

La risposta sismica locale



Lucia Luzi

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)



Norme tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 Gennaio 2008)

- Prevedono che ai fini della definizione dell'azione sismica (da definirsi in base a spettri di risposta elastici in funzione delle coordinate geografiche del sito) *“sia valutato l'effetto della risposta sismica locale mediante ‘specifiche analisi’”*
- Obiettivo della presentazione è descrivere i principi fondamentali che fanno da sfondo alle prescrizioni normative

Schema

Introduzione agli effetti di sito

Fenomeni fisici

Effetti stratigrafici (1D – 2D)

Effetti topografici

Cenni su frane e liquefazione

Valutazione della risposta sismica locale

Approccio strumentale

Approccio numerico / geotecnico

Normativa sismica e risposta sismica locale

Risposta sismica locale (o effetto di sito)

Modificazioni che il moto sismico subisce nell'attraversare i depositi e gli ammassi rocciosi superficiali, per la presenza di particolari condizioni lito-stratigrafiche e morfologiche che determinano:

- ***Amplificazioni locali***
- ***Fenomeni di instabilità del terreno*** (*instabilità di versante, liquefazioni, faglie attive e capaci, cedimenti differenziali, ecc.*).

Le modificazioni del moto sismico riguardano tutti i parametri rappresentativi del moto sismico, e cioè:

- ***ampiezza*** (*picco d'accelerazione, velocità, spostamento*)
- ***contenuto in frequenza***
- ***durata***

Scala di indagine

Scala comunale	→	Microzonazione Sismica
Scala di manufatto	→	Progettazione antisismica

Al variare della scala di indagine variano i metodi di valutazione degli effetti amplificativi:

- **Approccio strumentale**
- **Approccio geotecnico / numerico**

Approccio strumentale

- Basato sulla **registrazione di segnali sismici** (terremoti o microtremori)
- Consiste prevalentemente in:
 - confronto tra il moto del suolo osservato ai siti indagati con quello ottenuto ad un sito di riferimento
 - confronto tra la componente orizzontale, H, e verticale , V, delle registrazioni per una singola stazione

Approccio numerico / geotecnico

Basato **sull'impiego di modelli numerici** che:

- simulano il comportamento del terreno nelle condizioni di interesse per le analisi ingegneristiche impiegando opportune leggi costitutive sforzi-deformazioni
- idealizzano il deposito in modo da rendere il problema trattabile, pur cercando di riprodurre la realtà

Vantaggi e limiti

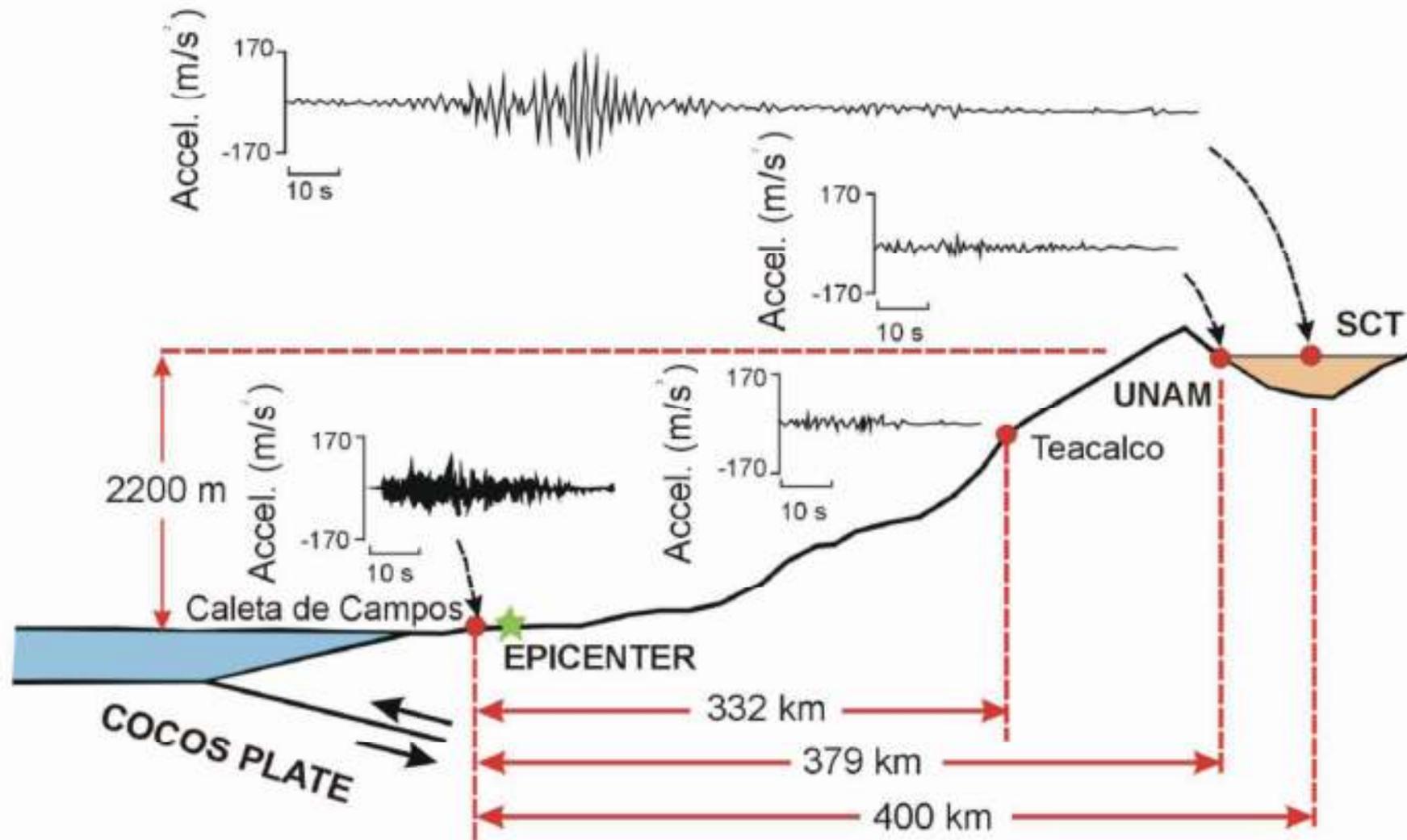
Approccio strumentale

- I segnali sismici registrati sono in genere deboli e i livelli deformativi del terreno molto bassi
- E' possibile indagare aree molto vaste (es. nel caso delle misure di microtremore è possibile eseguire molte misure in tempi brevi e con costi contenuti)

Approccio geotecnico

- Richiedono analisi complesse e prove sui terreni molto costose
- Permettono di simulare la risposta del terreno anche in campi deformativi elevati (terremoti forti) e di effettuare previsioni nelle condizioni sismiche di interesse per il caso in studio

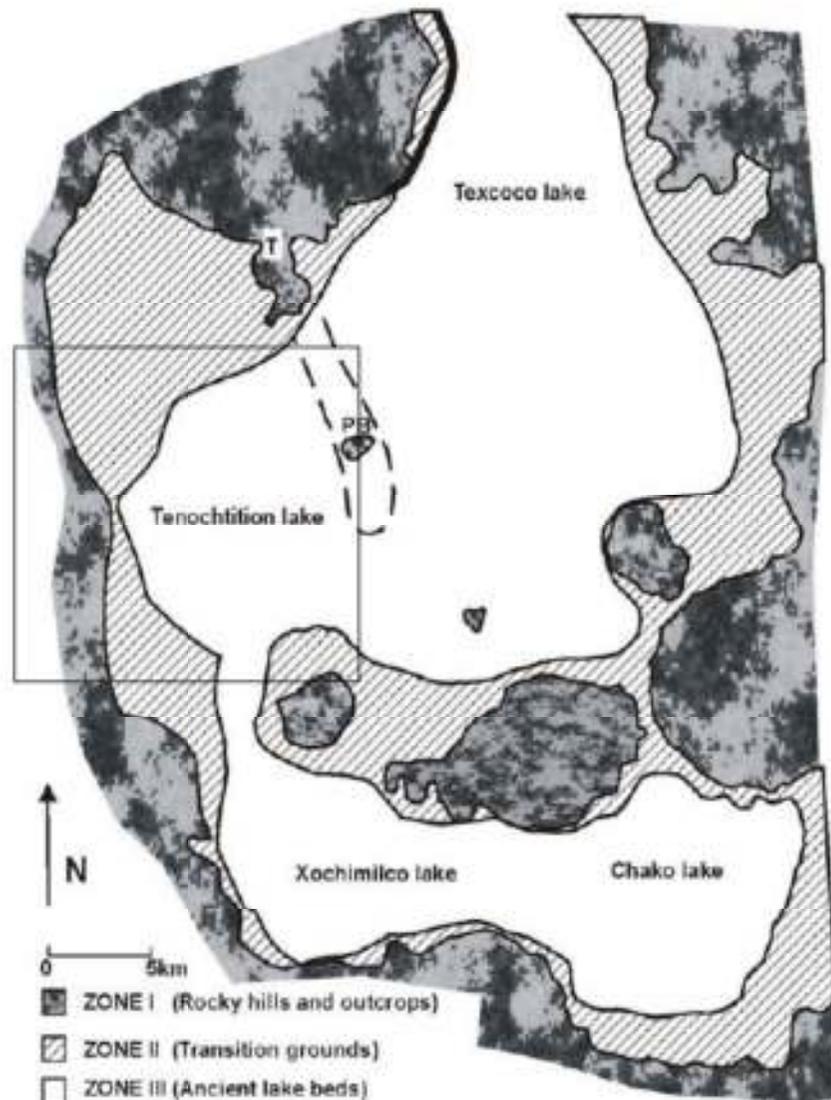
Il terremoto di Città del Messico M 8.1



Città del Messico (1985)

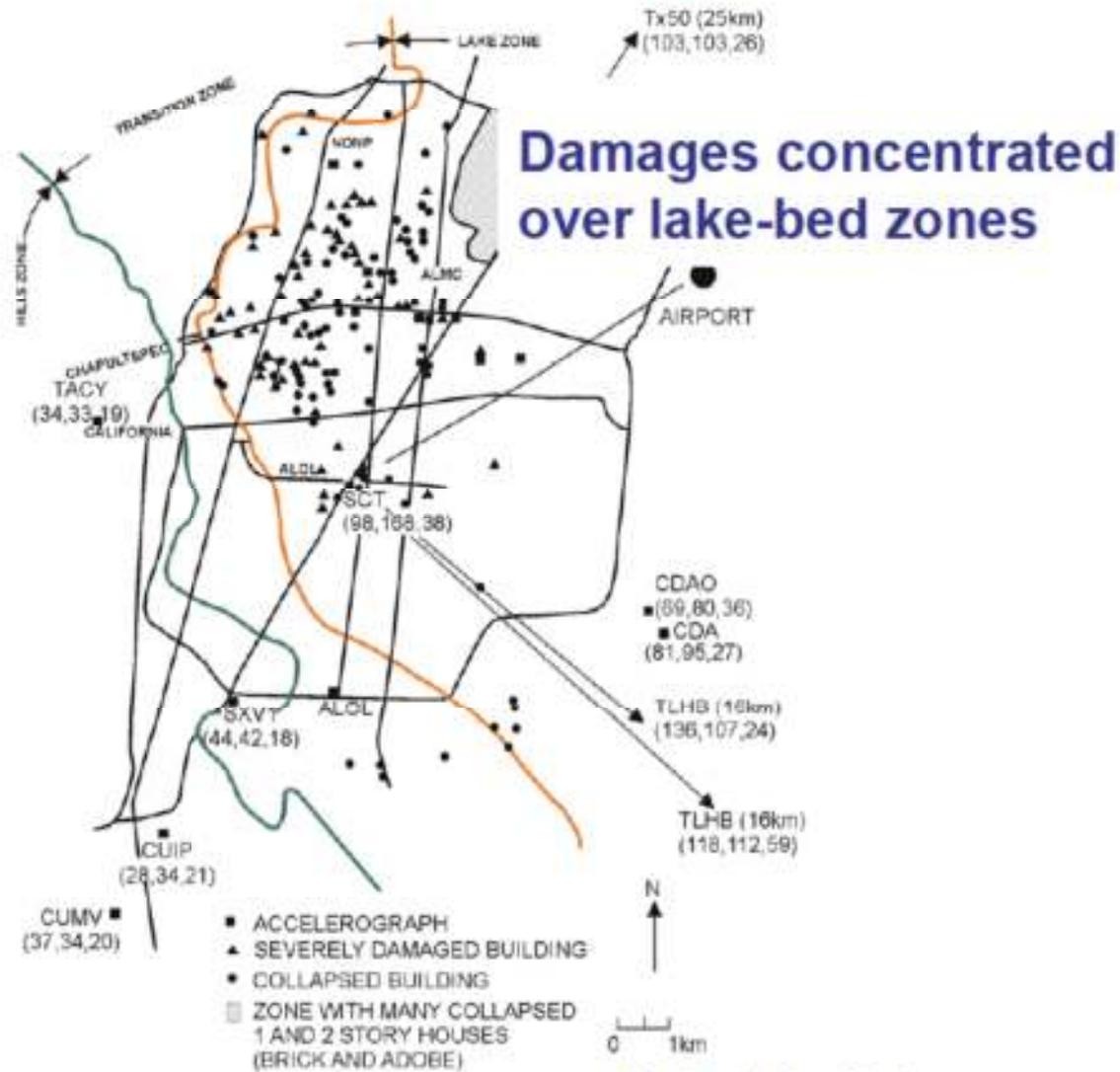
- Stazioni tra loro vicine, alla stessa distanza dalla sorgente sismica, hanno registrato sismogrammi tra loro molto diversi
- A causa della comune distanza dalla sorgente, i termini di sorgente e di percorso sono gli stessi, per cui si deduce che le differenze sono unicamente dovute alla geologia di superficie

Inquadramento geologico



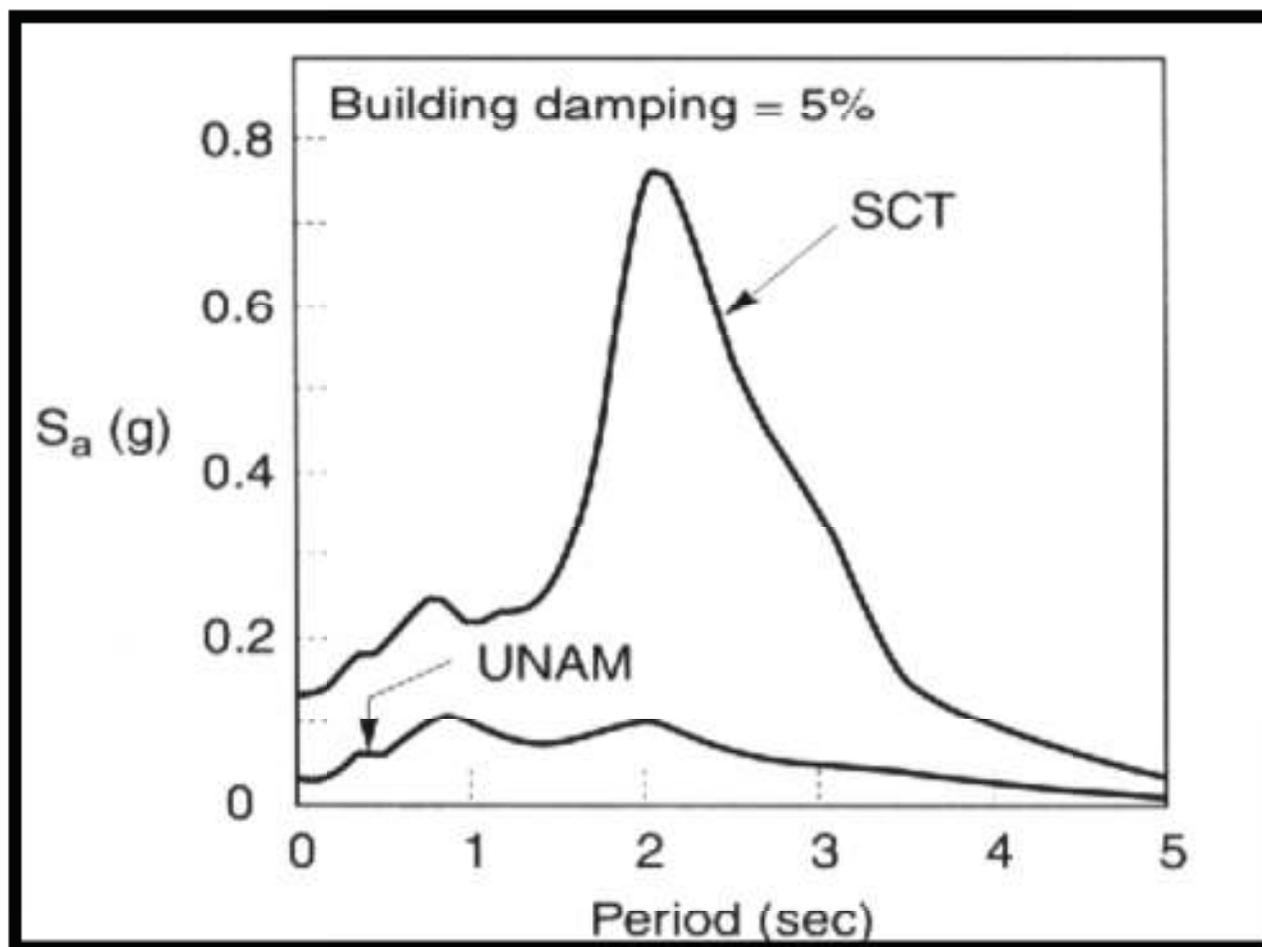
Modified after Selingman et al.(1989)

Mappa del danneggiamento



Modified after Singh et al.(1989)

Spettri di risposta a Città del Messico per roccia e sito "soffice"



Giornata di studi "LA GEOFISICA E IL RISCHIO GEOLOGICO", Rovereto 5 dicembre 2013



Città del Messico: danni più severi ad almeno 400 edifici con un numero di piani compreso tra 7 e 18



(EEFIT, 1986)

Città del Messico

- Il danneggiamento a Città del Messico è stato prevalentemente causato dalla coincidenza tra il periodo dominante del moto del suolo e il periodo naturale di vibrazione di alcuni edifici
- Per una struttura in cemento armato di N piani, il periodo naturale di vibrazione T (secondi) può essere stimato come:

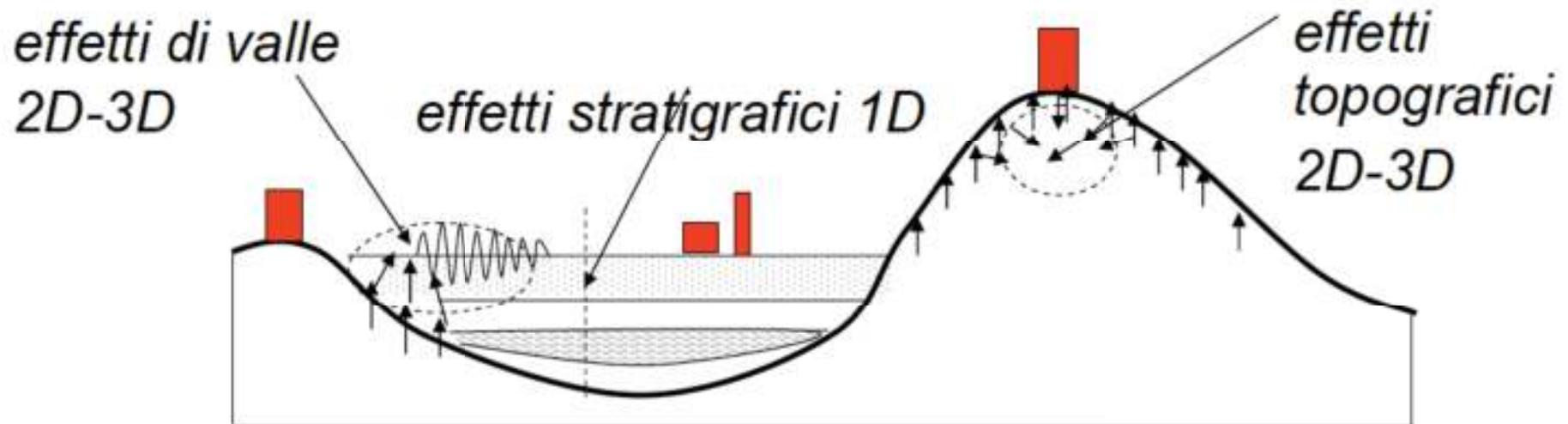
$$T = 0.1 * N$$

Il fenomeno fisico

Tipologia di effetti amplificativi

Si distinguono tre tipi fondamentali di effetti amplificativi:

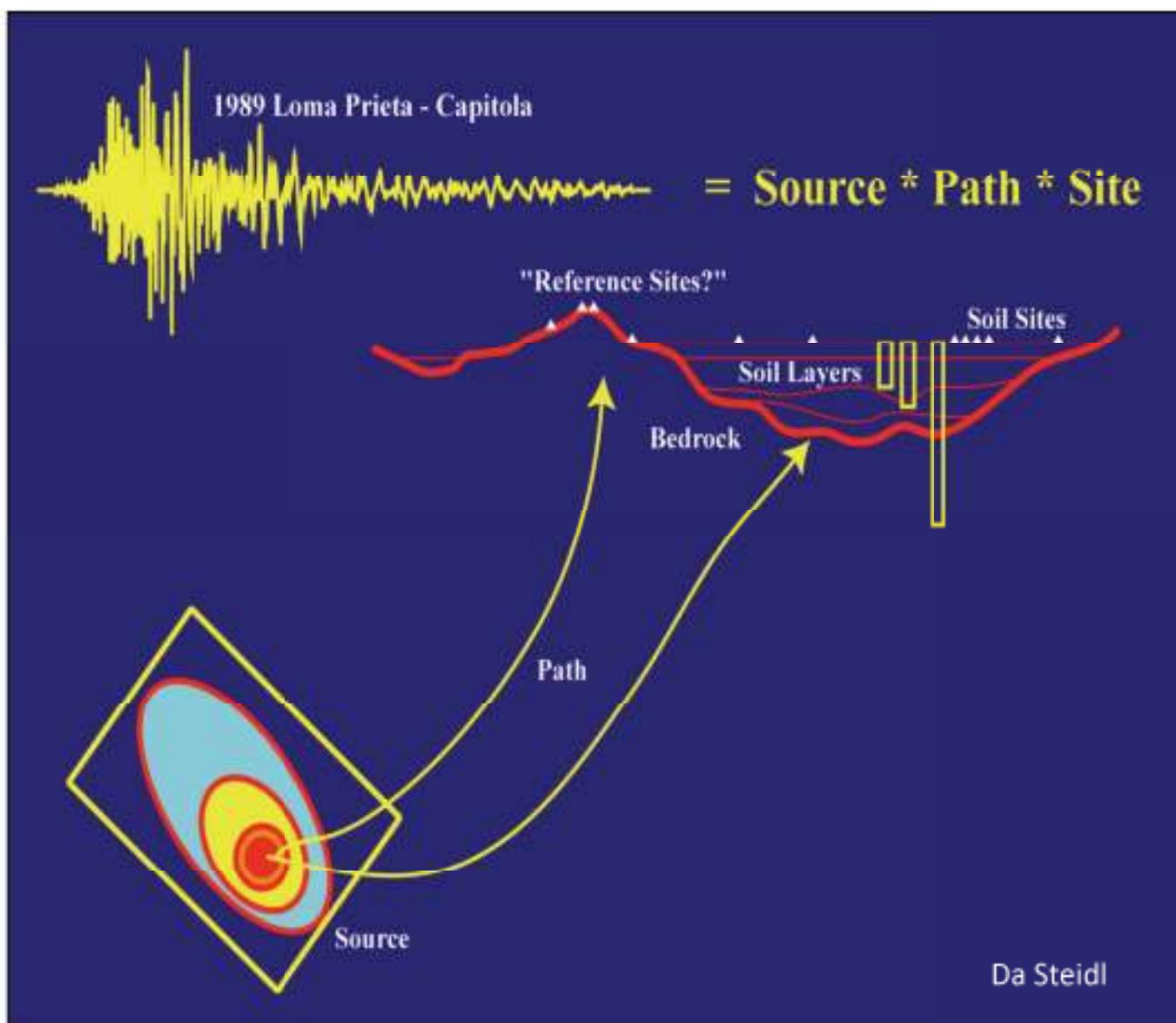
- Effetti stratigrafici o mono-dimensionali (1D)
- Effetti di valle (bi-tridimensionali, 2D-3D)
- Effetti topografici (bi-tridimensionali, 2D-3D)



Caratteristiche del moto sismico

Le caratteristiche del moto sismico alla superficie, in condizioni di *free-field*, sono il risultato un insieme di fenomeni molto complessi legati a:

- Meccanismo di sorgente
- Propagazione sorgente – sito
- Caratteristiche geologiche, morfologiche e geotecniche del sito



Equivalenza dominio del tempo e dominio della frequenza

In sismologia, è spesso utile rappresentare una funzione o una distribuzione definita nel **dominio del tempo** (segnale) in una nuova funzione espressa nel **dominio della frequenza**

Nel caso di funzioni periodiche, si utilizza la **trasformata di Fourier**, che può essere semplificata con il calcolo di un insieme discreto di ampiezze complesse, chiamati coefficienti della serie di Fourier.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{-i\omega t} d\omega$$

$$F(\omega) = |A(\omega)| e^{i\phi(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

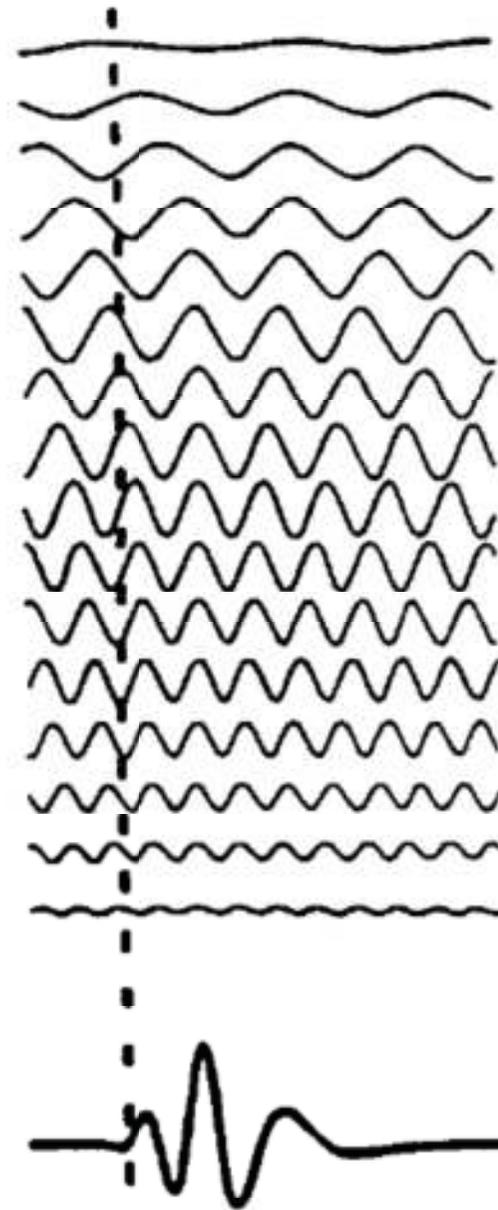
$$|A(\omega)| = \sqrt{(a^2(\omega) + b^2(\omega))}$$

$$\phi(\omega) = \tan^{-1} \frac{b(\omega)}{a(\omega)}$$

Versione discreta che mostra come una somma di funzioni armoniche può eguagliare una funzione arbitraria:

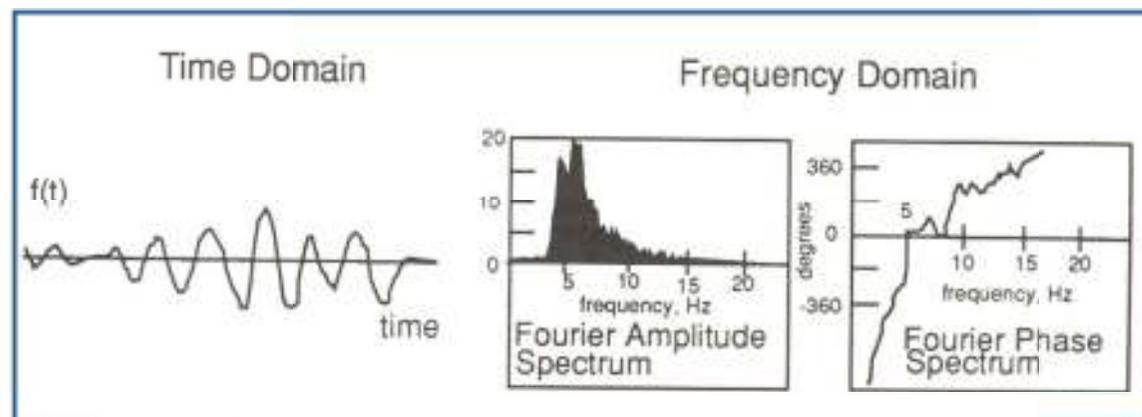
Da: Lay & Wallace

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \sum |A(\omega)| e^{-i([\omega t + \phi(\omega)] \Delta\omega}$$



Spettro di Fourier

- La coppia di coefficienti $a(\omega)$, $b(\omega)$ ci permette di passare dal dominio del tempo a quello della frequenza
- Dove ω è la frequenza angolare, $A(\omega)$ è l'ampiezza e $\phi(\omega)$ è la fase di ogni componente armonica



Da: Lay & Wallace

Perchè lo spettro di Fourier di un segnale è utile?

