

Corso di
“Microzonazione Sismica”
L’Aquila, Facoltà di Scienze, Coppito, 1 marzo 2010

Caratterizzazione geotecnica dei terreni in condizioni dinamiche



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Giuseppe Lanzo

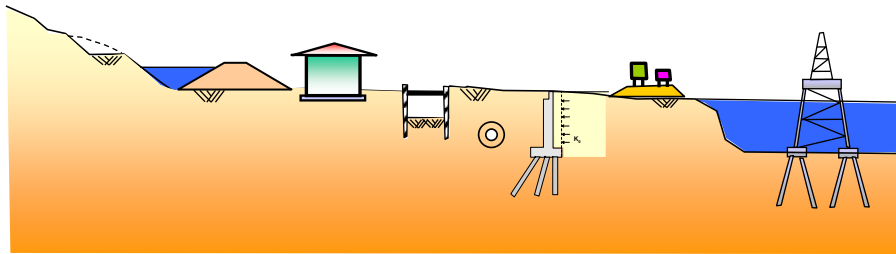
CHE COS'È LA GEOTECNICA ?

La Geotecnica è una disciplina dell'Ingegneria Civile che studia la risposta meccanica dei terreni e delle rocce ad azioni di varia natura (antropica e naturale) con varie finalità....

Problemi applicativi in Ingegneria Geotecnica

...finalità di studiare:

- le opere **a contatto con il terreno** (fondazioni, opere di sostegno, etc.)
- le opere **costruite nel terreno** (gallerie, scavi, etc.)
- le opere **costruite con il terreno** (argini, rilevati, dighe, etc.)
- fenomeni **che si verificano nel terreno** (frane, subsidenza, amplificazione sismica, etc.)



Geotecnica sperimentale e applicata

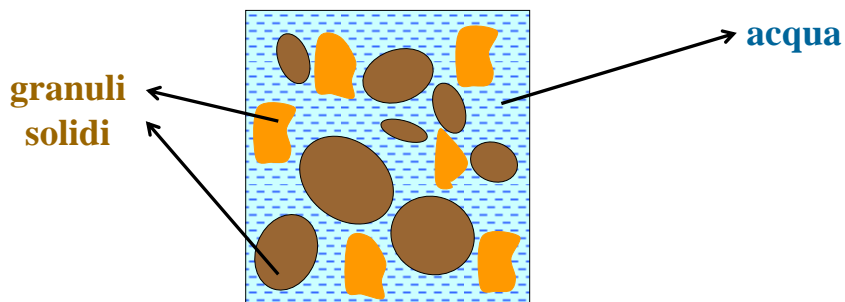
Si può parlare di:

Geotecnica sperimentale: che studia le proprietà fisiche e meccaniche dei terreni mediante prove in sito e in laboratorio

Geotecnica applicata: studia teorie e modelli per il dimensionamento delle opere (fondazioni, ecc.) e per la previsione del comportamento delle opere stesse e del terreno

PECULIARITA' DELLA GEOTECNICA

- ❑ il terreno è un materiale non convenzionale se paragonato con quelli trattati dall'Ingegneria Strutturale: è un sistema multifase (solido + acqua + aria) il cui comportamento conserva "memoria" di quanto accaduto in passato

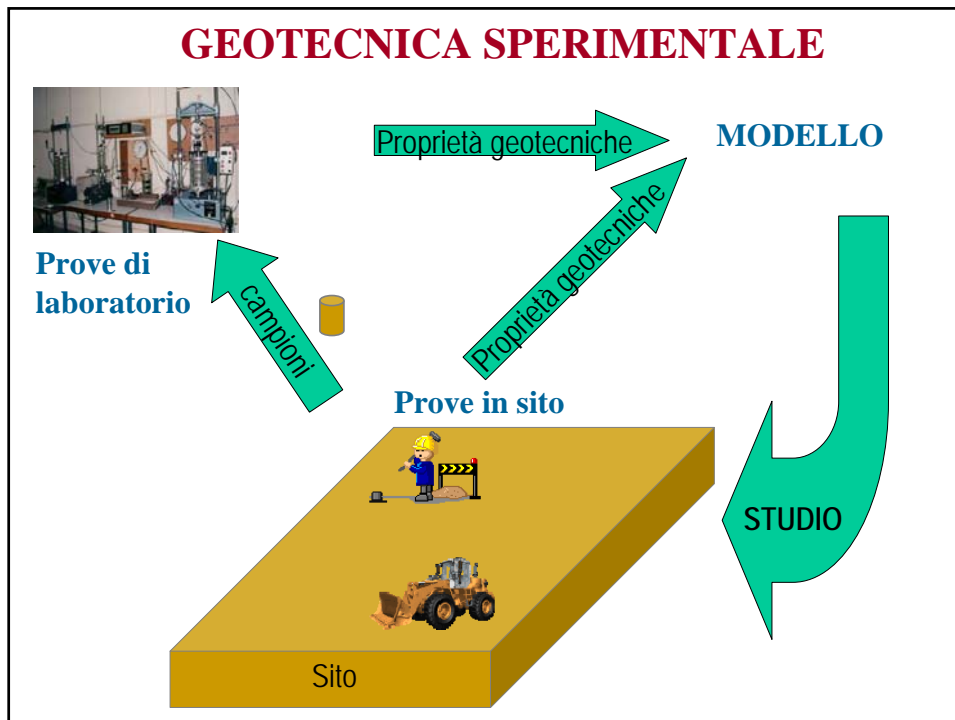


PECULIARITÀ DELLA GEOTECNICA

- ❑ estrema diversità dei terreni naturali che dà luogo non solo ad un'ampia variabilità delle proprietà fisiche e meccaniche ma a classi di comportamento meccanico differenti
- ❑ le proprietà dei materiali non sono note a priori (non le scelgo!) ma devono essere ricavate da **appropriate indagini**

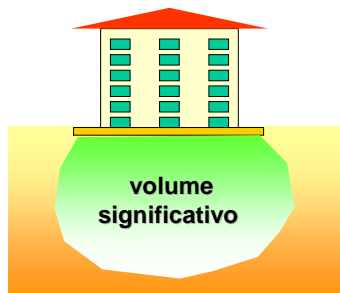
Le considerazioni precedenti rendono imprescindibile la geotecnica sperimentale in qualsiasi problema applicativo ed evidenziano il ruolo fondamentale delle indagini geotecniche

GEOTECNICA SPERIMENTALE



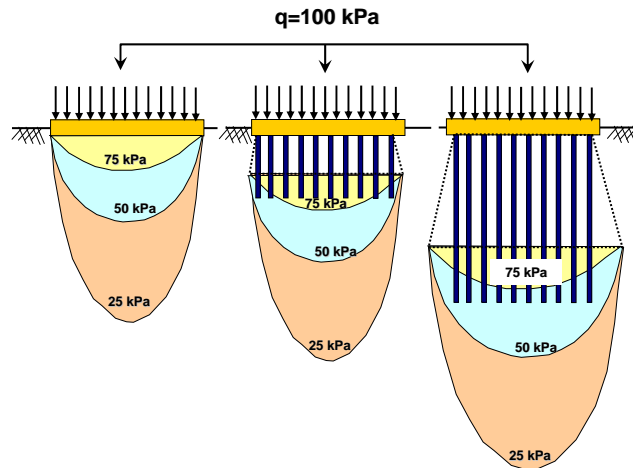
Modello geotecnico di sottosuolo

Le indagini geotecniche devono essere programmate in funzione del tipo di opera e/o di intervento e devono riguardare il **volume significativo**, e devono permettere la **definizione del modello geotecnico** di sottosuolo necessario per lo studio del problema in esame.



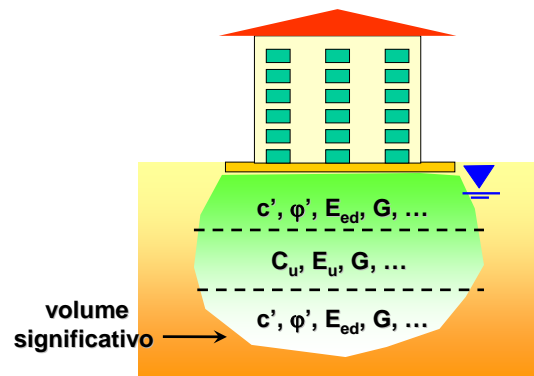
Il modello geotecnico di sottosuolo

Il volume di terreno da indagare dipende dalle scelte progettuali



Il modello geotecnico di sottosuolo

Per modello geotecnico si intende uno schema rappresentativo delle condizioni stratigrafiche, del regime delle pressioni interstiziali e della caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce comprese nel volume significativo, finalizzato all'analisi quantitativa di uno specifico problema geotecnico.



Fasi della caratterizzazione geotecnica

Rilievi geologici



1) definizione dei tratti geologici essenziali (morfologia superficiale e sepolta, eventuali discontinuità strutturali)

Indagini geognostiche



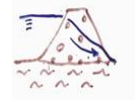
2) identificazione della geometria e delle proprietà fisiche dei materiali (terreni e rocce) che costituiscono il sottosuolo (profilo stratigrafico)

Misure piezometriche



3) caratterizzazione del regime idrico sotterraneo iniziale e suo monitoraggio in esercizio (rilievo di quote piezometriche/pressioni interstiziali)

Misure di permeabilità e consolidazione



4) analisi della risposta dei terreni sotto falda ad una variazione del regime idraulico o tensionale (caratteristiche di permeabilità e di consolidazione)

Prove meccaniche



5) analisi del comportamento meccanico del sottosuolo in condizioni di esercizio o ultime (relazione sforzi-deformazioni e resistenza al taglio)

Tipo di indagini geotecniche

Finalità	Mezzi di indagine	
Profilo stratigrafico	Diretti	<ul style="list-style-type: none"> • Scavi accessibili (pozzi, trincee, cunicoli) • Fori di sondaggio
	Indiretti	<ul style="list-style-type: none"> • Prove geofisiche
Proprietà fisico-meccaniche	In laboratorio	<ul style="list-style-type: none"> • Compressione triassiale • Taglio diretto
		<ul style="list-style-type: none"> • Compressione edometrica
	In sito	<ul style="list-style-type: none"> • Penetrometriche statiche e dinamiche • Pressiometriche, Dilatometriche, Scissometriche
		<ul style="list-style-type: none"> • Geofisiche
Misura pressione interstiziale	<ul style="list-style-type: none"> • Piezometri 	
Permeabilità	<ul style="list-style-type: none"> • Prove di emungimento • Prove di immissione 	

