



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**PERICOLOSITÀ SISMICA, CATEGORIE DI SOTTOSUOLO
E AZIONI SISMICHE DI PROGETTO**

Sebastiano Foti



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

Il rischio sismico



Pericolosità sismica (seismic hazard)

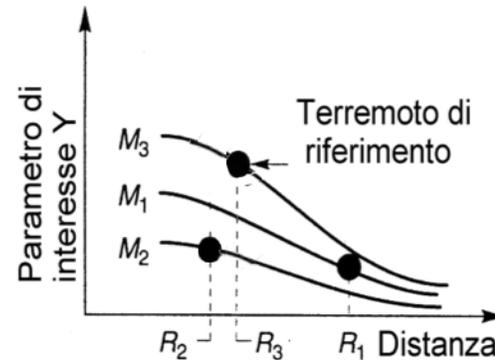
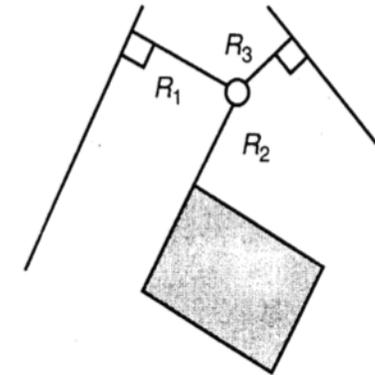
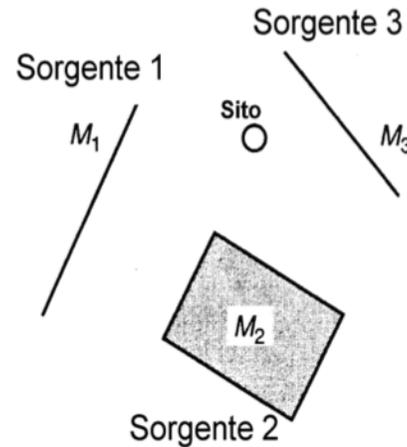
Per pericolosità sismica si intende un effetto fisico diretto (scuotimento di moto del suolo) o indiretto (e.g. instabilità dei versanti) riconducibile ai terremoti, capace di causare conseguenze avverse (perdite) sulle attività umane. Gli studi di pericolosità mirano a prevederne il valore atteso.

In senso probabilistico, è la probabilità che un valore prefissato di pericolosità, espresso da un parametro di moto sismico del suolo (ad es. PGA, S_a) o da un grado di intensità macrosismica, venga superato in un dato sito entro un dato periodo di tempo.

In modo equivalente, la pericolosità può essere definita dal valore del parametro di scuotimento che ha una prefissata probabilità di essere superato in un dato periodo di tempo

Pericolosità (Metodo Deterministico)

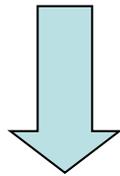
- 1) Identificazione sorgenti
- 2) Valutazione magnitudo sismica massima attesa (dati storici e caratteristiche zone sismogenetiche)
- 3) Valutazione distanza sorgente-sito
- 4) Valutazione effetti attesi in funzione delle leggi di attenuazione regionali
- 5) Selezione del terremoto di controllo



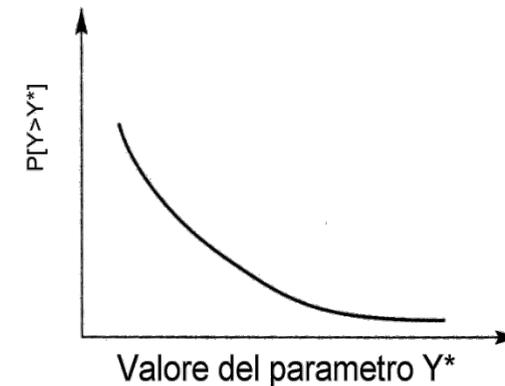
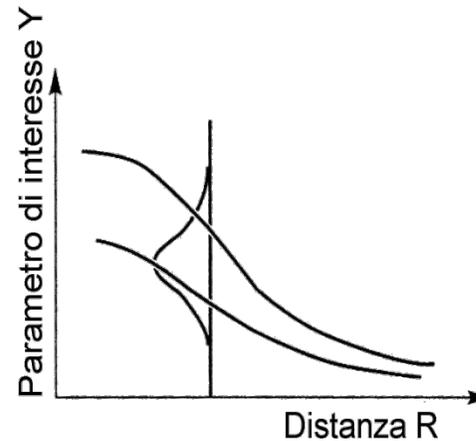
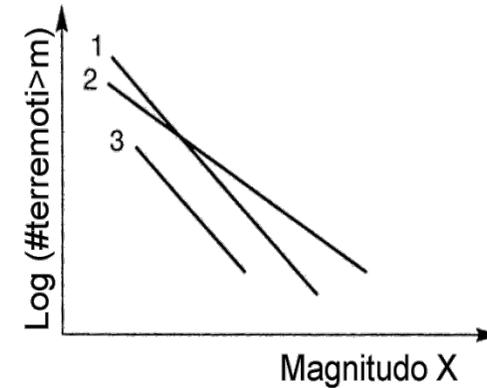
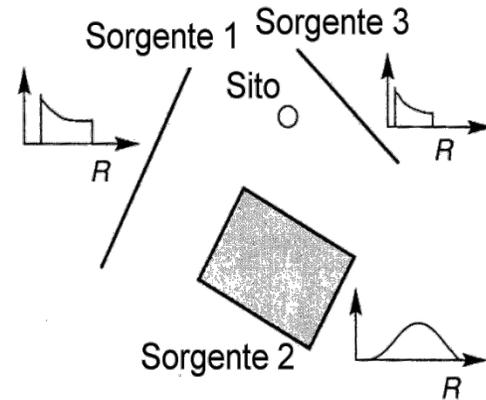
$$Y = \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_N \end{Bmatrix}$$

Pericolosità (Metodo Probabilistico)