Lo spettro di Fourier semplifica la separazione tra contributi di sorgente, percorso e sito in un sismogramma:

$$U(f) = E(f) * D(f) * S(f)$$

$U(f)$ è lo spettro di Fourier del segnale

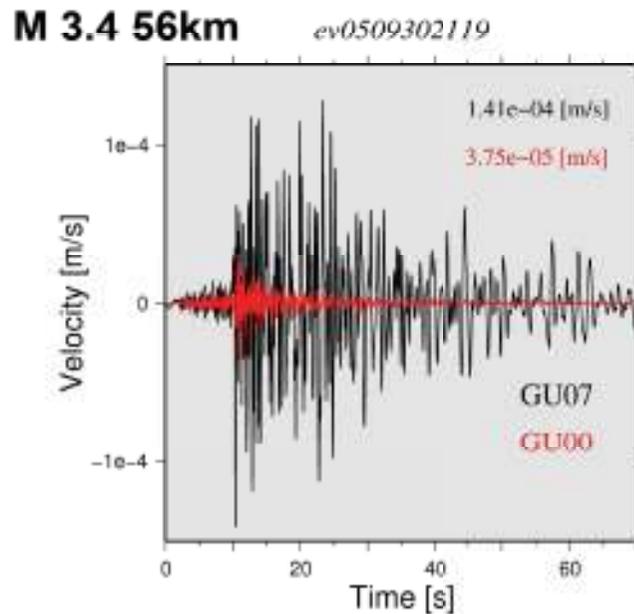
$E(f)$ è lo spettro di Fourier della sorgente sismica

$D(f)$ è l'attenuazione dell'ampiezza con la distanza R

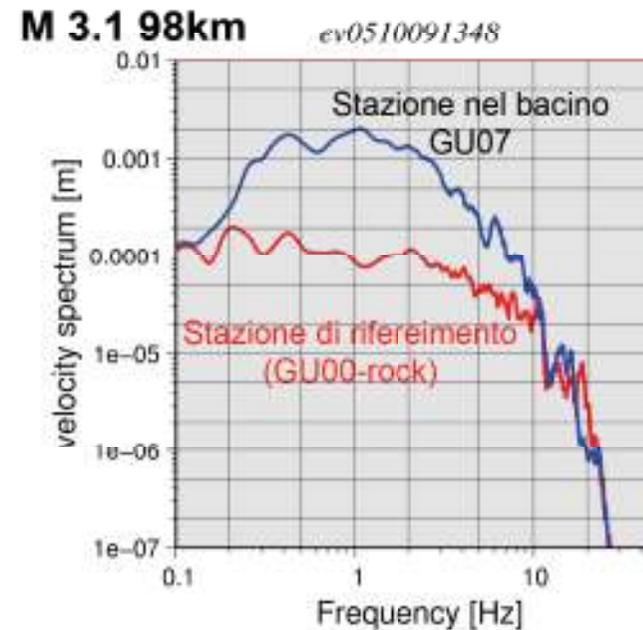
$S(f)$ è l'amplificazione dovuta all'effetto di sito (= 1 per un sito ideale)

Confronto tra registrazioni

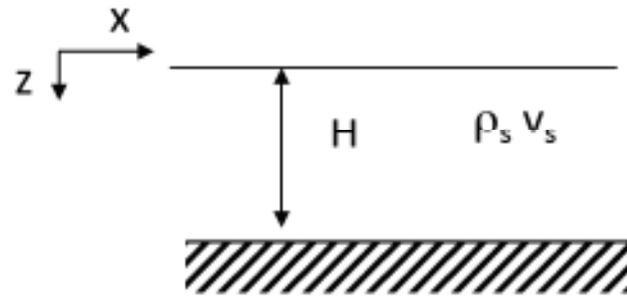
Dominio temporale: confronto tra i valori di picco, di durata, parametri integrali, etc



Dominio della frequenza: spettri di Fourier di ampiezza



Strato omogeneo elastico su substrato rigido



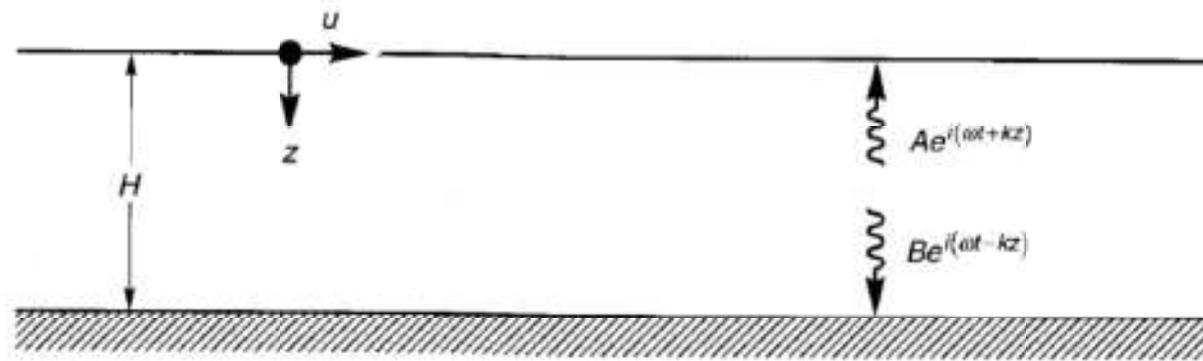
Le onde si propagano con incidenza verticale

H = spessore dello strato

ρ = densità

V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio

Si assume che non ci sia dissipazione dell'energia all'interno del suolo e che le onde che viaggiano verso il basso subiscano il fenomeno della riflessione, per cui l'energia viene "intrappolata" nello strato di terreno



Da Kramer

$$u(z, t) = Ae^{i(\omega t + kz)} + Be^{i(\omega t - kz)}$$

Spostamento alla superficie libera

$$\tau(0, t) = G\gamma(0, t) = G \frac{\partial u(0, t)}{\partial z} = 0$$

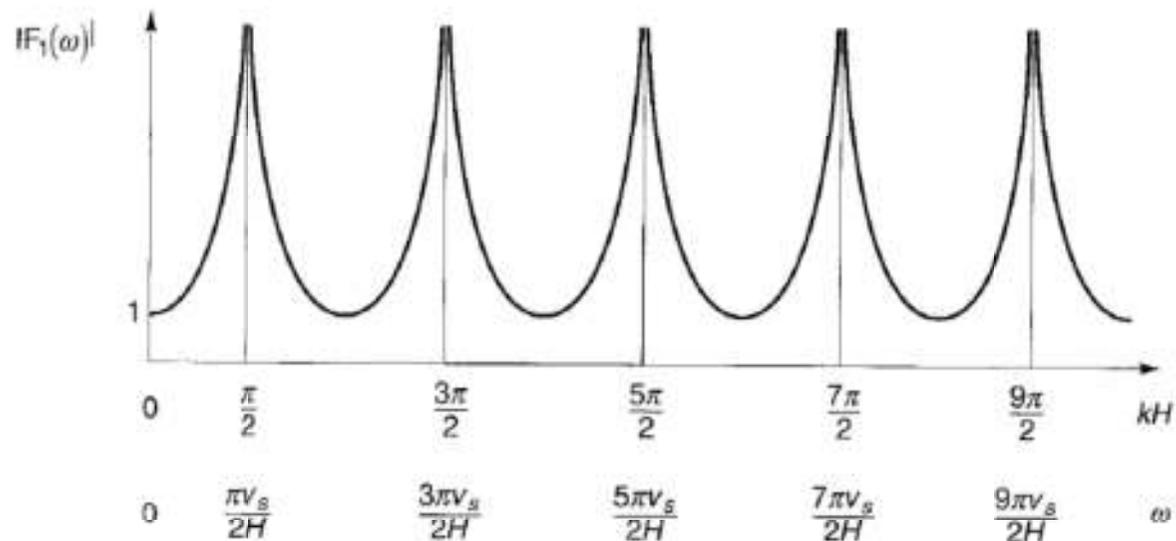
Alla superficie lo sforzo di taglio e la deformazione sono pari a zero

$$Gik(Ae^{ik(0)} - Be^{-ik(0)})e^{i\omega t} = Gik(A - B)e^{i\omega t} = 0 \quad \text{Sostituzione e differenziazione}$$

$$u(z, t) = 2A \frac{e^{ikz} + e^{-ikz}}{2} e^{i\omega t} = 2A \cos kz e^{i\omega t} \quad \text{Onda risultante alla superficie libera}$$

$$F_1(\omega) = \frac{u_{\max}(0, t)}{u_{\max}(H, t)} = \frac{2Ae^{i\omega t}}{2A \cos kHe^{i\omega t}} = \frac{1}{\cos kH} = \frac{1}{\cos(\omega H/v_s)}$$

$$|F_1(\omega)| = \sqrt{\{\text{Re}[F_1(\omega)]\}^2 + \{\text{Im}[F_1(\omega)]\}^2} = \frac{1}{|\cos(\omega H/v_s)|}$$

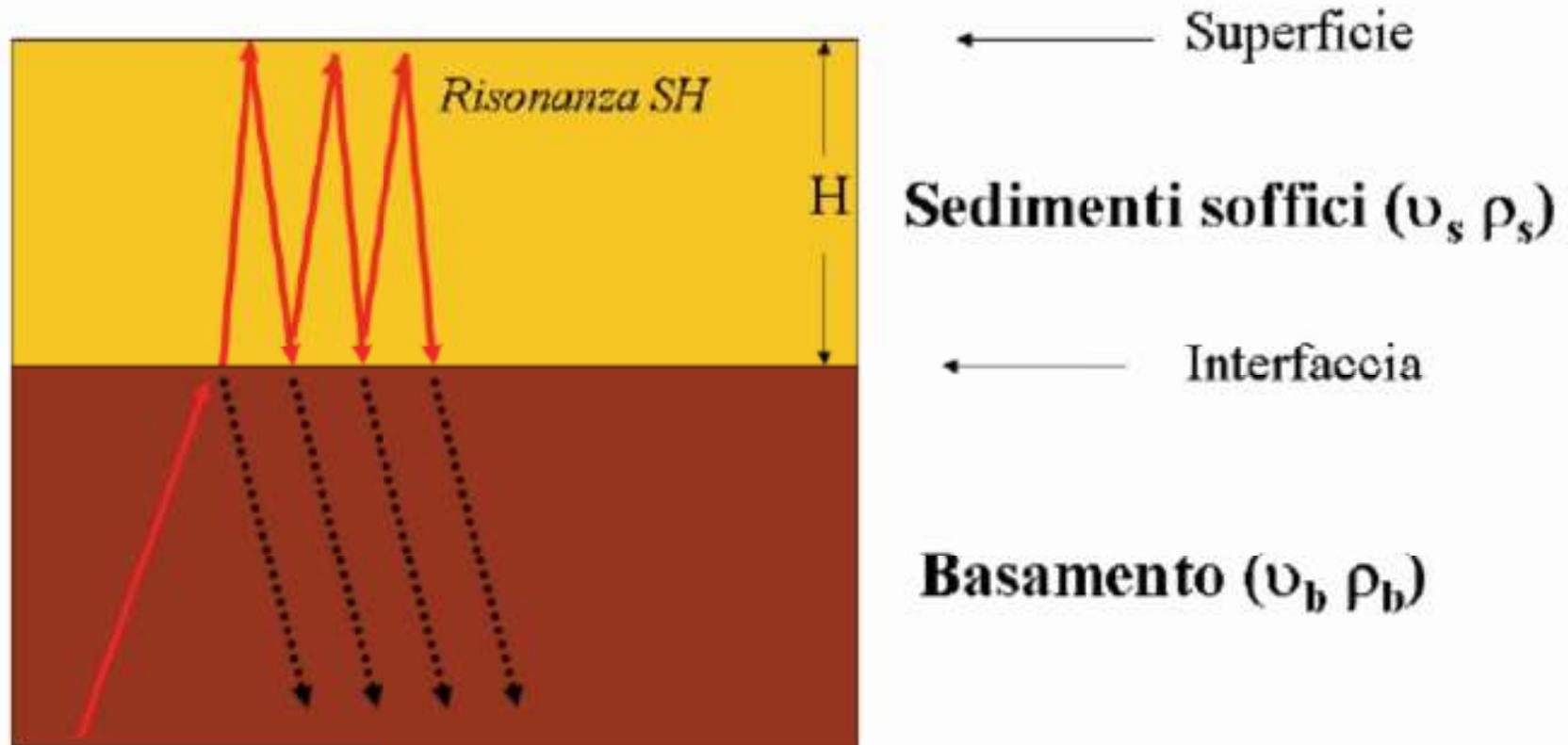


$$|F_1(\omega)| = \sqrt{\{\text{Re}[F_1(\omega)]\}^2 + \{\text{Im}[F_1(\omega)]\}^2} = \frac{1}{|\cos(\omega H/v_s)|}$$

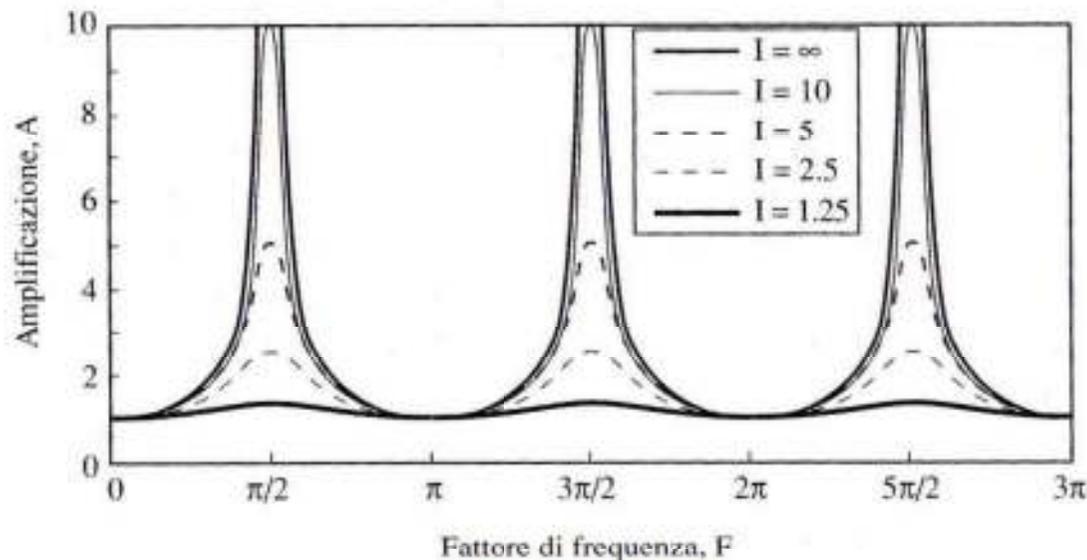
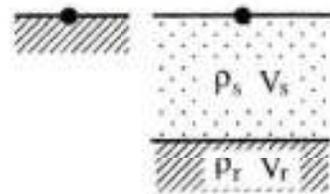
Lo spessore H e il valore di V_s controllano la frequenza di risonanza

$$\omega_n = \frac{\pi V_s (2n - 1)}{2H} \qquad f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{V_s}{4H} (2n - 1)$$

Substrato elastico



*Onde SH
incidenti*



Lo spessore H e il valore di V_s
controllano la frequenze di risonanza

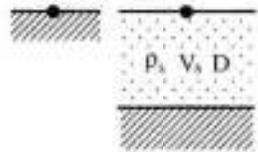
$$\omega = \frac{V_s}{H} (2n - 1) \frac{\pi}{2} \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{V_s}{4H} (2n - 1) \Rightarrow T = \frac{1}{f} = \frac{4H}{V_s \cdot (2n - 1)}$$

$$A_d(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2 F + \frac{1}{I^2} \sin^2 F}}$$

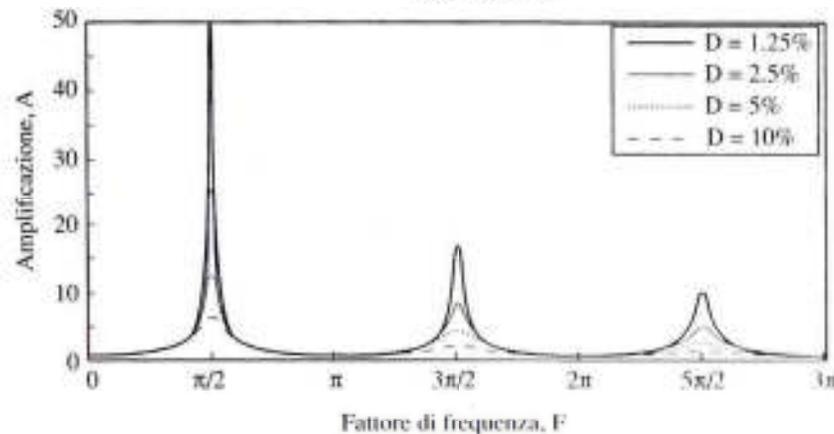
$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$

Rapporto di Impedenza sismica
controlla l'entità del fenomeno

$$I = \left(\frac{\rho_s v_s}{\rho_r v_r} \right)$$



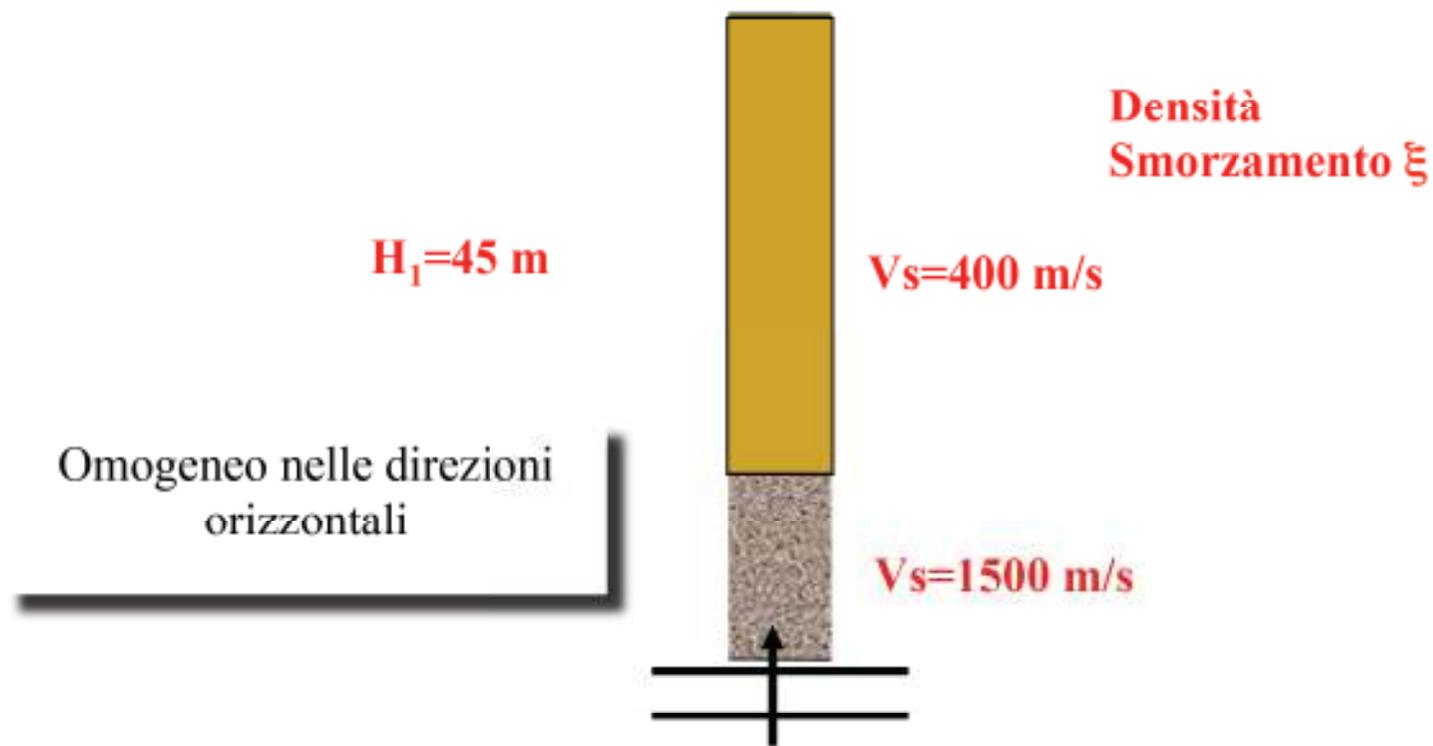
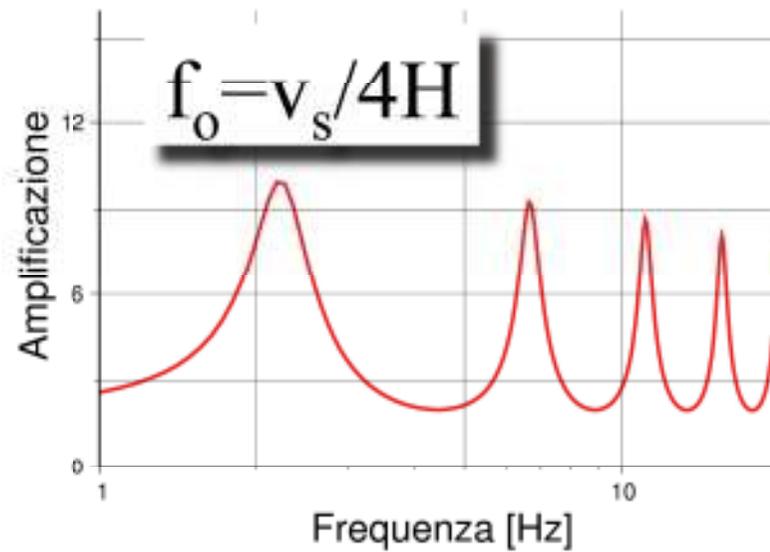
$$A_r^*(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(kH) + \sinh^2(DkH)}} \approx \frac{1}{\sqrt{\cos^2 F + DF}}$$

