

FONDAZIONI E STRUTTURE DI FONDAZIONE

ing. Nunziante Squeglia

INDAGINI IN SITO
Caratterizzazione dinamica e
Azione sismica

Testi “consigliati”

Oltre ai soliti Viggiani e/o Lo Presti (II)

Crespellani – Facciorusso

Dinamica dei Terreni

Dario Flaccovio Editore

Kramer

Geotechnical Earthquake Engineering

Prentice Hall

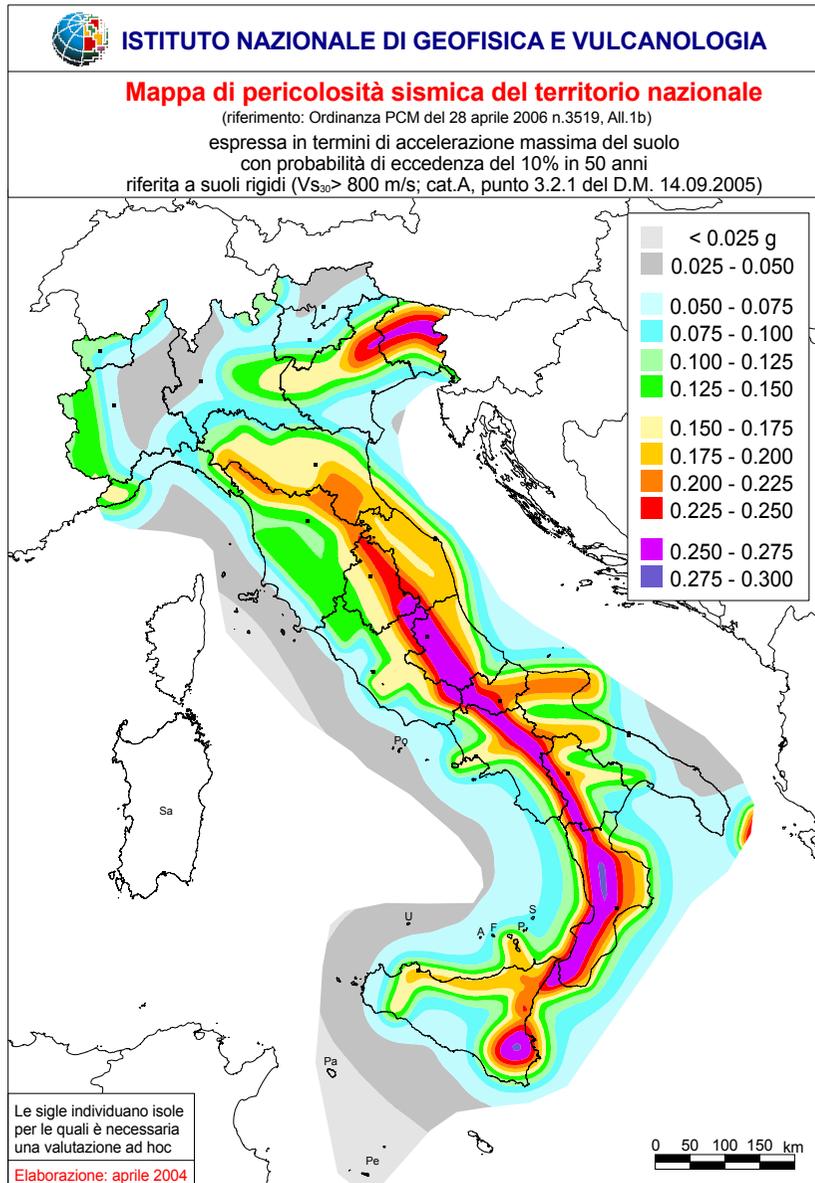
CAPITOLO 3 – NTC 2018

3.2 AZIONE SISMICA

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione. Essa costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche.

La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria **A** quale definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{V_R} , come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento V_R , come definito nel § 2.4. In alternativa è ammesso l’uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla *pericolosità sismica* del sito.

- Pericolosità definita in termini di accelerazione attesa
- Categoria del sottosuolo
- Spettro di risposta elastico
- Accelerogrammi



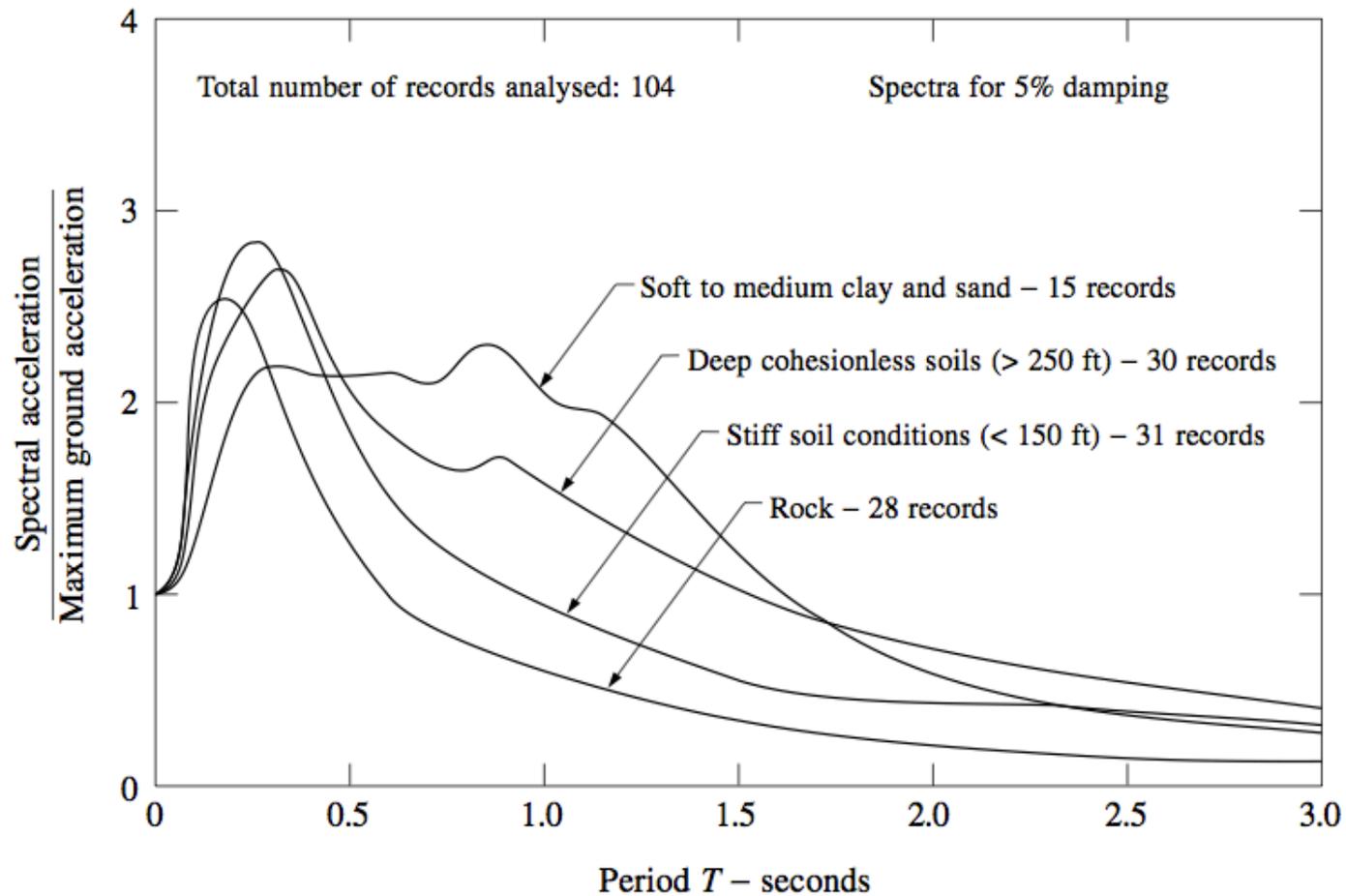
PERICOLOSITA' DI BASE

CATEGORIE DI SOTTOSUOLO

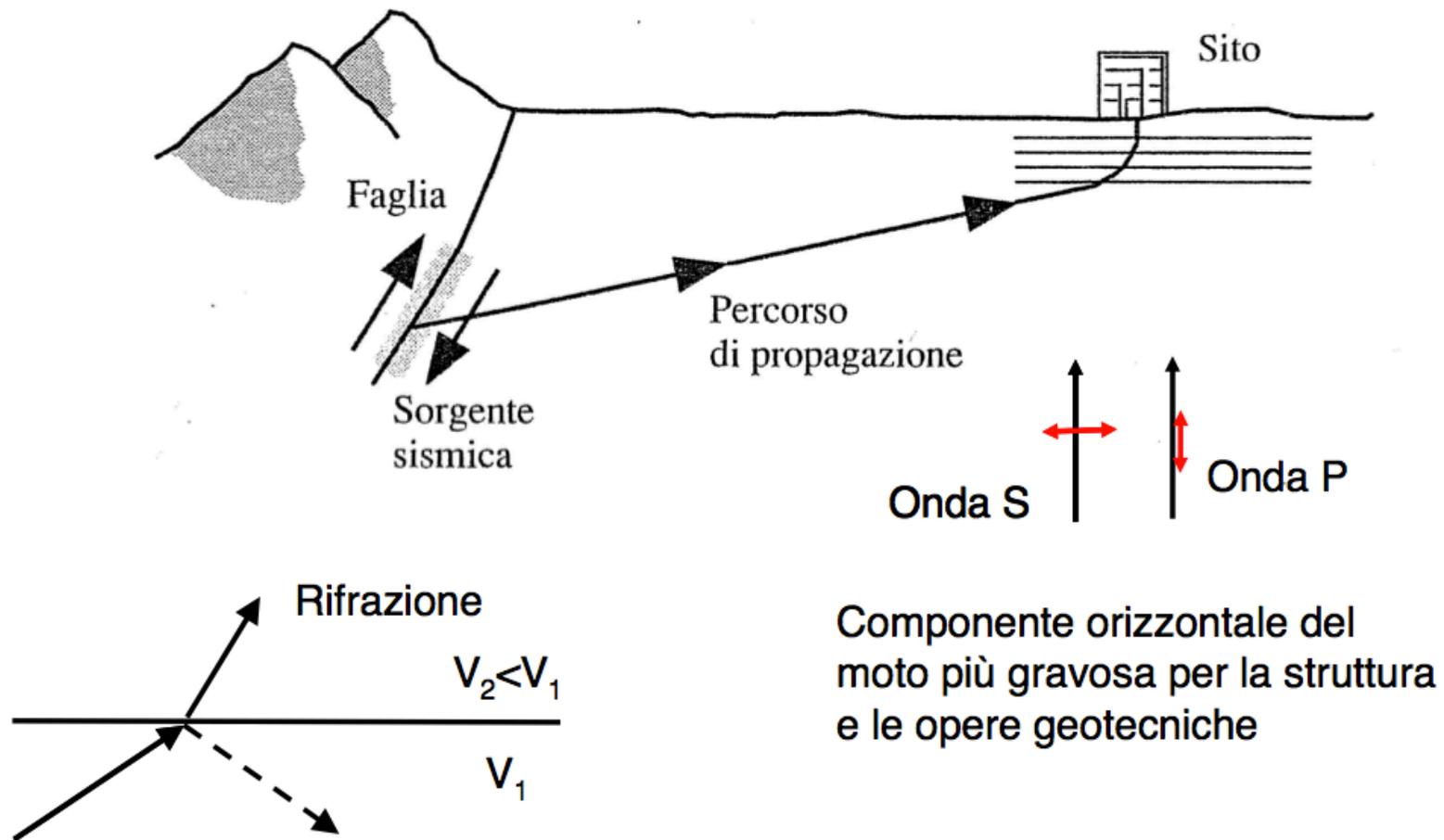
Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>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.</i>
D	<i>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.</i>
E	<i>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.</i>

INFLUENZA DEL SOTTOSUOLO SULL'AZIONE SISMICA (Misure)



SCHEMA DELLA PROPAGAZIONE DELL'ONDA SISMICA



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:

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

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II.

RISPOSTA SISMICA LOCALE

7.11.3.1 RISPOSTA SISMICA LOCALE

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche del sottosuolo e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi di cui è costituito. Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, l'analisi della risposta sismica locale consente quindi di definire le modifiche che il segnale sismico di ingresso subisce, a causa dei suddetti fattori locali.