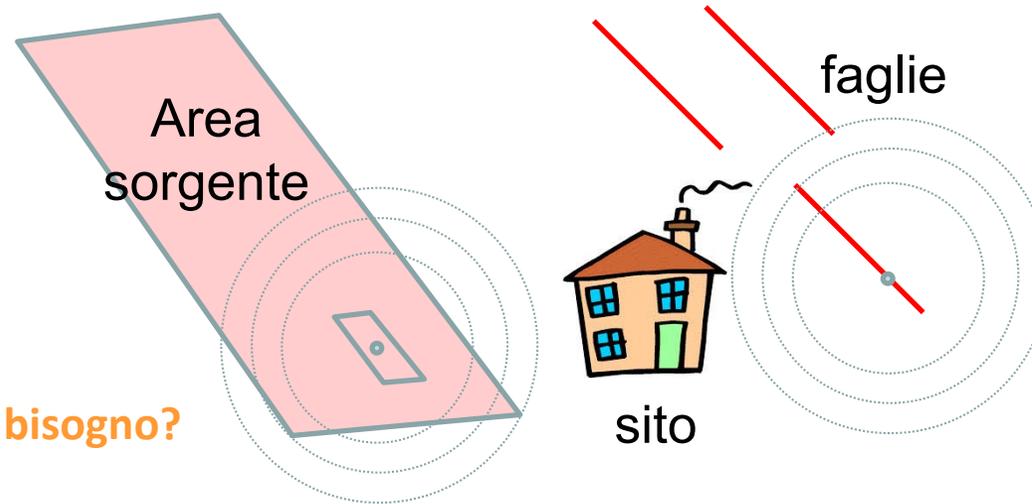
- Valutazione statistica della distanza dal sito;
- Distribuzione temporale di ricorrenza terremoti
- Incertezze legge di attenuazione
- Assunzione modello distribuzione temporale



probabilità che un dato evento si verifichi in un intervallo di tempo assegnato



Pericolosità sismica: di cosa abbiamo bisogno?



di cosa abbiamo bisogno?

di un **modello sismogenetico**, che ci dica dove possono avvenire i terremoti che possono colpire il sito, entro quale intervallo di magnitudo

di un **modello di occorrenza temporale** (relazione frequenza-magnitudo), che ci dica con quale frequenza avvengono terremoti di prefissata magnitudo nell'area sismogenetica in studio

di un **modello di propagazione del moto sismico**, che ci dica quale sia il valore atteso dello scuotimento al sito, nell'ipotesi che avvenga un terremoto di data magnitudo a una certa distanza

Il contesto tettonico nell'area Mediterranea

(cortesia prof. Paolucci)



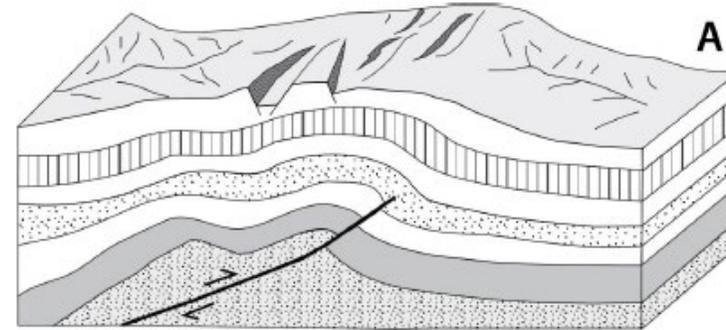
"... stiamo transitando dall'Eurasia all'Africa. La seconda ha sfondato la sua antagonista facendo breccia tra i Balcani e l'Appennino, e preme a nord-ovest da tempo immemorabile.

E' un ariete che migra con tutta la Puglia e l'intero Adriatico fin dentro la Pianura Padana, e che, a furia di spinte millimetriche ma inesorabili, ha finito per generare le Alpi"

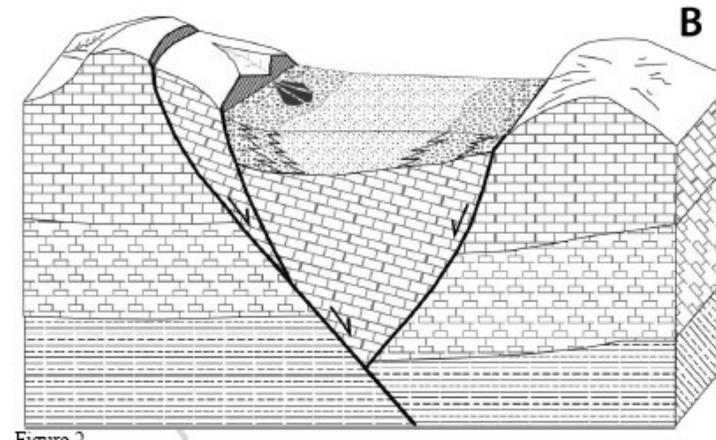
P. Rumiz, *Appia*

Dal contesto sismotettonico italiano a un modello sismogenetico

(cortesia prof. Paolucci)



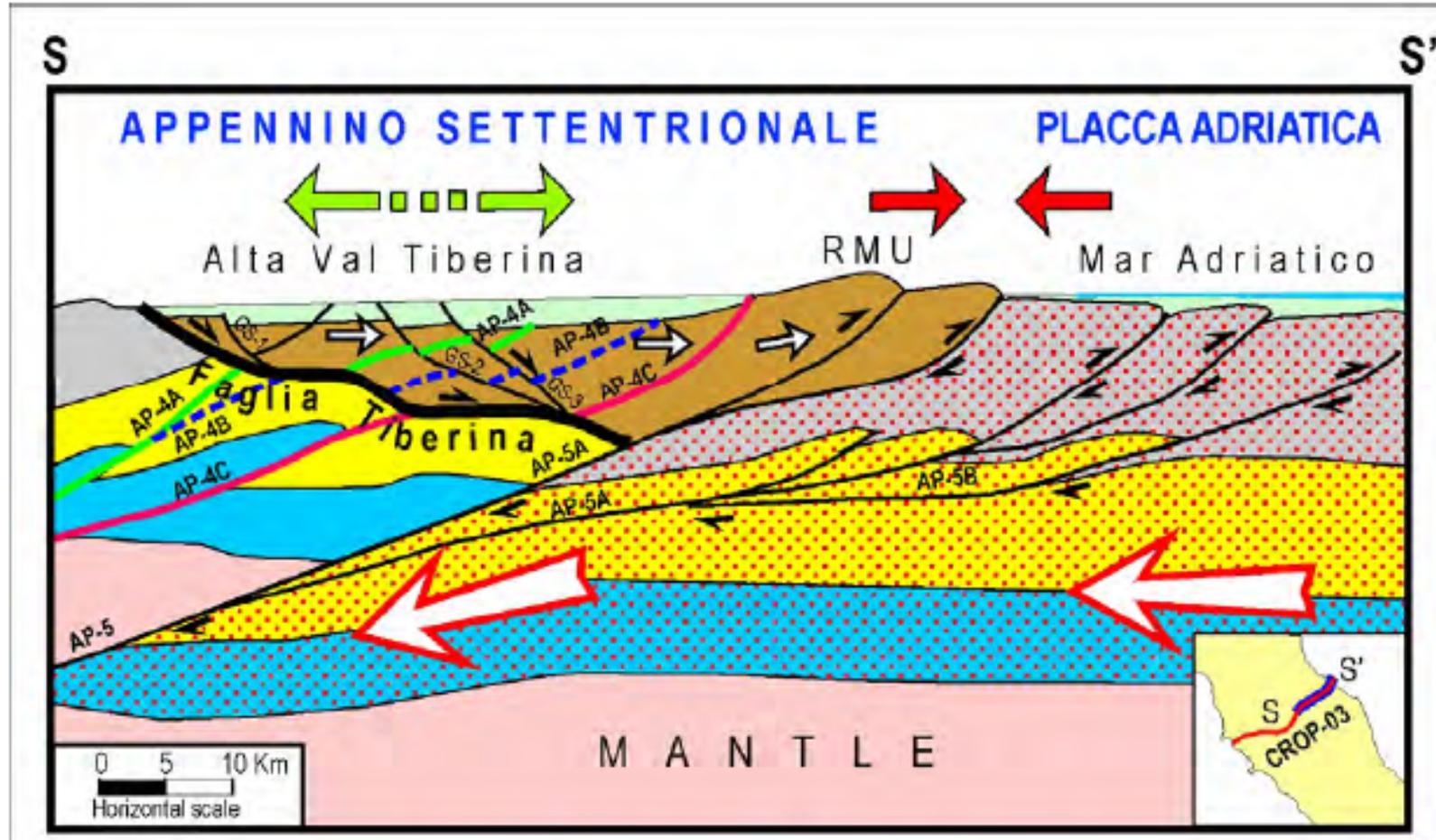
1,2 : contesto tettonico **compressivo**, caratterizzato da faglie inverse “cieche”, coperte da spesse coltri sedimentarie