Ingegneria Geotecnica Sismica

Ingegneria Geotecnica Sismica

L'Ingegneria Geotecnica Sismica è una disciplina "giovane"

Terremoto di Niigata, Giappone, 1964

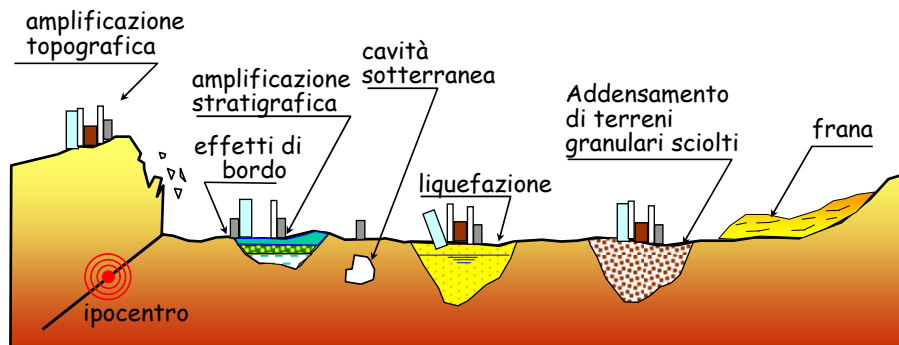


Terremoto di Anchorage, Alaska, 1964



Scenari di pericolosità sismica locale

- amplificazione locale
- addensamento di terreni granulari sciolti
- liquefazione
- crolli di cavità sotterranee
- instabilità dei pendii



ROTTURA SUPERFICIALE DI FAGLIA



Terremoto di Izmit $M_w=7.4$
(Turchia, 1999)

crolli a sandwich delle costruzioni
in c.a. a causa della prossimità
ad una faglia

faglia



MANIFESTAZIONI IN SUPERFICIE



Terremoto di Izmit (Turchia, 1999):
spostamento della linea ferroviaria per
effetto della rottura in superficie



FENOMENI DI LIQUEFAZIONE

Terremoto di Colima
(Messico, 2003)



Deformazioni laterali dovuti a
liquefazione nel porto di Manzanillo



FENOMENI

Terremoto di Niigata 1964

Perdita di capacità portante



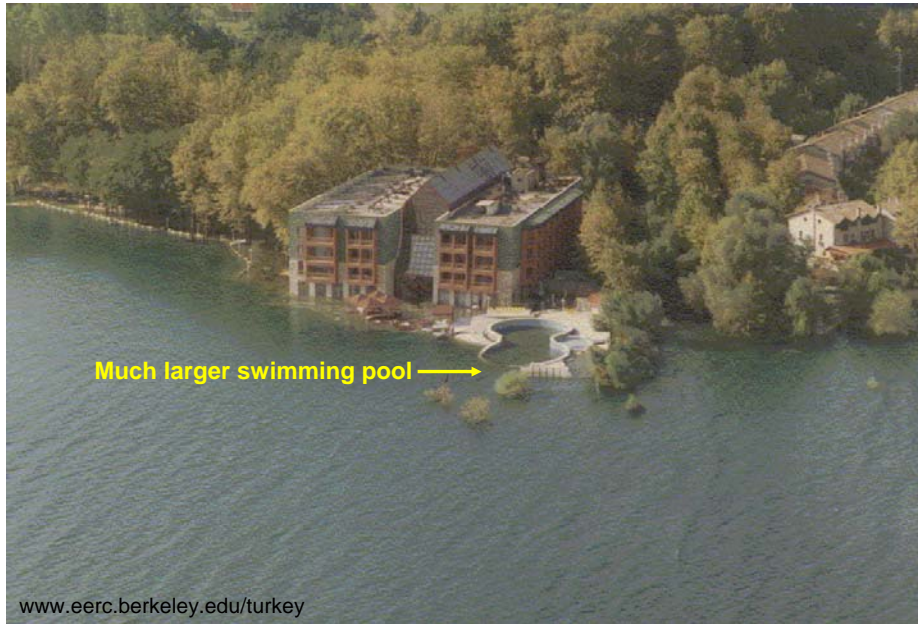
FRANE INDOTTE DA SISMA

Terremoto di El Salvador del
13 gennaio 2001 (M=7.7)

Frana di Las Colinas



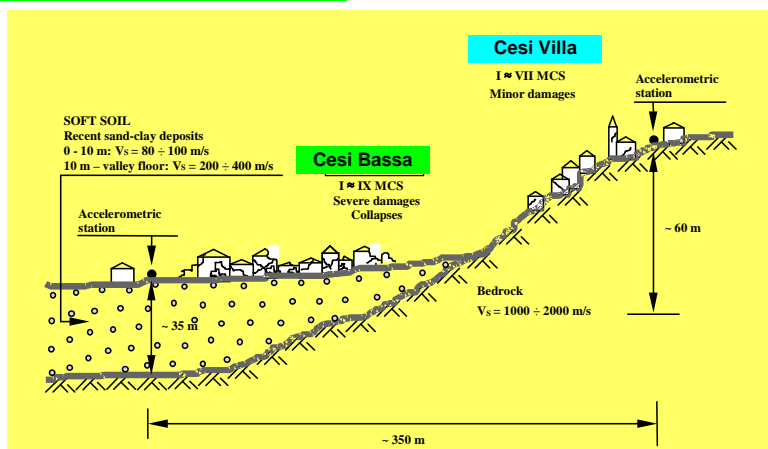
Settlement and Lateral Spreading at Hotel Sapanca



Sequenza sismica Umbria-Marche del 1997: il caso di Cesi

Cesi Bassa: sottosuolo
costituito da argilla tenera

Cesi Villa: sottosuolo rigido



Sequenza sismica Umbria-Marche del 1997: il caso di Cesi

Cesi Bassa – IX MCS

Cesi Villa – VII MCS



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.

Il terremoto dell'Aquila del 6 aprile 2009

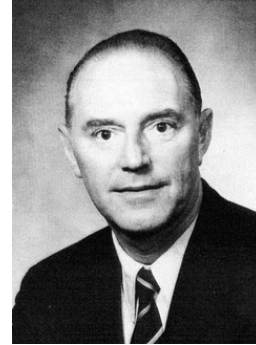
Il lago Sinizzo



Ingegneria Geotecnica Sismica

H.B. Seed è riconosciuto come il padre di questa nuova importante disciplina. I suoi studi pionieristici iniziano intorno alla metà degli anni '60

Negli **Stati Uniti** un notevole progresso della disciplina avviene a seguito del terremoto di San Fernando (California) del 1971.



Nel periodo 1965-1980 anche in **Giappone** si assiste ad un notevole avanzamento delle conoscenze sia in campo teorico che applicativo.

Nello stesso periodo, e fino all'incirca ai primi anni '80, l'**Italia** registra invece un notevole ritardo delle conoscenze di geotecnica sismica

Eventi sismici in Italia

Terremoti che negli ultimi cento anni hanno provocato in Italia un'intensità epicentrale del X o XI grado della scala Mercalli

Data	Area Colpita	Intensità epicentrale	Magnitudo	Vittime
8.9.1905	Calabria	X	7.5	326
28.12.1908	Calabria Meridionale Messina	XI	7.3	80.000
15.10.1911	Area Etna	X	4.5	13
8.5.1914	Area Etna	X	4.9	69
13.1.1915	Marsica (Avezzano)	XI	7.0	33.000
29.6.1919	Mugello	X	6.3	>100
76.9.1920	Garfagnana	X	6.5	171
23.7.1930	Irpinia	X	6.7	1404
15.1.1968	Valle del Belice	X	5.9	231
6.5.1976	Friuli	X	6.5	965
23.11.1980	Irpinia/Basilicata	X	6.9	2914
06.04.2009	Abruzzo	X	6.3	297

Eventi sismici in Italia

Terremoti che negli **ultimi cento anni** hanno provocato in Italia un'intensità epicentrale del VIII grado della scala MCS sono stati poco più di 40

cioè 1 ogni 2-3 anni

Il terremoto del Molise del 2003, quello dell'Abruzzo del 2009 non sono quindi eventi eccezionali ma rientrano nella normale sismicità, frequente e territorialmente diffusa, che caratterizza il territorio italiano

L'Ingegneria Geotecnica Sismica in Italia

Periodo 1980-2002

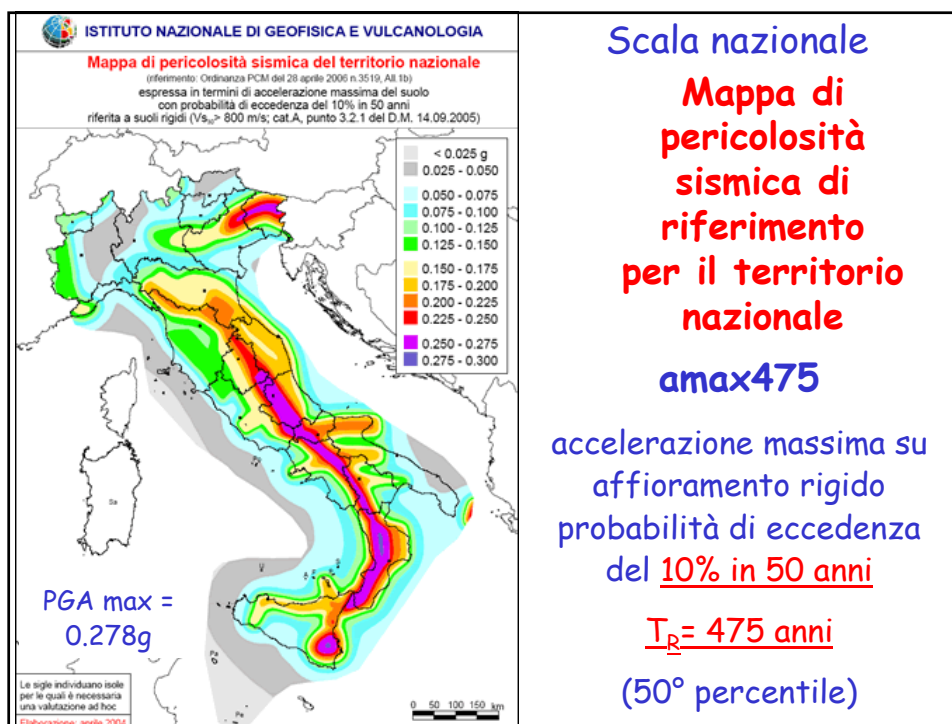
- Terremoto del Friuli del 6 maggio 1976
- Terremoto Irpino del 23 novembre 1980

I due forti eventi sismici, a breve distanza di tempo l'uno dall'altro, hanno stimolato gli studi e le ricerche in campo sismologico, geotecnico e strutturale.