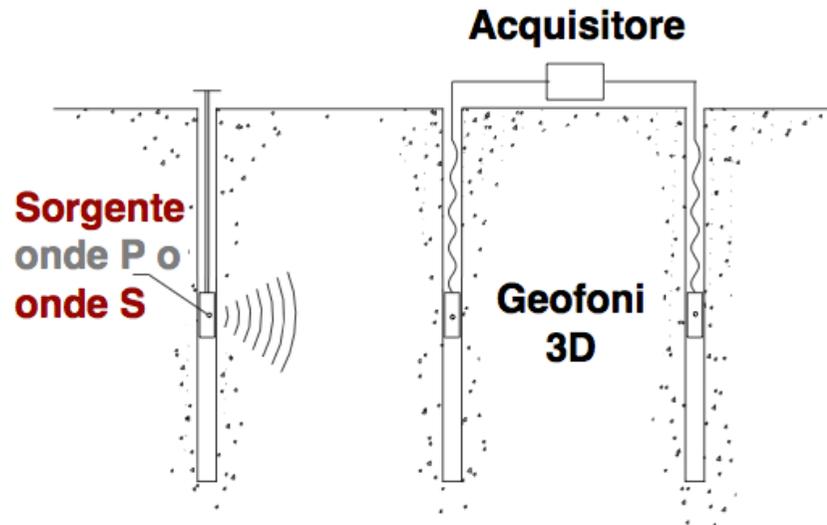
Le analisi di risposta sismica locale richiedono un'adeguata conoscenza delle proprietà geotecniche dei terreni, da determinare mediante specifiche indagini e prove.

Nelle analisi di risposta sismica locale, l'azione sismica di ingresso è descritta in termini di storia temporale dell'accelerazione (accelerogrammi) su di un sito di riferimento rigido ed affiorante con superficie topografica orizzontale (sottosuolo tipo A del § 3.2.2). Per la scelta degli accelerogrammi di ingresso, si deve fare riferimento a quanto già specificato al § 3.2.3.6.

DETERMINAZIONE DEL PROFILO DELLA V_S **Bassissimo livello di deformazione ($\gamma < 10^{-6}$)**

- Prove in foro
 - Prove Cross-hole
 - Prove Down-hole
 - In foro
 - SCPT-SDMT
- Prove dalla superficie
 - Prove sismica a rifrazione (onde SH)
 - Analisi delle onde superficiali
 - Metodi attivi (SASW, MASW)
 - Metodi passivi (fk, SPAC, ReMi, H/V)

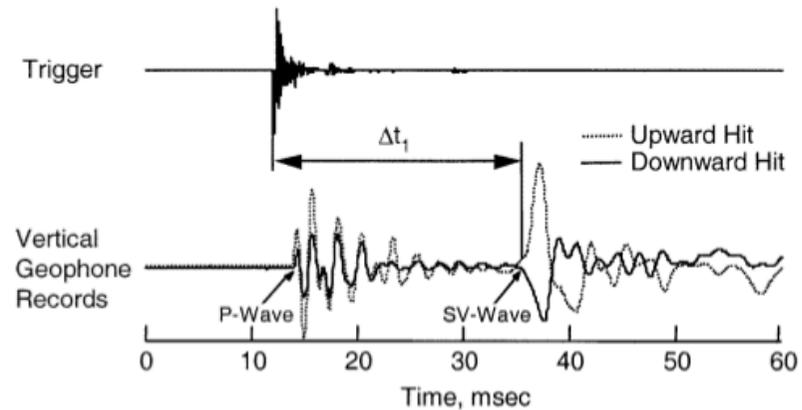
SCHEMA DI UNA PROVA CROSS-HOLE



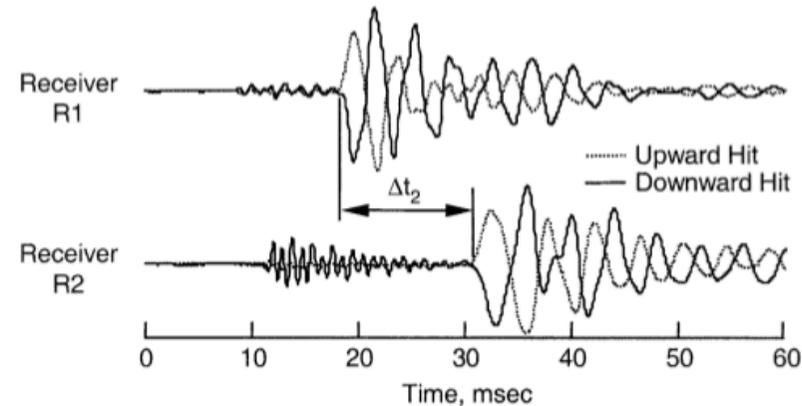
2 o 3 fori rivestiti e cementati con controllo verticalità (costi ↑)

tempi di arrivo → V_p & V_s

onde P Sv Sh

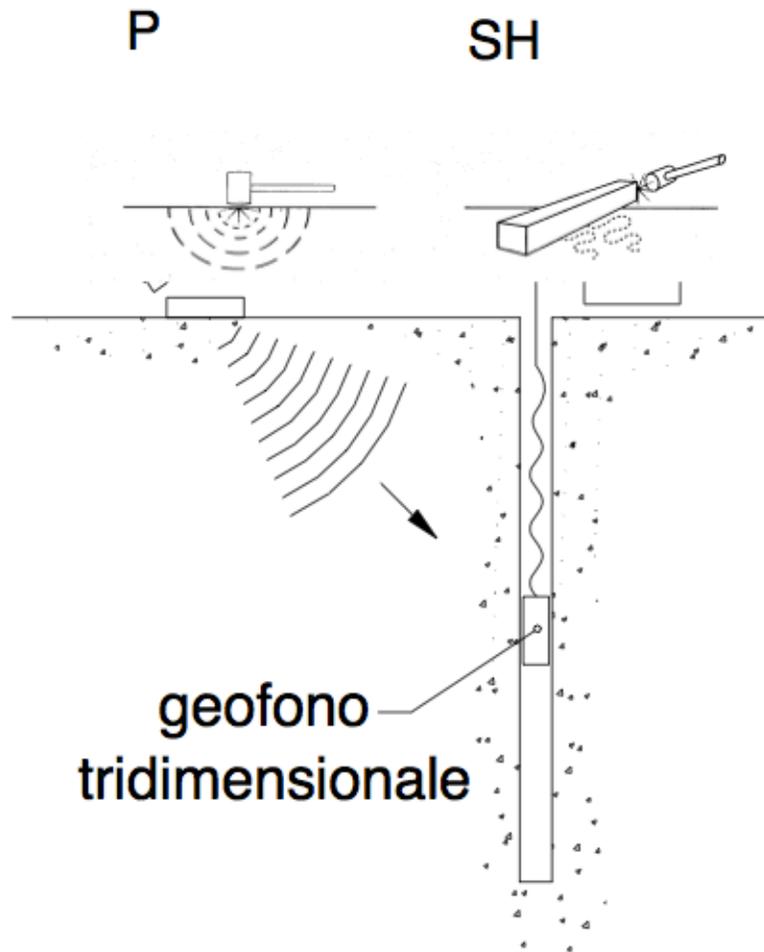


a. Record Illustrating a Direct Travel Time Measurement of an SV Wave



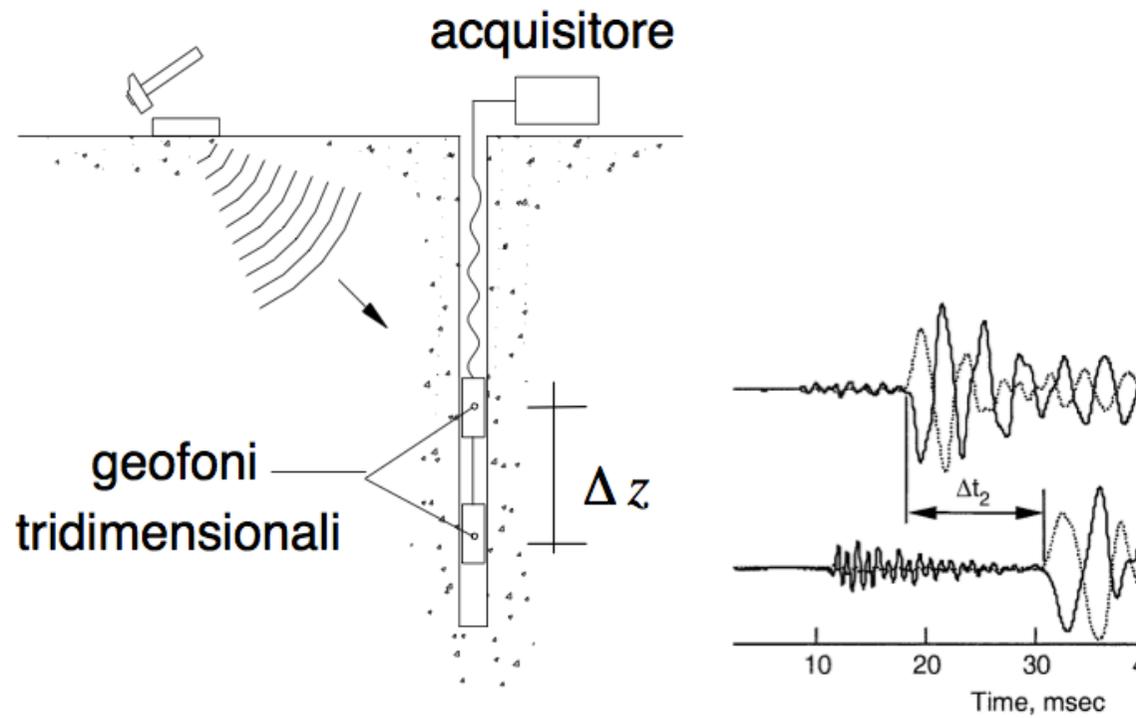
(after Santamarina and Stokoe, 2000)

SCHEMA DI UNA PROVA DOWN-HOLE



UN RICEVITORE

SCHEMA DI UNA PROVA DOWN-HOLE (due ricevitori)

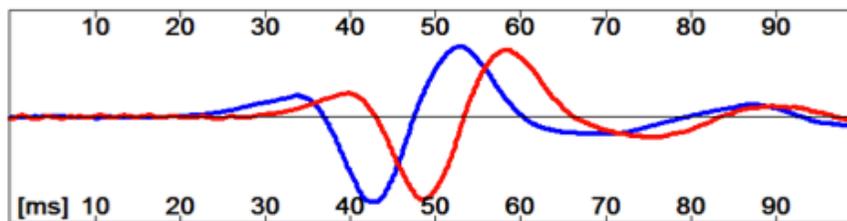


$$V = \frac{\Delta z}{\Delta t_{corr}}$$

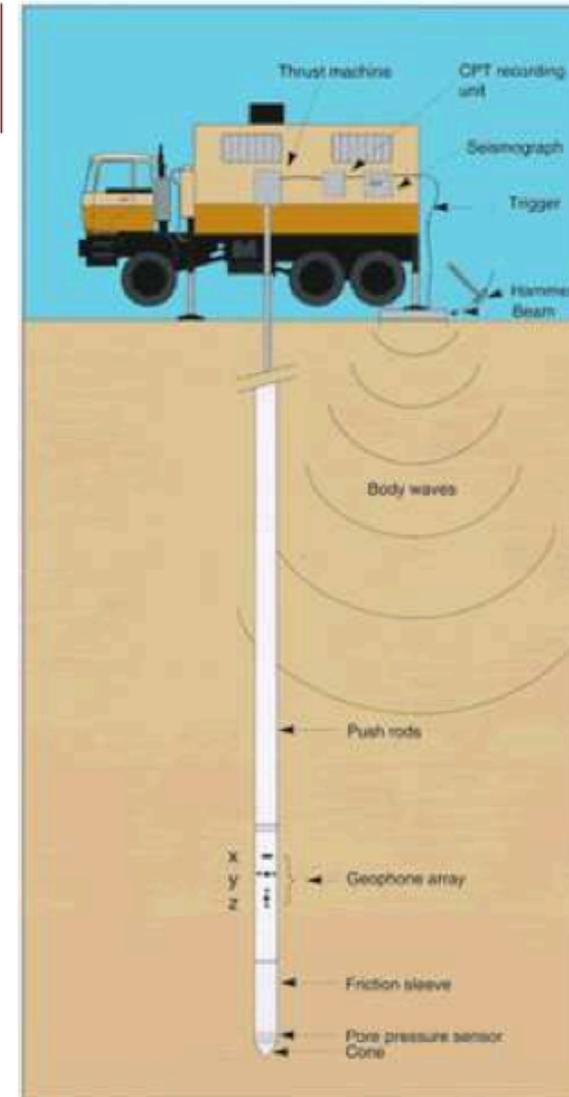
PROVA PENETROMETRICA STATICA CON MODULO SISMICO

- molto efficiente (no fori sondaggio)
- ottimo accoppiamento geofono-terreno (niente rivestimento)
- possibile eseguire prova SCPT in *modalità CHT* usando due coni
- stesse limitazioni CPT/DMT