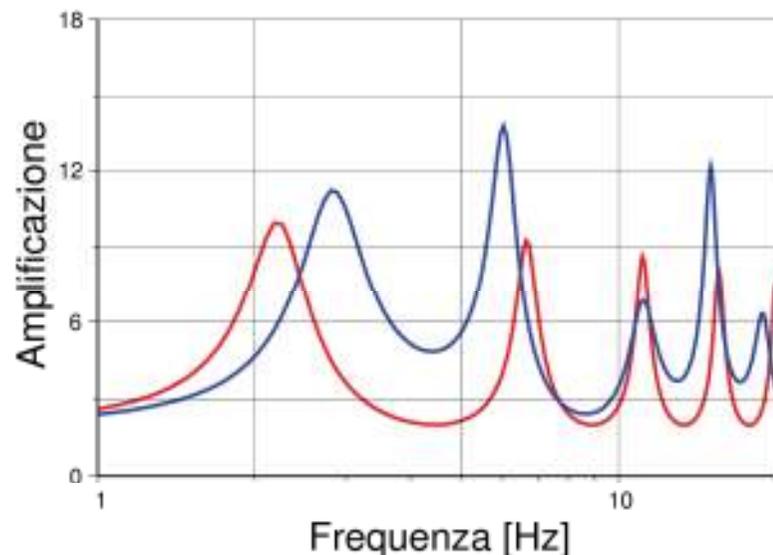


$$F = \frac{\omega H}{V_s}$$

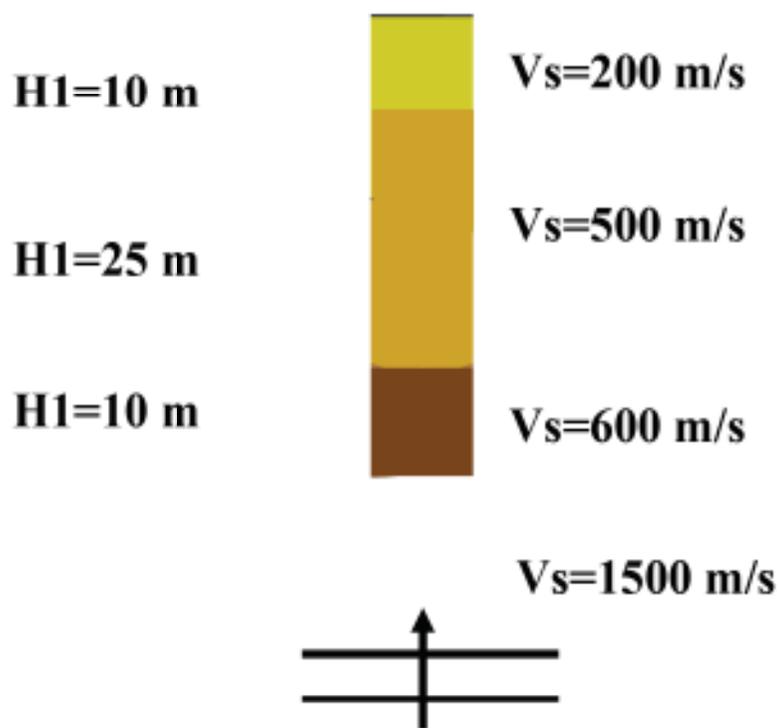
- $D > 0$ la funzione di amplificazione presenta valori massimi finiti in funzione di D .
- Le frequenze naturali risultano praticamente invariate rispetto ai casi già esaminati
- I massimi valori di amplificazione risultano decrescenti con n (ordine del modo di vibrare dello strato) secondo l'espressione approssimata:

$$(A_r^*)_{\max, n} \approx \frac{2}{(2n - 1)\pi D}$$



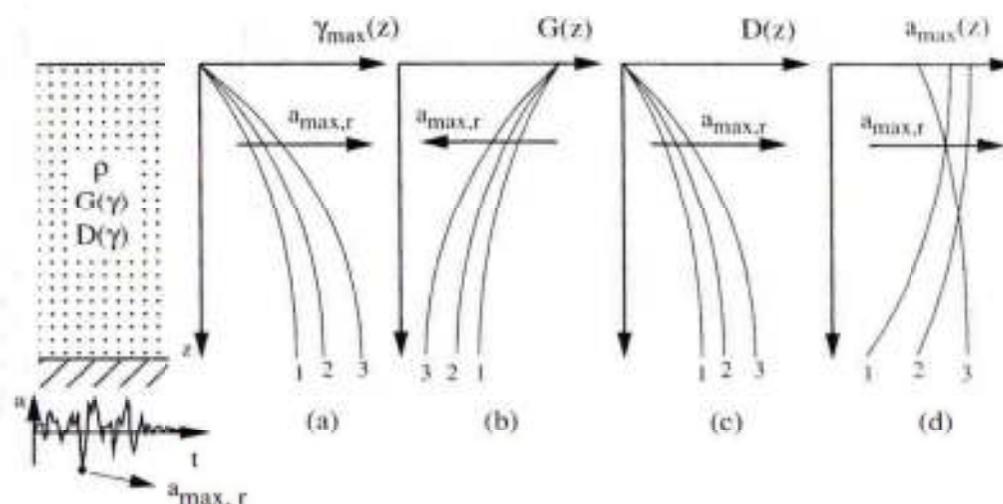


$$f_0 = v_s / 4H$$



La velocità media nei primi 45m è maggiore di 400 m/s, quindi f_0 aumenta rispetto al caso precedente.
C'è un secondo contrasto d'impedenza significativo più superficiale.

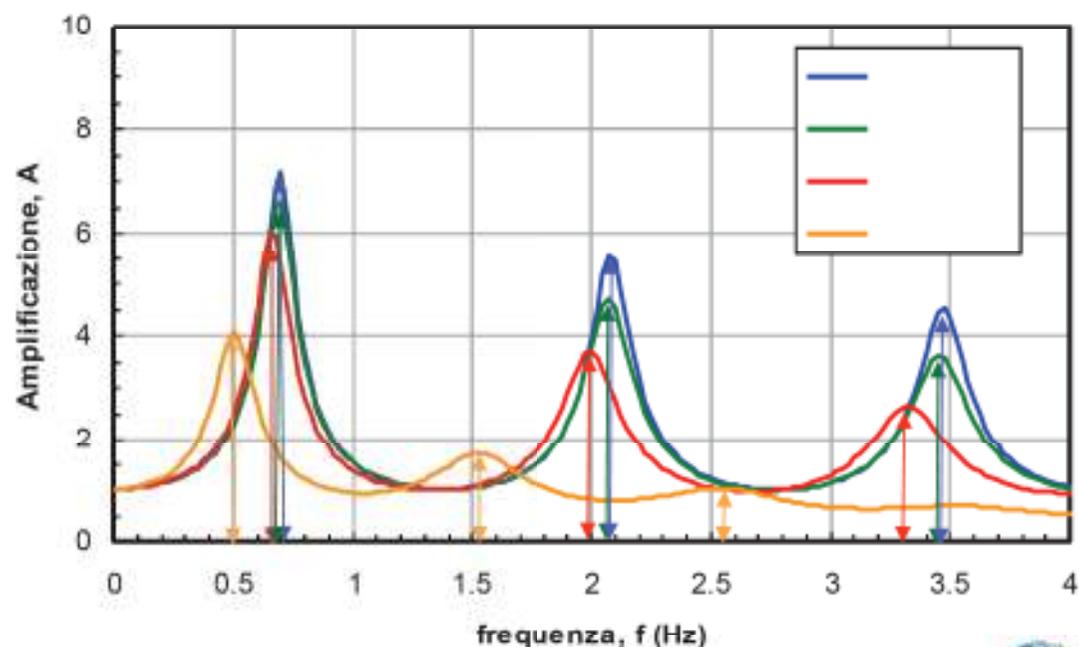
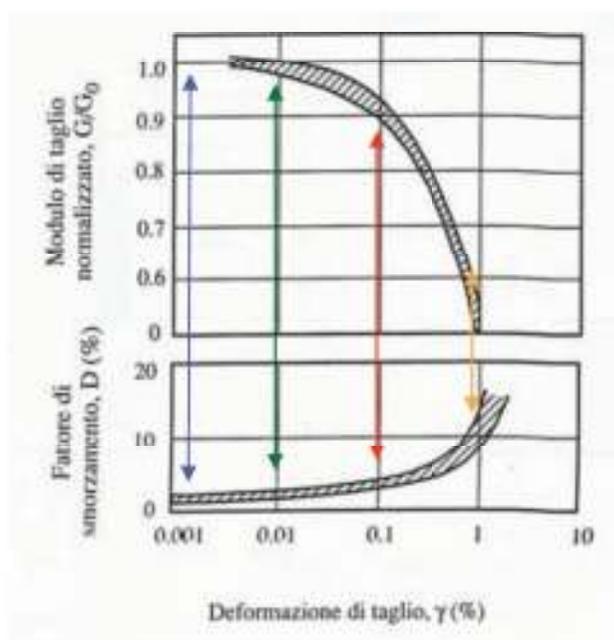
Effetti della non linearità



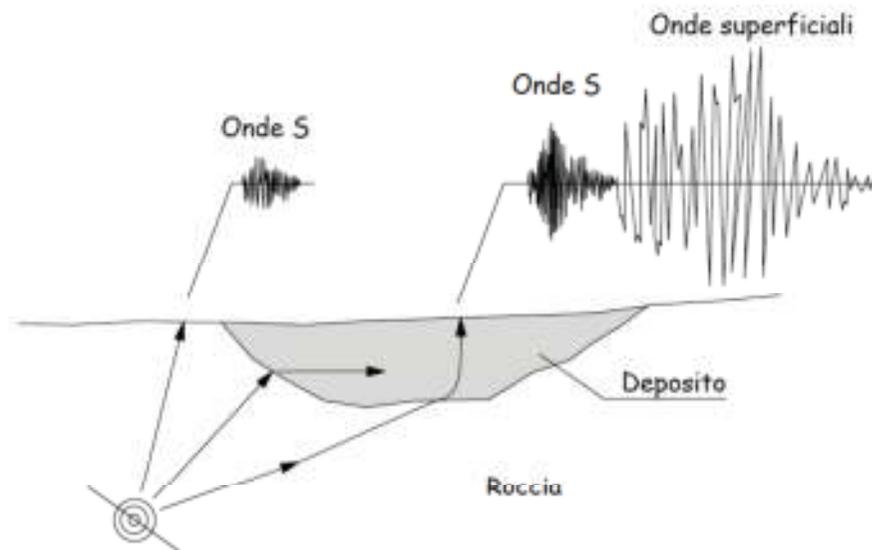
Si consideri un moto sismico caratterizzato da valori crescenti dell'accelerazione di picco al bedrock $a_{max,r}$. Aumentando $a_{max,r}$, si verifica un aumento del livello di deformazione indotto lungo il deposito, a cui corrisponde, a causa del comportamento non lineare del terreno, un valore del modulo di taglio mobilitato via via decrescente e, per contro, uno smorzamento via via crescente. In corrispondenza di valori elevati di $a_{max,r}$ è possibile addirittura che il profilo di accelerazioni conseguente si attenui verso la superficie, per l'effetto significativo dello smorzamento.

Effetti della non linearità

Livelli più elevati della deformazione di taglio indotta si associano a rigidità e smorzamenti rispettivamente decrescenti e crescenti. Ne consegue un aumento dei periodi propri (ossia una riduzione delle frequenze naturali, a causa della riduzione della rigidità mobilitata) e una riduzione dei picchi d'amplificazione (a causa dell'incremento del fattore di smorzamento e dell'incremento del contrasto di impedenze roccia-terreno). Addirittura, per terremoti particolarmente forti ($\gamma=1\%$) si osservano fenomeni di attenuazione del moto alle alte frequenze.



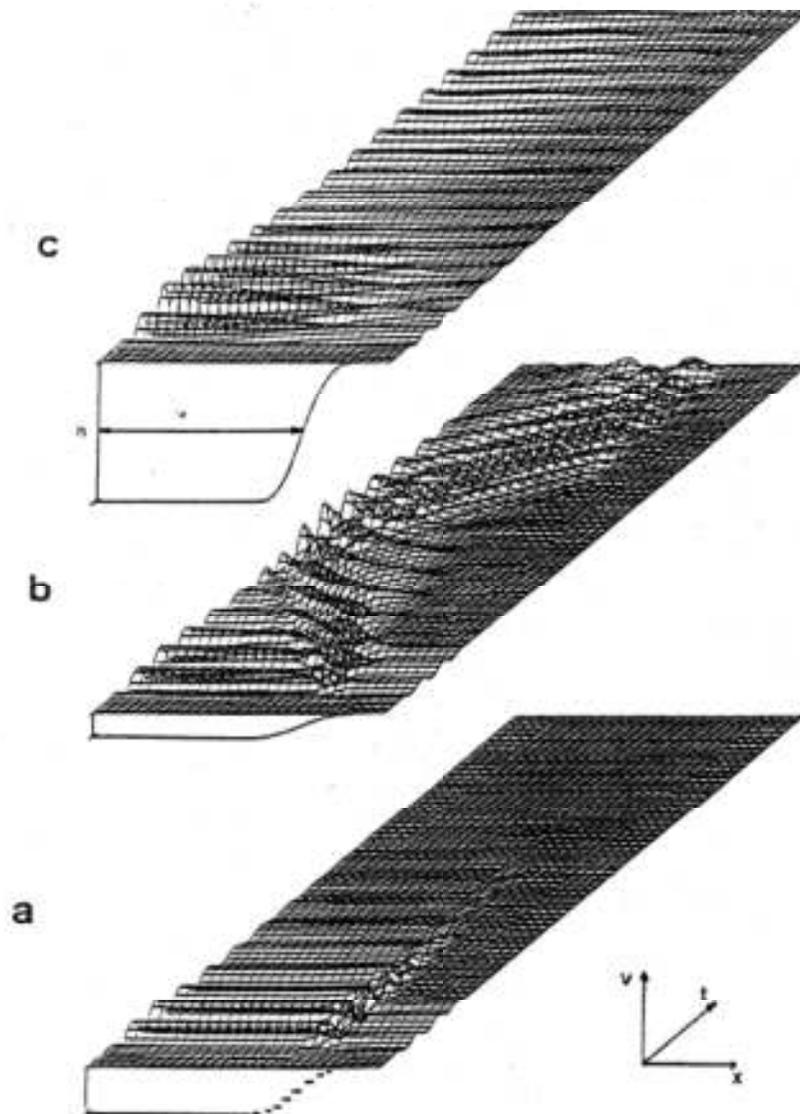
Topografie sepolte: valli alluvionali / bacini lacustri



Effetti di amplificazione:
Focalizzazione delle
onde sismiche
(interferenza costruttiva
di onde riflesse ed onde
rifratte)
Generazione di onde di
superficie con direzione
di propagazione
orizzontale

Effetti 2D dovuti alle variazioni laterali della situazione geologica e morfologica
Rispetto al caso 1D, si verificano:

- maggiori amplificazioni
- aumento significativo della durata del moto sismico per effetto di riflessioni multiple, diffrazione ed onde di superficie



Dominio del tempo:

a) Approssimazione 1-D (considerando per ogni sito la profondità dei sedimenti).

b) Modellazione 2D, valle poco profonda $h/w = 0.06$.

c) Modellazione 2D, valle profonda $h/w = 0.70$.

I sedimenti sono elastici (no damping)

Variazione spaziale (x) e temporale (t)

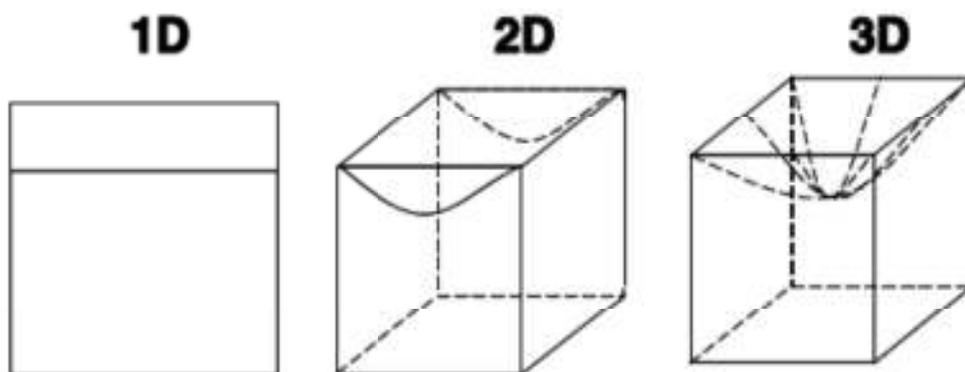
del moto sismico per onde SH con

frequenza caratteristica $f_p = \beta_1/4h$ (β_1 è

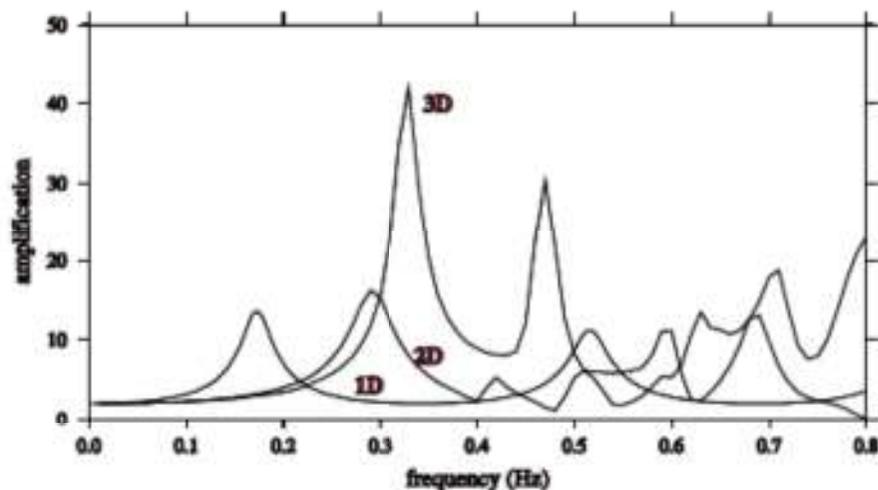
la velocità delle onde S nei sedimenti, h

è lo spessore dei sedimenti).

Da Bard e Buchon, 1980



transfer functions for the central point of a sinusoidal irregularity



Dominio della frequenza:

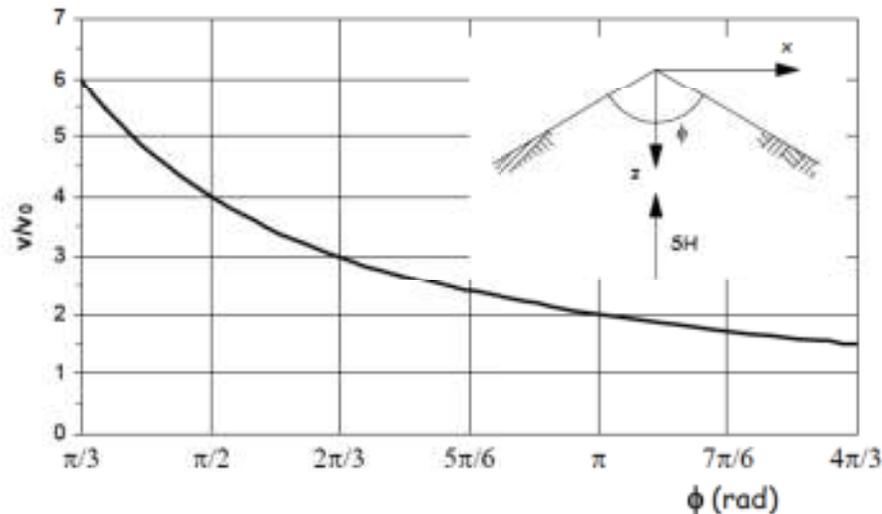
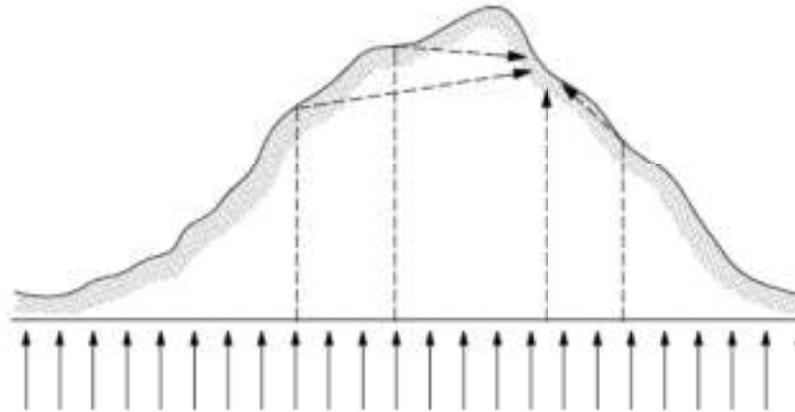
Risposte spettrali da modelli 1-D, 2-D e 3-D per morfologia sinusoidale.

Per i modelli 2-D e 3-D, il moto è calcolato al centro del bacino.

Effetti topografici

Gli effetti di amplificazione osservabili alla sommità di rilievi, creste, pendii sono attribuibili ai fenomeni di:

Focalizzazione delle onde sismiche
Complessa interazione tra campo d'onda incidente e diffratto.



Variazione del fattore di amplificazione con l'angolo al vertice, dal modello di Sanchez-Sesma (1990)

Valutazione degli effetti di sito

- Approccio **strumentale**: basato sulle registrazioni
- Approccio **numerico /geotecnico**: basato sulla teoria della propagazione delle onde

Segnali sismici

- Registreazioni di terremoti deboli (weak motion, $M \leq 4$) o moderati e forti ($M > 4$) possono includere gli effetti non lineari del terreno (per forti magnitudo)
- Microtremori (rumore ambientale) Sono le registreazioni delle vibrazioni causate da disturbi naturali o antropici (ampiezze 10^{-4} - 10^{-2} mm)

Rumore ambientale

	Gutenberg (1958)	Asten (1978-1984)
Waves striking the coast	0.05-0.1 Hz	0.5-1.2 Hz
Monsoon / large scale meteorological perturbations	0.1-0.25 Hz	0.16-0.5 Hz
Cyclones over the ocean	0.3-1 Hz	0.5-3 Hz
Local meteorological conditions	1.4-5 Hz	
Volcanic tremor	2-10 Hz	
Urban	1-100 Hz	1.4-30hz

Table 2.1: Summary of noise sources according to frequency after *Gutenberg* [1958] and *Asten* [1978, 1984] studies [from *SESAME Project, report WP08, 2003*].

Analisi spettrali

- **Standard Spectral Ratio (SSR):** si assume che per uno stesso terremoto (stessa sorgente) due stazioni vicine abbiano la stessa attenuazione, per cui la differenza tra gli spettri di Fourier è solo dovuta all'effetto di sito
- **Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR):** si assume che la componente verticale del moto non subisca fenomeni di amplificazione

SSR

$$A_{ij}(f) = S_i(f)P_{ij}(f)G_j(f)I_j(f),$$

$S_i(f)$ è il termine di sorgente del terremoto i -esimo; $P_{ij}(f)$ è il termine di attenuazione tra la sorgente i e il sito j ; $G_j(f)$ è il termine di sito e $I_j(f)$ è la risposta dello strumento

$$\frac{A_{ij}(f)}{A_{ik}(f)} = \frac{S_i(f)P_{ij}(f)G_j(f)}{S_i(f)P_{ik}(f)G_k(f)} \longrightarrow \frac{A_{ij}(f)}{A_{ik}(f)} = \frac{G_j(f)P_{ij}(f)}{G_k(f)P_{ik}(f)}$$

Rimuovo il termine comune di sorgente e il termine di propagazione se le stazioni sono molto vicine

SSR

- La scelta del sito di riferimento per il metodo SSR è spesso cruciale
- Non tutti i siti su roccia sono uguali
- Anche i siti su roccia possono essere affetti da amplificazione

HVSR

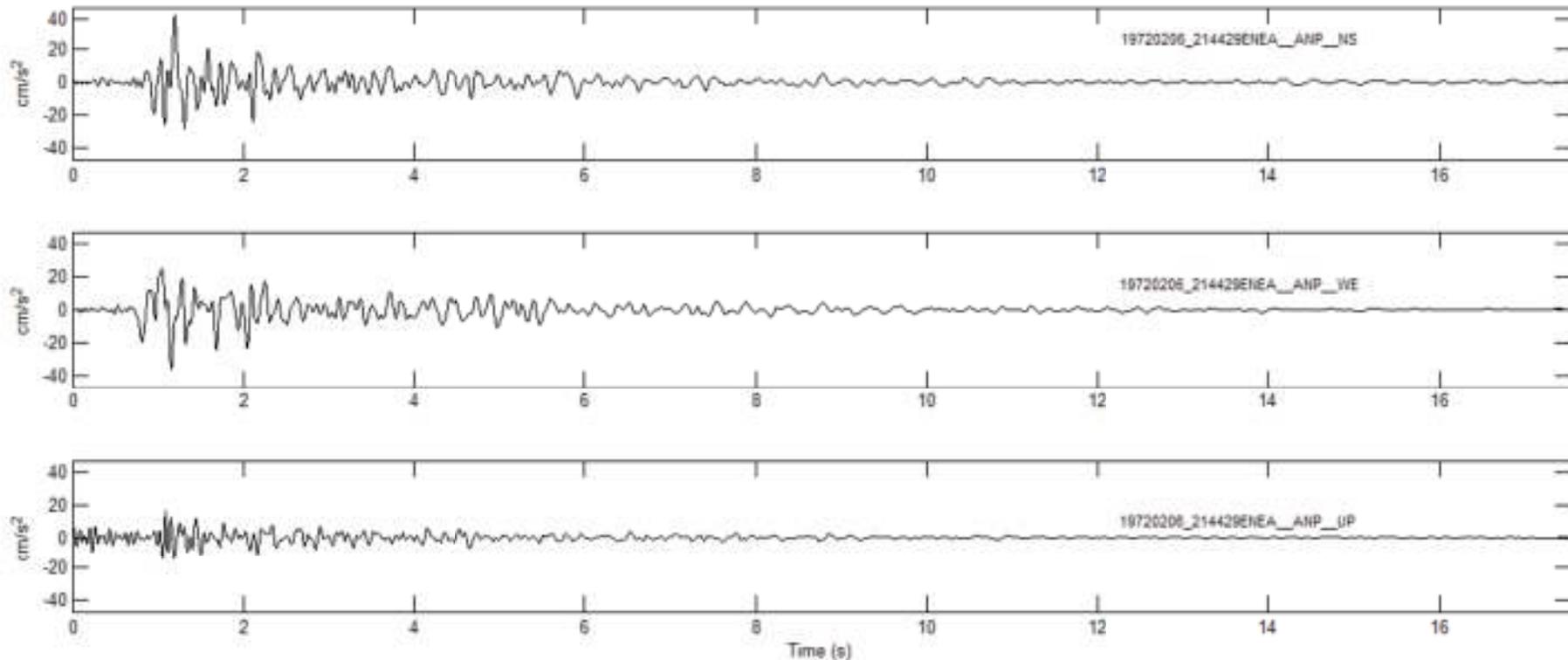
Il metodo è anche conosciuto come **Receiver Function** (Langston, 1979). L'assunzione di base è che la componente verticale del moto non sia influenzata dalla struttura locale.