- Sequenza sismica Umbria-Marche 1997-98
- Terremoto del Molise 2002
- Sequenza sismica aquilana del 2009

Scale di indagine e obiettivi

Scala nazionale	⇒	Classificazione sismica del territorio nazionale: Suddivisione del territorio nazionale in zone a diversa <i>pericolosità sismica</i>
Scala locale	⇒	Microzonazione sismica: Suddivisione dell'area in sottozone a diversa <i>pericolosità sismica locale</i> indicando le aree sismicamente critiche
Scala manufatto	⇒	Progettazione antisismica Proteggere la vita umana e limitare i danni attraverso una corretta progettazione



Scale di indagine e obiettivi

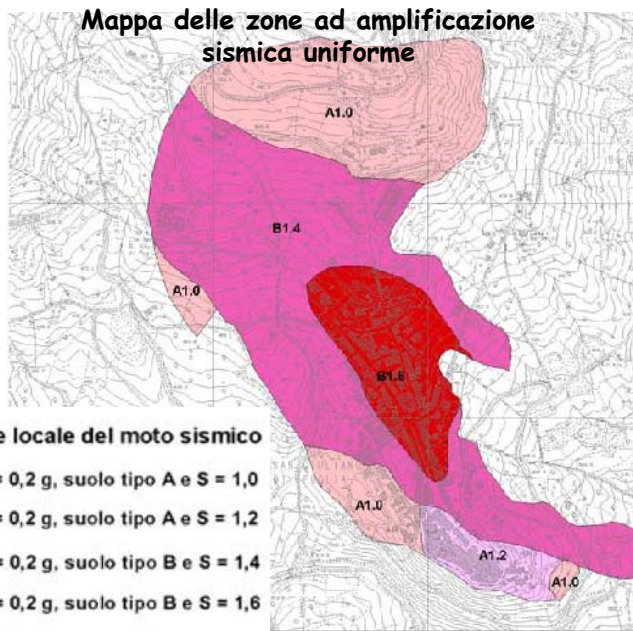
Scala locale







Microzonazione
sismica

San Giuliano di
Puglia (DPC)

Mappa delle zone ad amplificazione
sismica uniforme



Fenomeni di amplificazione locale del moto sismico

	A1.0 Spettro per $ag = 0,2$ g, suolo tipo A e $S = 1,0$
	A1.2 Spettro per $ag = 0,2$ g, suolo tipo A e $S = 1,2$
	B1.4 Spettro per $ag = 0,2$ g, suolo tipo B e $S = 1,4$
	B1.6 Spettro per $ag = 0,2$ g, suolo tipo B e $S = 1,6$

L'Ingegneria Geotecnica Sismica in Italia

Periodo 1980-2002

Microzonazione sismica

"Forse non è superfluo ricordare che, intorno al 1970, anche nell'ambiente accademico bastavano le dita di una mano per contare coloro che conoscevano con ragionevole approssimazione cosa fosse la MS. Questo numero aumentò impercettibilmente negli anni immediatamente successivi, ed anche dopo gli eventi del Friuli del 1976 non arrivò probabilmente a superare le pochissime decine, nonostante le attività specifiche assunte dalla amministrazione regionale Friuli-Venezia Giulia e da alcuni istituti universitari e nonostante l'avvio delle attività del PFG".

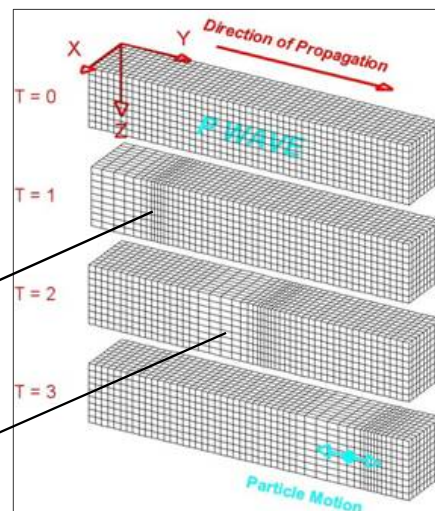
(da "Elementi per una Guida alle Indagini di Microzonazione Sismica", AAVV, 1986)

Taranto (Brambati et al. 1980), Ancona (AA.VV., 1981), Irpinia (CNR-GNDT, 1983), Napoli (Vinale, 1988a e b), Gubbio (Augusti et al., 1989; Crespellani et al., 1989), Firenze (Vannucchi, a cura di, 1991), Benevento (Marcellini et al., 1995a e b), Città di Castello (Crespellani et al., 1997b), Calabritto (Maugeri e Carrubba (1997), Fabriano (Marcellini e Tiberi, 2000; Marcellini e Maugeri, 2001;), Nocera Umbra (Marcellini e Maugeri, 2001; Crespellani et al., 1999a, 2000a, 2001a e b), 60 centri dell'Umbria (Pergalani e Petrini, 2000), costa orientale dell'Emilia Romagna (Crespellani et al., 1999b e 2002;), Garfagnana (Crespellani et al., 2002) Alta Val Tiberina (Crespellani et al., 2002b; Pergalani et al., 2002a e b), etc...

Richiami di Risposta Sismica Locale (RSL) e Dinamica dei Terreni

Onde di compressione P

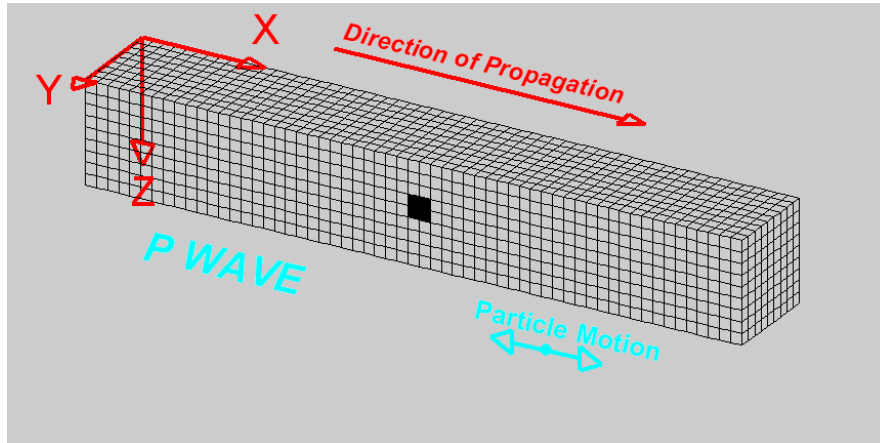
Le onde P producono vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione (il moto delle particelle è parallelo alla direzione di propagazione) e deformazioni di compressione e estensione



compressione

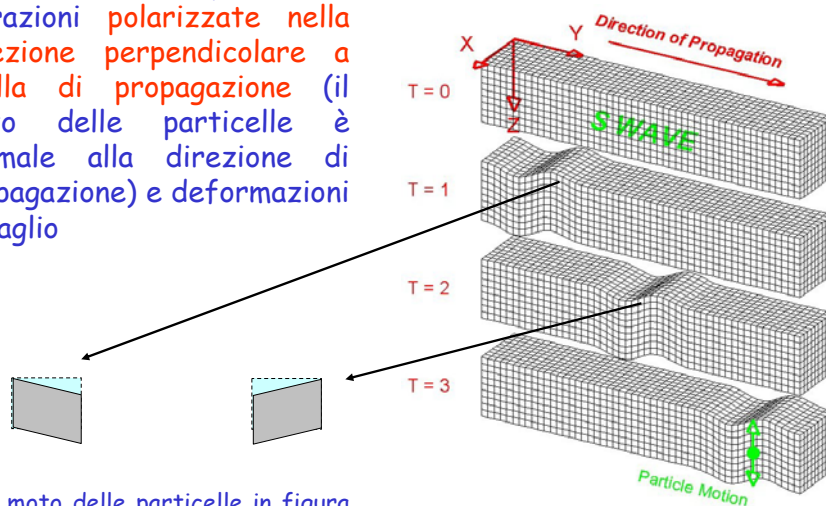
estensione

Onde di compressione P - Animazione



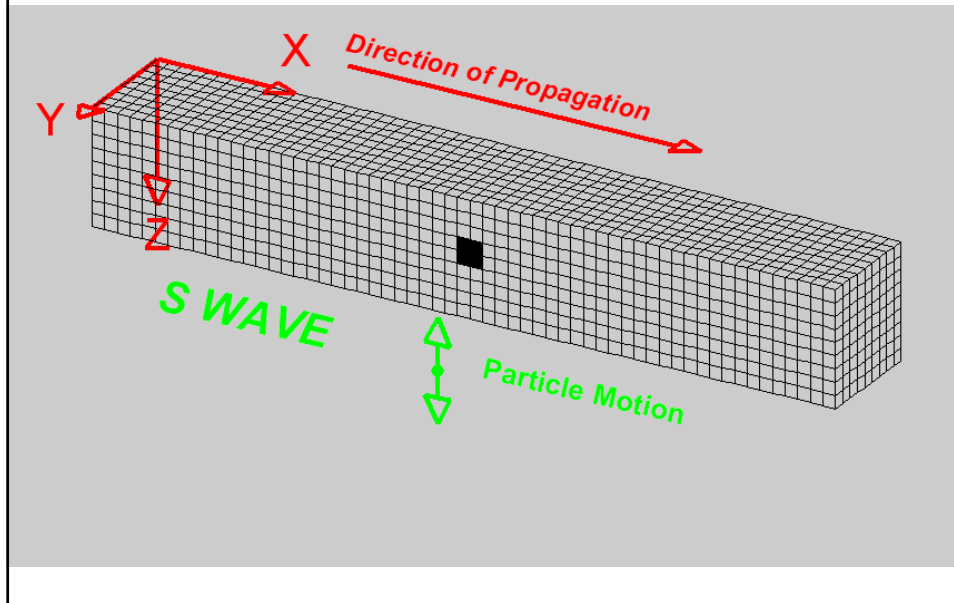
Onde di taglio S

Le onde S producono vibrazioni polarizzate nella direzione perpendicolare a quella di propagazione (il moto delle particelle è normale alla direzione di propagazione) e deformazioni di taglio



NB: Il moto delle particelle in figura è verticale ma può essere in qualsiasi direzione

Onde di taglio S - Animazione



Velocità delle onde e proprietà dei terreni

In generale la velocità delle onde sismiche dipende dalle caratteristiche **fisiche** (densità) e **meccaniche** (modulo di Young E, coefficiente di Poisson ν , etc.) del mezzo in cui si propagano.