SDMT: trasmissione del segnale digitalizzato

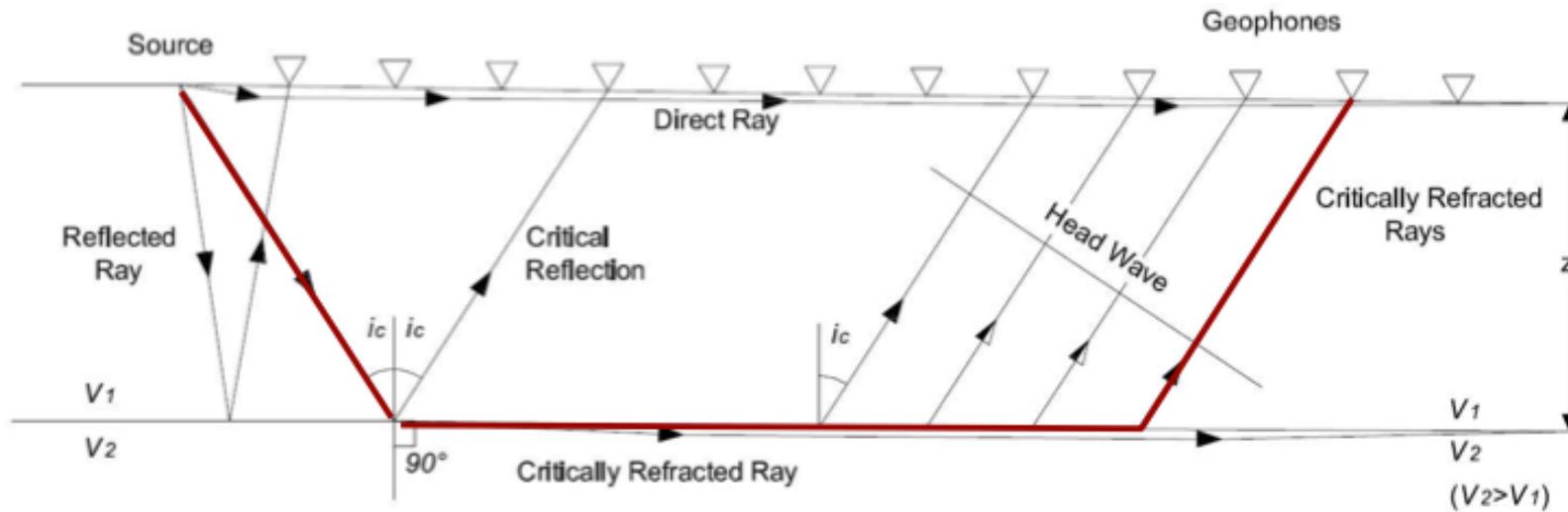


(Marchetti et al., 2006)