3: contesto tettonico **estensivo**, caratterizzato dalla formazione di bacini intramontani, bordati da un sistema di faglie primarie e secondarie.

Dal contesto sismotettonico italiano a un modello sismogenetico

(cortesia prof. Paolucci)



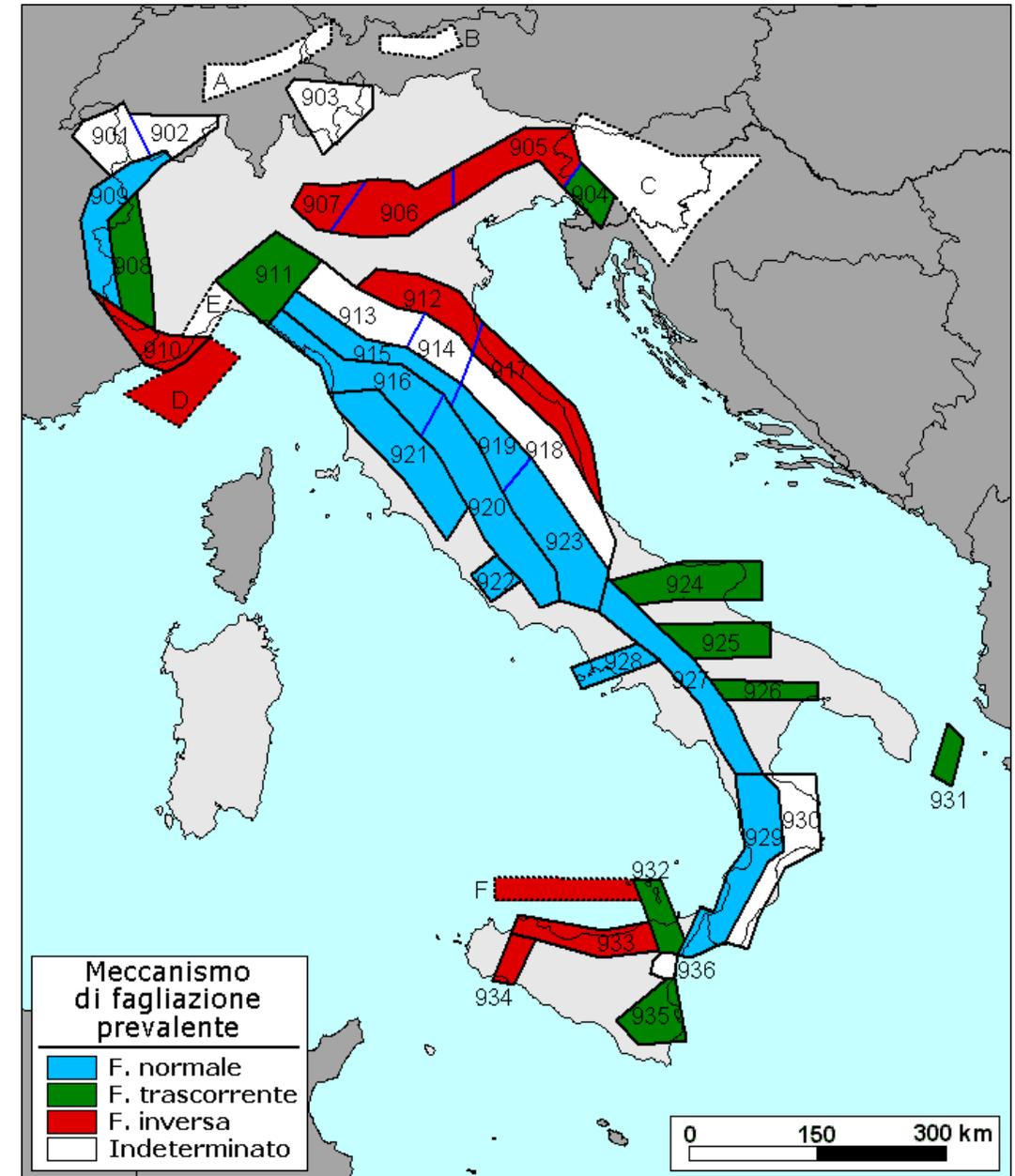
da Mantovani et al, 2011

Zonazione sismogenetica italiana: modello ZS9

Da Gruppo di Lavoro MPS (2004).
 Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 appendici.
 Disponibile in Internet al sito <http://zonesismiche.mi.ingv.it>.