In un mezzo *omogeneo elastico lineare isotropo* valgono le seguenti relazioni:

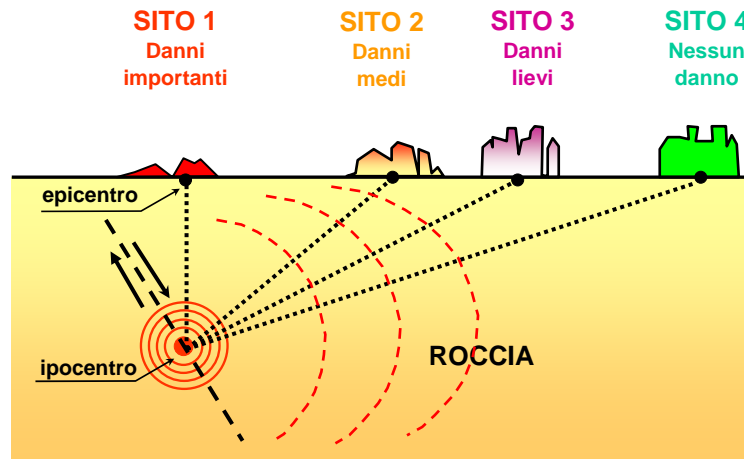
$$V_P = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{E_{ed}}{\rho}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

La velocità di propagazione aumenta con la rigidezza del materiale e si riduce con la densità.

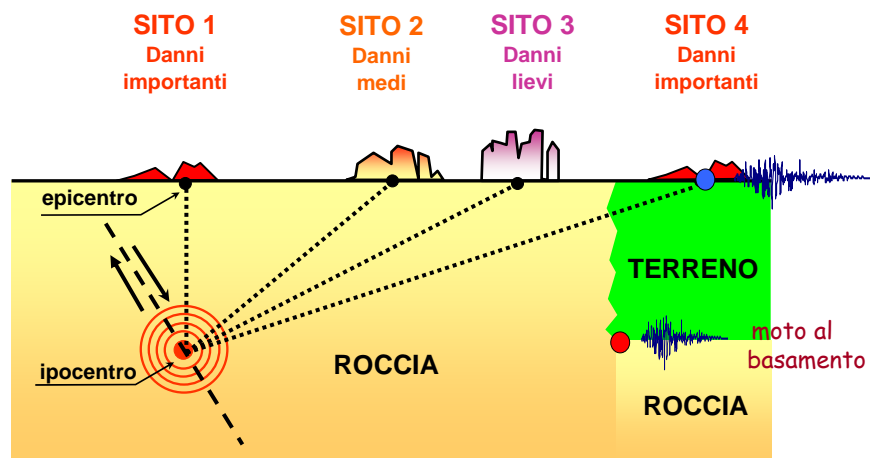
Pericolosità sismica e attenuazione del moto

Sottosuolo rigido (roccia) con piano campagna orizzontale



Risposta sismica locale

Sottosuolo generico



Risposta Sismica Locale (Amplificazione locale)

Condizioni locali

caratteristiche morfologiche e stratigrafiche dei depositi di terreno e degli ammassi rocciosi superficiali e delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali che li costituiscono

Risposta Sismica Locale

insieme delle modifiche che il moto sismico di ingresso al sito subisce, in termini di

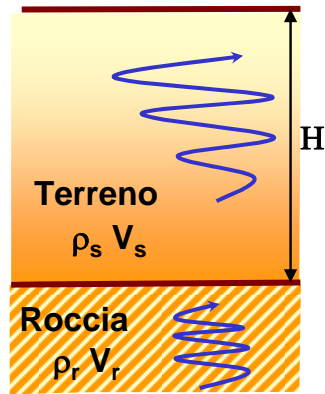
- **ampiezza**
 - **contenuto in frequenza**
 - **durata**
- dovute alle condizioni locali

Fattori influenti

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

- **Effetti stratigrafici o mono-dimensionali (1D)**
- **Effetti di valle (bidimensionali - 2D)**
- **Effetti topografici (bidimensionali - 2D)**

Effetti stratigrafici (1D)



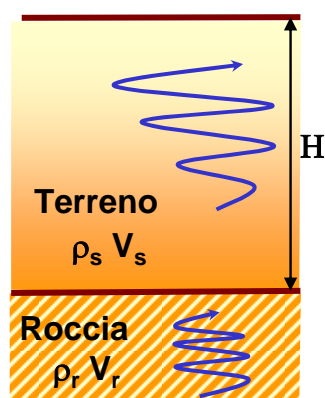
contrasto di impedenza

$\rho_r V_r$ = impedenza sismica roccia

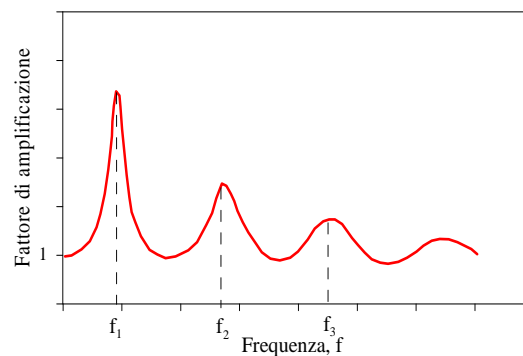
$\rho_s V_s$ = impedenza sismica terreno

Depositi costituiti da terreni di caratteristiche meccaniche diverse da quelle della roccia sottostante

Effetti stratigrafici (1D)



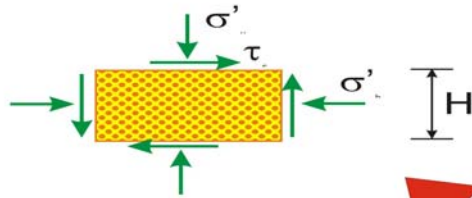
risonanza



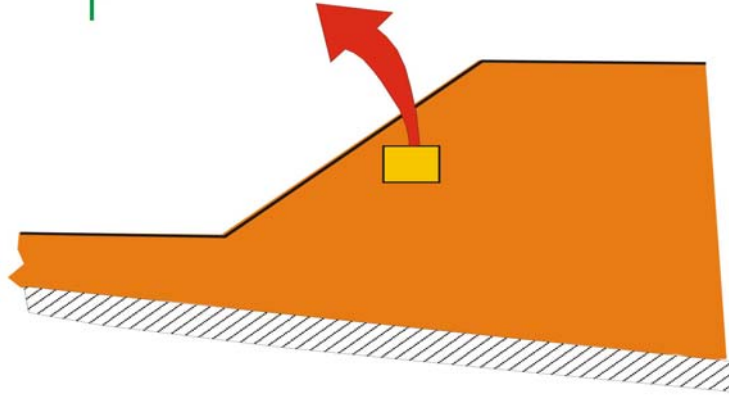
$$f_1 = \frac{V_s}{4H}$$

$$T_1 = \frac{4H}{V_s}$$

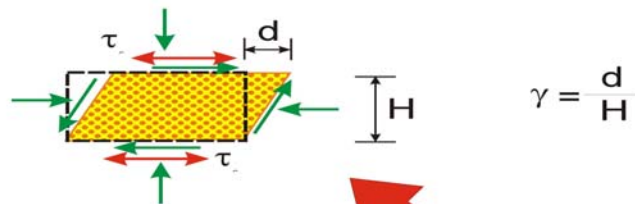
Il legame sforzi-deformazioni



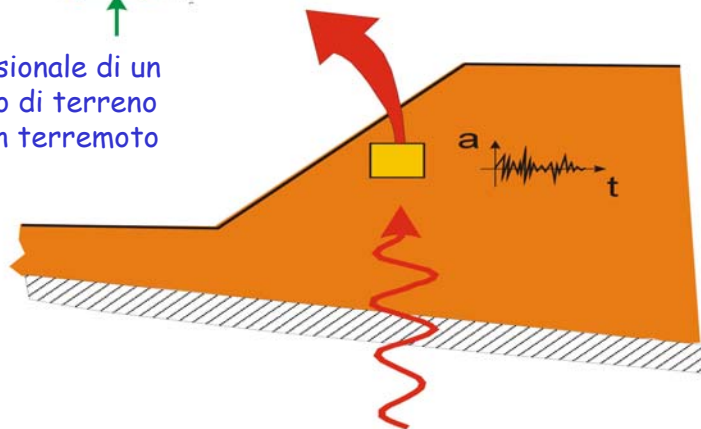
Stato tensionale di un
elementino di terreno
prima del terremoto



Il legame sforzi-deformazioni



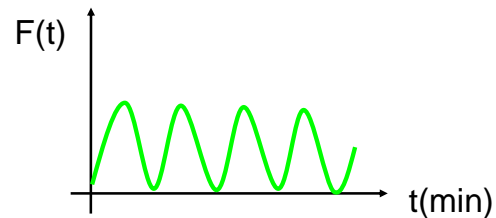
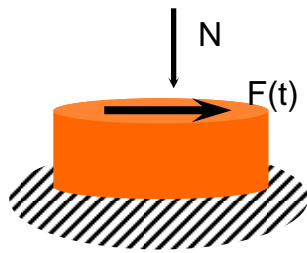
Stato tensionale di un
elementino di terreno
durante un terremoto