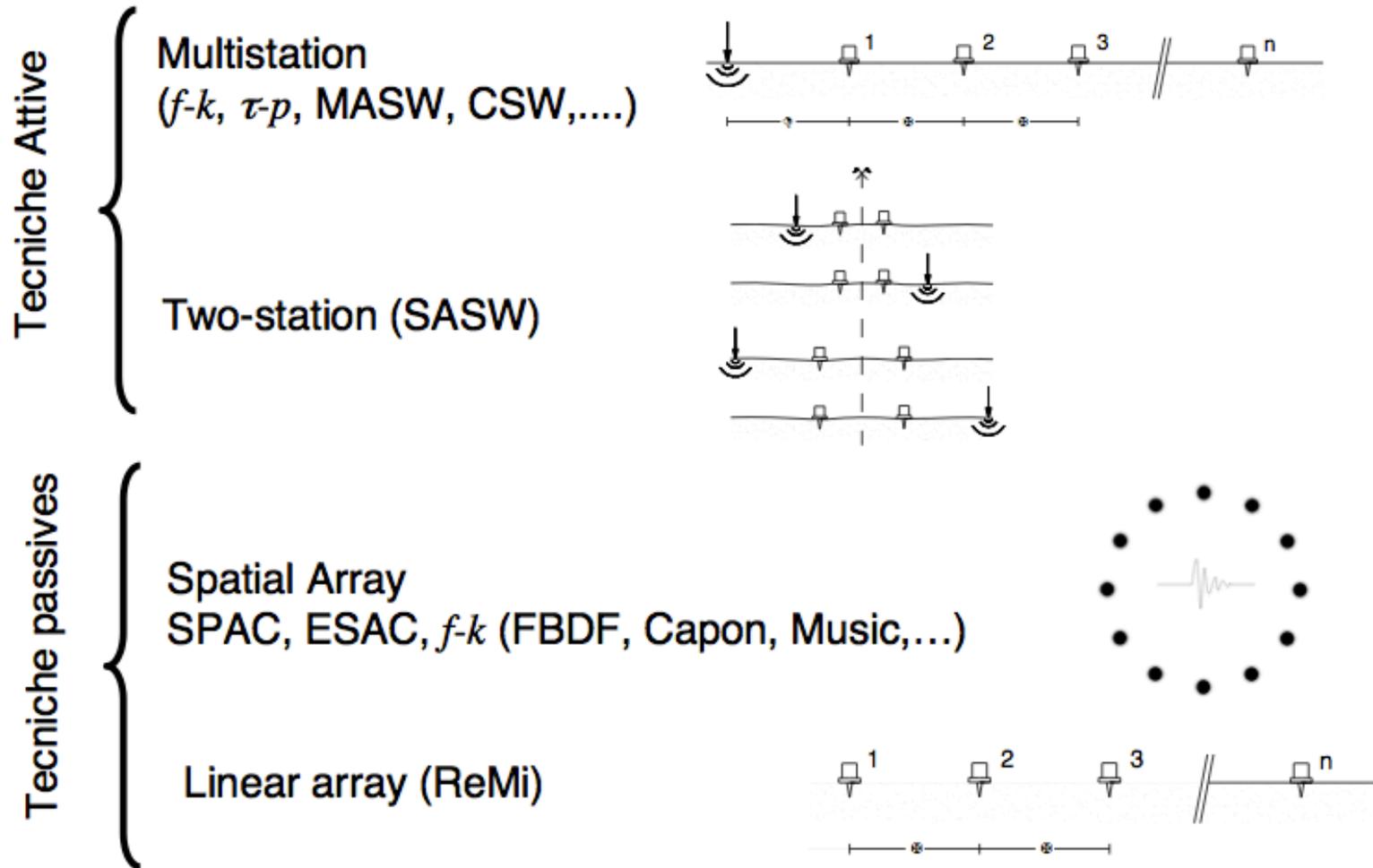


METODI GEOFISICI

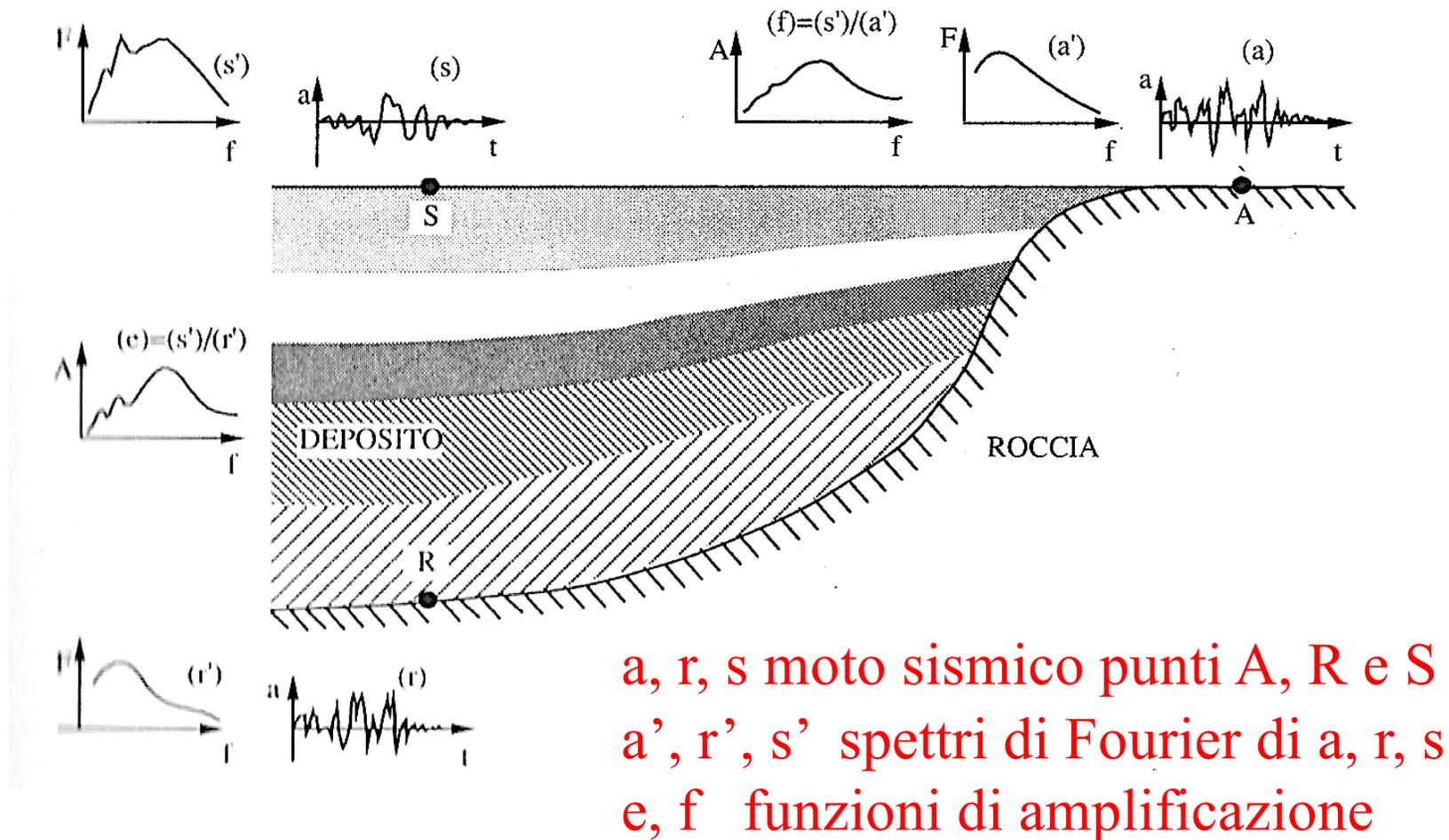
Sismica a rifrazione



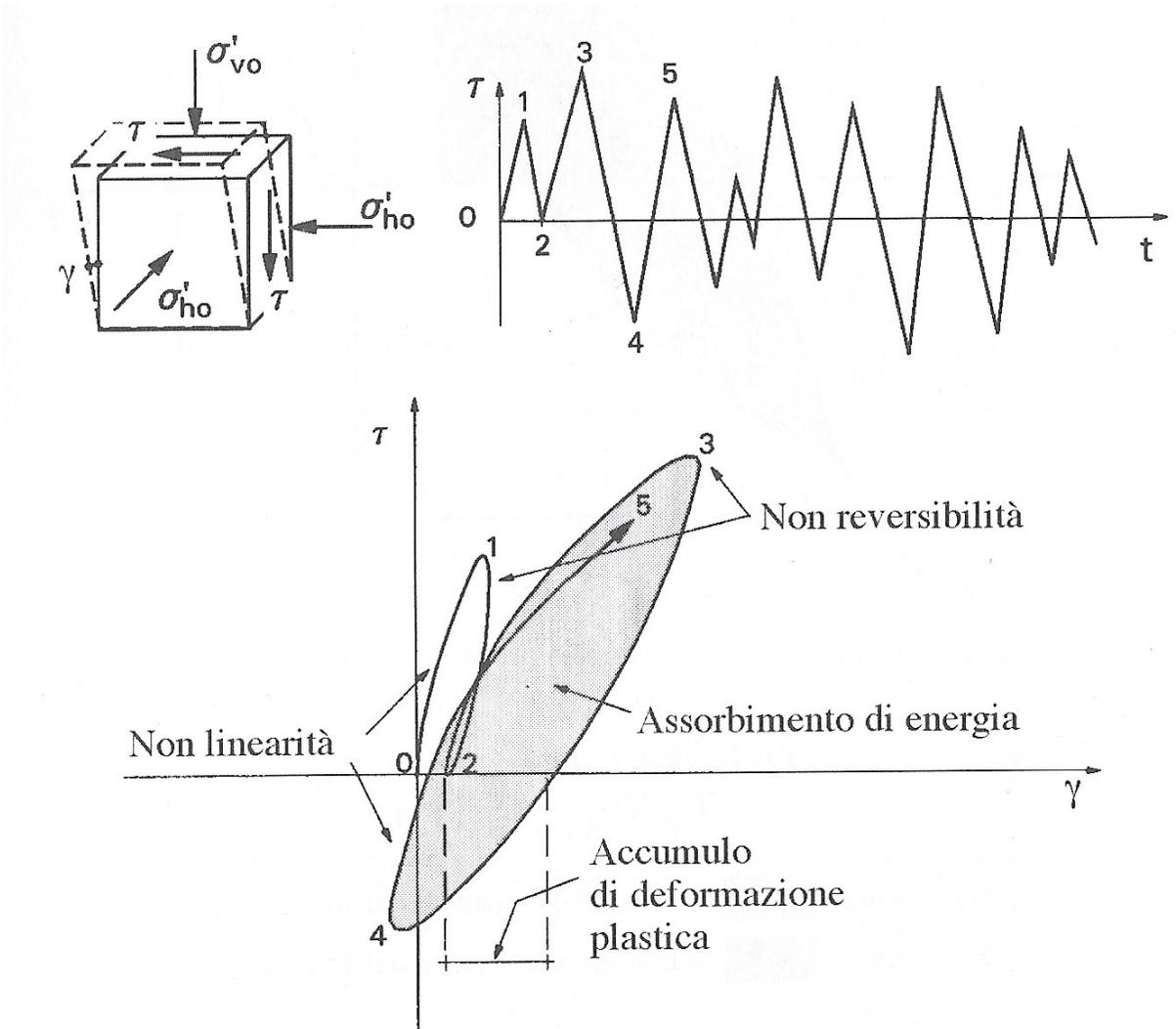
ALTRE TECNICHE DI SUPERFICIE



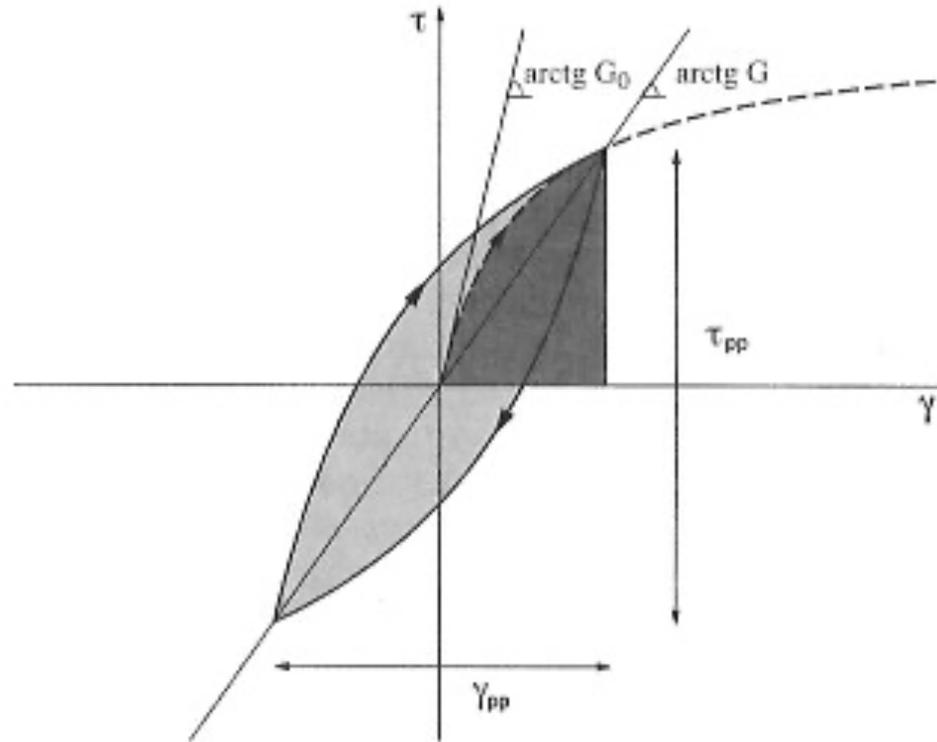
ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE



COMPORTAMENTO NON LINEARE DEL TERRENO



COMPORTAMENTO NON LINEARE DEL TERRENO



$$G = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}} \quad D = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$

$W_D = \text{Area } \text{[light gray]} = \text{Energia dissipata nel ciclo}$
 $W_S = \text{Area } \text{[dark gray]} = \text{Energia accumulata nel 1° carico}$

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL TERRENO

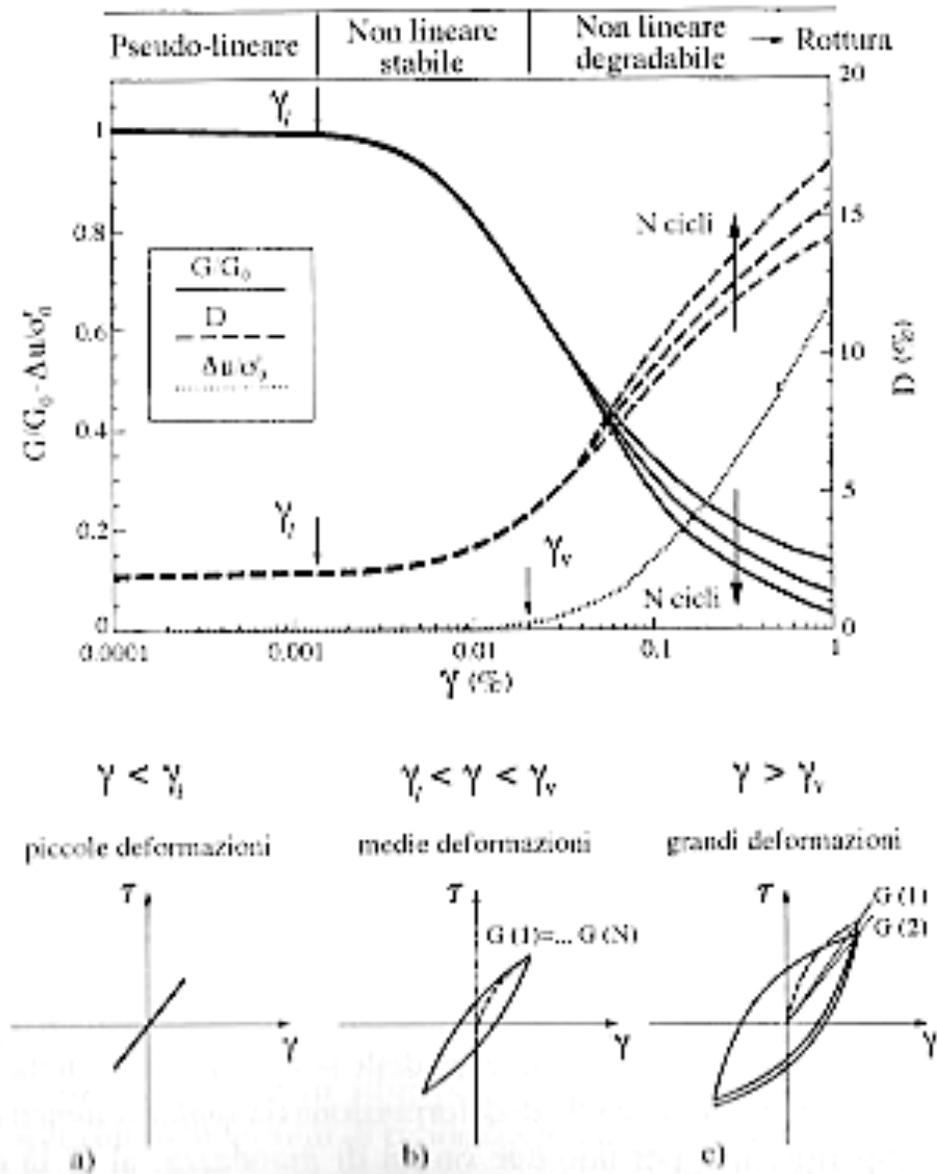
Tipo di prova			Stato tensionale	Deformazione tangenziale $\gamma(\%)$	Frequenza $f(\text{Hz})$	Rigidezza	Smorzamento
In sito	Convenzionali	SPT	Litostatico	-	-	$N_{SPT} \rightarrow V_S \rightarrow G_0$	-
		CPT				$q_c \rightarrow V_S \rightarrow G_0$	
	Geofisiche	Down-Hole		$V_S \rightarrow G_0$	Possibile		
		Cross-Hole		$V_S \rightarrow G_0$			
		SASW		$V_R \rightarrow V_S \rightarrow G_0$			
Laboratorio	Cicliche	Triassiale	Simmetria radiale	$>10^{-2}$	0.01-1	$\sigma-\varepsilon \rightarrow E \rightarrow G$	$W_D/W_S \rightarrow D$
		Taglio semplice	Simmetria radiale	$>10^{-2}$	0.01-1	$\tau-\gamma \rightarrow G$	
		Taglio torsionale	Simmetria radiale o triassiale vero	$10^{-4}-1$	0.01-1	$\tau-\gamma \rightarrow G_0, G$	
	Dinamiche	Trasduttori piezoceramici	Simmetria radiale	$<10^{-3}$	>100	$V_S \rightarrow G_0$	Possibile
		Colonna risonante	Simmetria radiale o triassiale vero	$10^{-5}-1$	>10	$f_r \rightarrow G_0, G$	H.p., R.f. $\rightarrow D$

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL TERRENO

MEZZI DI INDAGINE IN LABORATORIO (su campioni “indisturbati”)

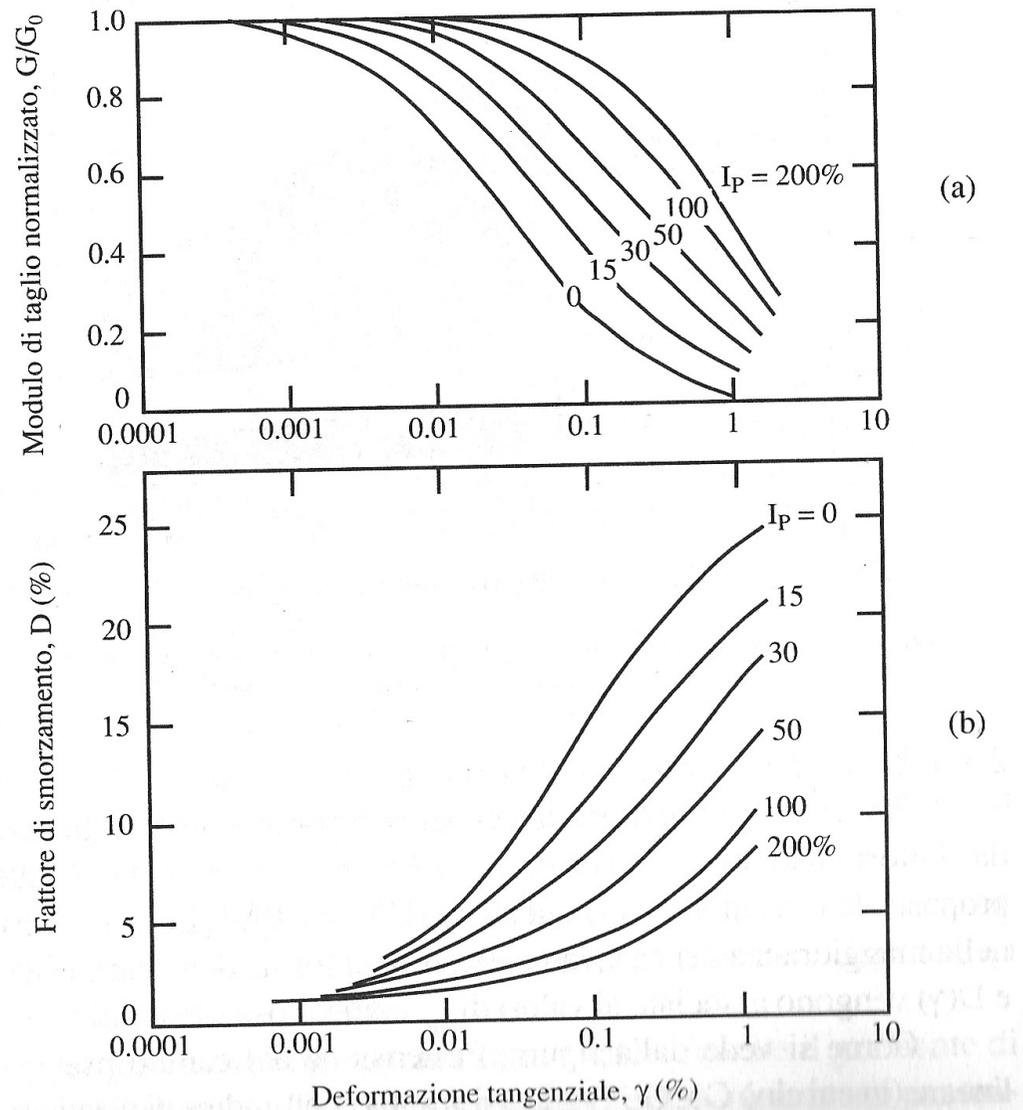
- TRIASSIALI
 - TX (UU, CU, CD)
 - **Cicliche (CLTX)**
- EDOMETRICHE (ED)
- TAGLIO DIRETTO O TAGLIO SEMPLICE (DS, SS)
- **COLONNA RISONANTE (RCT)**
- **TAGLIO TORSIONALE CICLICO (CLTST)**

CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL TERRENO

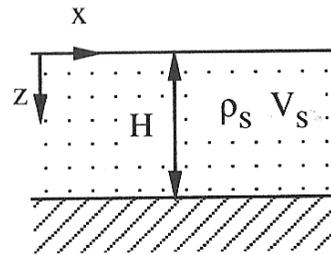


CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL TERRENO

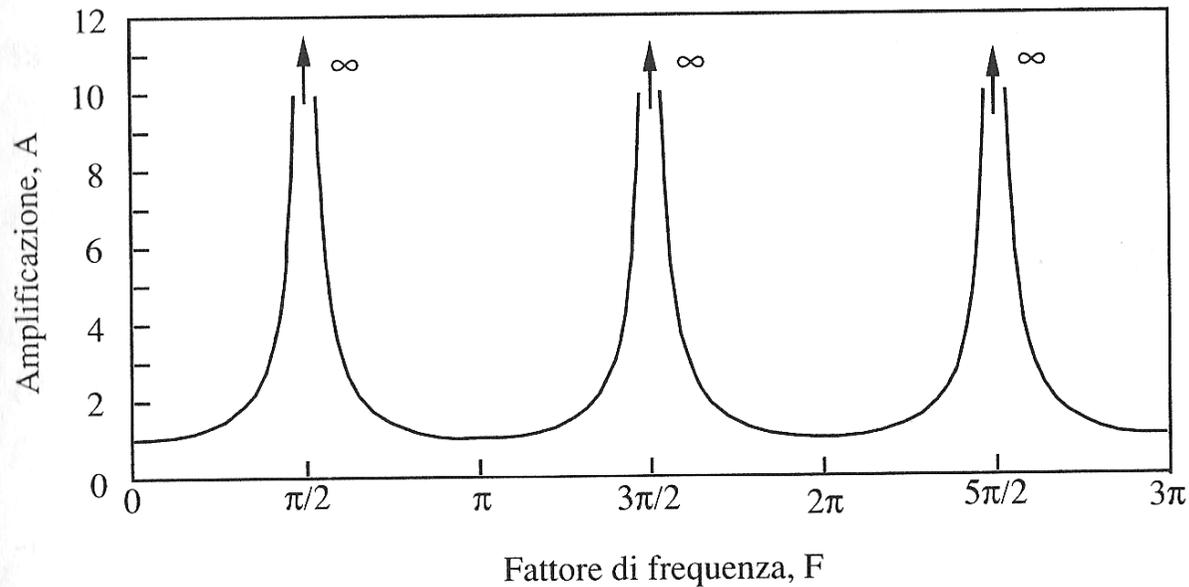
Vucetic & Dobry (1991)



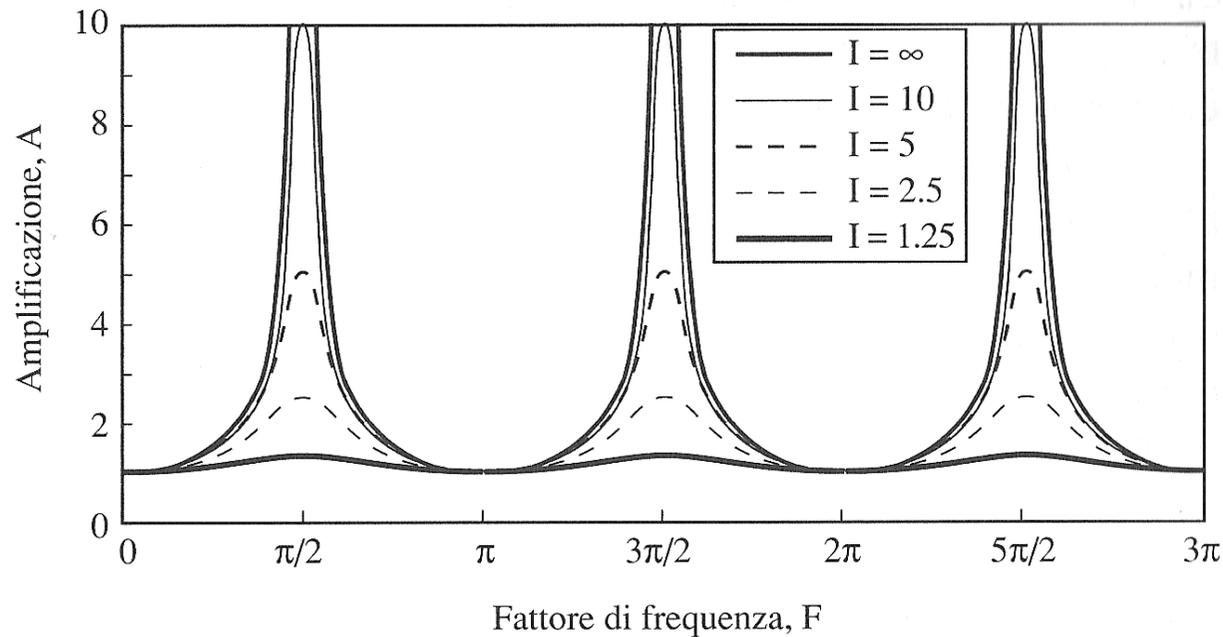
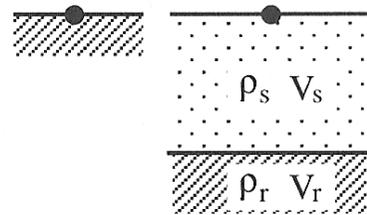
CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE strato elastico lineare su materiale rigido



$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$



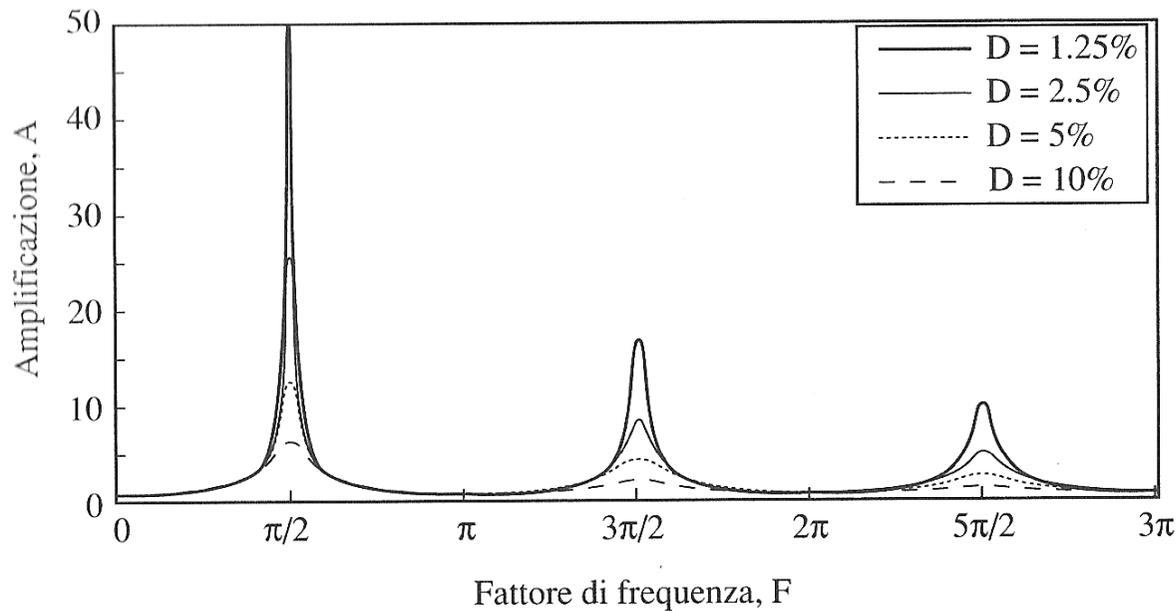
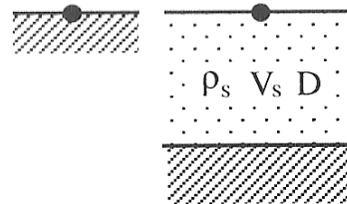
CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE strato elastico lineare su materiale deformabile



$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$

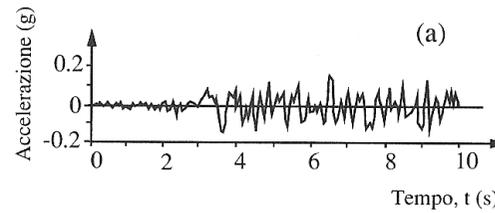
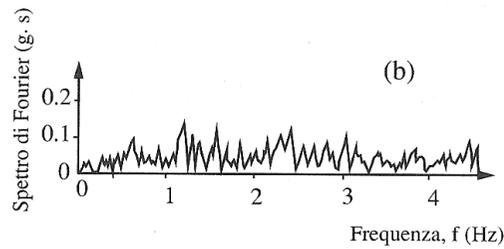
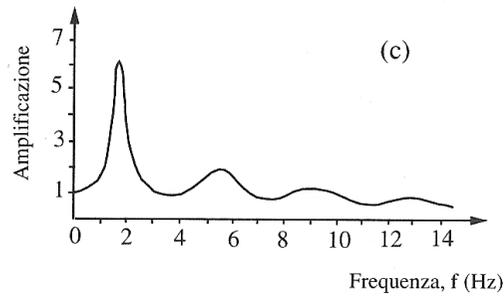
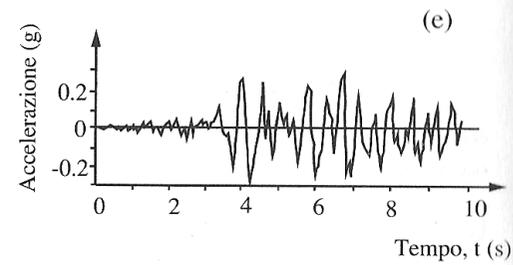
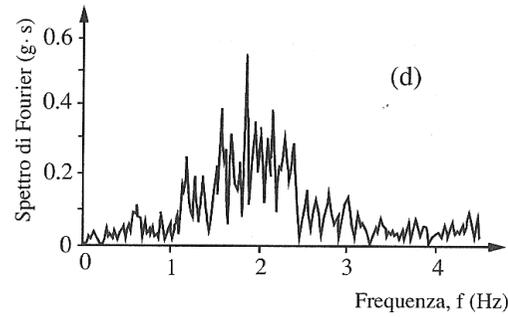
$$I = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s}$$

CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE strato visco-elastico lineare su materiale rigido

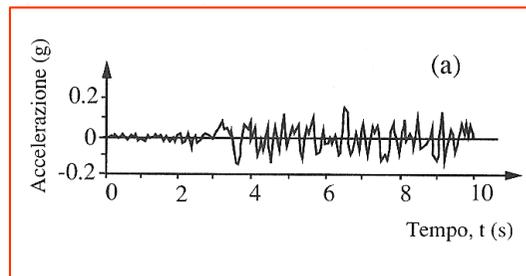
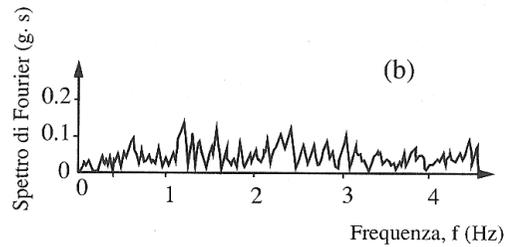
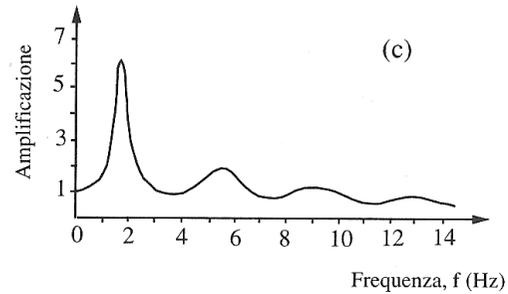
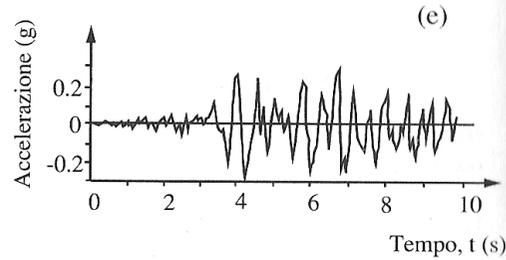
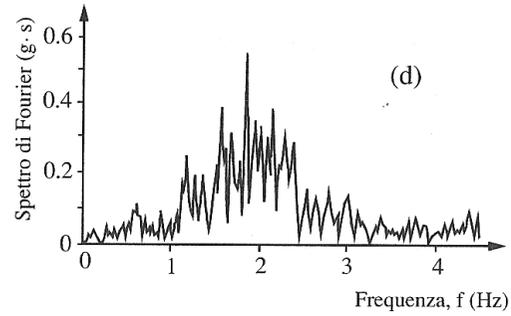


$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$

CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE sottosuolo reale



CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE sottosuolo reale



Come ci procuriamo (a) ?

CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE

definizione input sismico

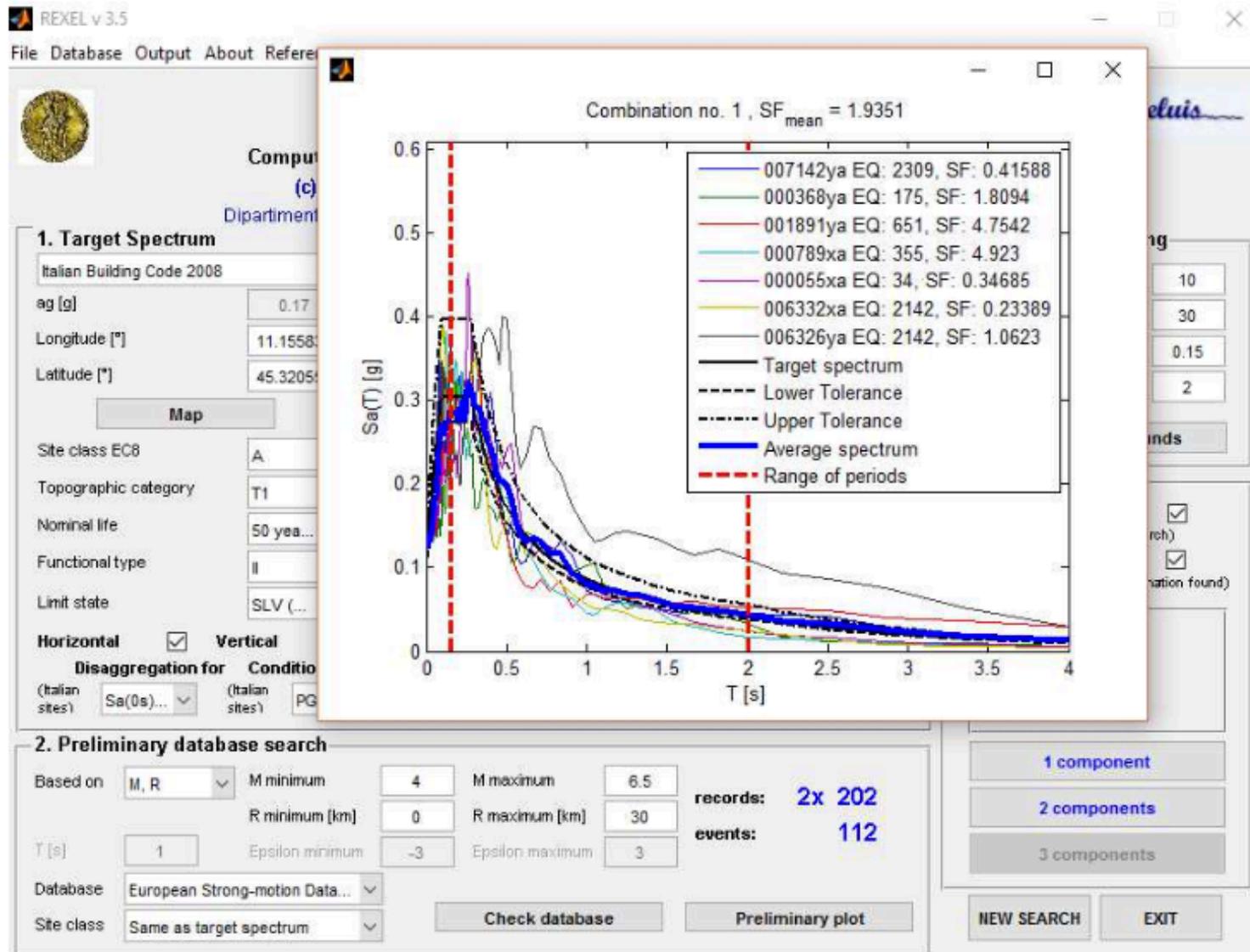
The screenshot displays the REXEL v 3.5 software interface, which is used for computer-aided code-based real record selection for seismic analysis of structures. The interface is divided into several sections:

- 1. Target Spectrum:** Includes fields for 'Italian Building Code 2008', 'ag [g]' (0.17), 'Longitude [°]' (11.155833), and 'Latitude [°]' (45.320553). A 'Map' button is present. The 'Site class EC8' is set to 'A' and 'Topographic category' is 'T1', both highlighted with a red box. Other options include 'Nominal life' (50 years), 'Functional type' (II), and 'Limit state' (SLV).
- 2. Preliminary database search:** Fields for 'Based on' (M, R), 'M minimum' (4), 'M maximum' (6.5), 'R minimum [km]' (0), 'R maximum [km]' (30), 'T [s]' (1), 'Epsilon minimum' (-3), and 'Epsilon maximum' (3). The 'Database' is 'European Strong-motion Data...' and 'Site class' is 'Same as target spectrum'. It shows 'records: 2x 202' and 'events: 112'.
- 3. Spectrum matching:** A table with 'Lower tolerance [%]' (10), 'Upper tolerance [%]' (30), 'T1 [s]' (0.15), and 'T2 [s]' (2). The 'Lower tolerance' and 'Upper tolerance' fields are highlighted with a red box. Callouts indicate 'MAX 10' for the lower tolerance and 'MAX 30' for the upper tolerance. A 'Plot spectral bounds' button is also present.
- 4. Analysis options:** Includes 'Scaled records' (checked), 'I'm feeling lucky' (checked), and 'Set size' options: 'Individual record', '7 records' (selected), and '30 records'.

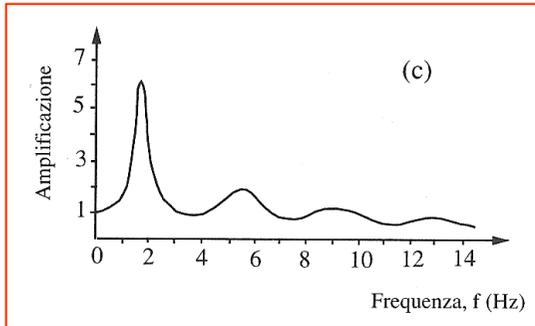
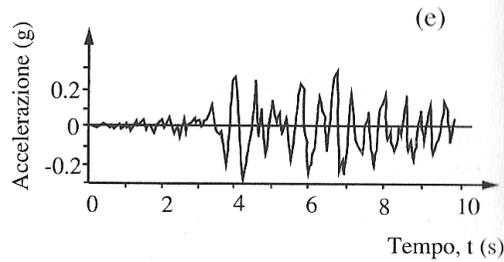
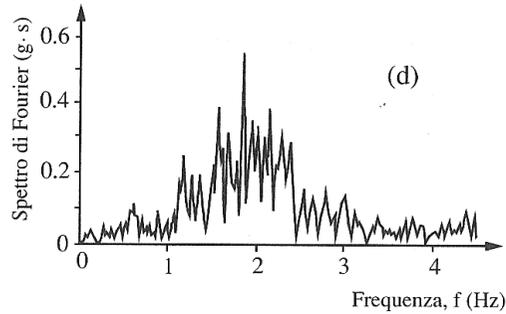
The central plot, titled 'Acceleration elastic response spectrum', shows the 'Target Spectrum' (solid blue line) and 'Lower Tolerance' (dashed black line) and 'Upper Tolerance' (dotted black line) bounds. The x-axis is 'T [s]' (0 to 4) and the y-axis is 'Sa(T) [g]' (0 to 0.6). A 'Range of periods' is indicated by a red dashed box between approximately 0.2s and 2.2s. Buttons for 'Build code spectrum', 'User-defined spectrum', 'Look at disaggregation', and 'Look at conditional hazard' are located below the plot.

CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE

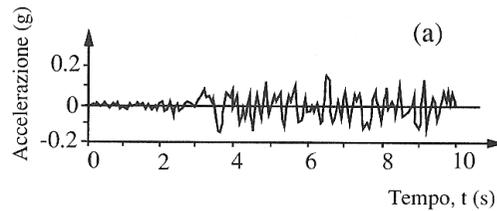
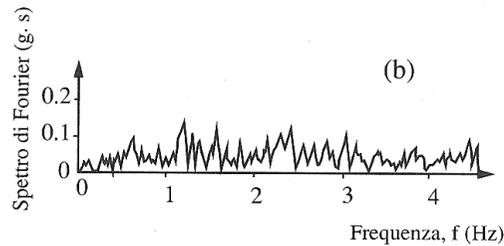
definizione input sismico



CALCOLO DELLA FUNZIONE DI AMPLIFICAZIONE sottosuolo reale

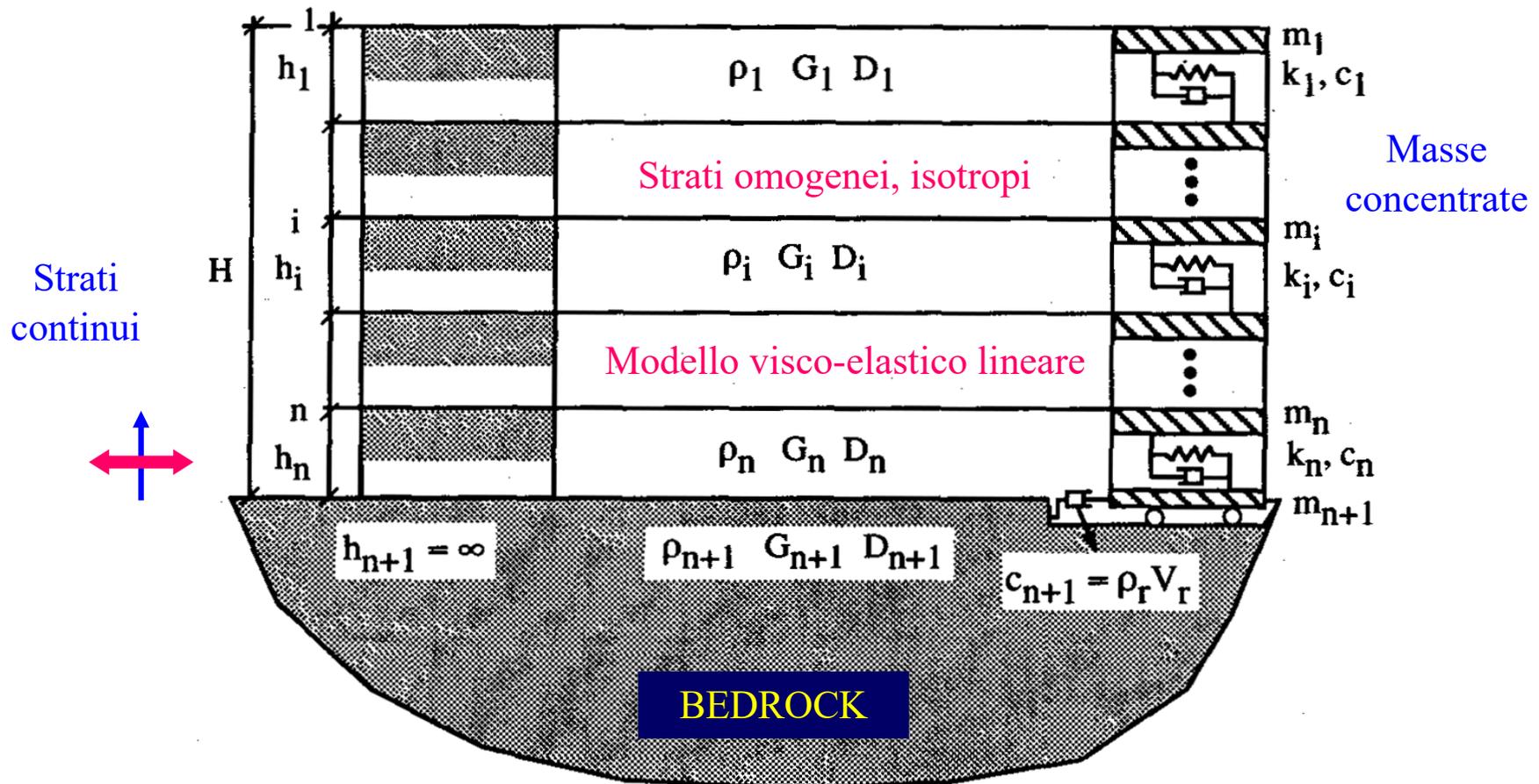


Come ci procuriamo (c) ?