Caratteristiche:

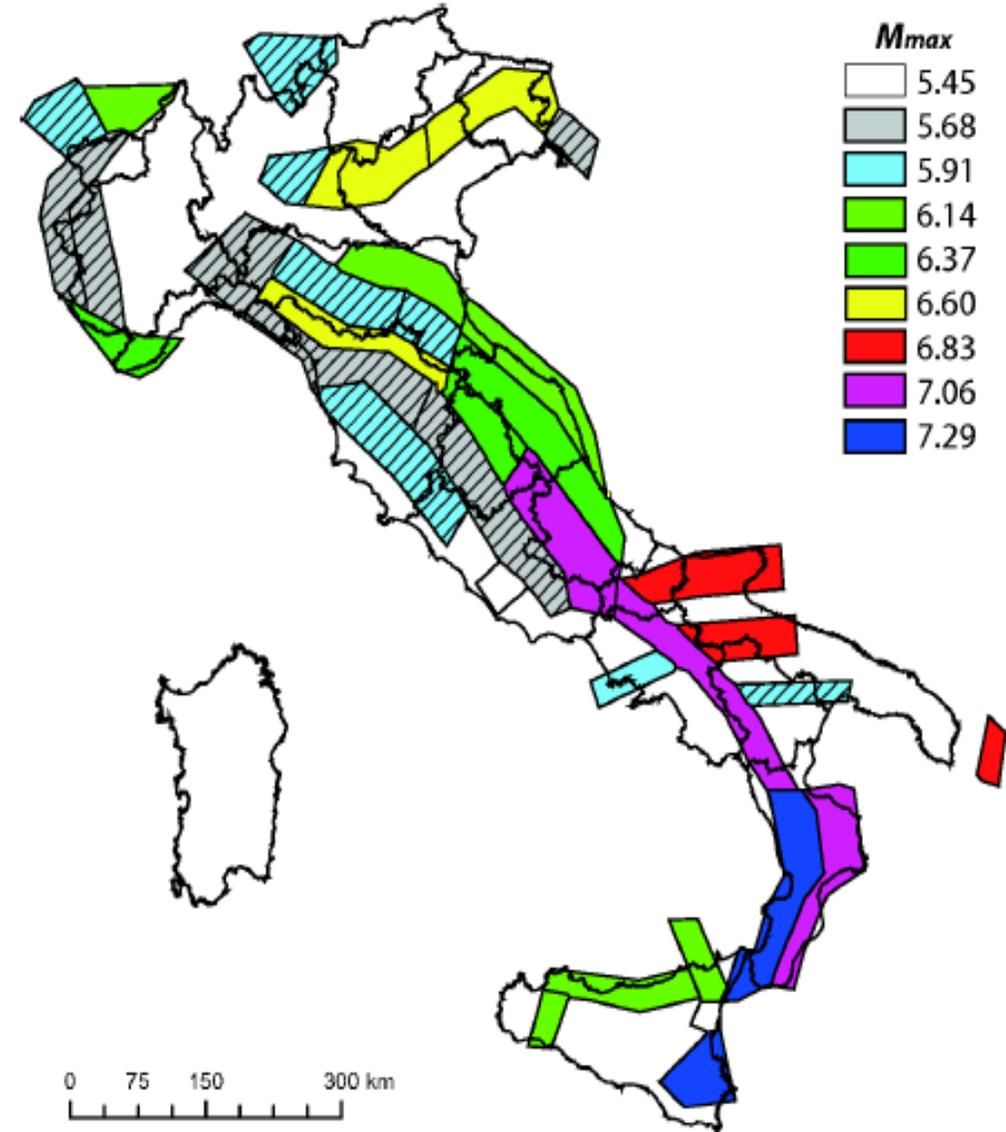
- ✓ compatibilità con il nuovo Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani CPTI04 (CPTI Working Group 2004)
- ✓ considerazione di tutti i terremoti con $M \geq 5.0$,
- ✓ definizione della profondità focale efficace
- ✓ definizione del meccanismo focale predominante



Magnitudo massime nelle ZS italiane

Magnitudo massime adottate nel modello ZS9. Nelle aree tratteggiate il valore atteso è stato aumentato a 6.14, nelle altre aree il valore atteso coincide con il valore massimo osservato

La Magnitudo è un parametro particolarmente rilevante anche in relazione ad alcuni aspetti progettuali in quanto fortemente correlata con la durata della scossa. Quest'ultima incide in modo significativo sui fenomeni cumulati come il danneggiamento e l'accumulo di sovrappressioni interstiziali che possono portare alla liquefazione dei terreni. Pertanto è un parametro fondamentale da tenere in conto nella selezione di accelerogrammi di progetto registrati



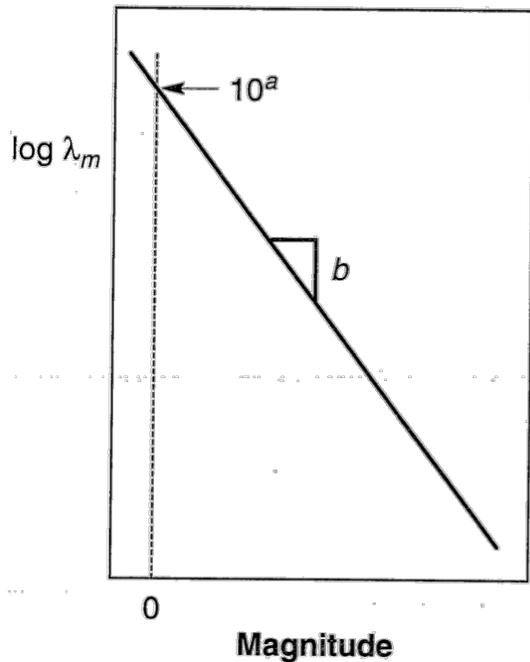
Legge di ricorrenza (Gutenberg-Richter)

(cortesia prof. Paolucci)