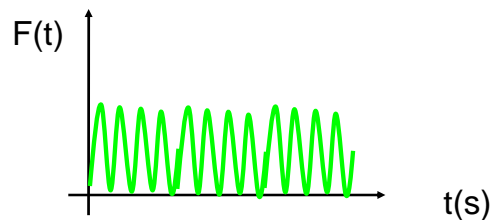
Dinamica dei terreni

Il campo di sollecitazioni

sollecitazione ciclica



sollecitazione dinamica



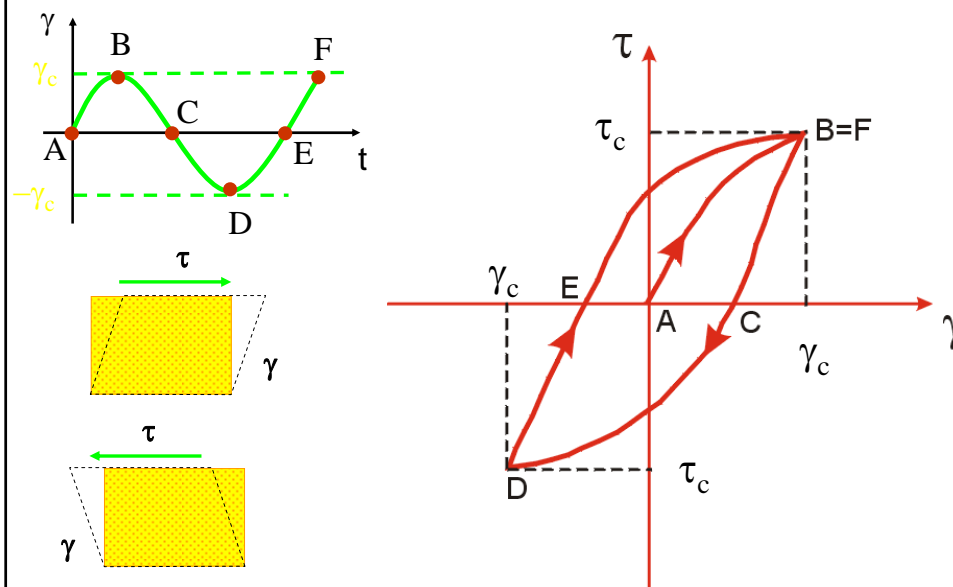
Dinamica dei terreni

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-deformazioni tangenziali**

Risposta di un elemento di terreno soggetto a sollecitazioni cicliche



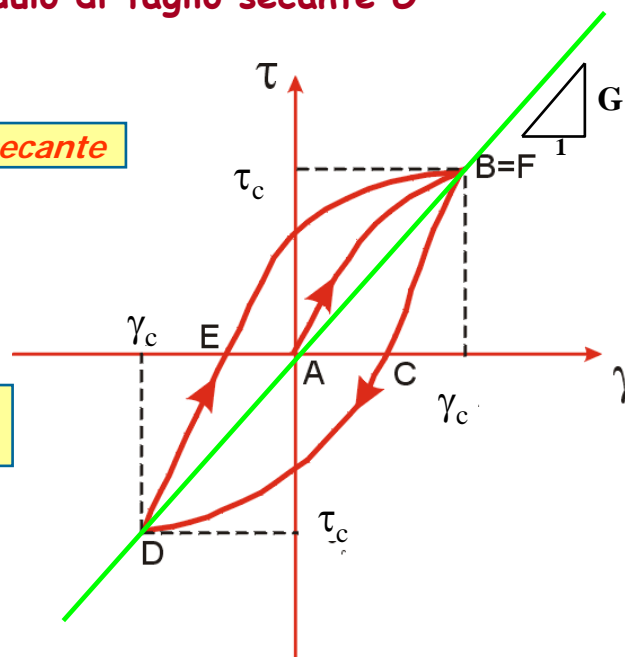
Modulo di taglio secante G

Modulo di taglio secante

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

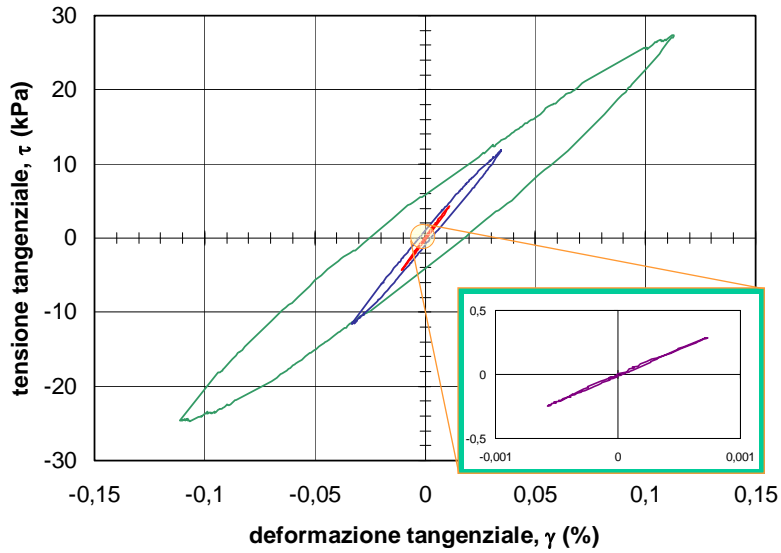
Fattore di smorzamento

D

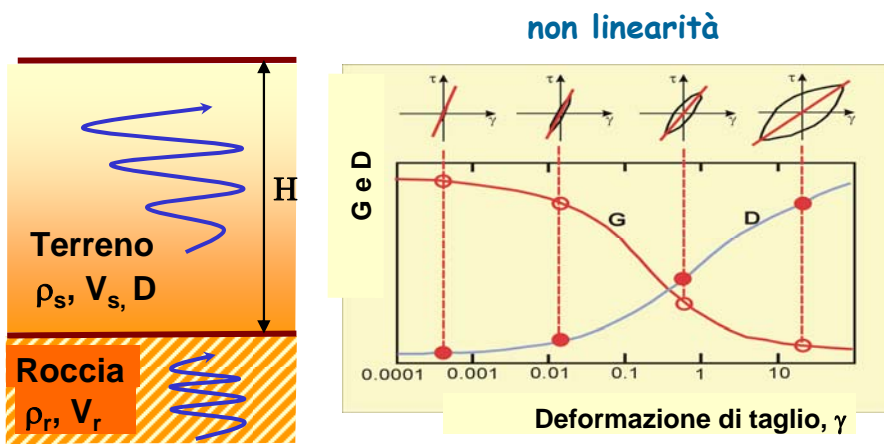


Evidenza sperimentale del legame τ - γ

Prove di taglio semplice ciclico (DSDSS) sull'argilla di Augusta



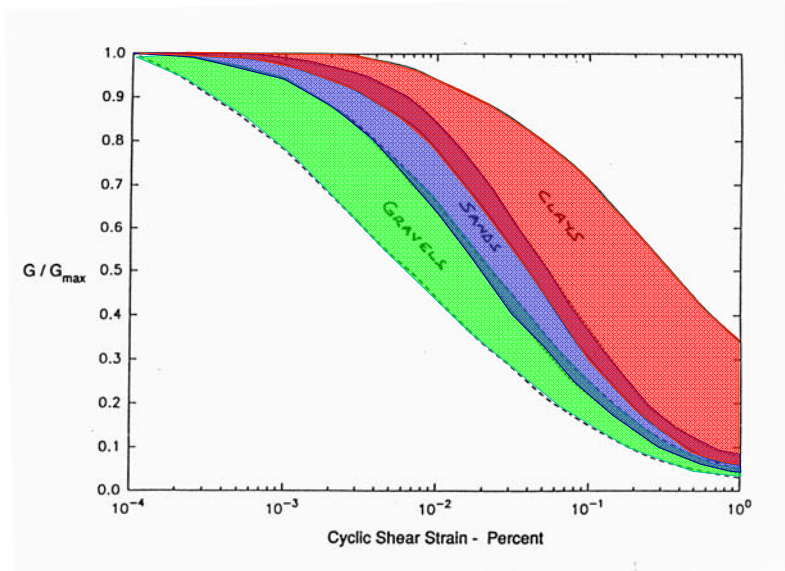
Effetti stratigrafici (1D)



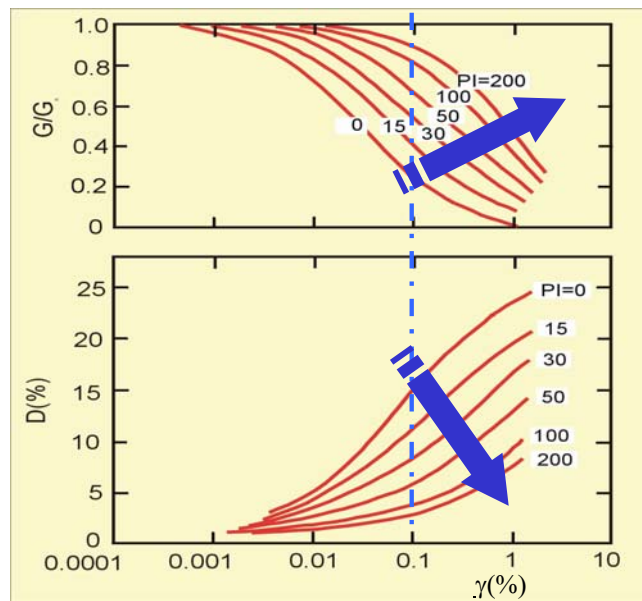
Al crescere dell'intensità dell'input sismico



Campi di variazione delle curve $G/G_0-\gamma$ per ghiaie, sabbie e argille



Influenza dell'indice di plasticità I_p sulle curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$



Il terremoto in Emilia-Romagna del sett. 2003

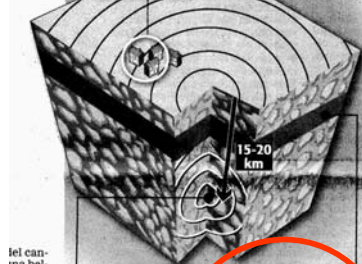
Il terremoto di Città del Messico del 1985



21255 Nel catastrofico terremoto che colpì Città del Messico nel 1985, rimase indenne il più alto edificio della metropoli, la «Torre Latino-Americana», perché le sue fondamenta erano state gettate su un terreno paludoso, che dunque smorzò le vibrazioni.