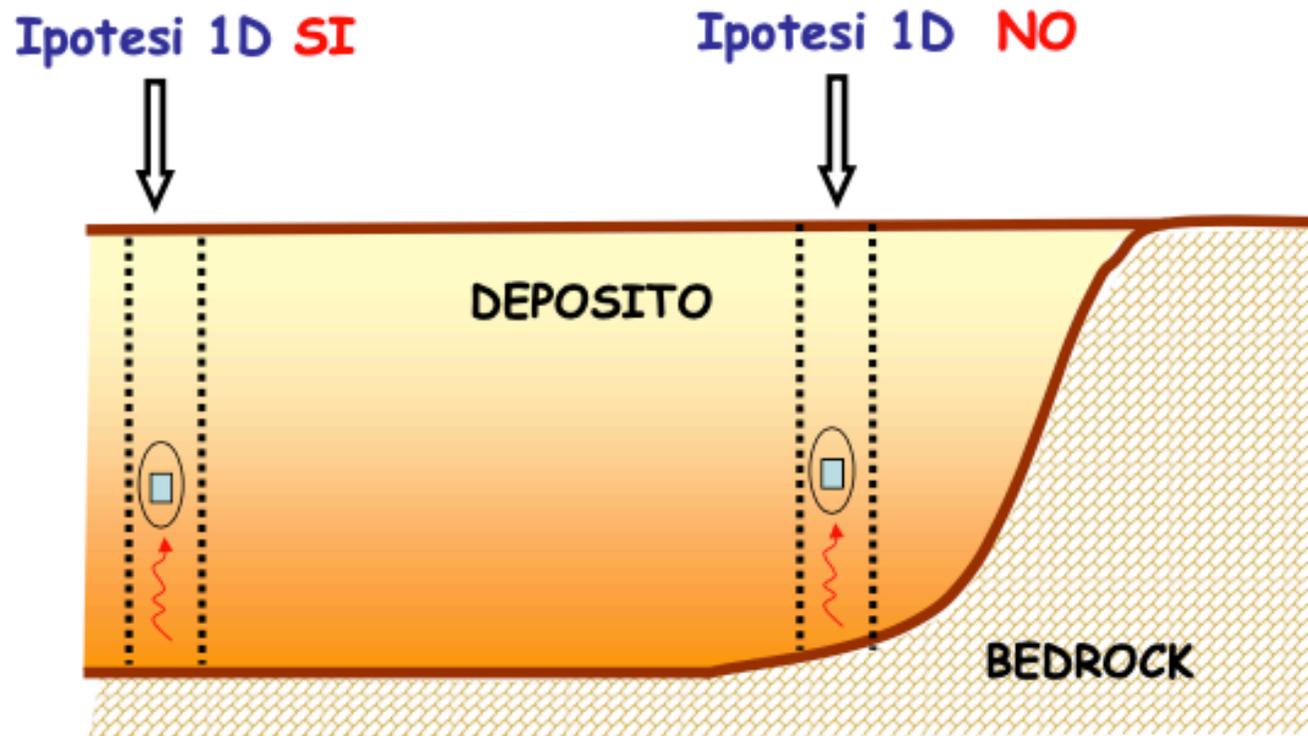
ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

Modellazione monodimensionale Strati e bedrock orizzontali

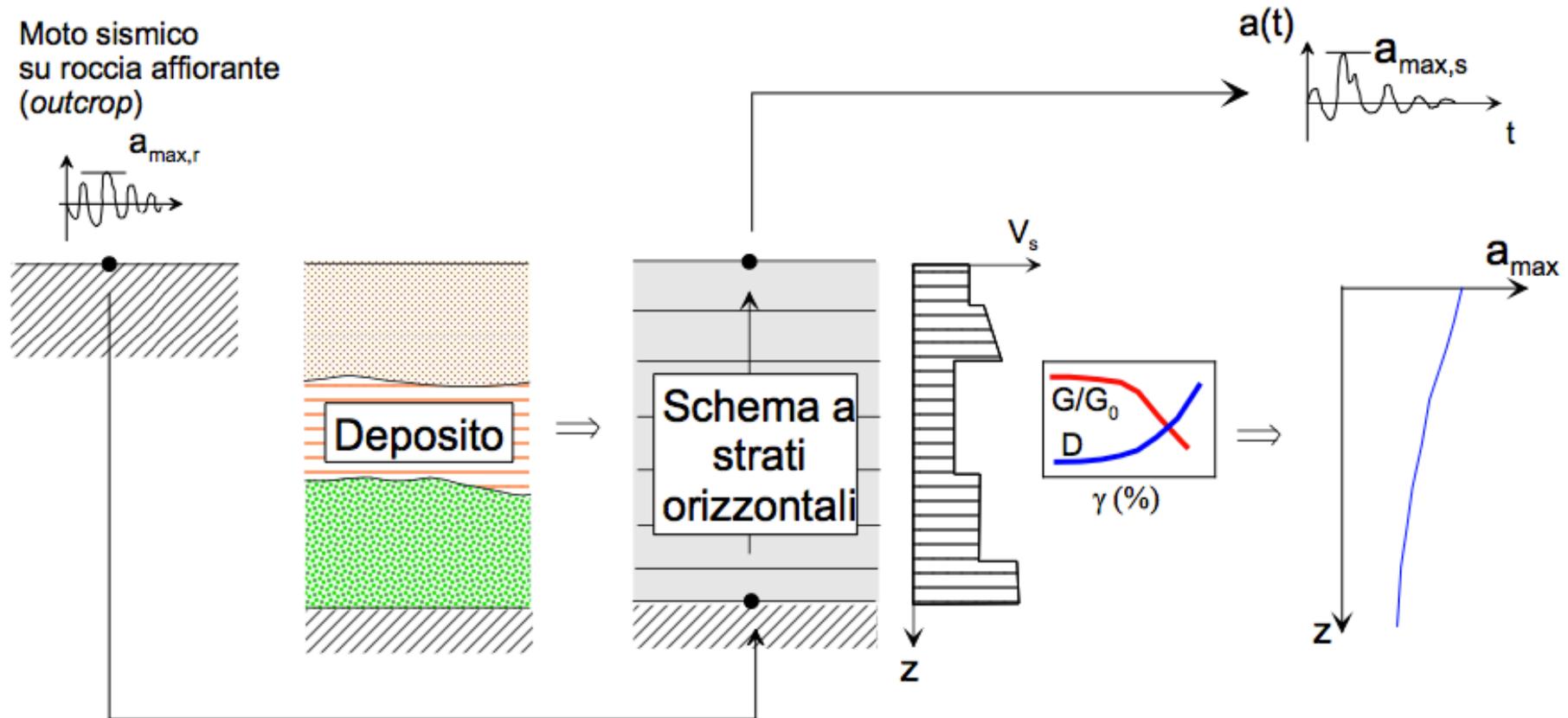


ANALISI DI RISPOSTA SISMICA LOCALE

VALIDITA' DELL'IPOTESI MONODIMENSIONALE



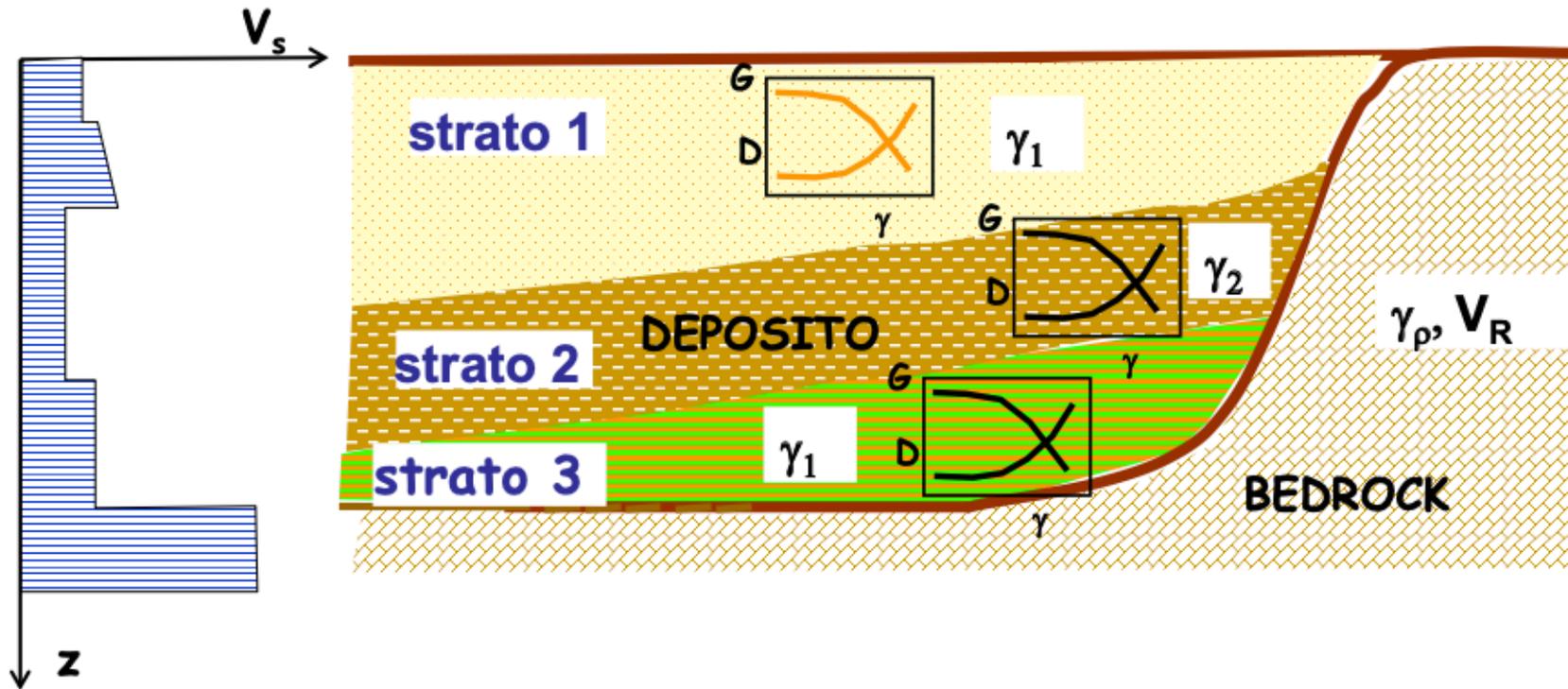
SCHEMA DI UNA ANALISI DI RISPOSTA SISMICA



Software più diffusi: STRATA, DEEPSOIL e ONDA

INGREDIENTI DI UNA ANALISI DI RSL

- Pesì dell'unità di volume dei materiali coinvolti;
- Profilo delle V_s ;
- Curve $G-\gamma$ e $D-\gamma$



TIPO DI MODELLO PER LE ANALISI NUMERICHE

Modello continuo

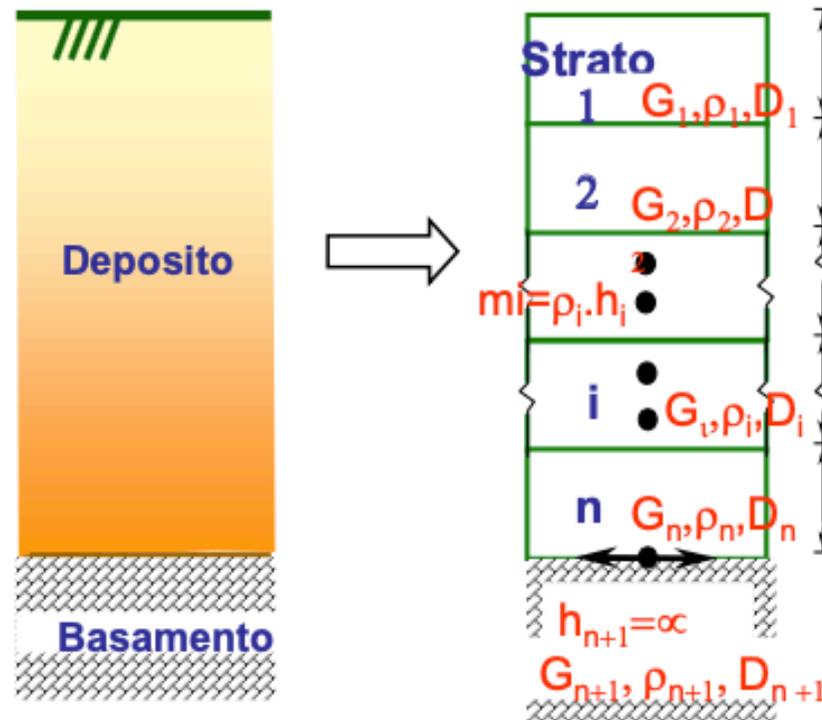
I **modelli continui** schematizzano il terreno come un mezzo continuo multistrato in cui ogni strato è assunto omogeneo a comportamento visco-elastico lineare (e.g. **SHAKE, EERA**)

Caratteristiche dello strato i

h_i = spessore
 G_i = modulo di taglio (o la velocità delle onde di taglio V_{si})
 ρ_i = densità
 D_i = fattore di smorzamento

Caratteristiche del substrato

V_{sr} = velocità delle onde di taglio
 ρ_r = densità
 D_r = fattore di smorzamento



TIPO DI MODELLO PER LE ANALISI NUMERICHE

Modello discreto a masse concentrate

I **modelli discreti a masse concentrate** schematizzano gli strati del deposito con una serie di masse concentrate in corrispondenza della superficie di separazione degli strati e collegate tra loro da molle e smorzatori viscosi (e.g.