$$\frac{H}{V} = \frac{A_{Hij}(f)}{2\sqrt{2}A_{Vij}(f)},$$

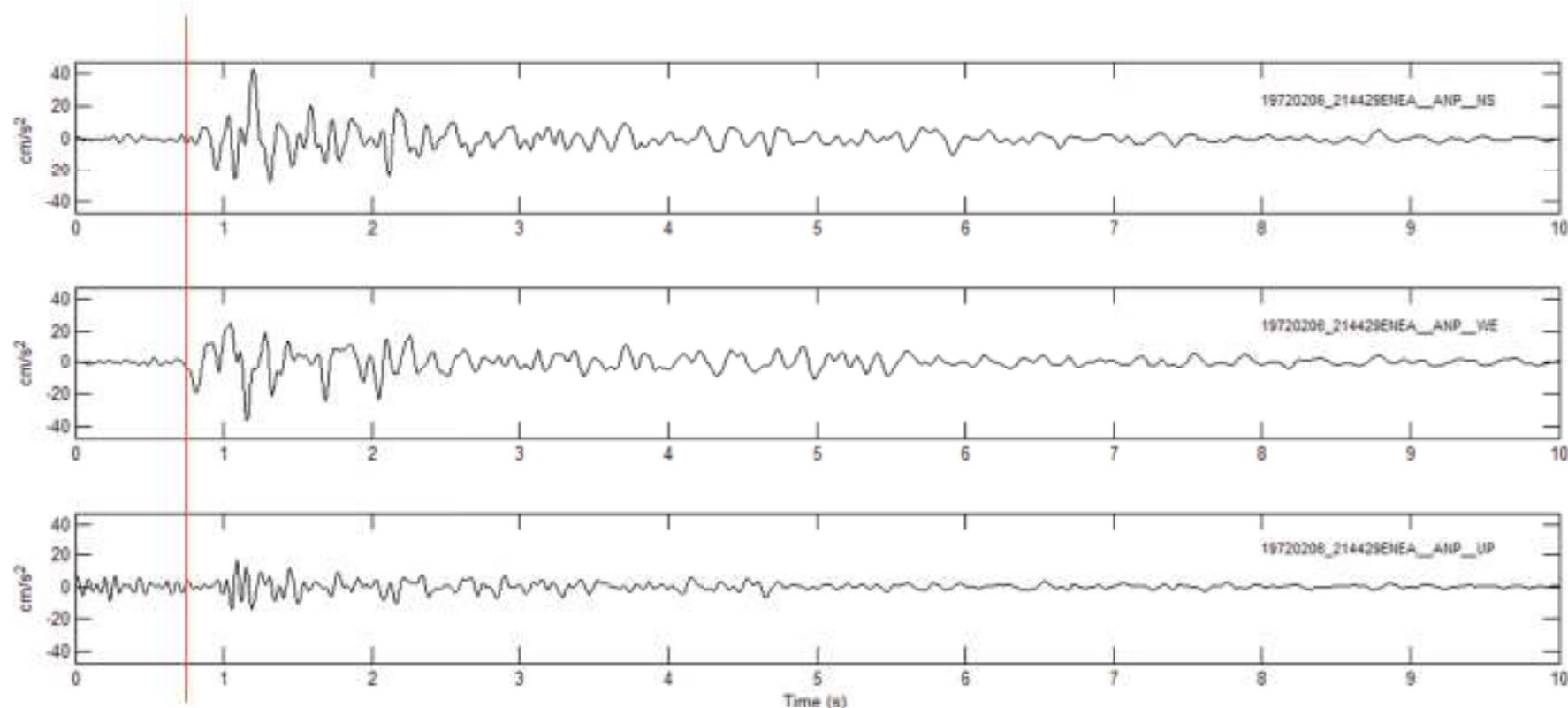
$A_{Hij}(f)$ è lo spettro della finestra S della componente orizzontale e $A_{Vij}(f)$ è lo spettro di Fourier della componente verticale dell'evento i registrato alla stazione j.

(Il fattore 2 nel denominatore riflette la simmetria dello spettro di Fourier per una singola componente. Il fattore radice di 2 riflette la ripartizione dell'energia tra le due componenti orizzontali)

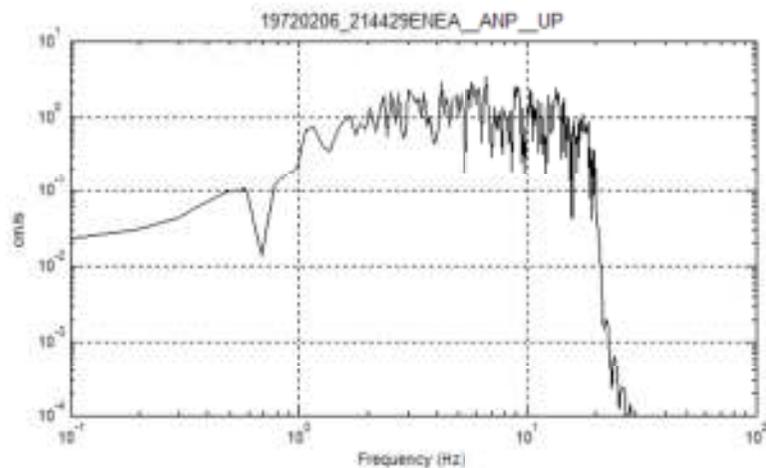
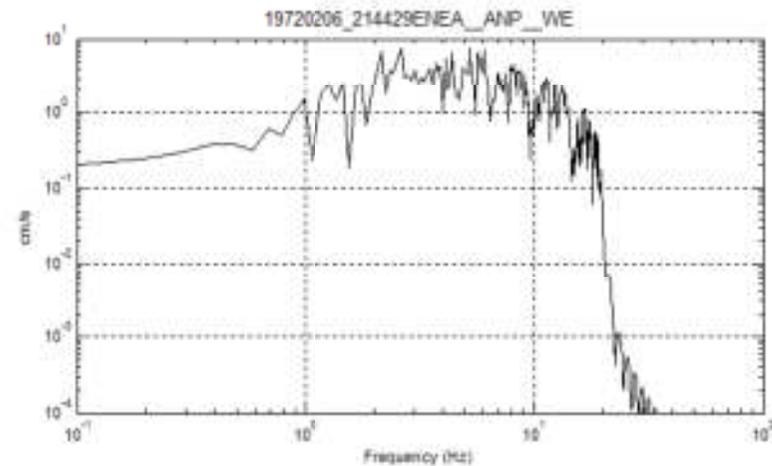
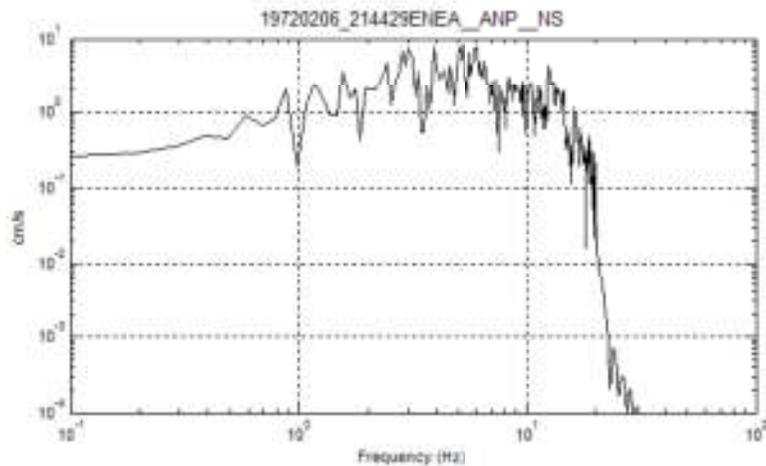
Esempio: Registrazione del terremoto del 06/02/1972 ad Ancona Palombina



Selezione della fase S: durata della finestra 10 s



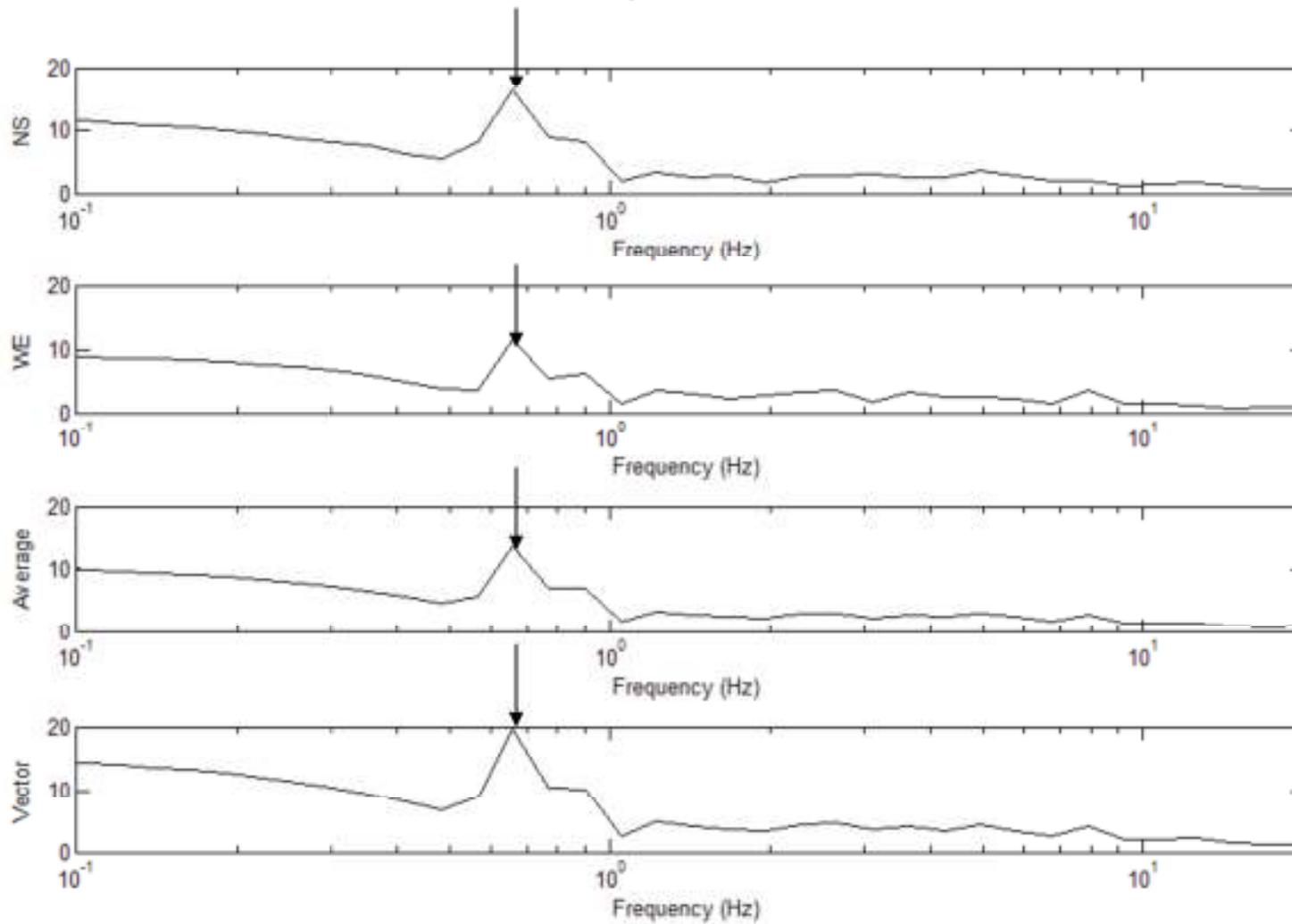
Spettri di Fourier



Lo spettro di ampiezza viene “lisciato” per ridurre la variabilità stocastica nella stima delle ordinate spettrali

HVSR

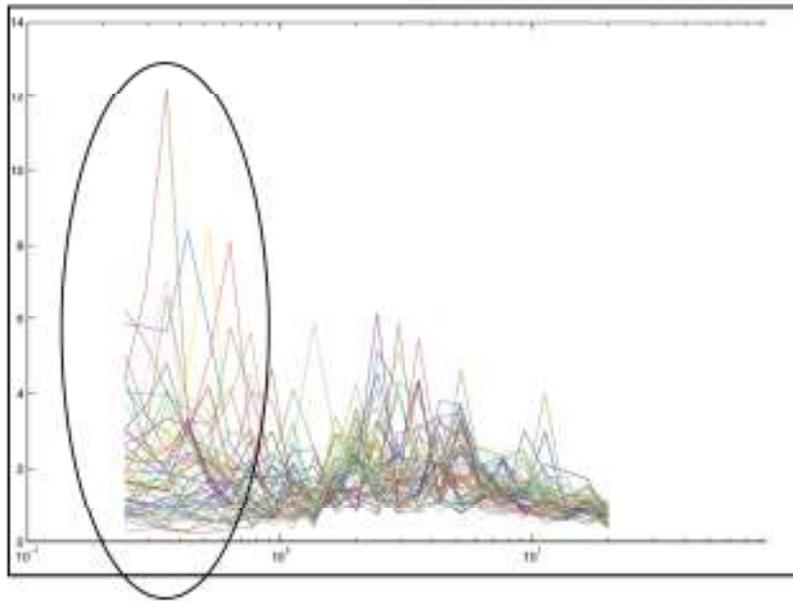
Frequenza di risonanza



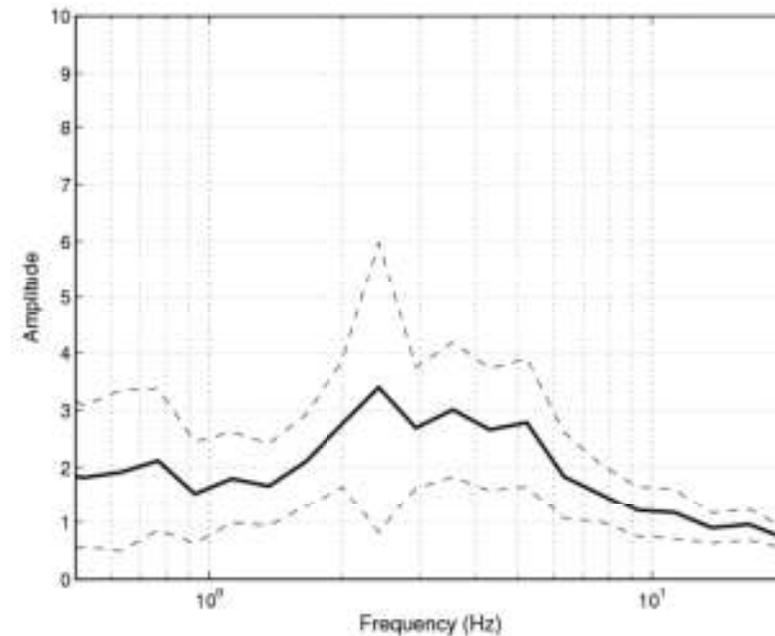
Funzione di amplificazione

- Per avere una funzione di amplificazione attendibile deve essere utilizzato il numero massimo possibile di eventi per un sito
- I rapporti spettrali vengono mediati e viene calcolata la deviazione standard

Funzione di trasferimento

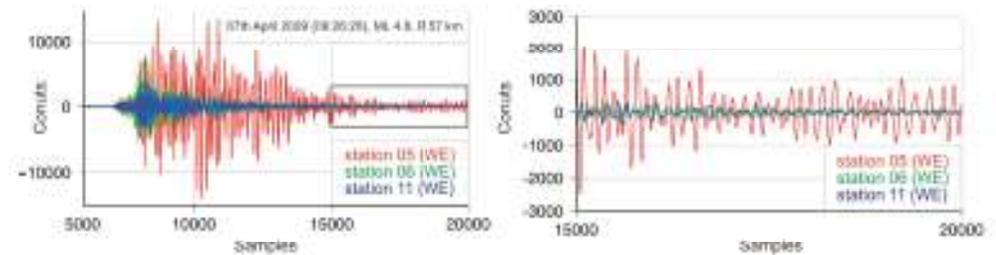
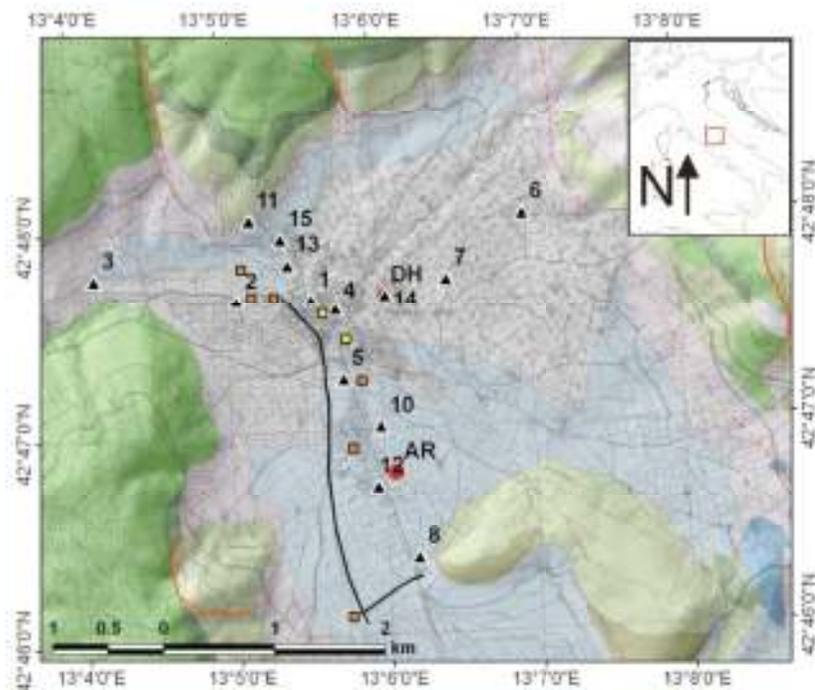


Insieme dei rapporti spettrali per diverse registrazioni ad un sito

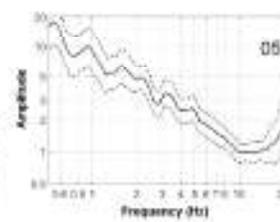


Risultato finale: media +/- 1 deviazione standard

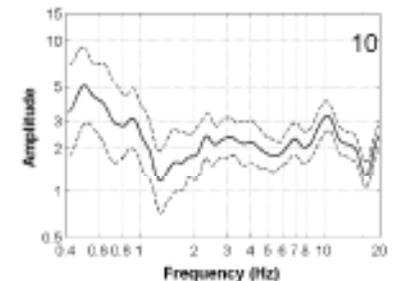
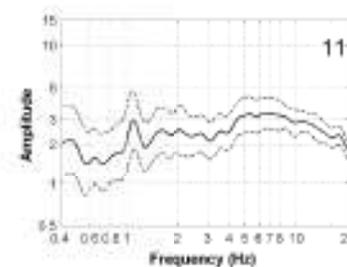
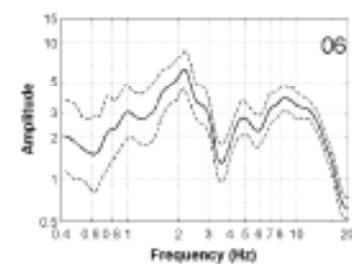
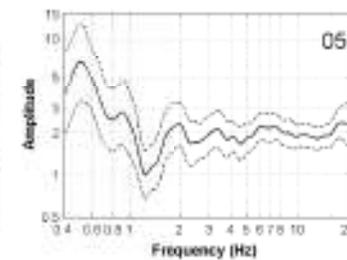
La conca di Norcia



SSR



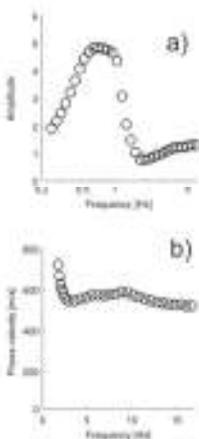
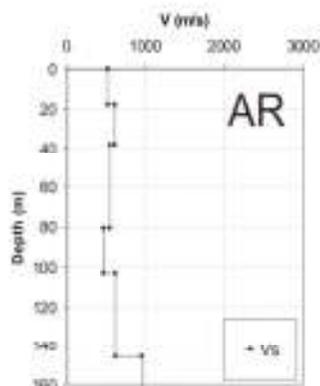
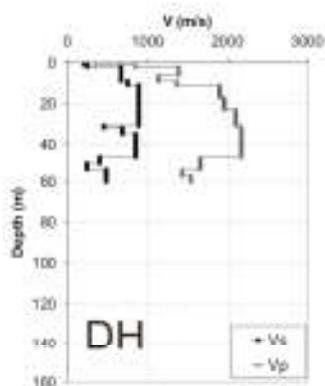
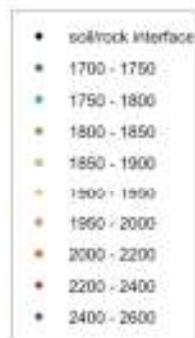
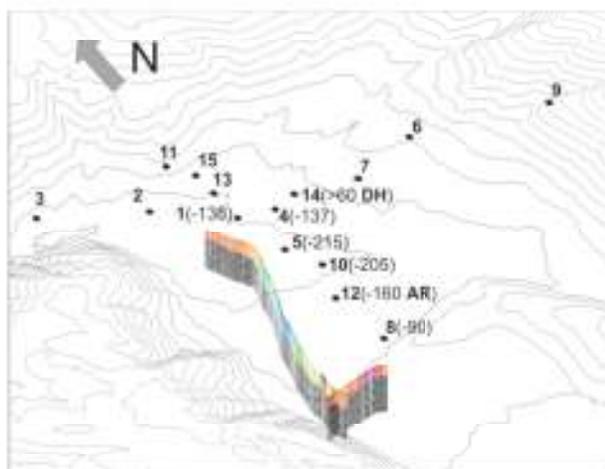
HVSR



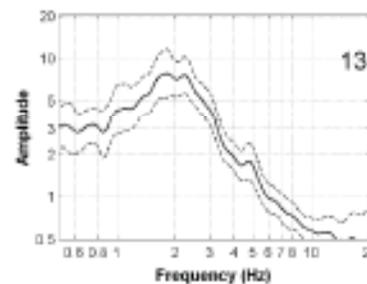
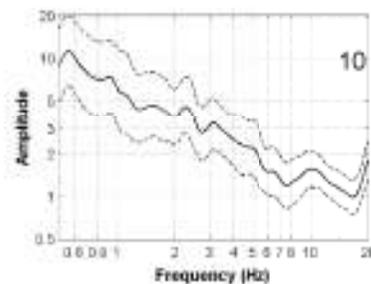
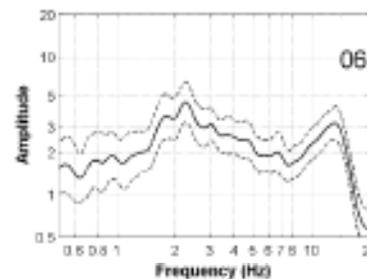
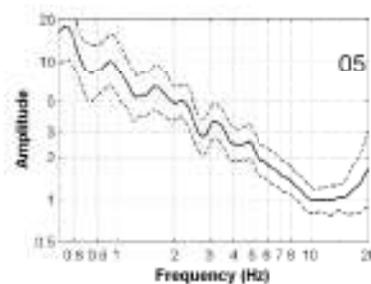
- | | |
|--|--|
| Lacustrine and swamp deposits, peat, alluvial deposits | Seismic temporary stations |
| Alluvial fan | Hypothesized normal or strike-slip fault |
| Debris deposits | Normal or strike-slip fault |
| Coarse-grained lacustrine and alluvial deposits | ENEL and DPC permanent stations |
| Scaglia rosata (marly limestone) | AR (station 12) |
| Scisti a fucoidi (calcareous marls) | DH (station 14) |
| Maiolica (limestone) | Seismic reflection |
| Scisti ad aptici (limestone) | |
| Calcarea massiccio (limestone) | |

Da Bindi et al. (2011)

La conca di Norcia



SSR

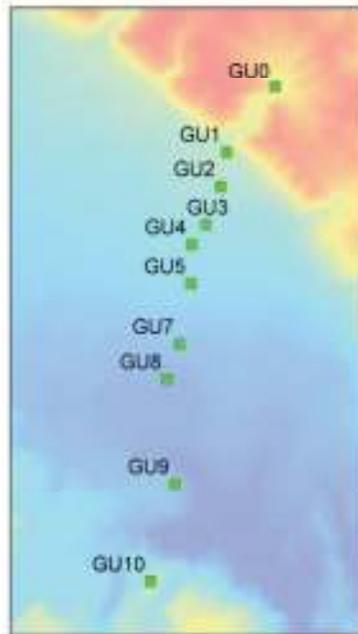


Da Bindi et al. (2011)

Il bacino di Gubbio (PG): HVSR (noise e terremoti)