Perché i danni sono stati limitati

CASE IN PIETRA
Le case basse costruite in campagna con pietre spesse e legno sono riuscite ad assorbire meglio l'urto delle onde

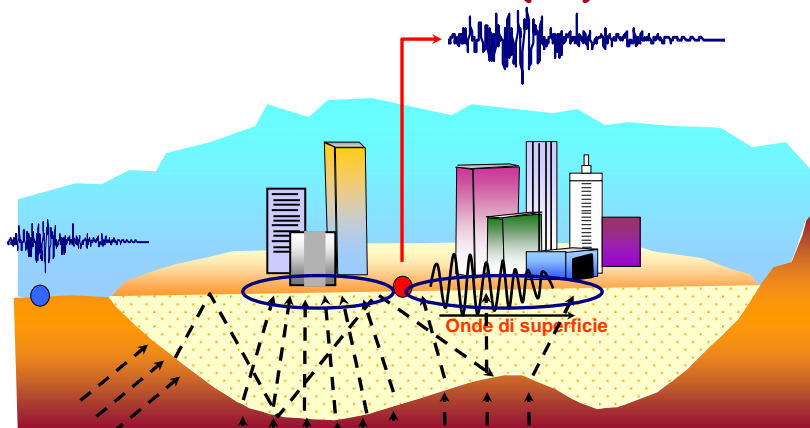


PROFONDITÀ
La profondità focale dell'ipocentro è stata 15-20 chilometri dentro la crosta terrestre. L'onda sismica ha avuto più spazio per smaltire l'effetto devastante

TERRENO ARGILLOSO
Il terreno morbido e argilloso tipico dell'Appennino tosco-emiliano ha facilitato l'assorbimento delle onde riducendo gli effetti in superficie

ne siamo proprio sicuri?

Effetti di valle (2D)

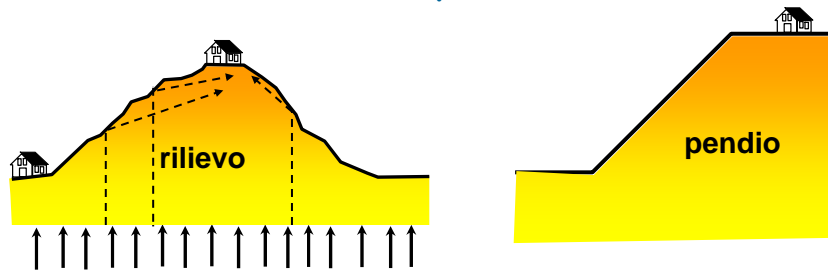


Rispetto al caso 1D

- ➔ **Maggiori amplificazioni**
- ➔ **Aumento significativo della durata del moto sismico**
- ➔ **Amplificazione a larga banda**

Effetti topografici (2D)

Sommità di rilievi, creste, pendii, etc.



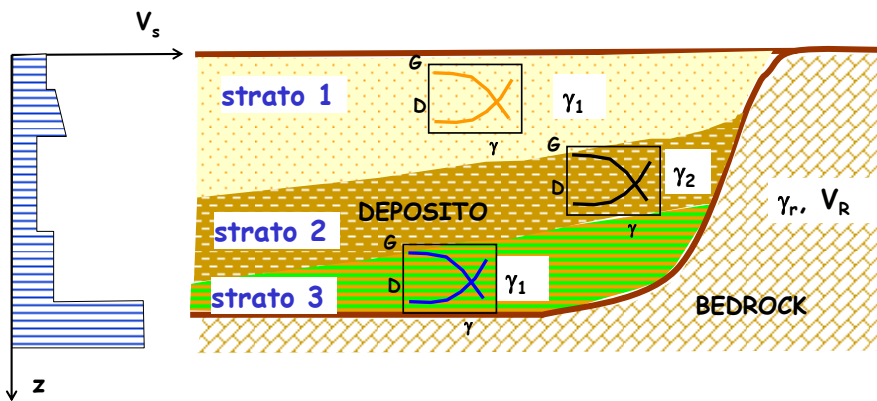
- ⇒ Focalizzazione delle onde sismiche in cresta
- ⇒ Complessa interazione tra campo d'onda incidente e diffratto

**Caratterizzazione geotecnica
ai fini sismici**

Modello geotecnico di sottosuolo per analisi RSL

caratteristiche geotecniche dei terreni e della roccia di base

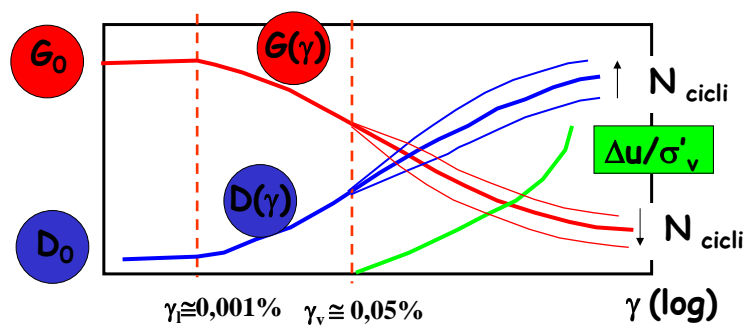
- pesi dell'unità di volume γ (dei terreni) e γ_R (della roccia di base)
- profilo della velocità delle onde di taglio V_s del terreno;
- velocità delle onde di taglio nella roccia V_R ;
- curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$)
- eccessi di pressione interstiziale



Proprietà dinamiche di interesse

Il comportamento dinamico dei terreni può essere descritto mediante:

$$G_0, D_0, G(\gamma), D(\gamma), \Delta u/\sigma'_v(\gamma)$$



Prove in situ e in laboratorio

Per la determinazione delle proprietà dinamiche dei terreni si ricorre a tecniche sperimentali **in situ e in laboratorio**

- ✓ **prove in situ** per la valutazione del modulo di taglio massimo G_0 dei terreni nella loro sede naturale (D_0 in fase di ricerca)
- ✓ **prove in laboratorio** per la determinazione di G_0 , D_0 e delle leggi $G(\gamma)$ e $D(\gamma)$ nel campo di deformazione di interesse

Confronto sito-laboratorio

Prove in situ

Principali vantaggi

Indagano i terreni nella loro sede naturale (non disturbati da operazioni di campionamento, variazione dello stato tensionale, etc.)

Principali limiti e svantaggi

- ✓ Consentono di studiare il comportamento del terreno in campo "elastico lineare" per i piccoli valori delle deformazioni indotte
- ✓ Interpretazione più complessa e condizioni al contorno non ben definite
- ✓ Mancanza di procedure standard

Confronto sito-laboratorio

Prove in laboratorio

Principali vantaggi

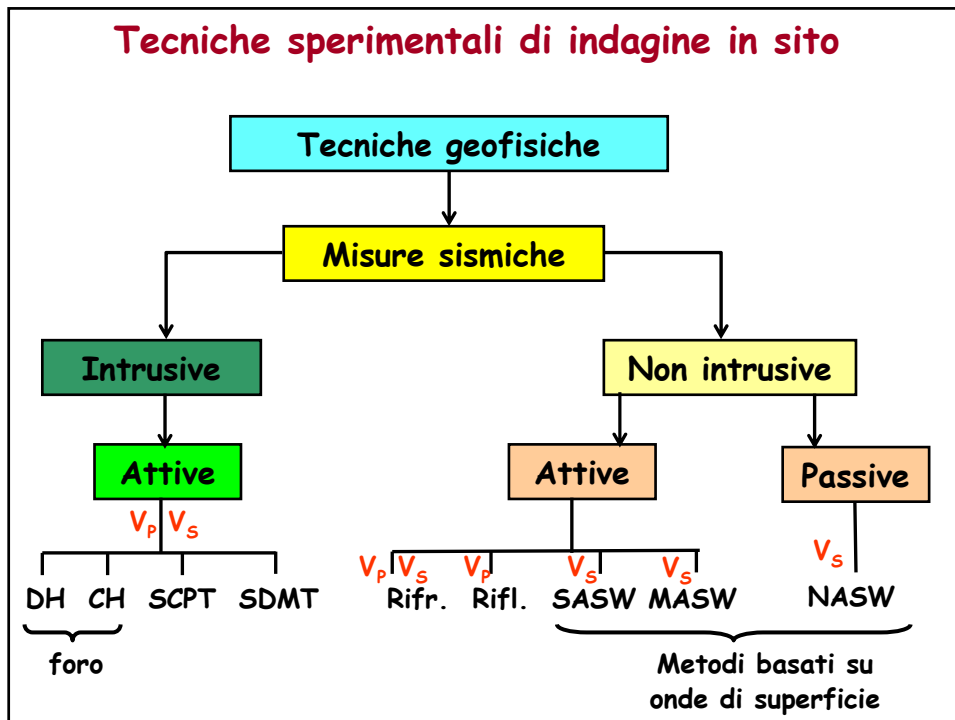
Indagano il comportamento del terreno in un campo di deformazioni ben più ampio e sotto condizioni accurate, controllate e riproducibili di sollecitazione e deformazione.

Principali limiti e svantaggi

- ✓ Disturbo prodotto nelle fasi di campionamento e preparazione dei provini di terreno
- ✓ Dimensioni dei provini ridotte rispetto ai volumi di terreno interessati nei problemi al finito
- ✓ Difficoltà nei terreni non coesivi

Prove in sito

Tecniche sperimentali di indagine in sito



Misure sismiche

Pregi e limiti

Misure attive: sono generalmente più diffuse e più affidabili di quelle passive. In particolare i metodi in foro sono caratterizzati da minori ambiguità interpretative in quanto corredati da indicazioni stratigrafiche.

Misure passive consentono di determinare con buona approssimazione la frequenza fondamentale di un sito in condizioni particolari (strati piani e paralleli, elevato contrasto di impedenza, etc.). Il loro principale vantaggio risiede nel fatto che sono operativamente più semplici e generalmente più economiche. Dato il loro basso costo e bassa invasività, appaiono utili strumenti per **indagini esplorative** del territorio.

Misure intrusive. In genere più costose in quanto richiedono l'esecuzione di prefiori o l'utilizzo di penetrometri. Misura diretta (interpretazione semplice). Buona risoluzione anche a grande profondità. Costi e necessità di pianificazione con largo anticipo.

Misure non intrusive. Più economiche e più flessibili (tempo e spazio). Proprietà dinamiche medie. Risultati attendibili limitatamente agli strati superficiali. Interpretazione complessa.