$$\log \lambda_m = a - b \cdot M$$

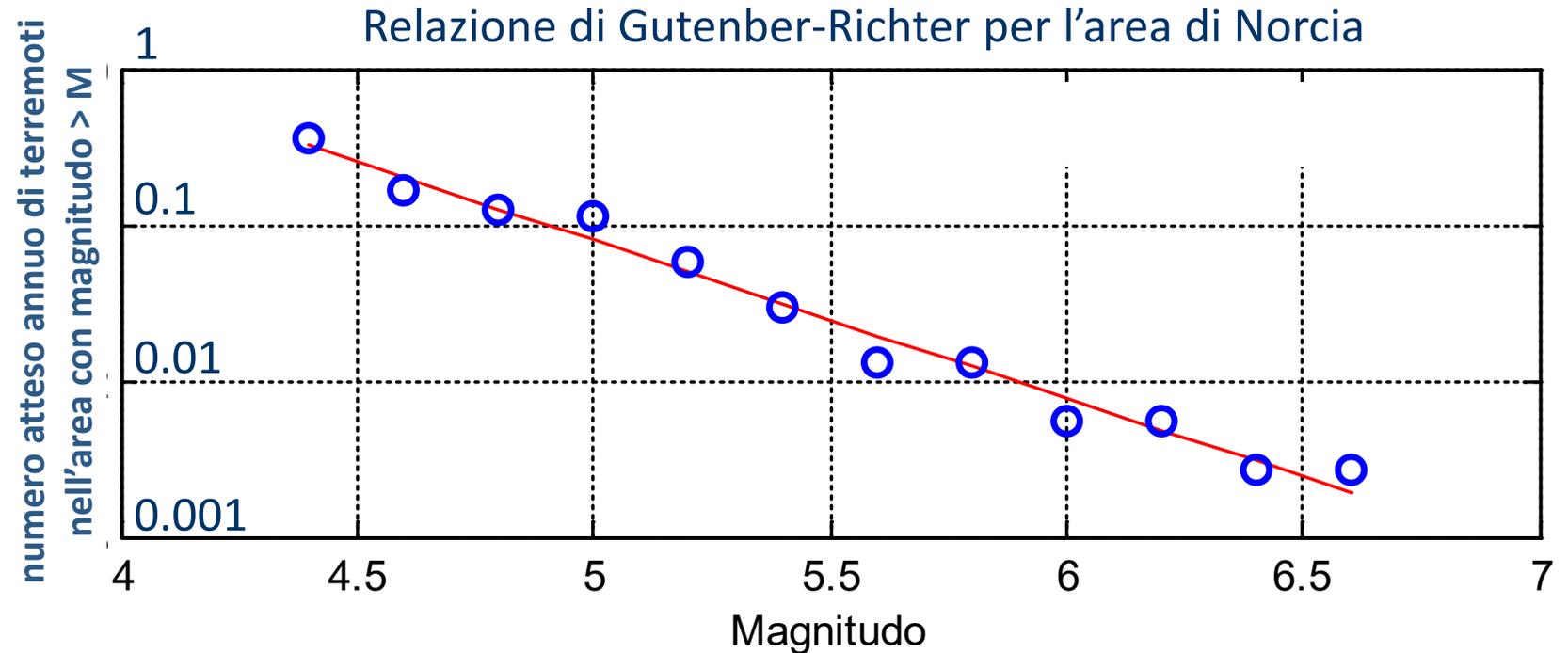
λ_m : numero di terremoti per anno aventi $M > m$ (frequenza annuale)

a e b : parametri ricavabili da regressione di dati storici



$T=1/\lambda_m$: periodo medio di ritorno per un terremoto avente $M > m$

Dal catalogo dei terremoti ai modelli temporali di occorrenza



Il succedersi degli eventi sismici in una prefissata regione è generalmente modellato nell'ipotesi poissoniana per cui **gli eventi si susseguono con tasso di accadimento costante e senza memoria di quanto avvenuto nel passato**

Equazioni empiriche di previsione del moto sismico

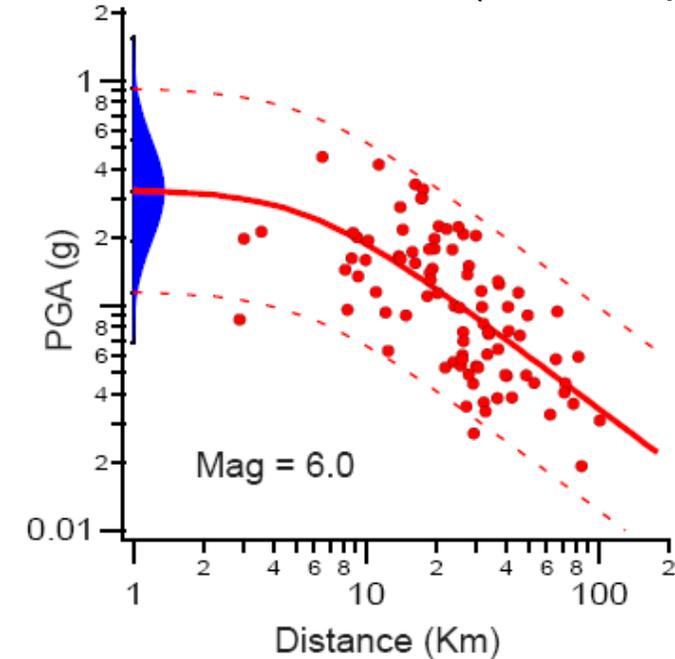
Le equazioni predittive empiriche (Ground Motion Prediction Equations, **GMPE**) forniscono modelli probabilistici di severità dello scuotimento calibrati su dati accelerometrici di varia provenienza (regionali, mondiali, ..).

Accuratezza e errori delle GMPE vengono sistematicamente verificati ad ogni nuovo terremoto, e versioni aggiornate prodotte sulla base dei nuovi risultati.

Data l'esistenza di svariate GMPE, sono state sviluppate tecniche (**ranking**) per verificare quali siano le più adatte per diverse aree geografiche/tettoniche.

... ma nonostante la numerosità dei dati accelerometrici ottenuti negli ultimi anni, **la capacità predittiva delle GMPE è ancora limitata** (area epicentrale, condizioni di sito complesse ..)

(cortesia prof. Paolucci)