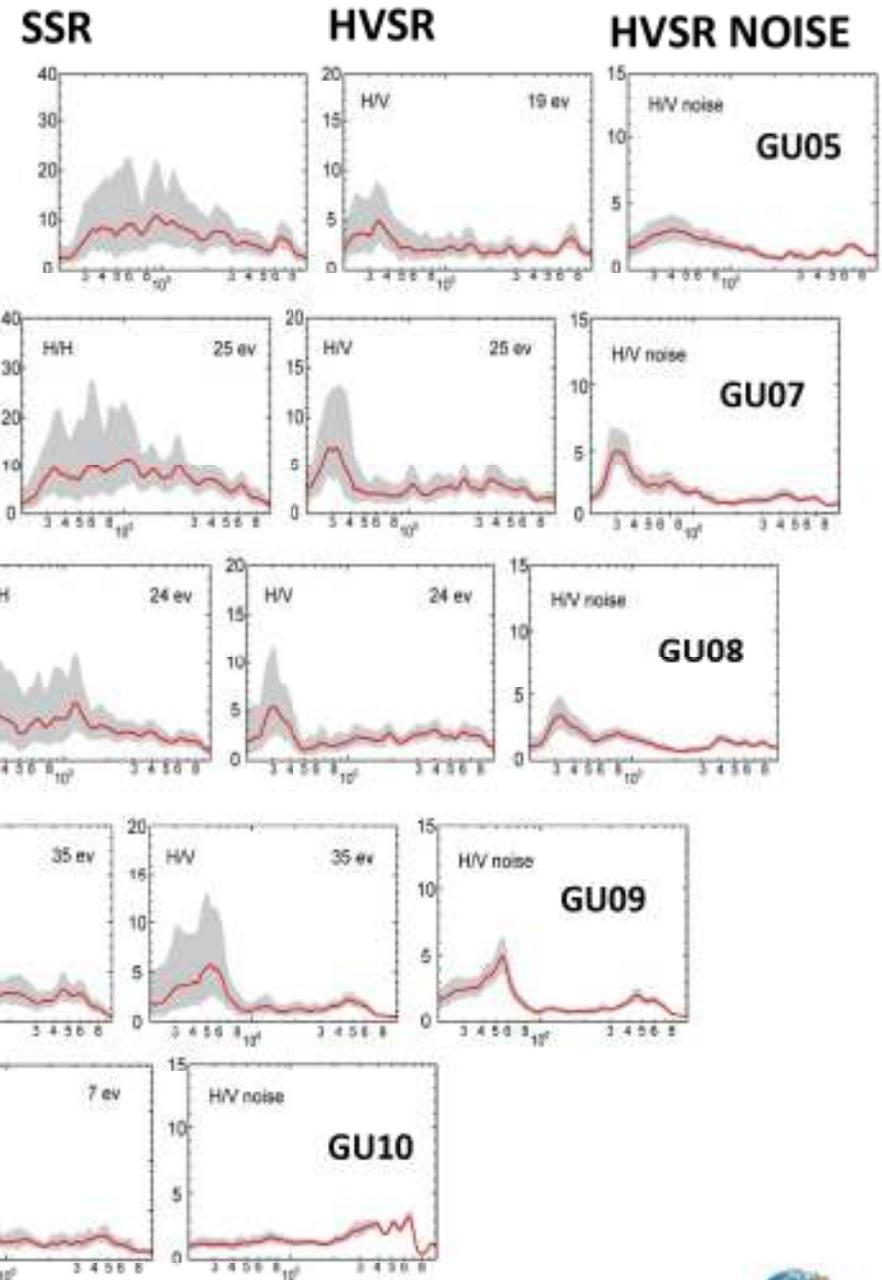
SSR

Forti amplificazioni a larga banda dai bordi verso il centro del bacino (da NE a SW): dominano gli effetti 2D e 3D

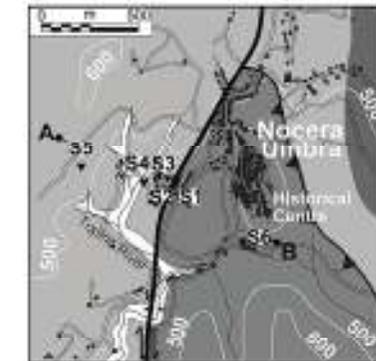
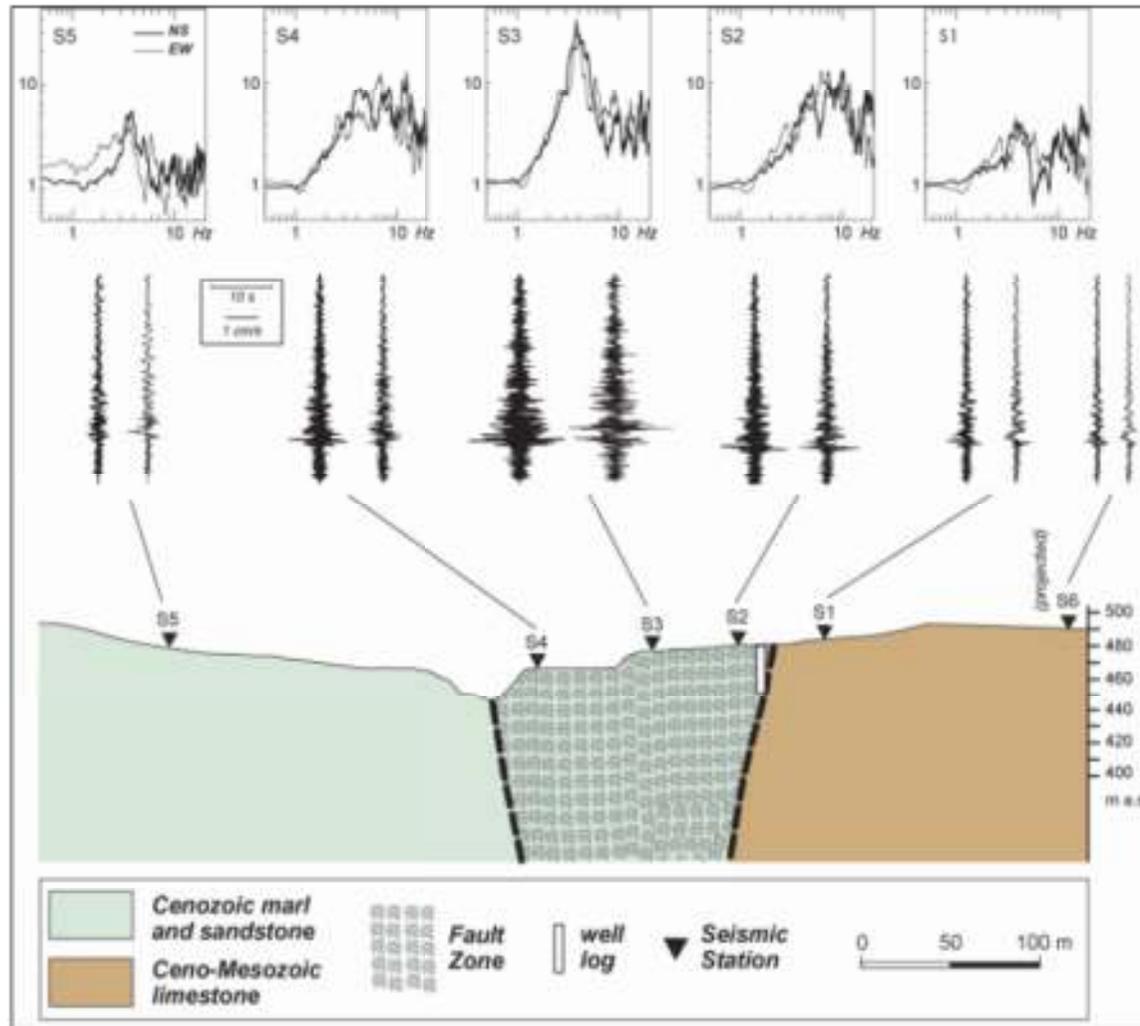


Da Bindi et al. (2009)

La scala di SSR è raddoppiata →

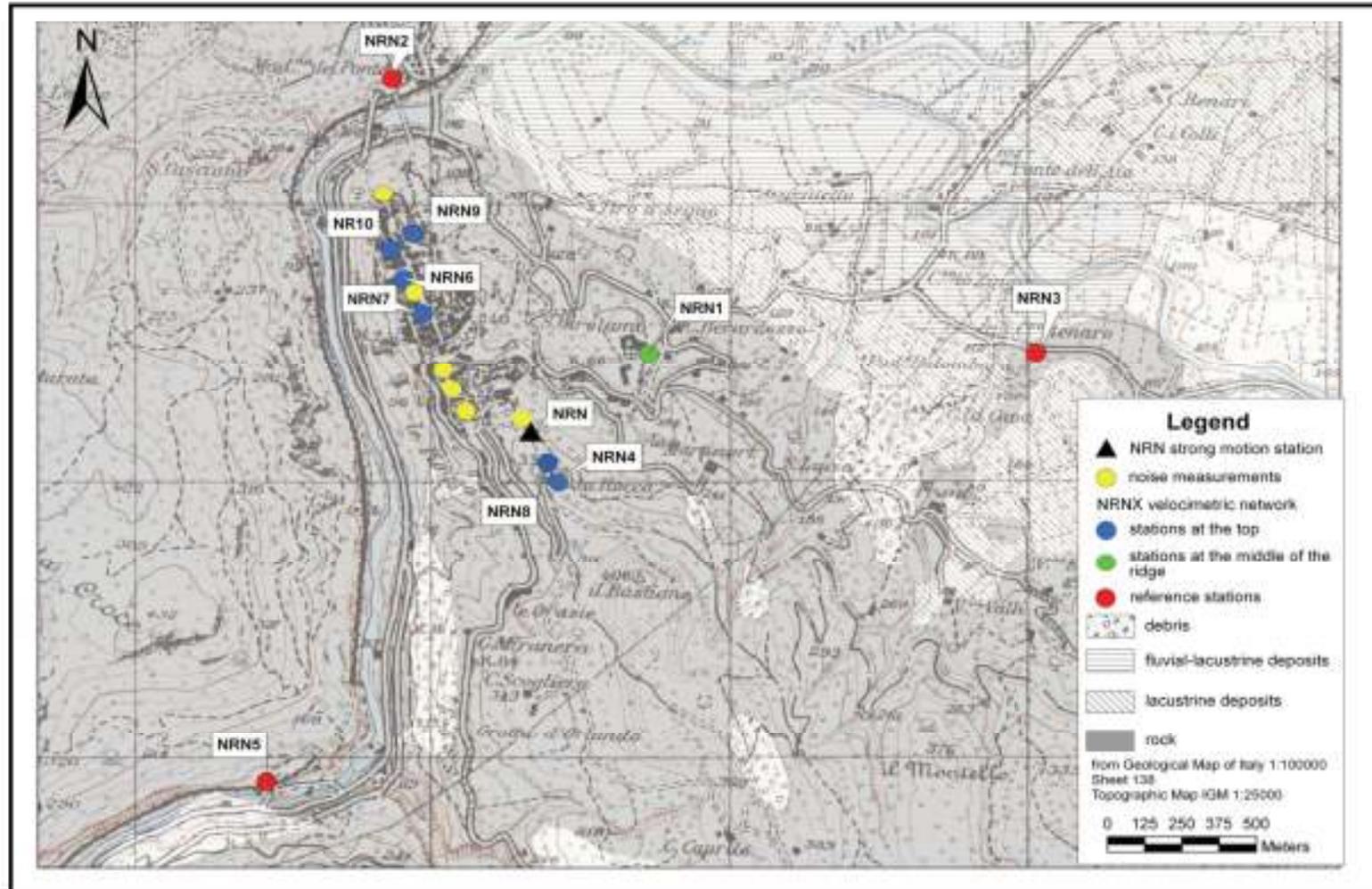


Nocera Umbra (zona di faglia)



G. Cultrera, A. Rovelli, G. Mele, R. Azzara, A. Caserta, and F. Marra (2003)

La dorsale di Narni (TR)



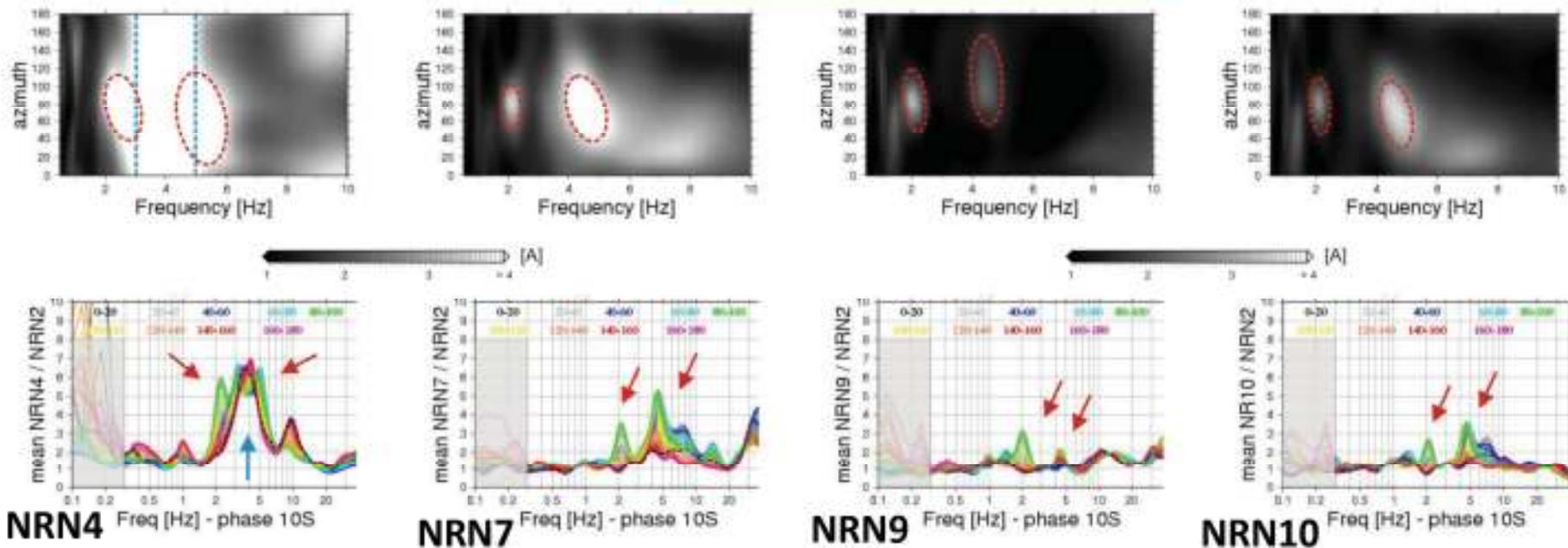
Narni (TR)

Dataset : eventi $M_l < 3.7$ - $R_{epi} < 30\text{Km}$

RISULTATI : SSR



dataset $R_{epi} < 30\text{ km}$ (azimuth between 80° and 120°)



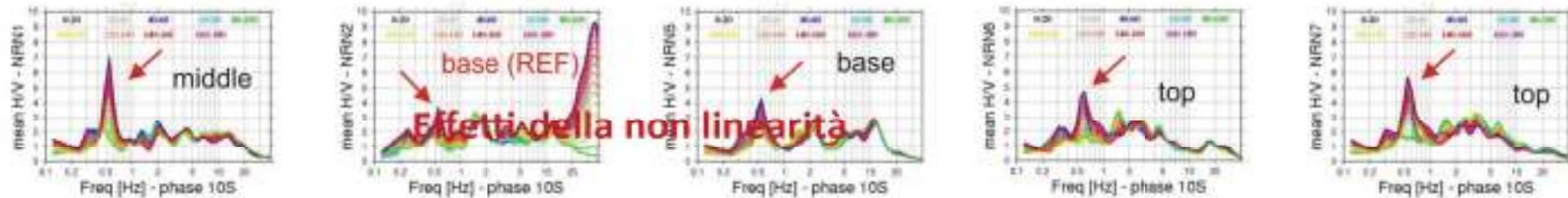
Amplificazione maggiore alla sommità e forte effetto direzionale (cortesia S. Lovati)

RISULTATI: HV e SSR

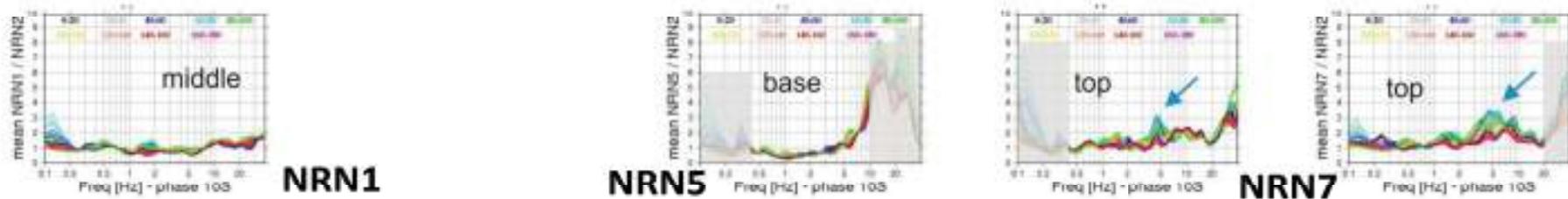


Dataset : sequenza Aquila – 7 eventi con Mw>4.5

aquila sequence (Mw>4.5) dataset : H/V results



aquila sequence (Mw>4.5) dataset : SSR results (NRN2 as a reference)



HV : picco 0.6 Hz (sorgente ?), picco 3-5 Hz (NRN6, NRN7) (sito)

SSR : picco 3-5 Hz (NRN6, NRN7) (sito) – assenza PICCO 0.6 Hz !

Livello 3 microzonazione

Tabella 1.6-3 - Livello3. Sintesi delle indagini, elaborazioni e prodotti

Indagini	<u>Campagne di acquisizione dati sismometrici</u> , sondaggi, prove in foro e in superficie per la determinazione del profilo di V_p sismica a rifrazione, prove geotecniche in sito e di laboratorio, <u>microtremori</u> .
Elaborazioni	Analisi numeriche 1D e 2D per amplificazioni, analisi dinamiche complete per la stima delle deformazioni permanenti.
Prodotti	<i>Carta delle indagini</i> <i>Carta di microzonazione sismica con approfondimenti</i> Relazione illustrativa della Carta di microzonazione sismica con approfondimenti.

Rumore ambientale

La procedura si divide in due fasi:

1. Determinazione degli spettri e dei rapporti spettrali su sotto-finestre del segnale
2. Determinazione dello spettro medio e della variabilità



Processamento del segnale

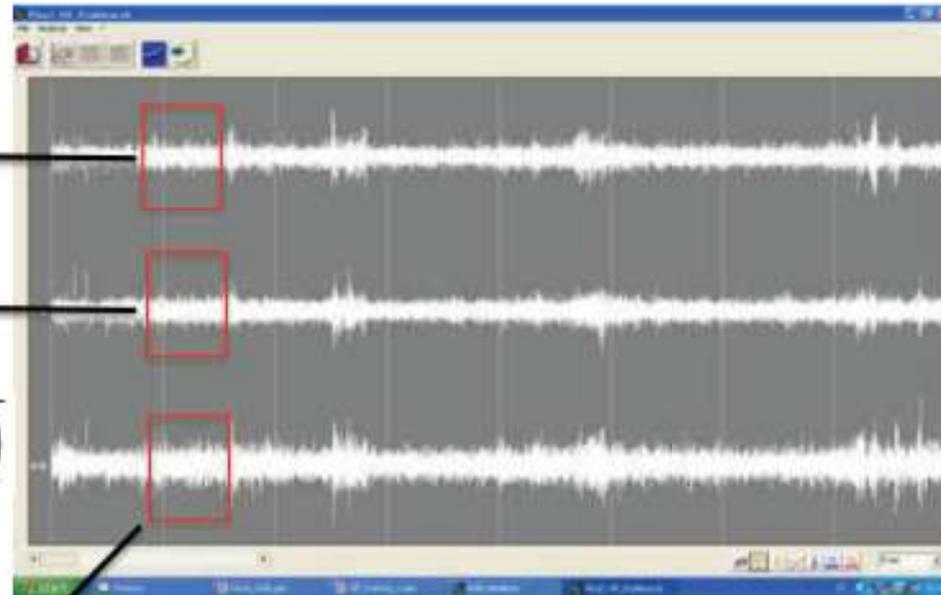
Ciascuna traccia viene suddivisa in finestre di uguale dimensione e per ciascuna finestra viene calcolato lo spettro di Fourier

Lo spettro di ampiezza viene "lisciato" per ridurre la variabilità stocastica nella stima delle ordinate spettrali

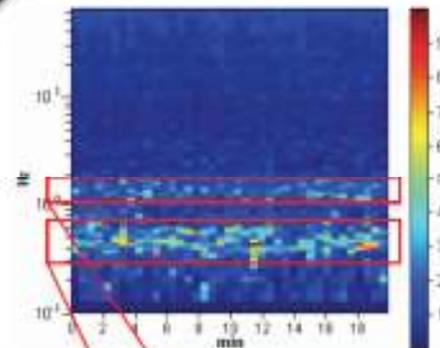
$NS(\omega)$

$EW(\omega)$

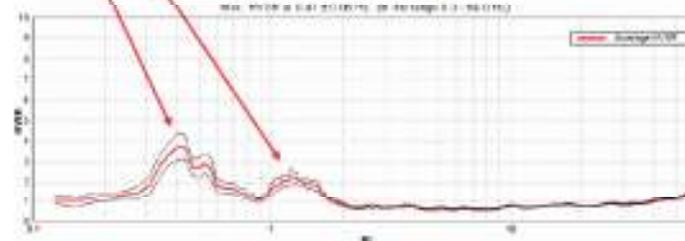
$$H(\omega) = \sqrt{NS(\omega) + EW(\omega)}$$



$$HVSr(\omega) = \sqrt{\frac{H^2(\omega)}{V^2(\omega)}}$$

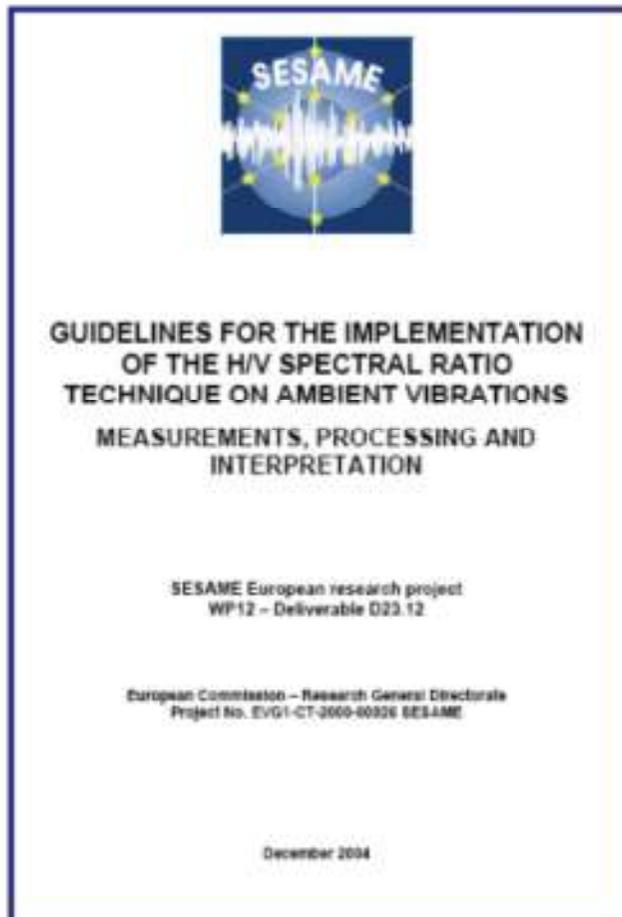


Viene valutata la persistenza delle funzioni HVSr nelle diverse finestre temporali



Vengono quindi calcolati i rapporti spettrali medi ed il relativo intervallo di confidenza

Data la versatilità di utilizzo di questo metodo, esso è stato oggetto di numerose ricerche e di almeno due progetti internazionali in ambito EU e NATO



Questi hanno avuto come obiettivi la valutazione delle caratteristiche del metodo e la messa a punto di protocolli di misura e interpretazione



<http://nato.gfz.hr/>

http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/SES_Reports.htm#Guidelines

Le misure di microtremore sono previste per il livello 2 e 3 di microzonazione

Tabella 1.6-2 - Livello2. Sintesi delle indagini, elaborazioni e prodotti

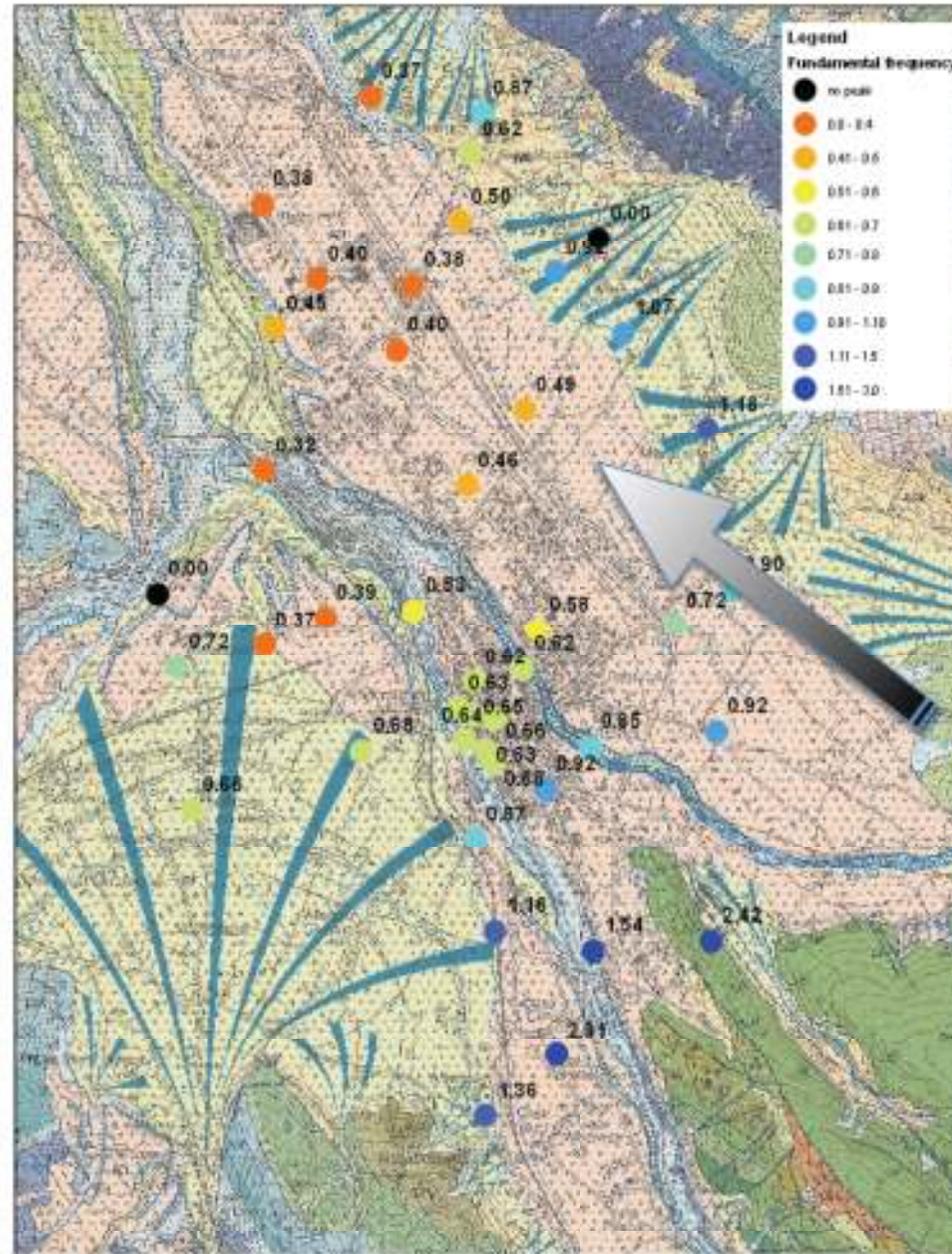
Indagini	Indagini geofisiche in foro del tipo DH o CH, cono sismico, sismica a rifrazione, analisi con tecniche attive e passive della dispersione delle onde superficiali per la stima di V_p , <u>microtremori</u> ed eventi sismici
Elaborazioni	Correlazioni e confronto con i risultati del livello 1, revisione del modello geologico, abachi per i fattori di amplificazione, abachi e formule empiriche per le instabilità di versante e per la liquefazione.
Prodotti	<i>Carta delle indagini</i> <i>Carta di microzonazione sismica</i> Relazione illustrativa della <i>Carta di microzonazione sismica</i> .