Proprietà dinamiche determinabili con prove geofisiche sismiche

Le prove sismiche consentono di misurare direttamente la velocità di propagazione delle onde sismiche in un dato sottosuolo (onde P, S e onde superficiali di Rayleigh) da cui è possibile ricavare il modulo di taglio massimo G_0 dei terreni nella loro sede naturale.

$$V_s \rightarrow G_0$$

La determinazione del fattore di smorzamento D_0 a piccole deformazioni è tuttora oggetto di ricerca

$$D_0$$

Tecniche geofisiche - Misure sismiche

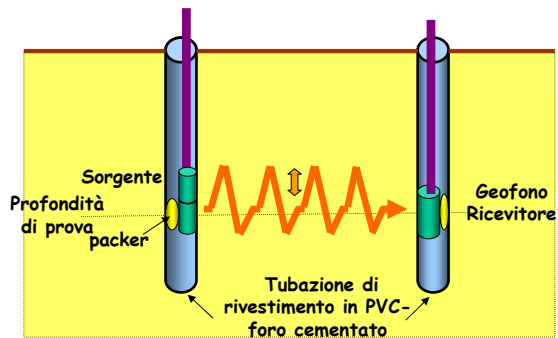
- ✓ Riflessione sismica
- ✓ Rifrazione sismica
- ✓ Cross-Hole (CH)
- ✓ Down-Hole (DH)
- ✓ Cono sismico (SCPT)
- ✓ Dilatometro sismico (SDMT)
- ✓ Analisi spettrale di onde di superficie (SASW)

Prova cross-hole (CH)

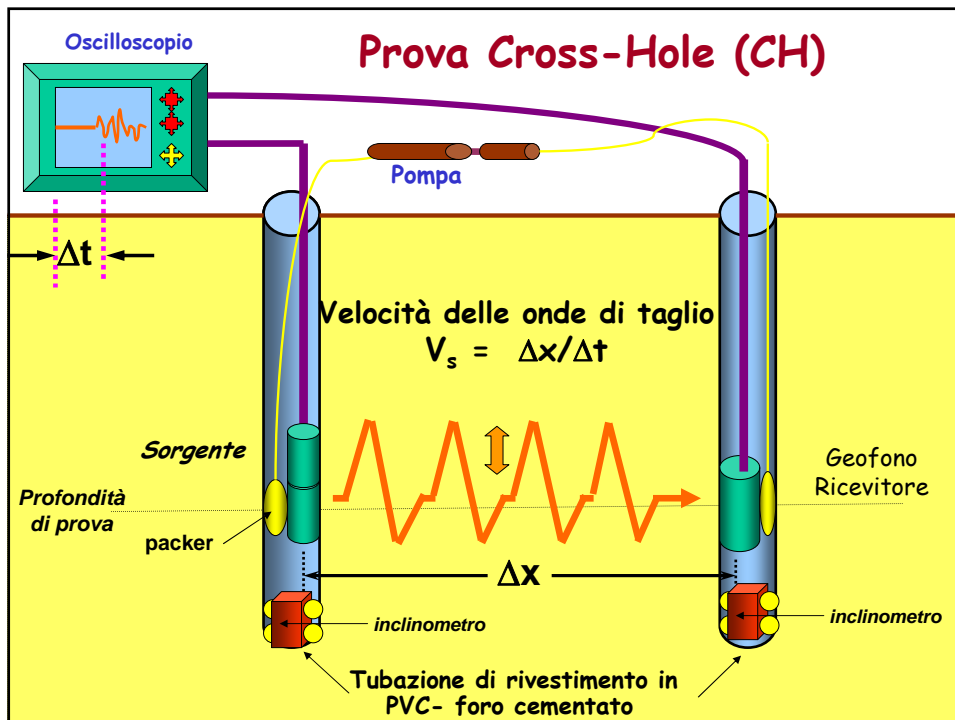
La sorgente meccanica è ubicata **in foro**; il ricevitore è ubicato in foro, **alla stessa profondità**.

Si misura il **tempo** necessario alle onde SV per spostarsi tra i due punti a distanza nota.

Misurando i **tempi di viaggio** delle onde, note le **distanze percorse**, si calcola la **velocità di propagazione** delle onde.



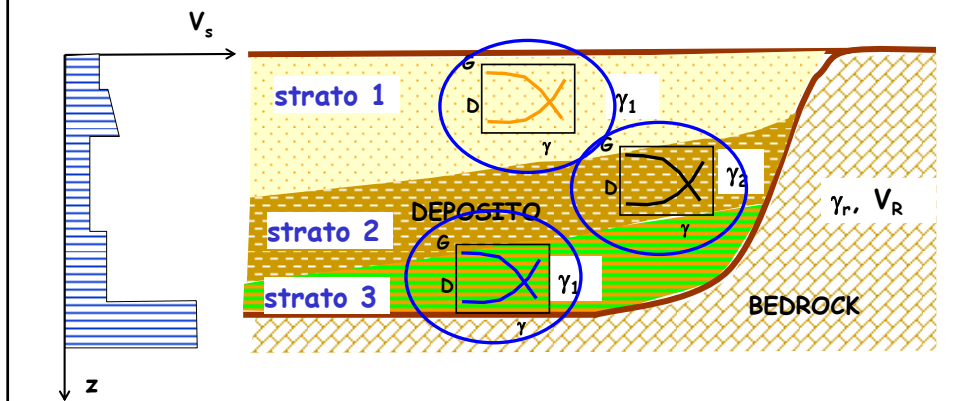
Prova Cross-Hole (CH)



Modello geotecnico di sottosuolo per analisi RSL

caratteristiche geotecniche dei terreni e della roccia di base

- pesi dell'unità di volume γ (dei terreni) e γ_R (della roccia di base)
- profilo della velocità delle onde di taglio V_s del terreno;
- velocità delle onde di taglio nella roccia V_R ;
- coefficiente di Poisson ν ;
- curve di decadimento del modulo di taglio ($G/G_0 - \gamma$) e di incremento del fattore di smorzamento ($D - \gamma$)



Prove in laboratorio

Prove in laboratorio

Prove cicliche

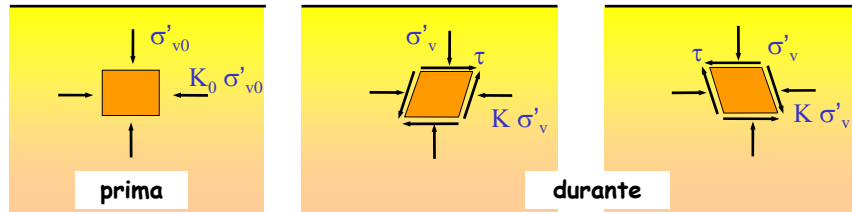
- ✓ Taglio semplice ($f = 0.01-1$ Hz)
- ✓ Taglio torsionale ($f = 0.01-1$ Hz)
- ✓ Triassiale ($f = 0.01-1$ Hz)

Prove dinamiche

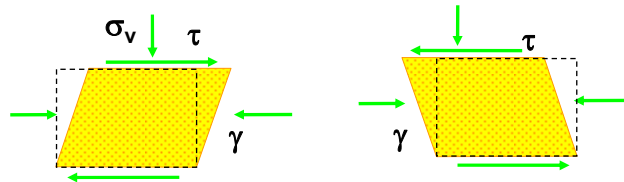
- ✓ Colonna risonante ($f > 10$ Hz)
- ✓ Bender elements ($f > 100$ Hz)

Prova di Taglio Semplice Ciclico (CSS - Cyclic Simple Shear)

Sollecitazioni di un elemento di terreno durante un evento sismico

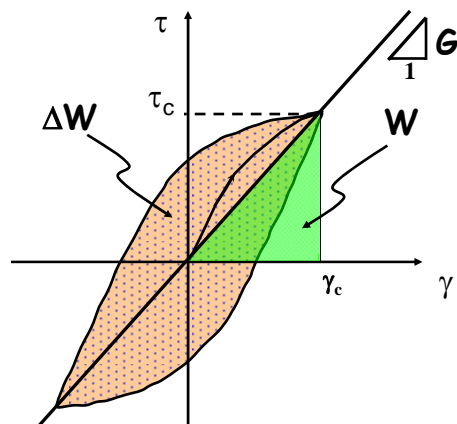


Stato tensionale nella prova di taglio semplice ciclico



Prova di taglio semplice ciclico (CSS)

I parametri geotecnici di interesse possono essere ottenuti direttamente dai cicli sforzi tangenziali-deformazioni tangenziali ottenuti.



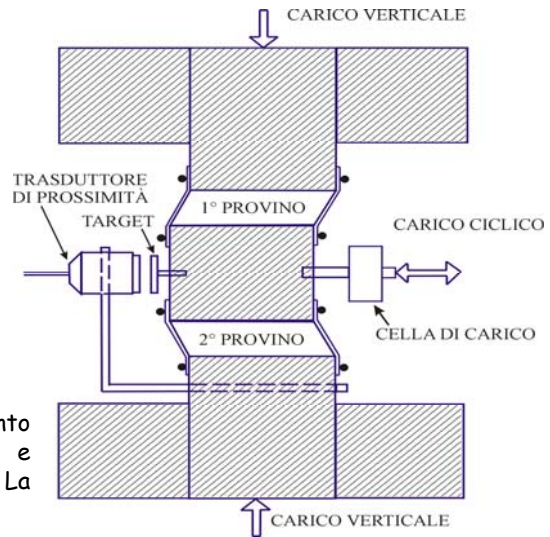
$$G = \frac{\tau_c}{\gamma_c}$$

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

Apparecchiatura di taglio semplice ciclico con doppio provino (DSDSS)