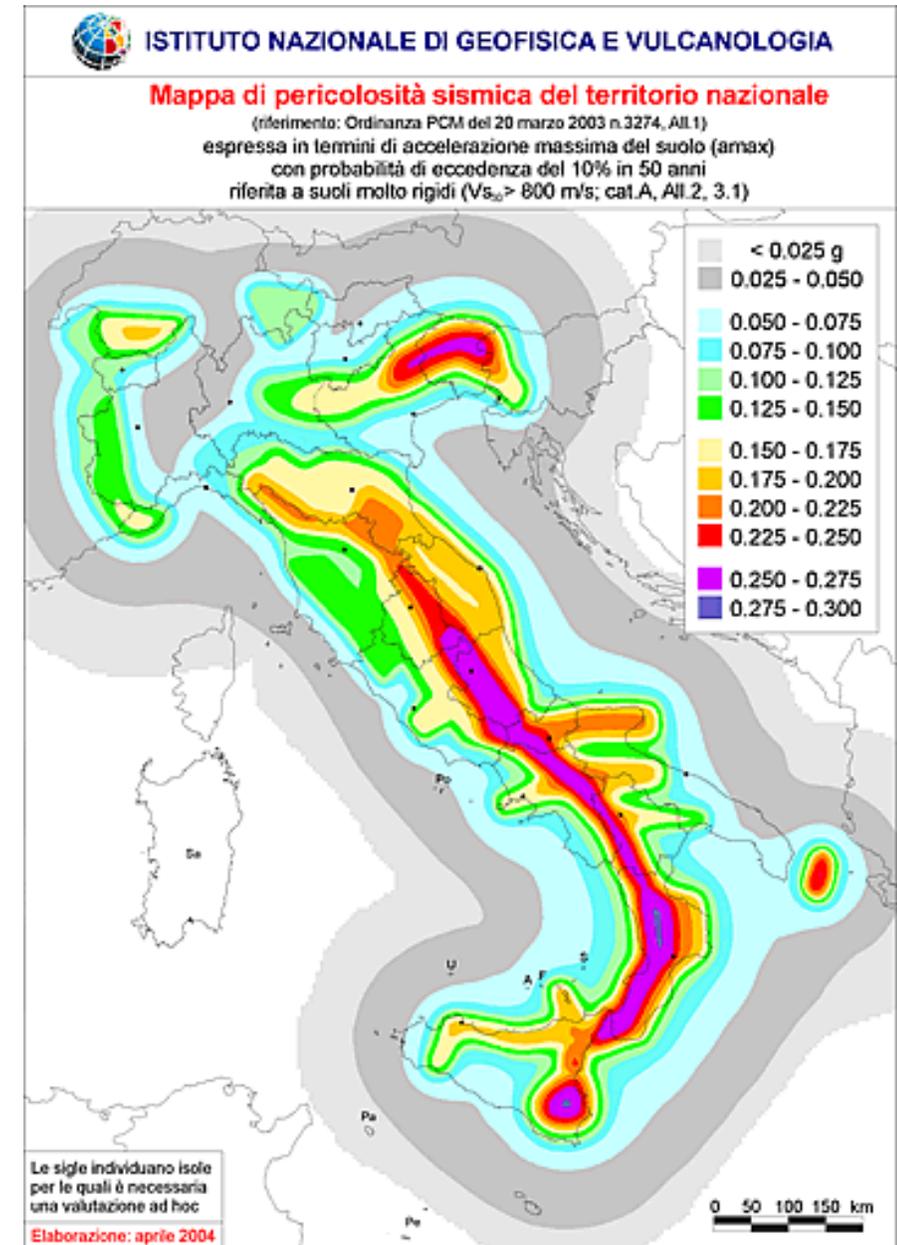
Lo scuotimento aumenta con Magnitudo e diminuisce con la distanza
(altri fattori: tipo di sorgente, classe di sottosuolo, caratteristiche della regione)

Le relazioni possono essere ricercate per un qualsiasi parametro di scuotimento (PGA, PGV, PGD, Arias Intensity, durata, valori dello spettro di risposta per diversi periodi, ...)

Mappa di pericolosità sismica del territorio italiano

- ✓ E' il risultato di un'analisi probabilistica di pericolosità sismica estesa a tutto il territorio nazionale.
- ✓ (GU 108, 11/5/2006)
- ✓ I valori in figura corrispondono alla accelerazione massima su suolo roccioso con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni → $T_r=475$ anni.
- ✓ Analoghe mappe sono prodotte anche per altri parametri dell'azione sismica e per altri periodi di ritorno.
- ✓ necessità di introdurre fattori amplificativi di sito

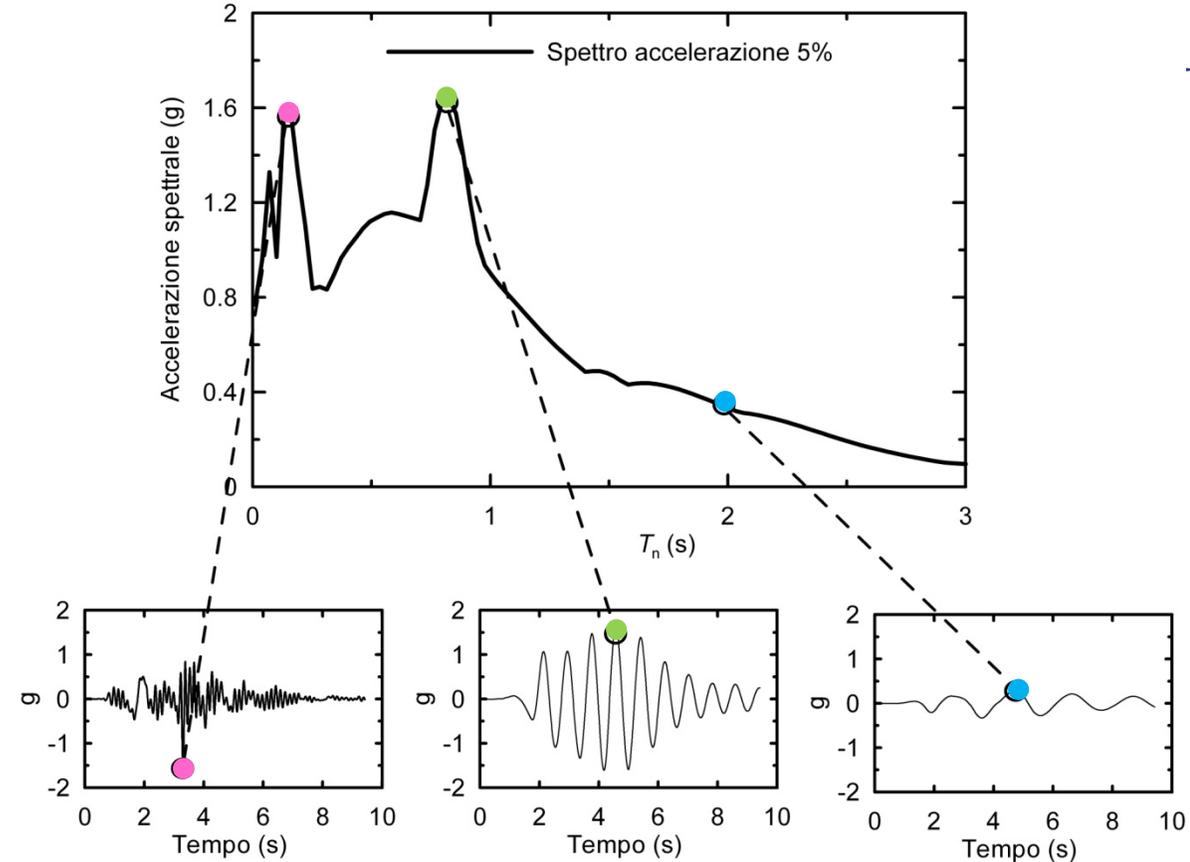
<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>



Moto sismico e risposta di una struttura

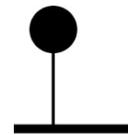
Interpretazione dello spettro di risposta elastico