Tabella 1.6-3 - Livello3. Sintesi delle indagini, elaborazioni e prodotti

Indagini	Campagne di acquisizione dati sismometrici, sondaggi, prove in foro e in superficie per la determinazione del profilo di V_p , sismica a rifrazione, prove geotecniche in sito e di laboratorio, <u>microtremori</u> .
Elaborazioni	Analisi numeriche 1D e 2D per amplificazioni, analisi dinamiche completa per la stima delle deformazioni permanenti.
Prodotti	<i>Carta delle indagini</i> <i>Carta di microzonazione sismica con approfondimenti</i> Relazione illustrativa della <i>Carta di microzonazione sismica con approfondimenti</i> .

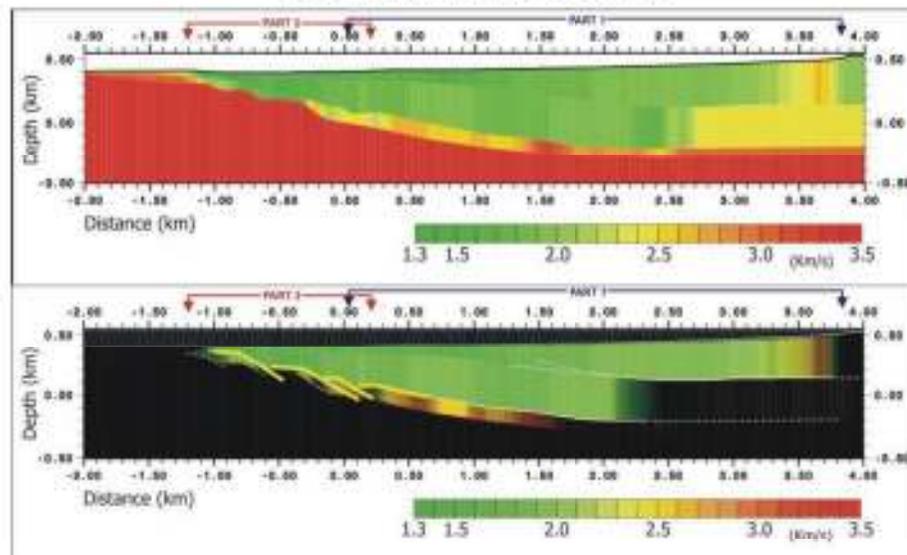
CAMPAGNA DI MICROTREMORE BACINO DI SULMONA

Frequenze fondamentali per
alcuni punti del bacino di
Sulmona (AQ).
Le frequenze indicano un
progressivo
approfondimento dei
sedimenti da SE verso NW,
nel verso della freccia



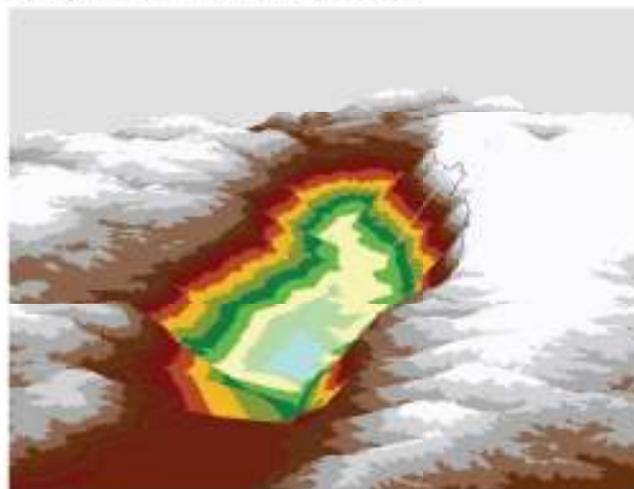
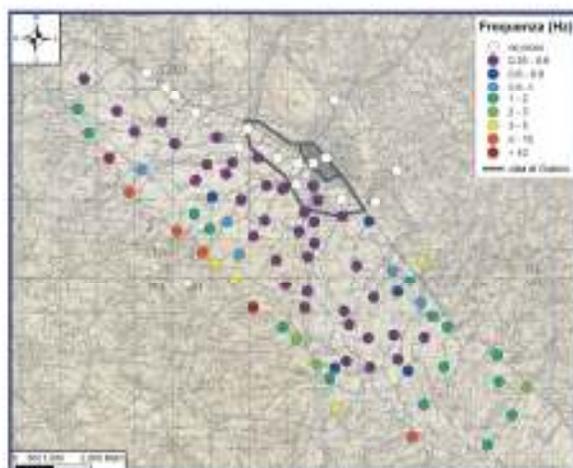
Gubbio (PG)

Sismica a riflessione



F_0 da HVSR del rumore

Ricostruzione interfaccia sedimenti /substrato



Alcune raccomandazioni

- Le curve HVSR ottenute da misure di rumore non sono la panacea: forniscono informazioni sulla frequenza fondamentale del sito, ma non riescono a cogliere la complessità dell'amplificazione.
- Le ampiezze delle curve di HVSR danno solo un'indicazione sull'entità dell'amplificazione

Modelli numerici / geotecnici

Modelli numerici

- Geometria del problema (1-D, 2-D, 3-D)
- Modello costitutivo del terreno (lineare elastico, elastoplastico con o senza hardening, non lineare)
- Interazione tra le fasi (acqua, terreno, aria)
- Tipo di input sismico (storia temporale, spettro di Fourier o spettro di risposta)

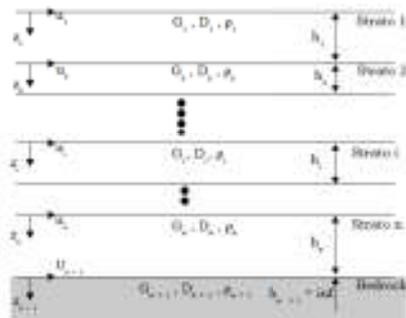
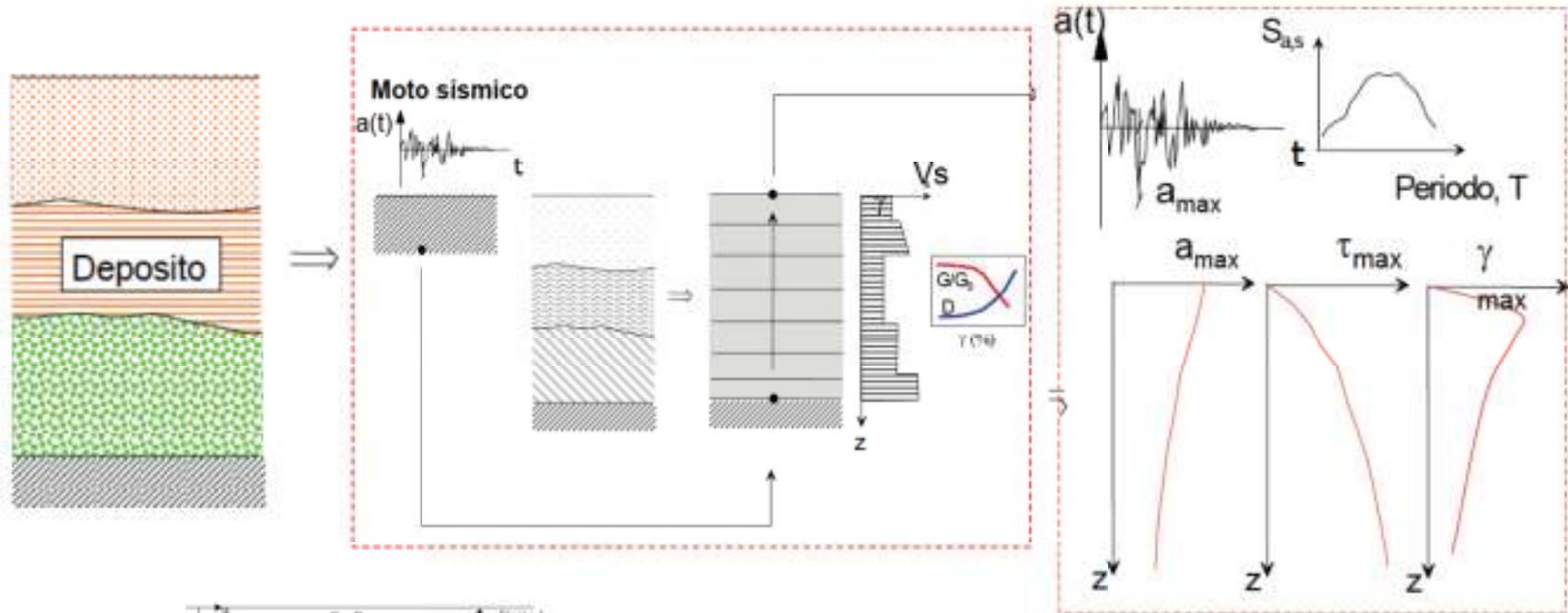
Calcolo di f_0

	descrizione	formulazione	commento
1	media pesata delle Vs	$V = \left(\sum_{i=1}^{i=n} V_i H_i \right) / H$ $T_0 = 4H / \bar{V}$	Leggera sovrastima (10-15%)
2	media pesata del modulo di taglio e della densità	$\bar{G} = \left(\sum_{i=1}^{i=n} G_i H_i \right) / H$ $\bar{\rho} = \left(\sum_{i=1}^{i=n} \rho_i H_i \right) / H$ $T_0 = 4H / \sqrt{\frac{\bar{G}}{\bar{\rho}}}$	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	$\omega_4^2 = \left(3 \sum_{i=1}^{i=n} V_i^2 H_i \right) / H_3$ $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_4}$	Leggerissima sovrastima (5%)

Metodi 1D: risposta monodimensionale di una colonna di suolo

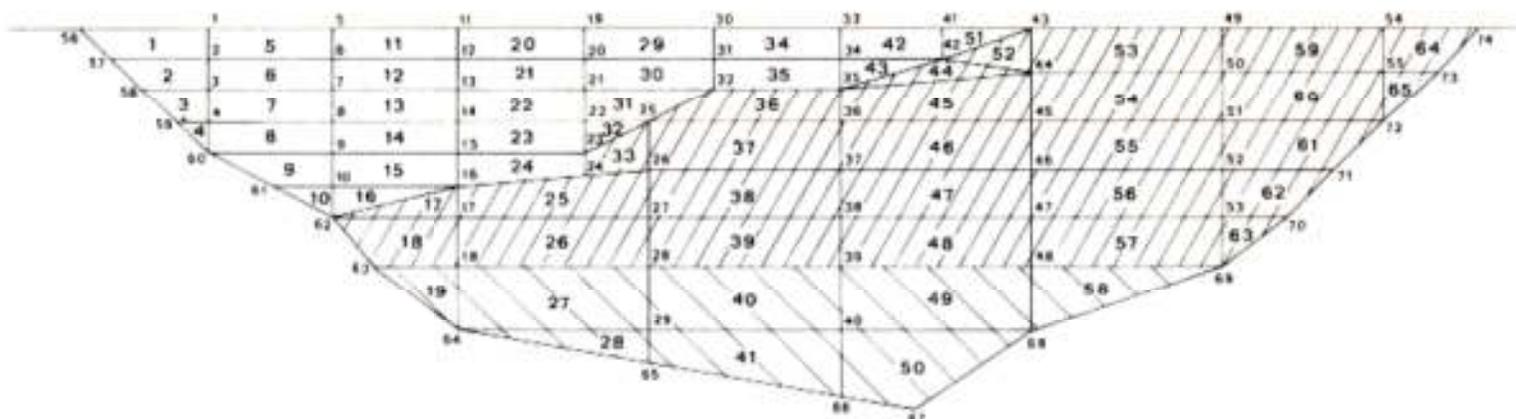
- Propagazione delle onde SH lungo una colonna di suolo infinitamente estesa in orizzontale
- Necessario conoscere: densità, V_s , smorzamento e spessore di ogni strato
- Comportamento del suolo: lineare, lineare-equivalente, non lineare
- Calcolo della funzione di trasferimento o della storia temporale dell'accelerazione in superficie

Modelli 1D



lo spessore h_i ,
 la densità ρ_i ,
 il modulo di taglio G_i (o la velocità delle onde S, V_{Si})
 il rapporto di smorzamento D_i .

Modelli 2D (elementi finiti)



LEGENDA



peso specifico (t/m^3)

1,8

coefficiente di Poisson

0,4

G_0 (kg/cm^2)

2880



2,0

0,35

7200

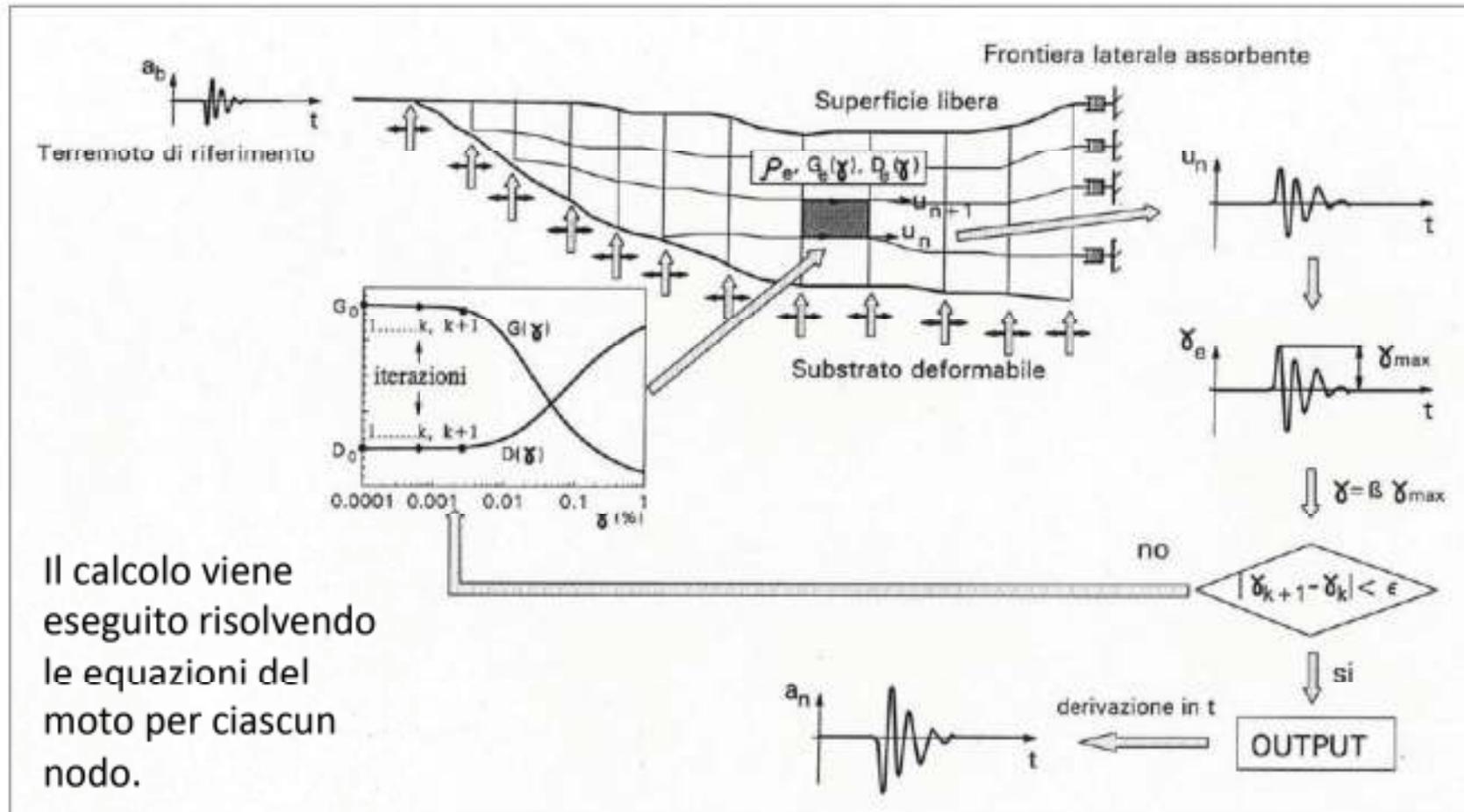


2,3

0,3

14720

Modelli 2D (Quad-4)



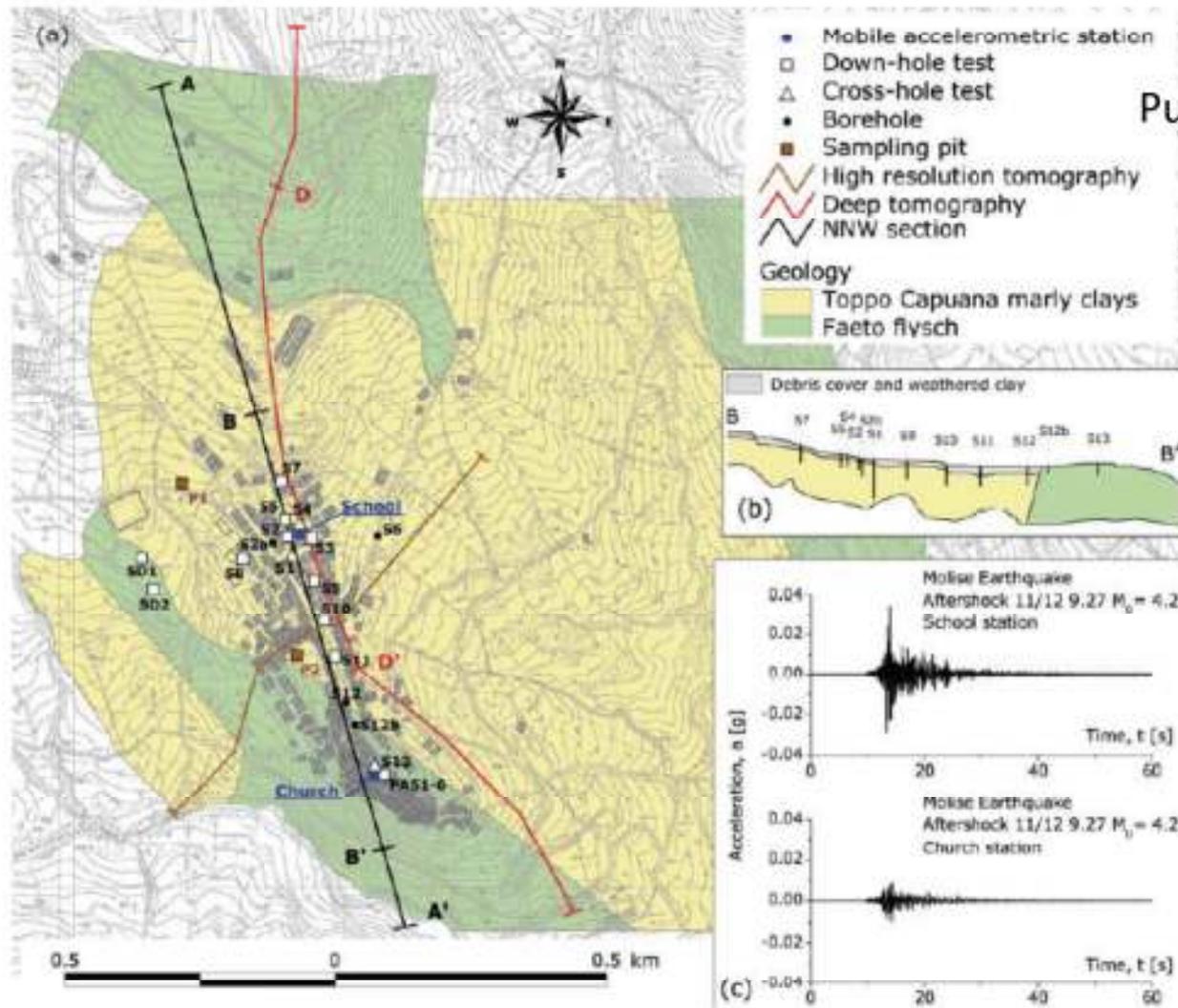
Principali codici di calcolo

Geometria /Dimensioni	Codice di calcolo	Tipo di analisi	
1-D	SHAKE (Schnabel <i>et al.</i> , 1972)	TT	LE
	SHAKE91 (Idriss & Sun, 1992)*		
	PROSHAKE (EduPro Civil System, 1999)		
	SHAKE2000 (www.shake2000.com)		
	EERA (Bardet <i>et al.</i> , 2000)*	TE	NL
	DESRA_2 (Lee & Finn, 1978)		
	DESRAMOD (Vucetic, 1986)		
	D-MOD_2 (Matasovic, 1995)		
	SUMDES (Li <i>et al.</i> , 1992)		
	NERA (Bardet & Tobita, 2001)*		
DEEPSOIL (Hashash e Park, 2001)	TT	NL	
CYBERQUAKE (www.brgm.fr)	TE		
2-D / 3-D	QUAD4 (Idriss <i>et al.</i> , 1973)	TT	LE
	QUAD4M (Hudson <i>et al.</i> , 1994)		
	FLUSH (Lysmer <i>et al.</i> , 1975)		
	QUAKE/W Vers. 5.0 (GeoSlope, 2002)	TE	NL
	DYNAFLOW (Prevost, 2002)		
	GEFDYN (Aubry e Modaressi, 1996)		
	TARA-3 (Finn <i>et al.</i> , 1986)		
	FLAC vers. 4.0 (Itasca, 2000)		
PLAXIS vers. 8.0 (www.plaxis.nl)			

* free

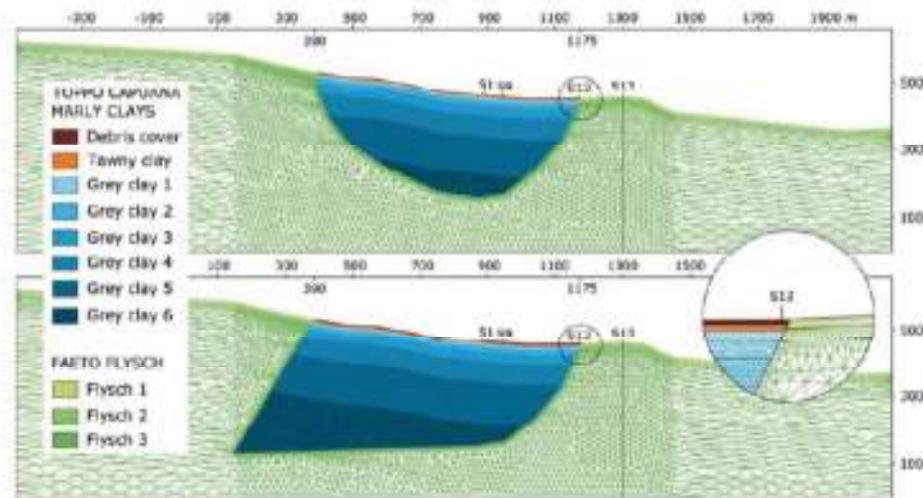
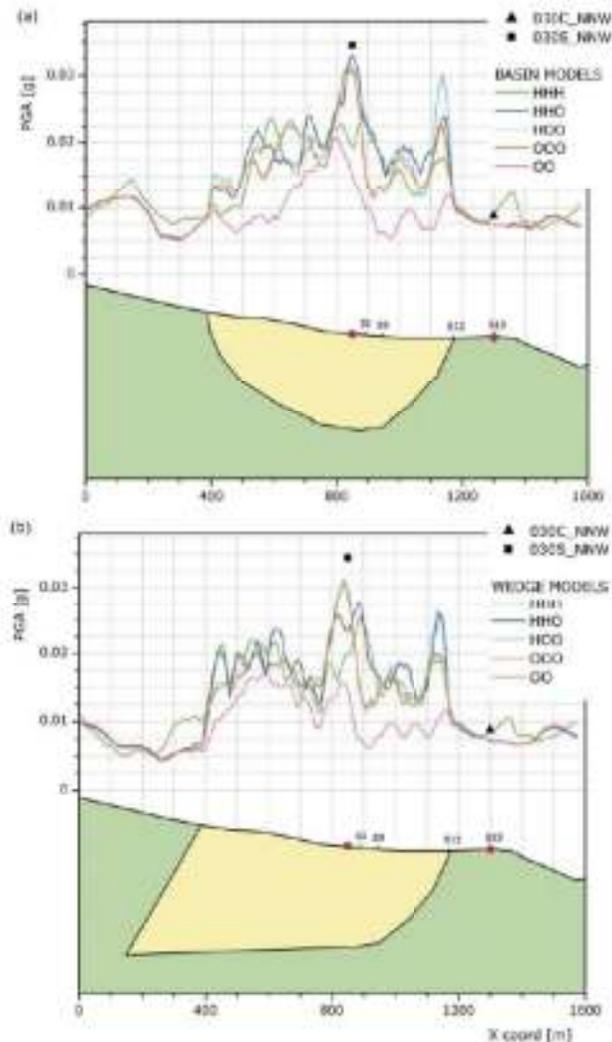
TT = tensioni totali; TE = tensioni efficaci; LE = lineare equivalente; NL non lineare