- provino cilindrico
- membrana con spirale metallica

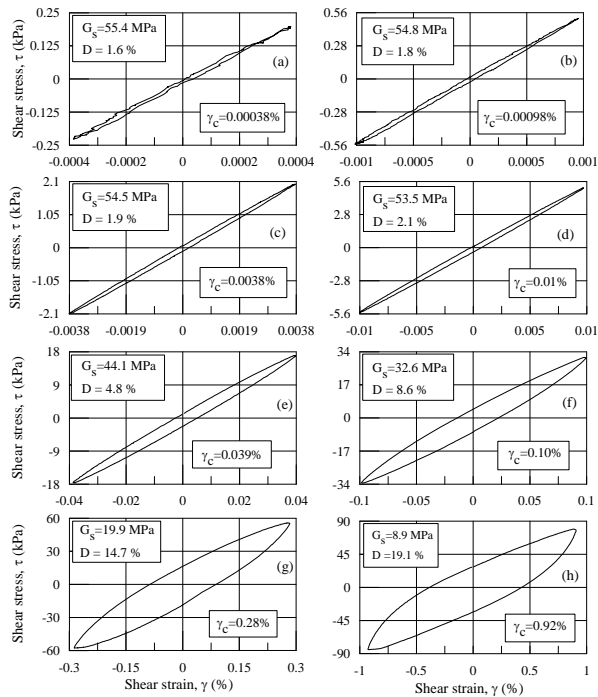
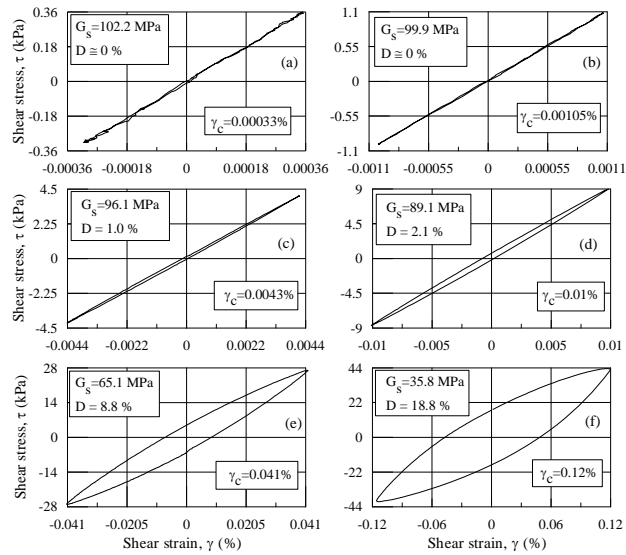
In dotazione presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica - Università La Sapienza di Roma



Apparecchiatura di taglio semplice ciclico con doppio provino (DSDSS)



Cicli di isteresi ottenuti da prove DSDSS sabbia di Toyoura



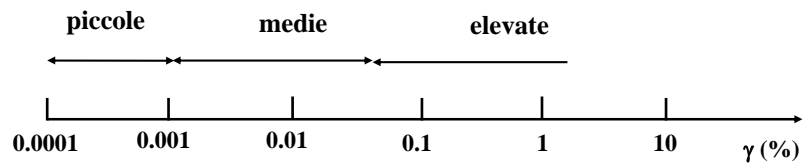
Cicli di
isteresi
ottenuti da
prove DSDSS

argilla di
Santa
Barbara

(D'Elia, Lanzo e
Pagliaroli, 2003)

Apparecchiature di taglio semplice ciclico

Campo di deformazioni investigato



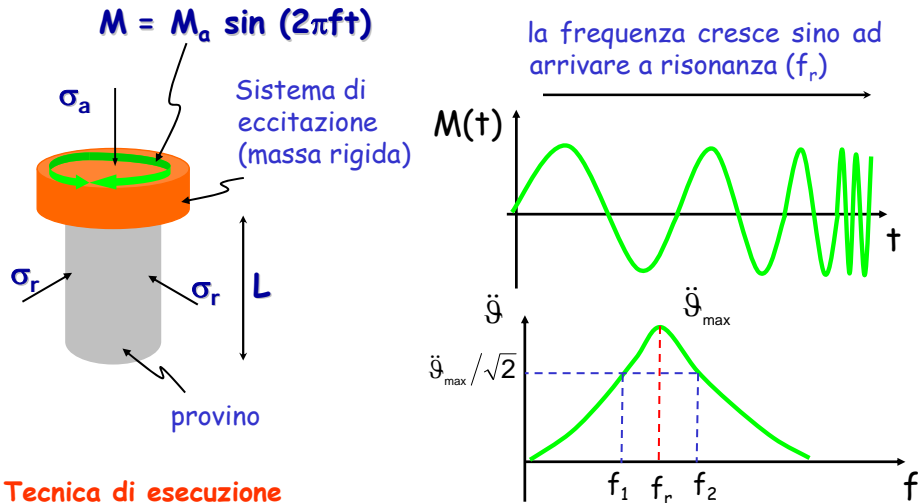
 DSDSS

Campo di frequenze investigato

f = 0.01-1 Hz

**Prova di Colonna Risonante
(RC - Resonant Column)**

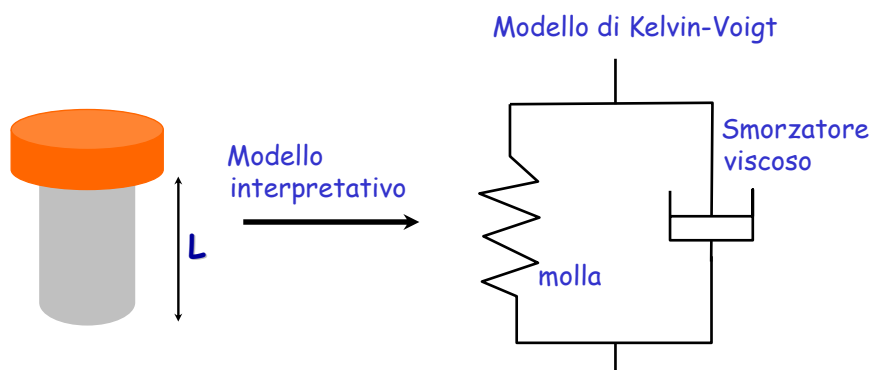
Prova di Colonna Risonante (RC)



Tecnica di esecuzione

- sollecitazioni applicate in condizioni dinamiche
- fissato M_a , si fa variare la frequenza con continuità individuando la prima frequenza di oscillazione f_r

Interpretazione della prova RC

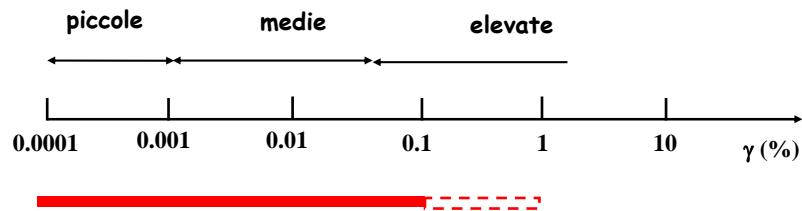


$$f_r \longrightarrow V_s \longrightarrow G_0, G$$

$$f_r, f_1, f_2 \longrightarrow D$$

Prova di Colonna Risonante (RC)

Campo di deformazioni investigato



Campo di frequenze investigato

$$f > 10 \text{ Hz}$$

Prova di Colonna Risonante (RC)

Pregi

- ✓ Alta risoluzione, affidabilità e ripetibilità a piccole deformazioni (è uno dei metodi di laboratorio più precisi e ripetibili per la misura di G_0)

Limiti

- ✓ La prova impone velocità di deformazione molto elevata che influenza le curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$
- ✓ La prova impone centinaia o migliaia di cicli di sollecitazione al provino
- ✓ meno affidabile di altre tecniche sperimentali per deformazioni $\gamma > 0,1\%$

Confronto sito-laboratorio

I due gruppi di tecniche sperimentali (prove in sito e prove in laboratorio) sono ovviamente **complementari**.

Infatti la definizione completa del comportamento dinamico dei terreni necessita sia di risultati acquisibili in sito, per la caratterizzazione alle piccole deformazioni, sia di risultati di laboratorio, per la caratterizzazione alle deformazioni più elevate.

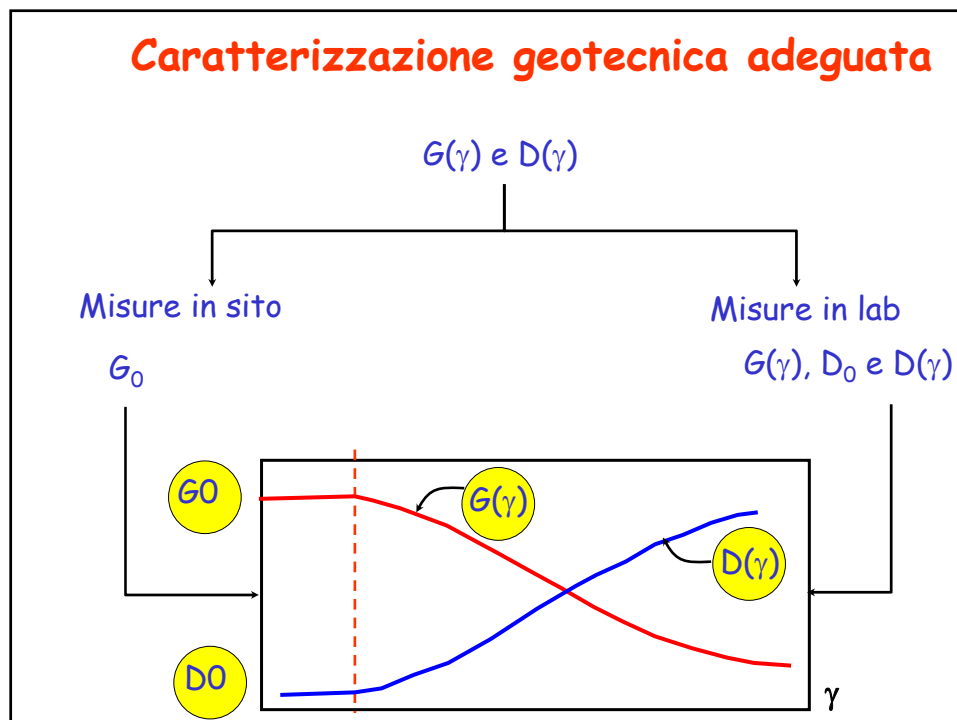
Prove in sito

- si evita il campionamento
- solo comportamento a basse deformazioni

Prove in laboratorio

- disturbo da campionamento
- comportamento in tutto il campo di deformazioni

Caratterizzazione geotecnica adeguata



Bibliografia

- 1) *KRAMER S.L. (1998). Geotechnical Earthquake Engineering (Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics)*
- 2) *LANZO G., SILVESTRI F. (1999). Risposta Sismica Locale. Teoria ed esperienze. Hevelius Edizioni. Marzo 1999.*
- 3) *AA.VV. (2005). "Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica-Linee Guida", Edizione provvisoria marzo 2005, Patron Editore, 83-98.*

Grazie per l'attenzione