Accelerazione assoluta dell'oscillatore →



Oscillatori con diversi T →

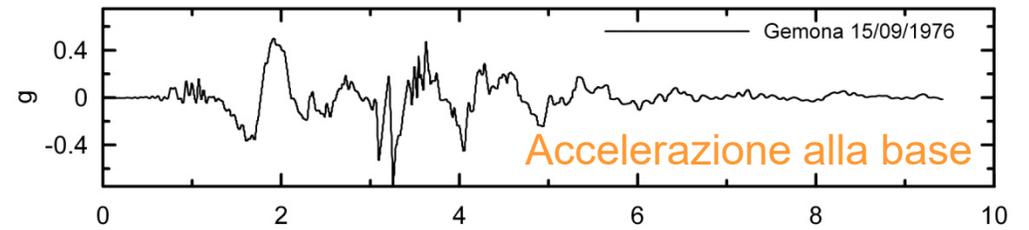
$T = 0.15$ s
(ex. Edificio in muratura a 2 piani)



$T = 0.80$ s
(ex. edificio in CA a 8-9 piani)

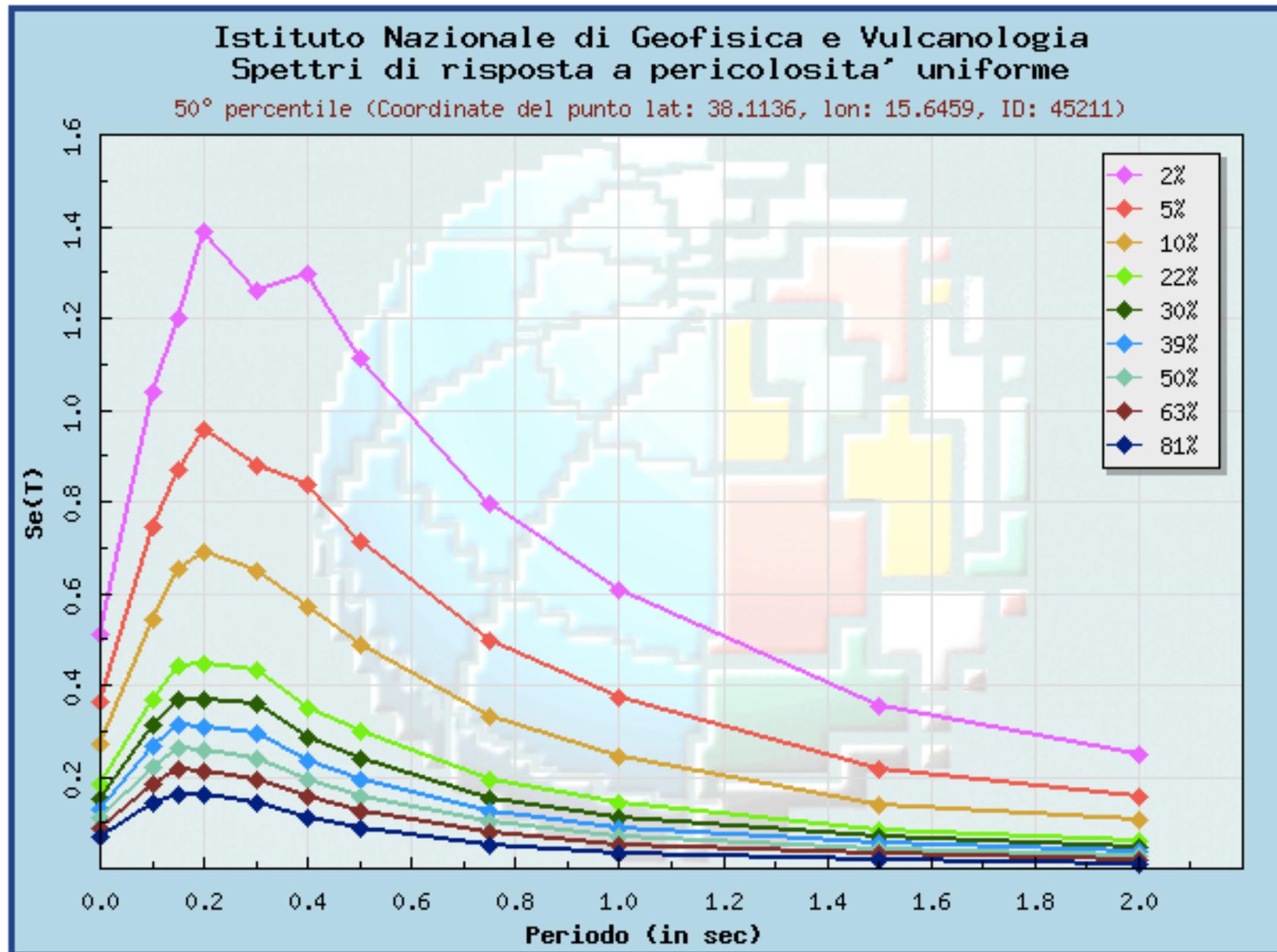


$T = 2.0$ s
(ex. edificio in CA a 25 piani)



(cortesia prof. Paolucci)