Un esempio: San Giuliano di Puglia



Puglia et al (2009)

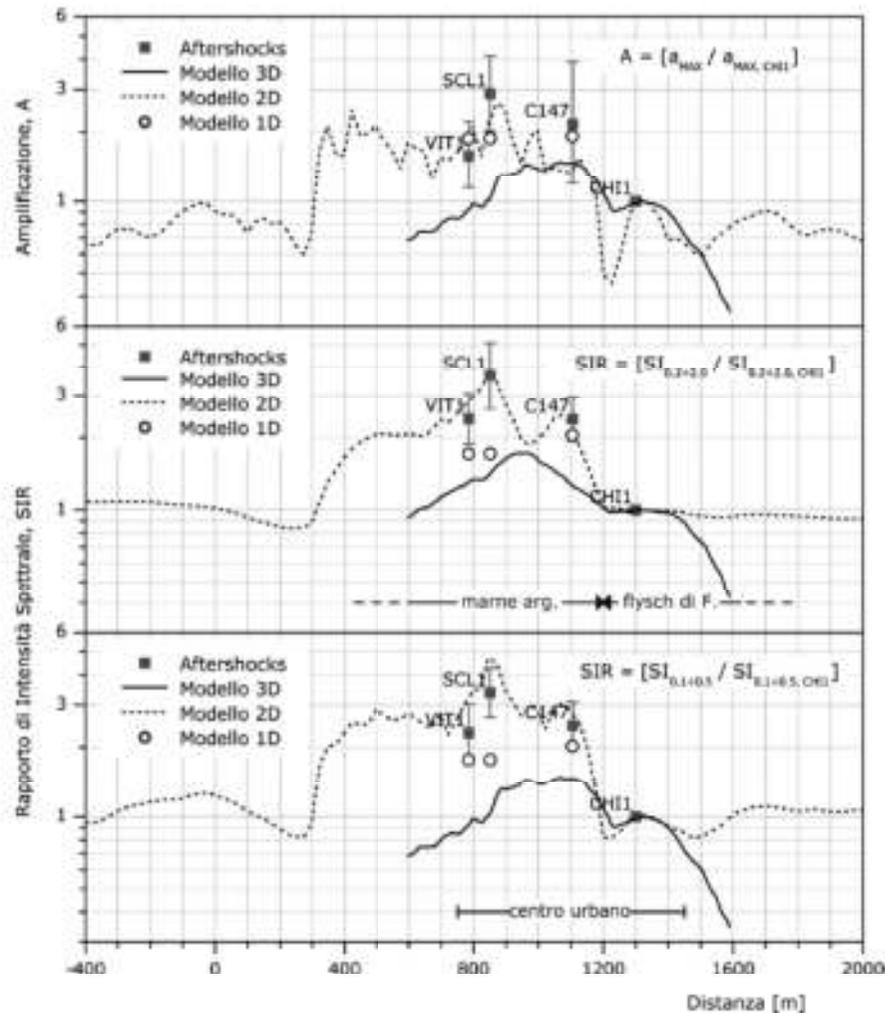
San Giuliano di Puglia (2D Model)



Acronym	OO	OOO	HOO	HHO	HHH
Debris cover	homogeneous	O	heterogeneous	H	H
Tawny clay	O		H		
Grey clay		O	O	H	H
Faeto flysch	O	O	O	O	H
	S12	S12	S12	S12	S12
Seismic input	recorded (C_NNW)				de-convoluted (C_NNW_D)

Puglia et al (2009)

S. Giuliano di Puglia



Fattori di amplificazione registrati e calcolati tramite i modelli 1D, 2D e 3D, in termini di:

- (a) accelerazioni di picco in superficie
- (b) intensità di Housner a 0.2-2.0 s
- (c) intensità di Housner 0.1-0.5 s

Puglia et al (2009)

I modelli numerici sono previsti per il livello 3 di microzonazione

Tabella 1.6-3 - Livello3. Sintesi delle indagini, elaborazioni e prodotti

Indagini	Campagne di acquisizione dati sismometrici, sondaggi, prove in foro e in superficie per la determinazione del profilo di V_p , sismica a rifrazione, prove geotecniche in sito e di laboratorio, microtemori.
Elaborazioni	<u>Analisi numeriche 1D e 2D per amplificazioni</u> , analisi dinamiche complete per la stima delle deformazioni permanenti.
Prodotti	<i>Carta delle indagini</i> <i>Carta di microzonazione sismica con approfondimenti</i> Relazione illustrativa della Carta di microzonazione sismica con approfondimenti.

NTC08

- Per definire l'azione sismica di progetto, alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, le NTC prescrivono la valutazione dell'effetto della risposta sismica locale, che consente di valutare le modifiche che un segnale sismico subisce rispetto a quello di un sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (sottosuolo di categoria A).
- Se **non sono ritenute necessarie analisi specifiche**, la definizione dell'azione sismica può fare riferimento a un **approccio semplificato**, che si basa sull'individuazione di 5 categorie di sottosuolo.

NTC08

Nel caso siano giudicate **necessarie analisi specifiche** per la singola opera o per il singolo sistema geotecnico, la verifica degli stati limite, ultimi e di esercizio può essere condotta attraverso analisi dinamiche che prevedono l'impiego di **accelerogrammi reali o simulati**, poiché, come si evince dal paragrafo 3.2.3.6, l'impiego di accelerogrammi artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici.

Categorie di sottosuolo

Tabella 3.2.II – *Categorie di sottosuolo*

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Tabella 3.2.III – *Categorie aggiuntive di sottosuolo.*

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad [\text{m/s}].$$

Definizione della forma spettrale

$0 \leq T < T_B$	$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$	<p>Per ogni probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} :</p> <p>a_g accelerazione orizzontale massima al sito; F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale. T^*_C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.</p>
$T_B \leq T < T_C$	$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$	
$T_C \leq T < T_D$	$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$	
$T_D \leq T$	$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$	

F_0 è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2,2;

T_C è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, dato da

$$T_C = C_C \cdot T_C^*, \quad (3.2.7)$$

dove T_C^* è definito al § 3.2 e C_C è un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo (vedi Tab. 3.2.V);

T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante,

$$T_B = T_C / 3, \quad (3.2.8)$$

T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione:

$$T_D = 4,0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1,6. \quad (3.2.9)$$

η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, mediante la relazione

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \geq 0,55, \quad (3.2.6)$$

Coefficiente S

S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione seguente

$$S = S_S \cdot S_T, \quad (3.2.5)$$

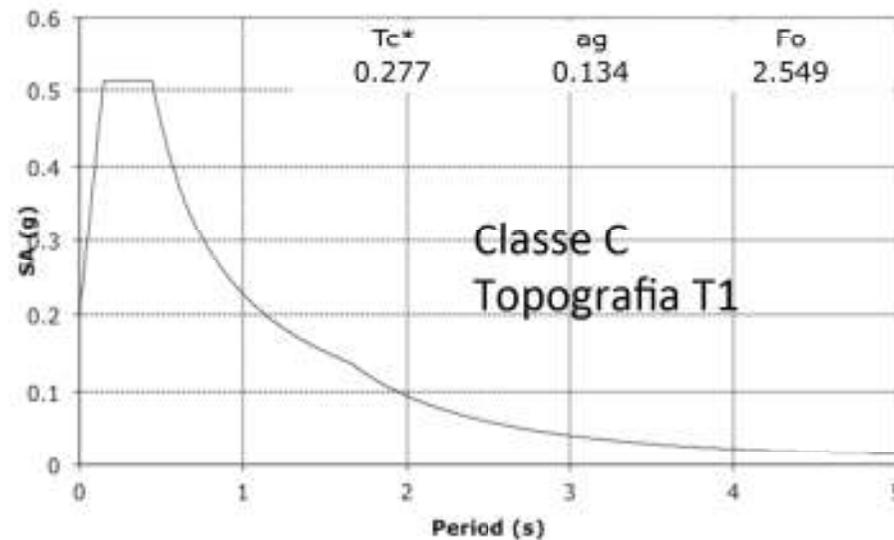


Tabella 3.2.V – Espressioni di S_S e di C_C

Categoria sottosuolo	S_S
A	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$

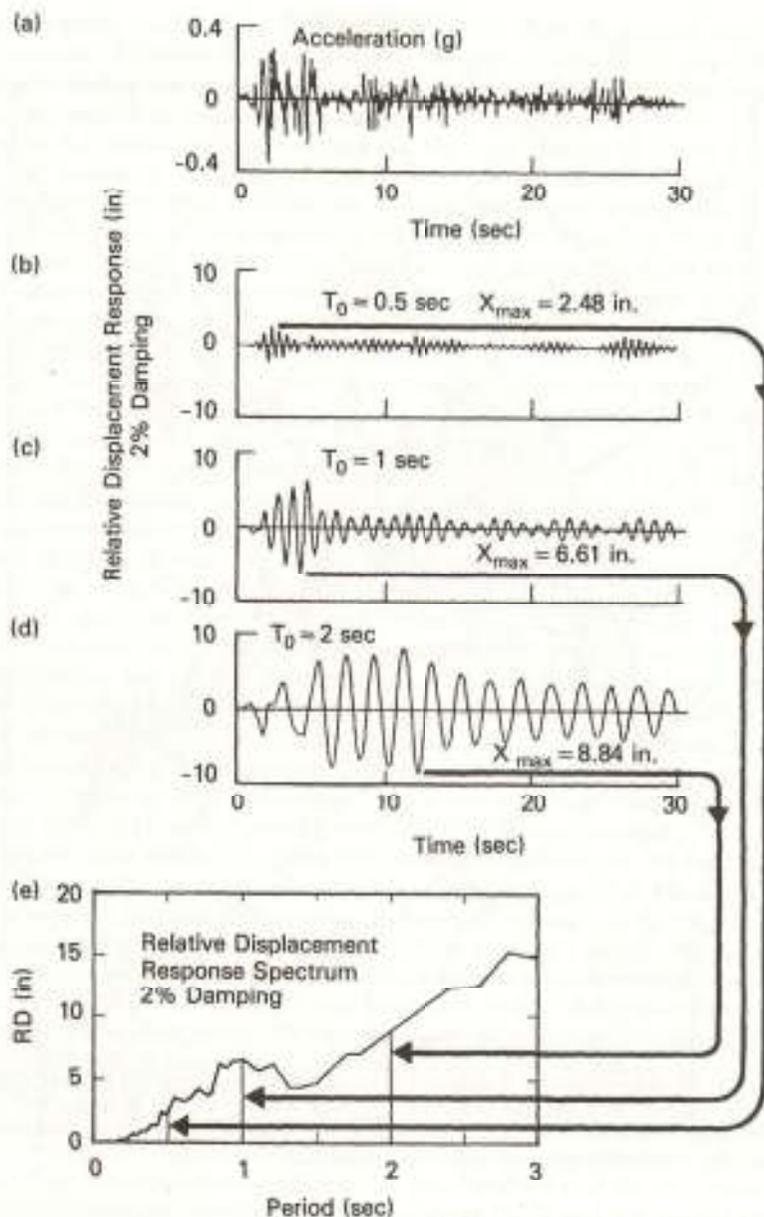
Tabella 3.2.VI – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

Categorie topografiche

Tabella 3.2.IV – *Categorie topografiche*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$



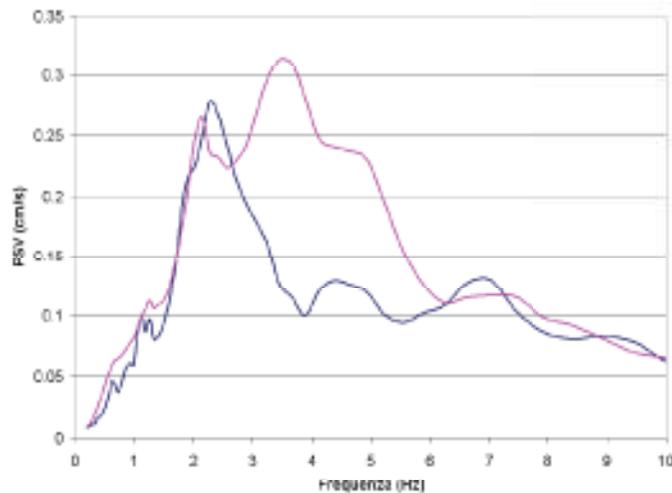
Costruzione dello spettro di risposta:

- accelerogramma
- Risposta dell'oscillatore con $T_0 = 0.5 \text{ s}$
- Risposta dell'oscillatore con $T_0 = 1 \text{ s}$
- Risposta dell'oscillatore con $T_0 = 2 \text{ s}$

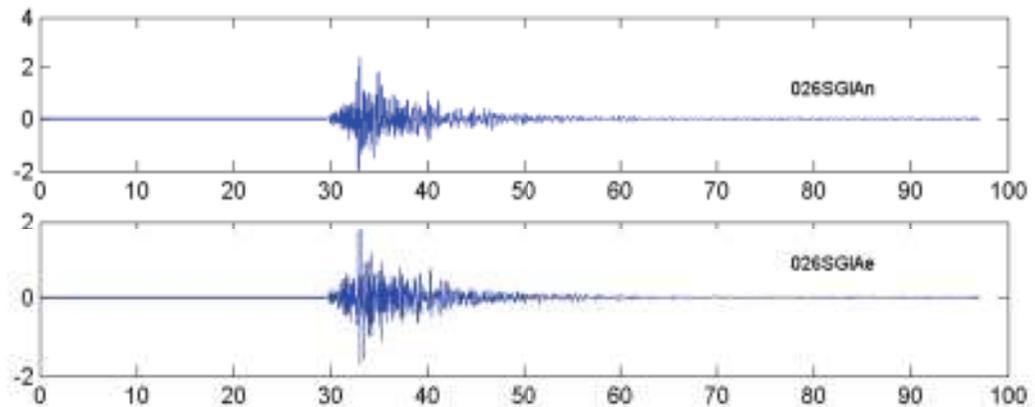
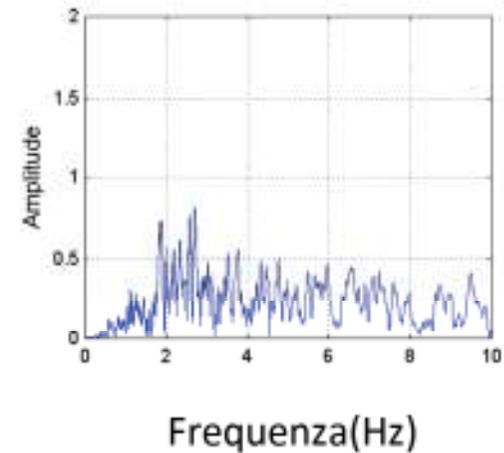
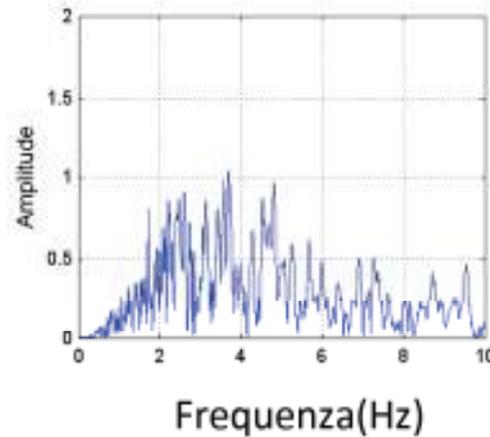
Gli spettri di risposta sono usati nella progettazione, ma **non sono una trasformazione lineare** del moto del suolo.

Da Chopra (1981)

Spettro risposta/spettro Fourier



Registrazione a *S. Giuliano di Puglia centro storico* (026SGIA)



ICMS (livello 2)

Utilizzo di abachi ottenuti da simulazioni numeriche: stima della risposta sismica locale in termini di fattori di amplificazione. La procedura è valida per un modello 1D

Input:

- la macrozona di pericolosità sismica;
- la litologia prevalente;
- lo spessore dei terreni di copertura H ;
- la V_sH media dei terreni di copertura.

Gli abachi forniscono 2 fattori di amplificazione FA e FV (come descritto nel paragrafo 2.5.3) e con questi fattori di amplificazione sarà possibile ricostruire lo spettro elastico in superficie, partendo da:

- spettro di input a probabilità uniforme forniti dalla Regione;
- spettro di norma;
- spettro rappresentativo di un set di accelerogrammi.

Esempio di abaco

Fattore di amplificazione

FA

Tipo di terreno

Argilla

a_g (g)

0.06

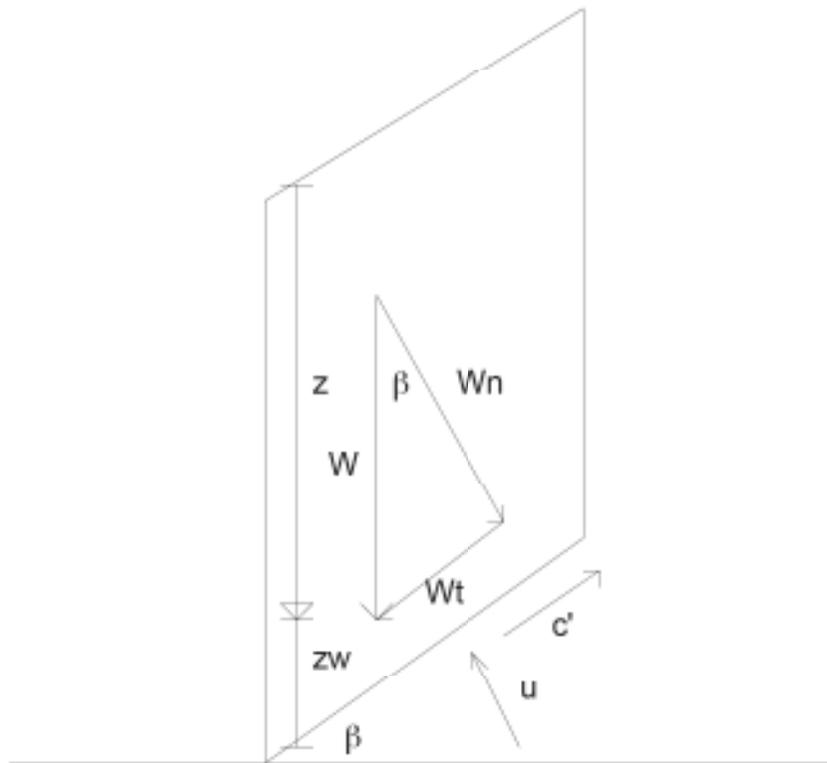
Profilo di velocità

Costante

	V_s (m/s)										
	150	200	250	300	350	400	450	500	600	700	
H											
5	2.37	1.84	1.56	1.47	1.34	1.22	1.12	1.07	1.02	1.00	
10	2.39	2.25	1.99	1.75	1.54	1.38	1.27	1.17	1.08	1.03	
15	1.76	2.05	1.99	1.85	1.69	1.53	1.40	1.29	1.13	1.05	
20	1.53	1.61	1.80	1.76	1.68	1.57	1.46	1.36	1.19	1.07	
25	1.49	1.47	1.49	1.61	1.58	1.52	1.45	1.36	1.21	1.08	
30	1.45	1.44	1.40	1.39	1.47	1.44	1.39	1.33	1.21	1.08	
35	1.39	1.42	1.40	1.34	1.33	1.36	1.33	1.29	1.18	1.08	
40	1.30	1.39	1.36	1.33	1.27	1.25	1.27	1.24	1.16	1.07	
50	1.24	1.32	1.32	1.30	1.27	1.22	1.17	1.14	1.10	1.04	
60	1.16	1.24	1.26	1.27	1.24	1.22	1.18	1.13	1.06	1.01	
70	1.14	1.23	1.23	1.23	1.21	1.19	1.17	1.13	1.06	0.99	
80	1.00	1.15	1.19	1.18	1.19	1.16	1.14	1.13	1.06	1.00	
90	1.02	1.15	1.17	1.18	1.15	1.14	1.12	1.10	1.06	1.00	
100	0.95	1.12	1.12	1.17	1.15	1.11	1.09	1.08	1.05	1.00	
110	0.89	1.03	1.11	1.13	1.13	1.14	1.09	1.05	1.03	0.99	
120	0.85	1.02	1.11	1.09	1.12	1.12	1.09	1.05	1.01	0.98	
130	0.80	0.98	1.06	1.09	1.08	1.09	1.09	1.05	1.00	0.96	
140	0.78	0.93	0.99	1.08	1.06	1.08	1.06	1.06	1.00	0.95	
150	0.73	0.91	1.00	1.06	1.07	1.04	1.05	1.03	1.00	0.95	

Frane

Forze agenti lungo un versante



- W** = peso di volume
- z** = profondità della superficie di scorrimento
- z_w** = altezza tavola d'acqua
- β** = angolo del versante
- u** = pressione dell'acqua
- c** = coesione
- Kc** = coefficiente di accelerazione orizzontale critica

Fattore di sicurezza

$$F_s = \frac{c' / \cos^2 \beta + (\gamma - m \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \tan \beta}$$

ϕ = angolo di attrito interno ($^\circ$);

c' = coesione effettiva (kPa);

γ = peso di volume (kN/m^3);

m = quota falda/spessore del terreno ratio z_w/z (senza dimensione);

γ_w = peso di volume dell'acqua (N/m^3);

z = profondità della superficie di scorrimento (m) ;

β = angolo del pendio ($^\circ$)

Accelerazione orizzontale critica

$$K_c = \frac{c' / \cos^2 \beta + (\gamma - m \cdot \gamma_w) \cdot z \cdot \tan \phi' - \gamma \cdot z \cdot \tan \beta}{\gamma \cdot z + \gamma \cdot z \cdot \tan \beta \cdot \tan \phi'}$$

ϕ = angolo di attrito interno ($^\circ$);

c' = coesione effettiva (kPa);

γ = peso di volume (kN/m³);

m = quota falda/spessore del terreno ratio z_w/z (senza dimensione);

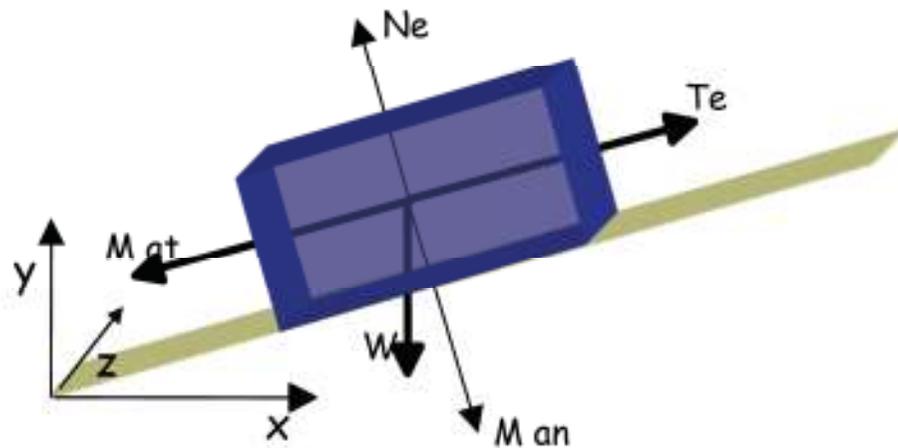
γ_w = peso di volume dell'acqua (N/m³);

z = profondità della superficie di scorrimento (m) ;

β = angolo del pendio ($^\circ$)

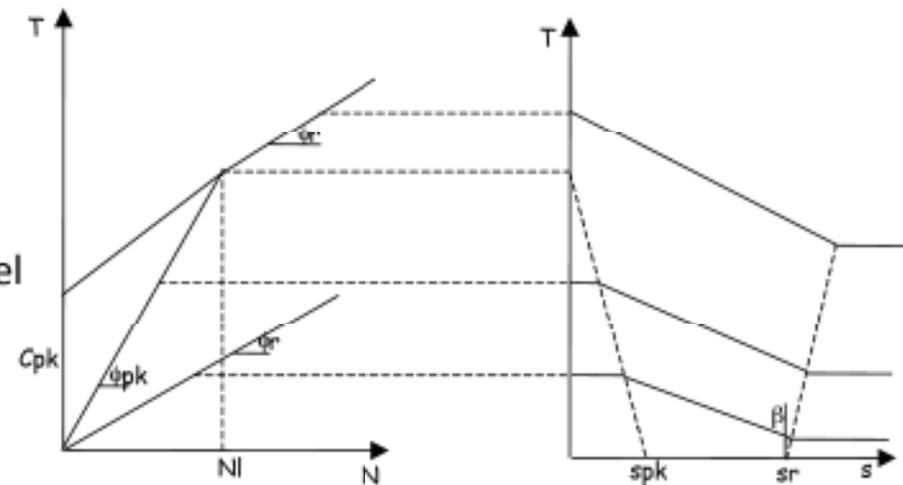
K_c viene calcolato per $F_s = 1$

Metodo di Newmark (o degli spostamenti)



la procedura consiste nell'utilizzare un accelerogramma di progetto che viene integrato nel dominio del tempo per le accelerazioni che eccedono l'accelerazione di soglia al fine di determinare lo spostamento cumulato

Legame base-blocco



Generalizzazione del metodo di Newmark

R.W. Jibson, E. L. Harp, J. A. Michael (1998)

$$\log(D_n) = 1.521 \cdot \log I_a - 1.993 \log K_c - 1.546$$

$$\sigma = 0.375$$

$$R^2 = 0.83$$

I_a = Arias intensity (m/s)

Basato su accelerogrammi USA e Iran

Generalizzazione del metodo di Newmark - Romeo (2000)

$$\log_{10} D = -1.281 + 0.648M - 0.934 \log_{10} \sqrt{RE^2 + 3.5^2} - 3.699K + 0.225S \pm 0.418 \quad [2.6-4]$$

dove:

M = magnitudo epicentrale del terremoto

RE = distanza epicentrale (km)

$K = k_c g/a_{max}$

S = coefficiente di amplificazione dovuto alla litologia affiorante; è compreso tra 0 (roccia o terreno rigido) e 1 (terreno soffice con $V_s < 400\text{m/s}$ e spessore $< 20\text{m}$)

Da ICMS

NTC08

L'analisi delle condizioni di stabilità dei pendii in condizioni sismiche può essere eseguita mediante metodi pseudostatici, metodi degli spostamenti e metodi di analisi dinamica
(§ **7.11.3.5.2**)

ICMS

§2.6 ICMS recita:

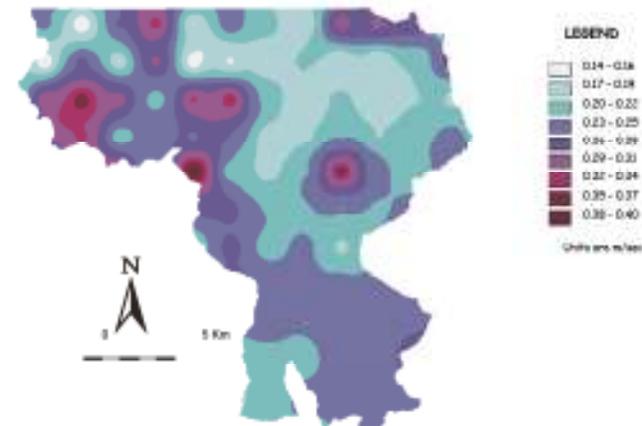
Gli spostamenti massimi attesi ottenuti con metodi semplificati (abachi, tabelle e grafici, **livello 2**) devono considerarsi esclusivamente come indicatori del livello di danno che la zona considerata può subire in occorrenza di un evento sismico di determinata entità e non come reali spostamenti.

