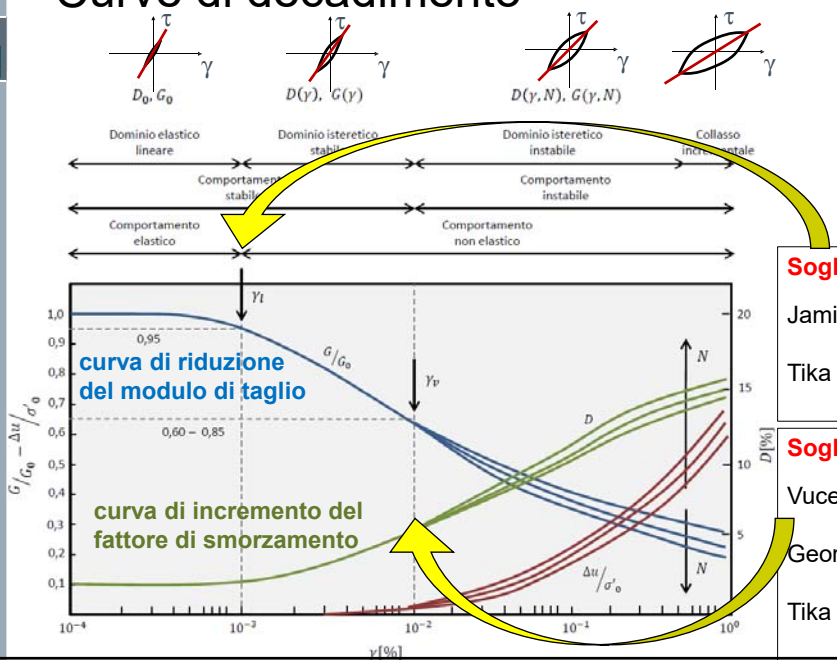
Al di sopra di γ_v si osserva:

- In condizioni non drenate incremento ed accumulo di sovrapressioni interstiziali.
- In condizioni drenate tale soglia corrisponde all'inizio di deformazioni di volume irreversibili.

42

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

Curve di decadimento



Soglia Lineare γ_l

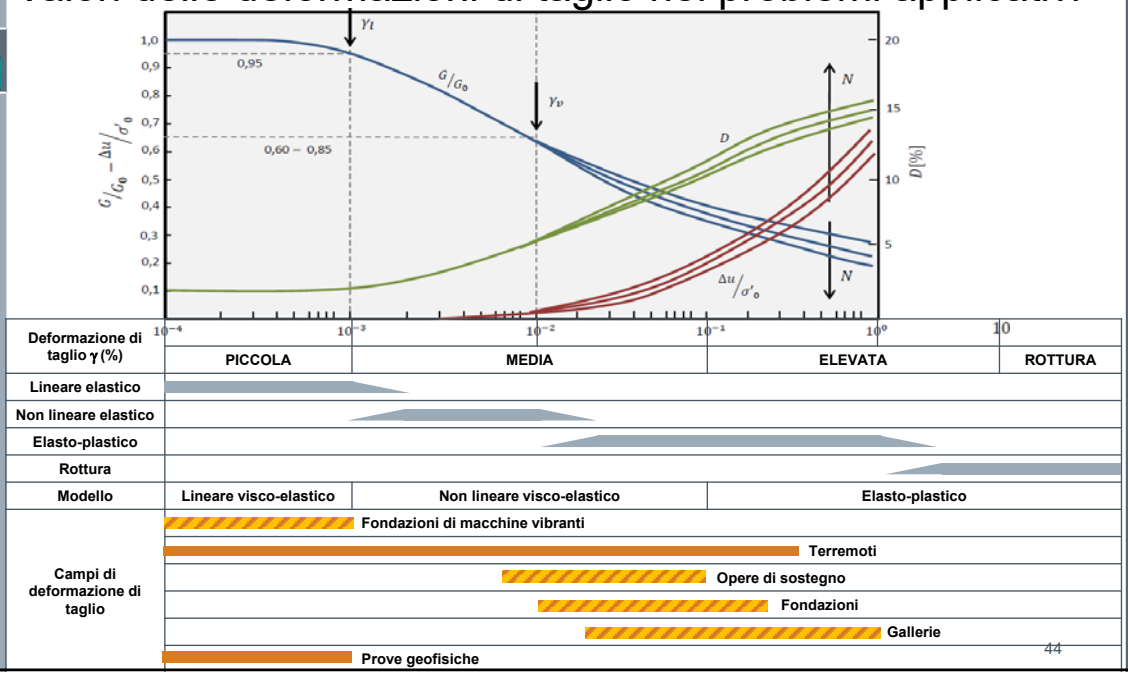
Jamiolkowski et al. ('95)
$G/G_0 = 0,95$
Tika et al.('98) e Vucetic ('94)
$G/G_0 = 0,98$

Soglia Volumetrica γ_v

Vucetic ('94)
$G/G_0 = 0,65$
Georgiannou et al. (1991)
$G/G_0 = 0,65/0,85$
Tika et al. (1999) G/G_0 = 0,60/0,90

43

Valori delle deformazioni di taglio nei problemi applicativi



44

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

Risposta Sismica Locale

La complessa geometria del sottosuolo,

La complessa natura e geometria della generazione delle onde sismiche,

La complessa propagazione delle onde sismiche nei terreni,

La complessa risposta del terreno alle azioni dinamiche generate,

La complessità ci dovrebbe far arrendere?

NO, al solito il professionista, in maniera ingegneristica, dovrà ridurre e semplificare il problema consapevole dei limiti, delle incertezze e della sensibilità del modello ad ogni singola variabile considerata.

Lanzo-Silvestri, Risposta Sismica Locale
modificato da Roberto Di Girolamo

45

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

46