DESRA, DMOD2000)

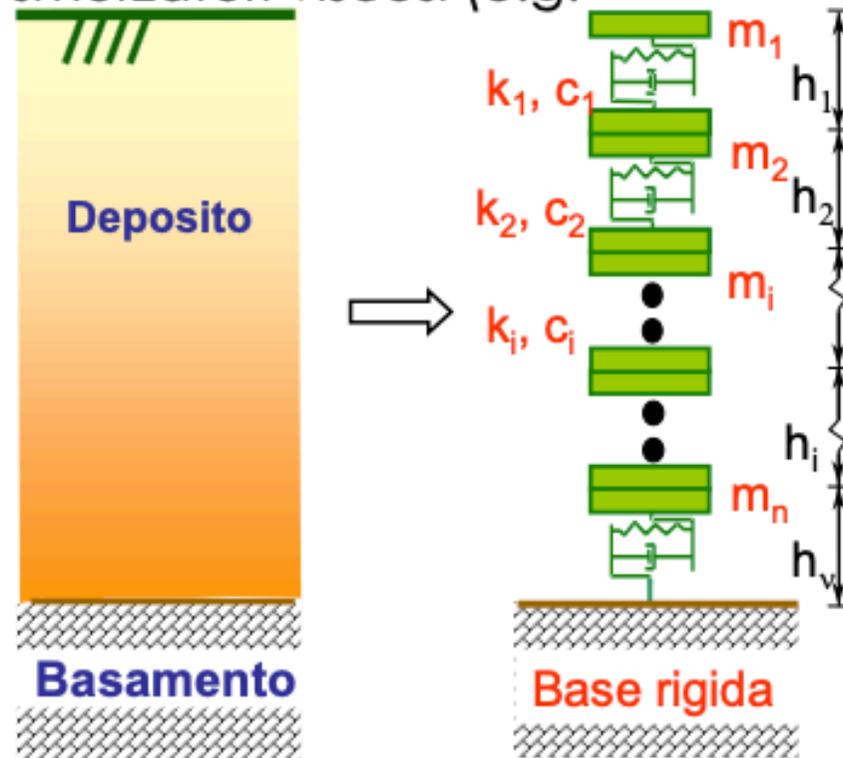
Proprietà del modello

h_i = spessore

k_i = rigidezza della molla

m_i = massa

c_i = coefficiente di smorzamento viscoso



RISOLUZIONE DELLE EQUAZIONI DEL MOTO

Modelli continui

Le equazioni del moto vengono risolte **nel dominio delle frequenze** attraverso l'analisi di Fourier.

Il comportamento non lineare del terreno è tenuto in conto mediante un approccio lineare equivalente.

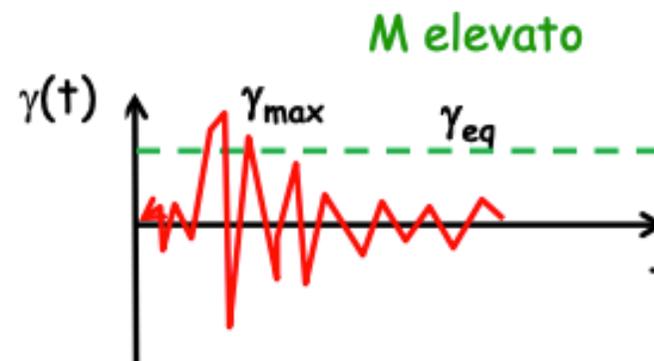
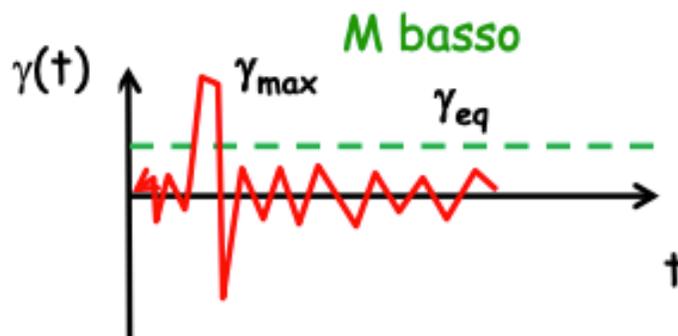
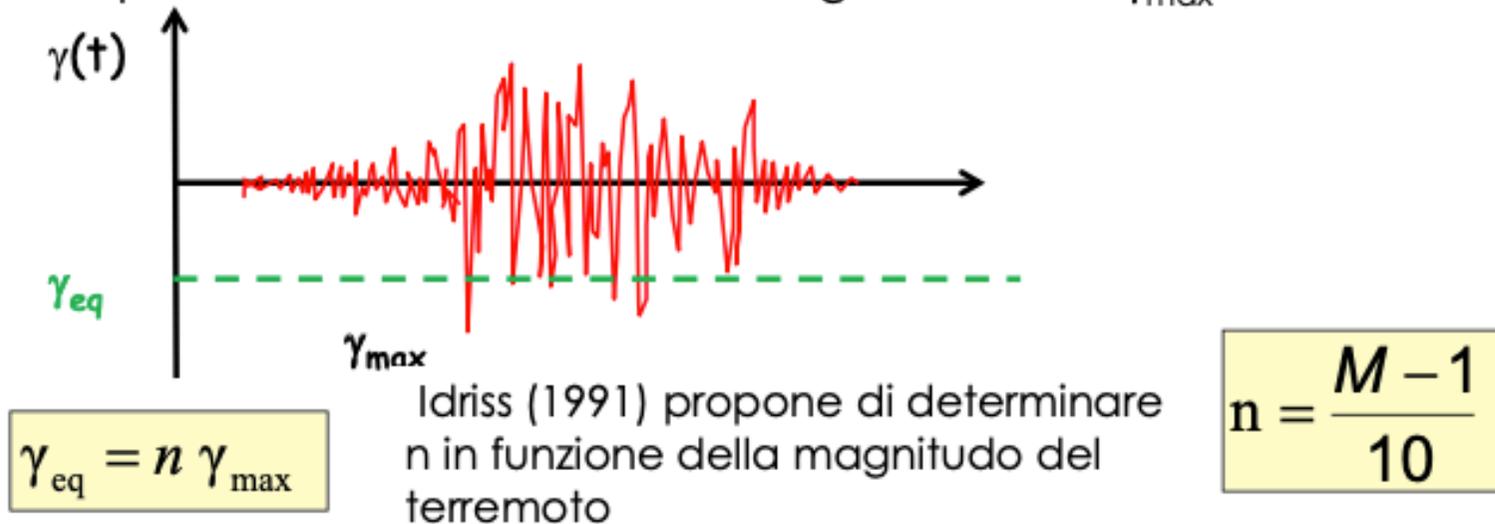
Modelli discreti

Le equazioni del moto vengono risolte **nel dominio dei tempi** con il metodo dell'integrazione diretta (metodo di Newmark, metodo di Wilson, etc.).

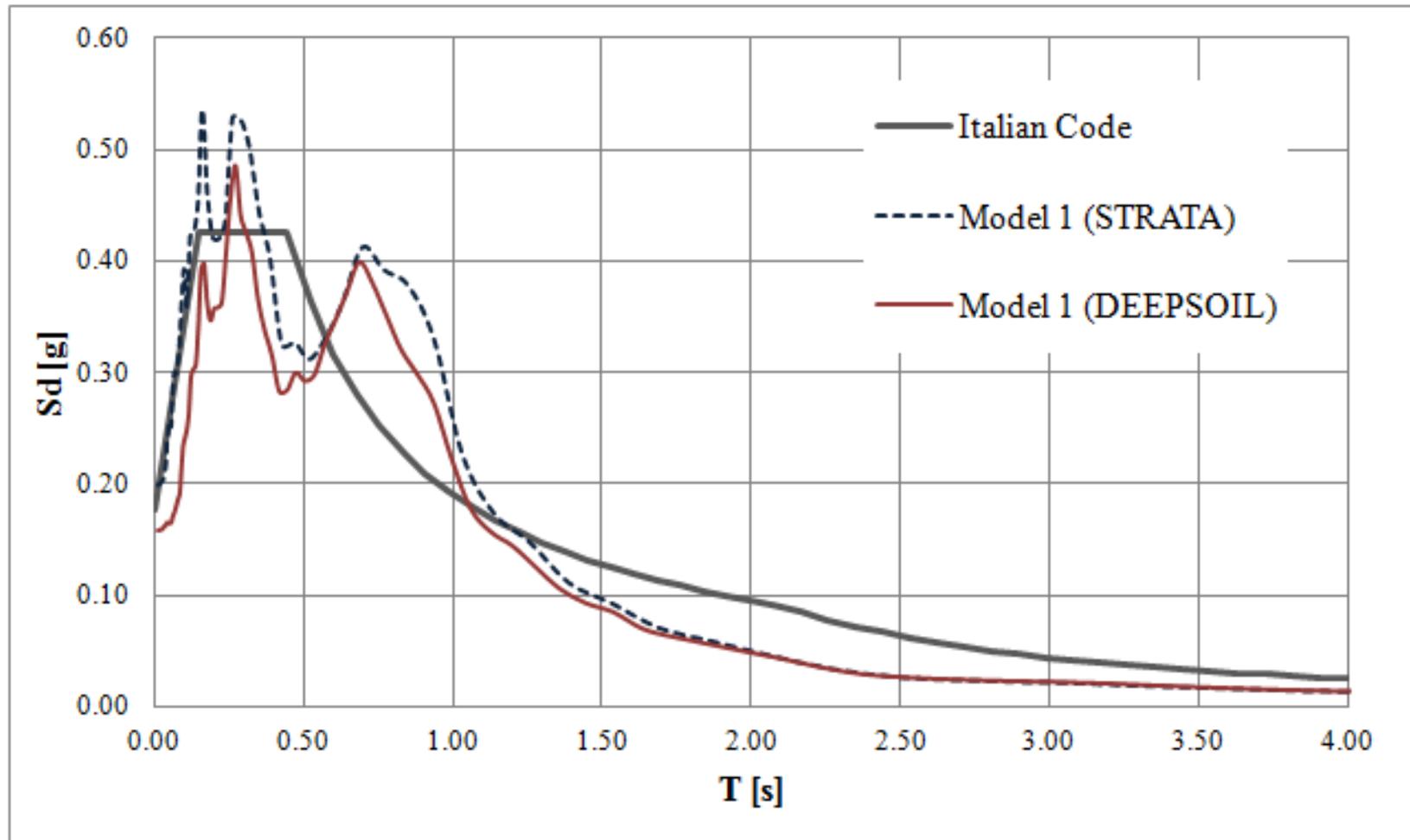
Alcuni codici eseguono analisi lineari equivalenti (e.g., **QUAD4M**) altri propriamente non lineari (e.g., **DESRA**)

CHE VUOL DIRE APPROCCIO LINEARE EQUIVALENTE?

Deformazione **equivalente** γ_{eq} è generalmente assunta pari ad un'aliquota della deformazione di taglio massima γ_{max}



ESEMPIO: INFLUENZA DEL MODELLO STRATIGRAFICO



ESEMPIO: INFLUENZA DEL MODELLO STRATIGRAFICO