APPLICAZIONE: OLTREPO' PAVESE (PV)

**Input sismico probabilistico
periodo di ritorno = 475 anni**



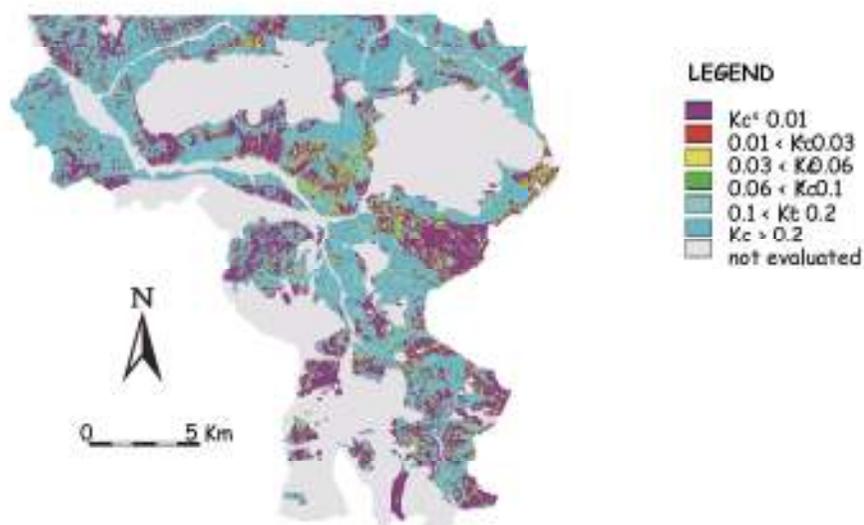
Peak Ground acceleration



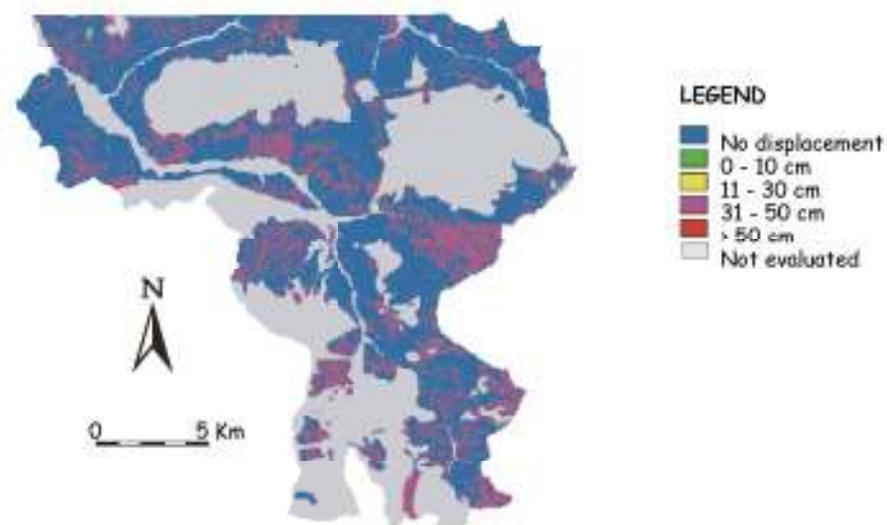
Arias Intensity

Da Luzi et al. (1999)

Calcolo di K_c e Spostamento atteso



Coefficiente di accelerazione
orizzontale critica



Spostamento

Umbria – Marche 1997

Scorrimenti di terra

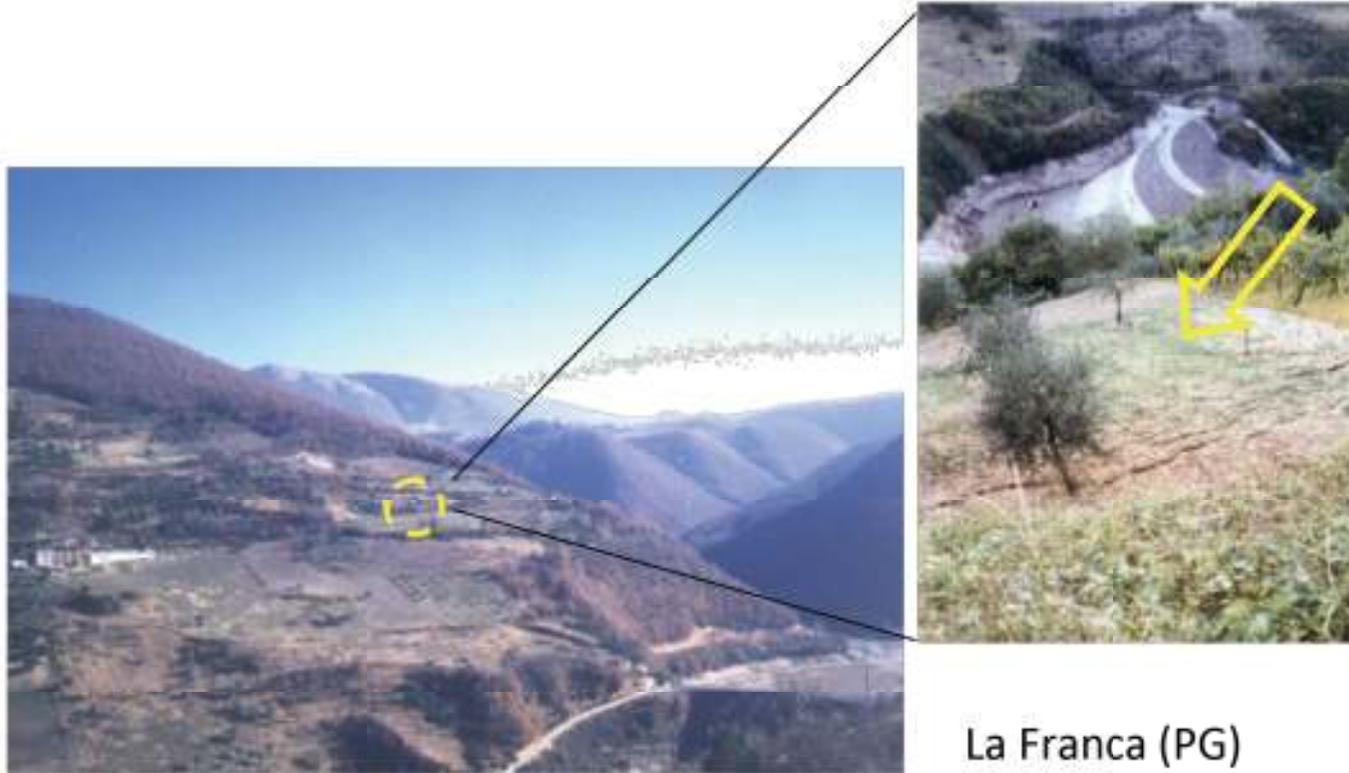


Nocera Umbra (PG)



Umbria – Marche 1997

Scorrimenti di detrito



La Franca (PG)

Liquefazione

Si definisce **liquefazione** la **trasformazione di un materiale granulare saturo dallo stato solido allo stato liquido**, in conseguenza dell'aumento della pressione interstiziale.

La liquefazione è causata principalmente dall'applicazione di sforzi di taglio e dall'accumulo di deformazione di taglio, che causano la rottura della struttura del suolo. Tipicamente il fenomeno si verifica in sedimenti non coesivi o parzialmente coesivi, ed è più rapido in sabbie da fini a grossolane, specialmente quando la granulometria è molto uniforme. L'acqua mista a sabbia si comporta come un fluido viscoso con una resistenza al taglio molto ridotta.

Liquefazione

Durante la transizione dall'assetto iniziale (Fig. 4A) allo stato di liquefazione (Fig. 4B), si verifica un forte aumento della pressione interstiziale. La pressione dei pori, in Fig. 4B, causa l'azzeramento dello stress effettivo. L'aumento della pressione è tale da causare l'idrofratturazione del tetto di sedimenti sovrastanti la zona di liquefazione. Fig. 4C illustra la successiva densificazione che si verifica quando la pressione interstiziale in eccesso si dissipa

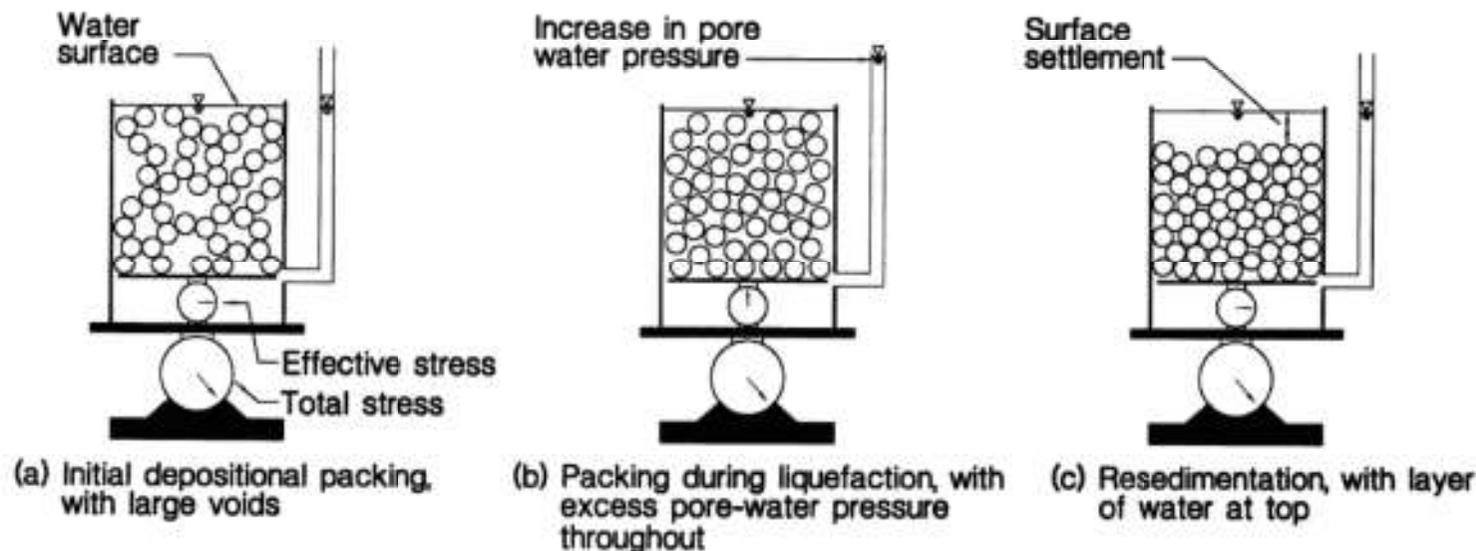
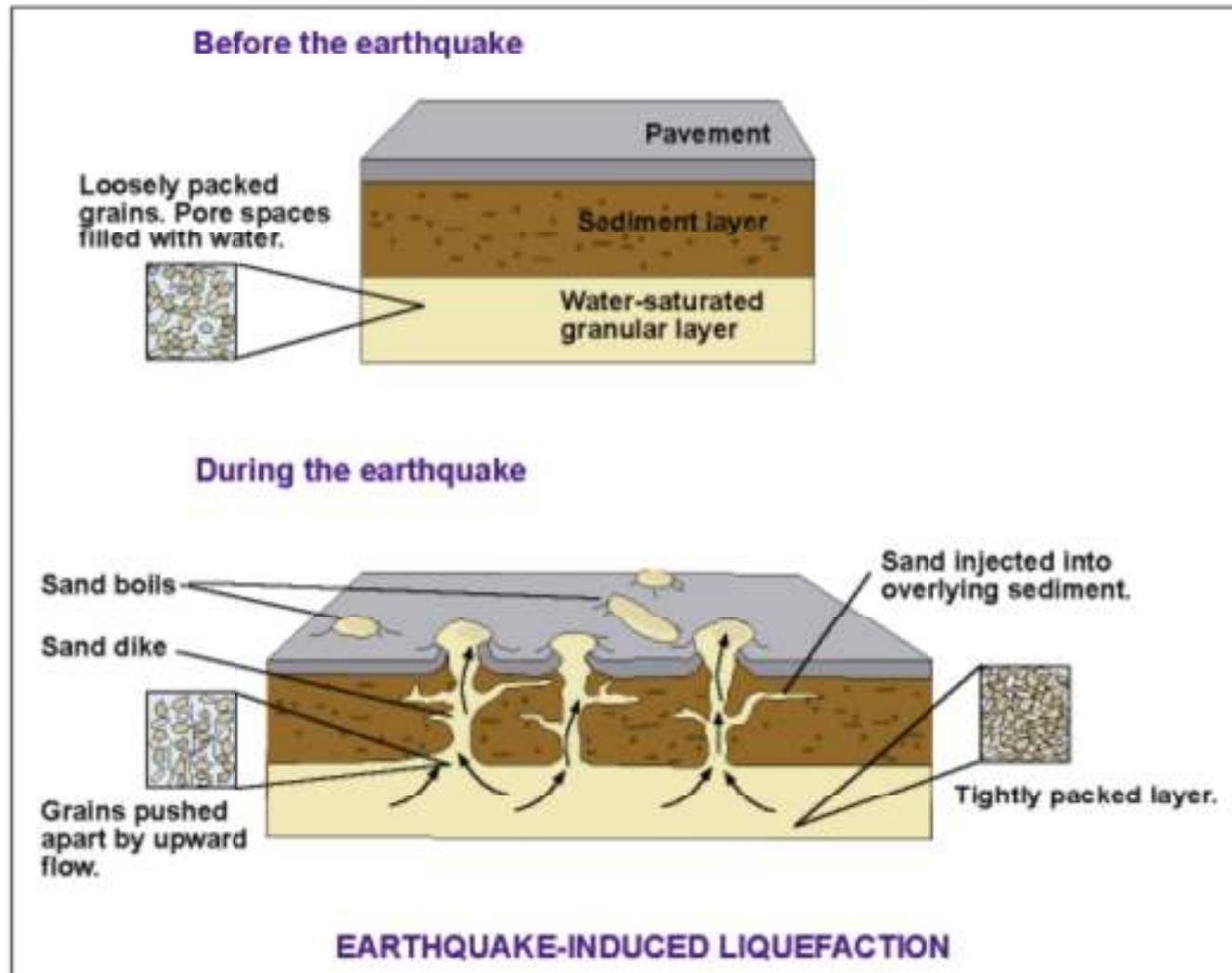


Fig. 4. (A-C) Changes in packing of sediment grains caused by liquefaction (from Ishihara, 1985).

Liquefazione indotta da terremoto



Liquefazione

La liquefazione avviene quando sono verificate *simultaneamente* alcune condizioni che riguardano

Le **condizioni predisponenti** del terreno:

- Profondità strato potenzialmente liquefacibile $< 15-20$ m dal p.c.
- Profondità falda < 5 m
- densità relativa $D_r < 60\%$
- diametro medio $0.02 \text{ mm} < D_{50} < 2 \text{ mm}$
- frazione di fini (diametro $< 0.005 \text{ mm}$) $< 15\%$

Le **condizioni scatenanti** (caratteristiche dell'azione sismica):

- magnitudo > 5.5
- PGA $> 0.15 \text{ g}$
- durata $> 15-20 \text{ s}$

ICMS

§ 2.7 recita: **per il livello 2** il pericolo liquefazione deve essere accertato in base a fattori scatenanti (caratteristiche dei terremoti attesi) e predisponenti (susceptibilità dei terreni)

- La susceptibilità del terreno deve essere valutata sulla base di prove in sito (SPT e/o CPT e/o prove geofisiche in foro del tipo DH, CH e/o SCPT) e sulla base delle fluttuazioni dei livelli di falda; nelle analisi dovrà considerarsi la condizione meno cautelativa.
- La stima del potenziale di liquefazione dovrà essere effettuata con i “metodi semplificati” (Fattore di sicurezza alla liquefazione e Indice del potenziale di liquefazione)
- Per ogni verticale dovrà essere valutato il picco di accelerazione alla superficie del deposito mediante analisi della risposta sismica locale.

Fattore di sicurezza alla liquefazione

Metodi semplificati basati su prove geotecniche e sulla valutazione, ad ogni quota z del deposito compresa nei primi 20 m, del fattore di sicurezza

$$F_L = \frac{CRR}{CSR} \cdot MSF \quad \text{dove: } MSF \text{ è un fattore di scala valutato in funzione della magnitudo dei terremoti attesi.}$$

$$CRR = \frac{\tau_{ult}}{\sigma'_{v0}}$$

CRR resistenza normalizzata (rispetto alla tensione efficace verticale iniziale σ'_{v0}) valutata attraverso abachi in funzione di parametri desunti da prove SPT, CPT e da misure della velocità delle onde di taglio V_s

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d \quad \text{è la tensione indotta dal terremoto}$$

dove:

a_{max} è il picco di accelerazione al piano campagna del terremoto di riferimento

g è l'accelerazione di gravità;

σ_v e σ'_v sono rispettivamente la tensione totale verticale e la tensione efficace verticale alla profondità considerata;

r_d è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica che porta in conto la deformabilità del sottosuolo e

Livello 2 ICMS



Fattore di sicurezza alla liquefazione

- Tra i metodi semplificati sono particolarmente raccomandati quelli basati su prove CPT.
- Se il fattore è $FL > 1.25$ la liquefazione è da escludere.
- Se è $FL < 1.25$ è possibile che avvengano fenomeni di liquefazione.
- Quando $FL > 1$ si possono avere, dopo il terremoto, cedimenti permanenti del terreno.

Indice del potenziale di liquefazione

L'indice del potenziale di liquefazione, I_L , è definito dalla seguente relazione:

$$I_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz$$

dove:

z è la profondità dal piano campagna in metri

$w(z) = 10 - 0.5z$ è una funzione che pesa il contributo del fattore F con la profondità.

Ad una data quota z il fattore $F(z) = F$ vale:

$$F = 1 - F_L \text{ se } F_L \leq 1.0$$

$$F = 0 \text{ se } F_L > 1.0$$

dove:

F_L è il fattore di sicurezza alla liquefazione alla quota considerata.

Livello 2 ICMS

NTC08 Stabilità nei confronti della liquefazione (§ 7.11.3.4)

Se il terreno è potenzialmente liquefacibile (condizioni al § 7.11.3.4.2) e comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda occorre valutare il coefficiente di sicurezza alla liquefazione.

Salvo utilizzare procedure di analisi avanzate, la verifica può essere effettuata con metodologie di tipo storico-empirico in cui il coefficiente di sicurezza viene definito dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione e la sollecitazione indotta dal terremoto di progetto.

La resistenza alla liquefazione può essere valutata sulla base dei risultati di prove in sito o di prove cicliche di laboratorio. La sollecitazione indotta dall'azione sismica è stimata attraverso la conoscenza dell'accelerazione massima attesa alla profondità di interesse (§ 7.11.3.4.3)

Liquefazione



Frattura di 15 m con massiva estrusione di sabbie grigie a NE di Mirabello.



Massiva fuoriuscita di sabbie liquefatte (galoppatoio di Mirabello)

Liquefazione



Ampia fuoriuscita i sabbie grigie al cimitero di S. Agostino



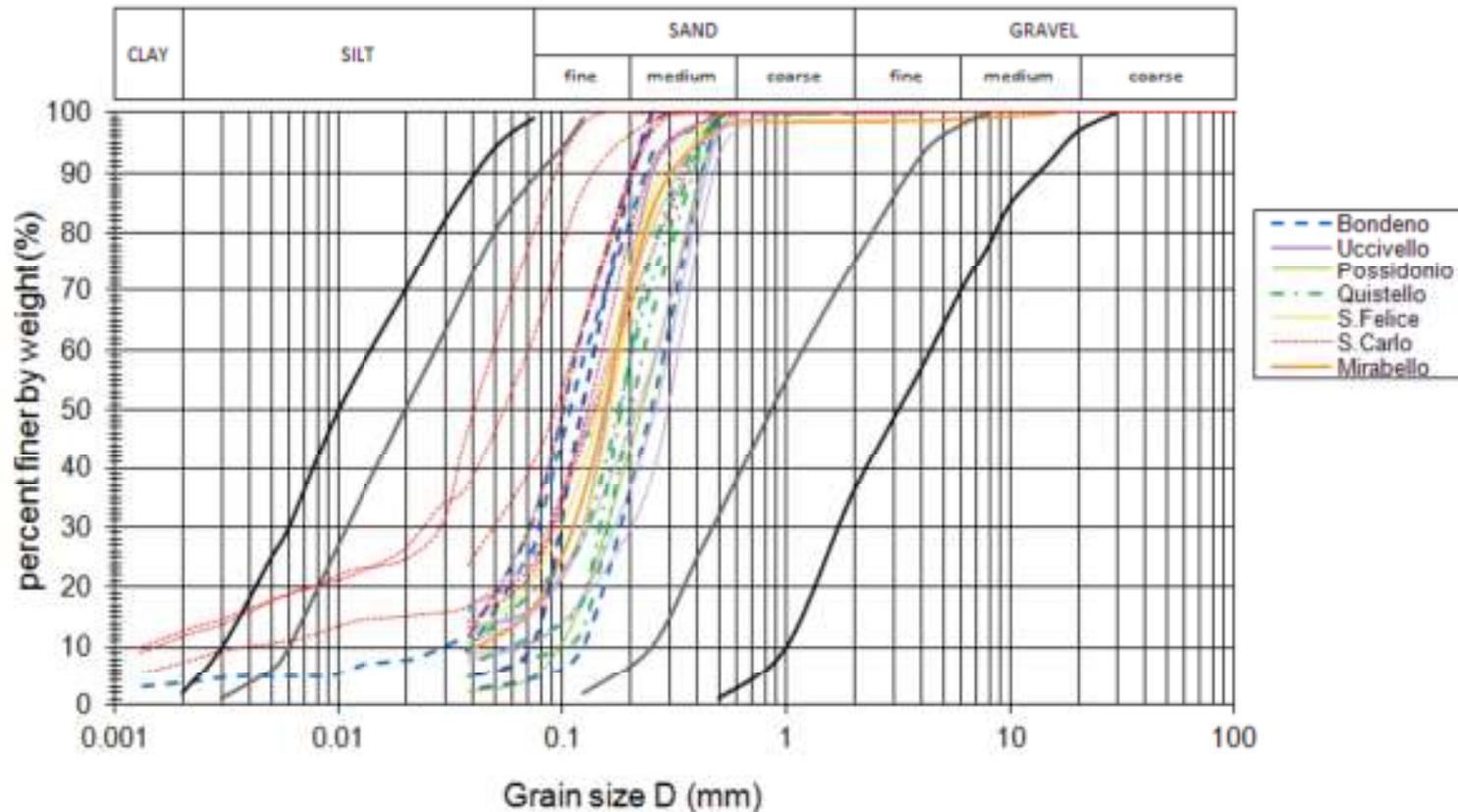
Visione dall'alto del cimitero di S. Agostino e fratture lunghe decine di metri localmente riempite di sabbia.

Liquefazione



San Carlo, frattura lunga centinaia di metri con fuoriuscita di sabbie

Analisi granulometrica



Distribuzione delle granulometrie dei suoli soggetti a liquefazione. Le curve indicano gli intervalli di granulometria dei suoli con potenziale di liquefazione [Obermeier 1996], mentre le linee grigie indicano gli intervalli di granulometria dei suoli ad alto potenziale di liquefazione

Conclusioni

- Le modificazioni del moto sismico (in ampiezza, durata e contenuto in frequenza) e le deformazioni permanenti, dovute alle condizioni locali, costituiscono il problema della ***risposta sismica locale*** (RSL)
- La valutazione della RSL è fondamentale per la pianificazione urbanistica nelle zone sismiche e per la progettazione antisismica delle costruzioni
- Per la valutazione della RSL finalizzata alla **pianificazione urbanistica** si adottano gli **indirizzi e criteri per la microzonazione sismica**
- Per la valutazione della RSL finalizzata alla **progettazione di singoli manufatti** si adottano le **NTC**

Conclusioni

- I metodi di valutazione degli effetti amplificativi possono variare al variare della scala di indagine, della complessità del fenomeno e dei fondi a disposizione
- Non esiste una soluzione unica

Grazie per l'attenzione



Lucia Luzi

Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

lucia.luzi@mi.ingv.it