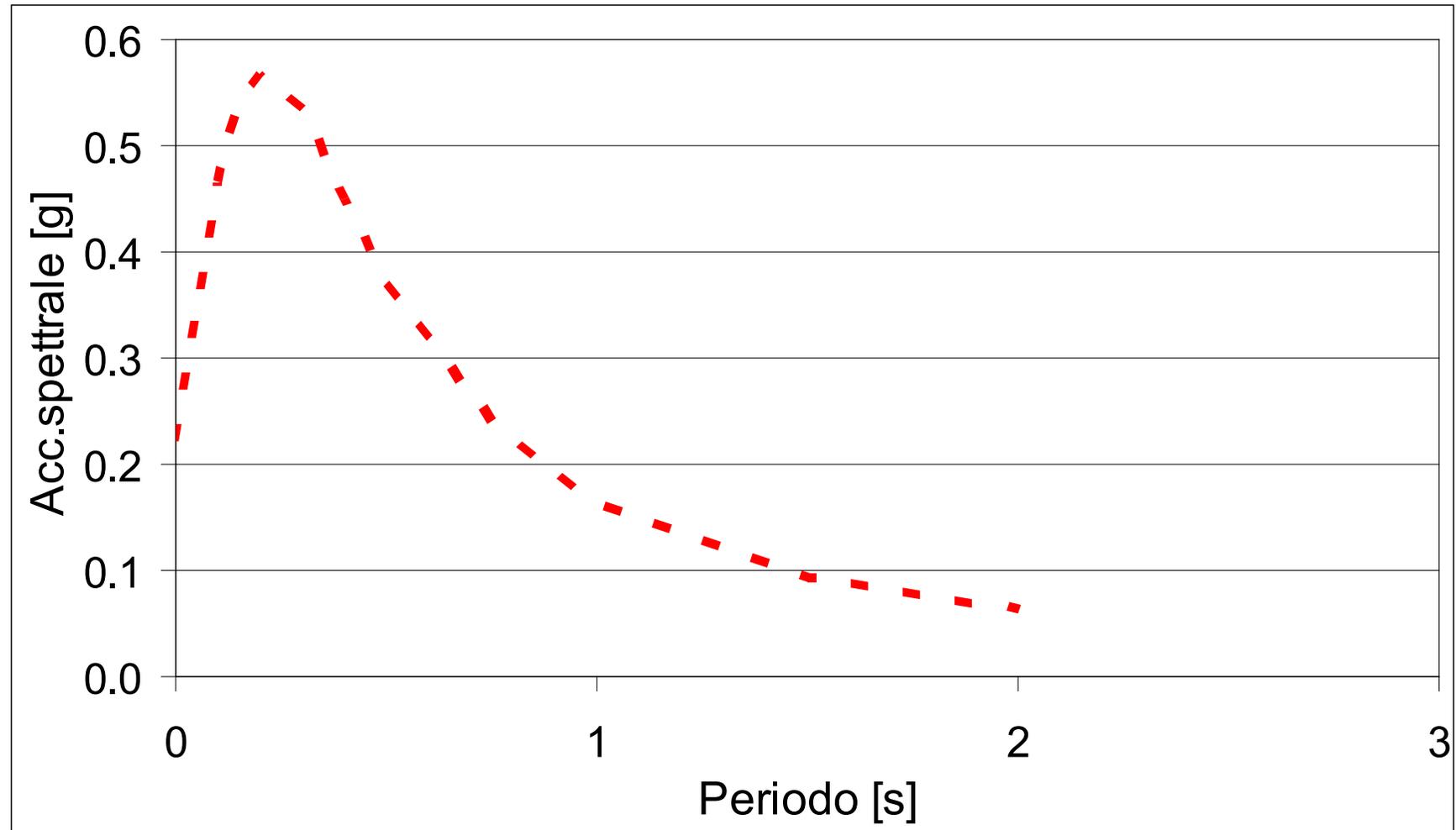
Esempio: Udine



Esempio: Udine

Spettro di risposta a pericolosità uniforme INGV:

Prob. Ecced. 10% in 50 anni (suolo rigido)



Azioni sismiche di progetto

Le forme spettrali previste dalle **NTC** sono definite, su sito di riferimento rigido orizzontale, in funzione dei tre parametri:

- a_g accelerazione orizzontale massima del terreno;
- 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.

Questi parametri sono determinati con una ottimizzazione ai minimi quadrati sulla base dello spettro previsto dagli studi di pericolosità (INGV)

Spettro di risposta elastico di normativa

$$0 \leq T < T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$

$$T_B \leq T < T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o$$

$$T_C \leq T < T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

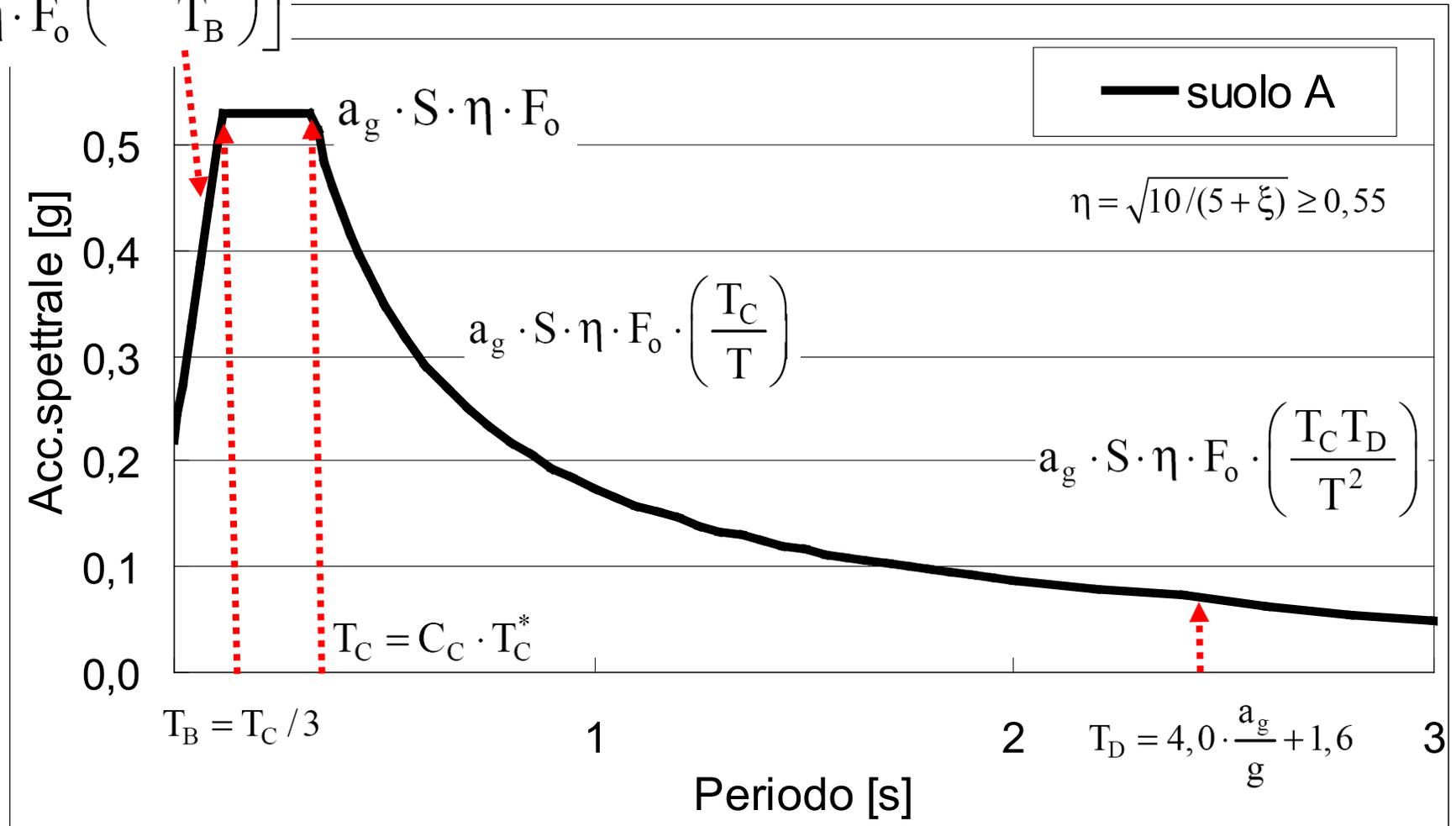
$$T_D \leq T \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right)$$

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

$$T_C = C_C \cdot T_C^* \quad T_D = 4,0 \cdot \frac{a_g}{g} + 1,6 \quad T_B = T_C / 3$$

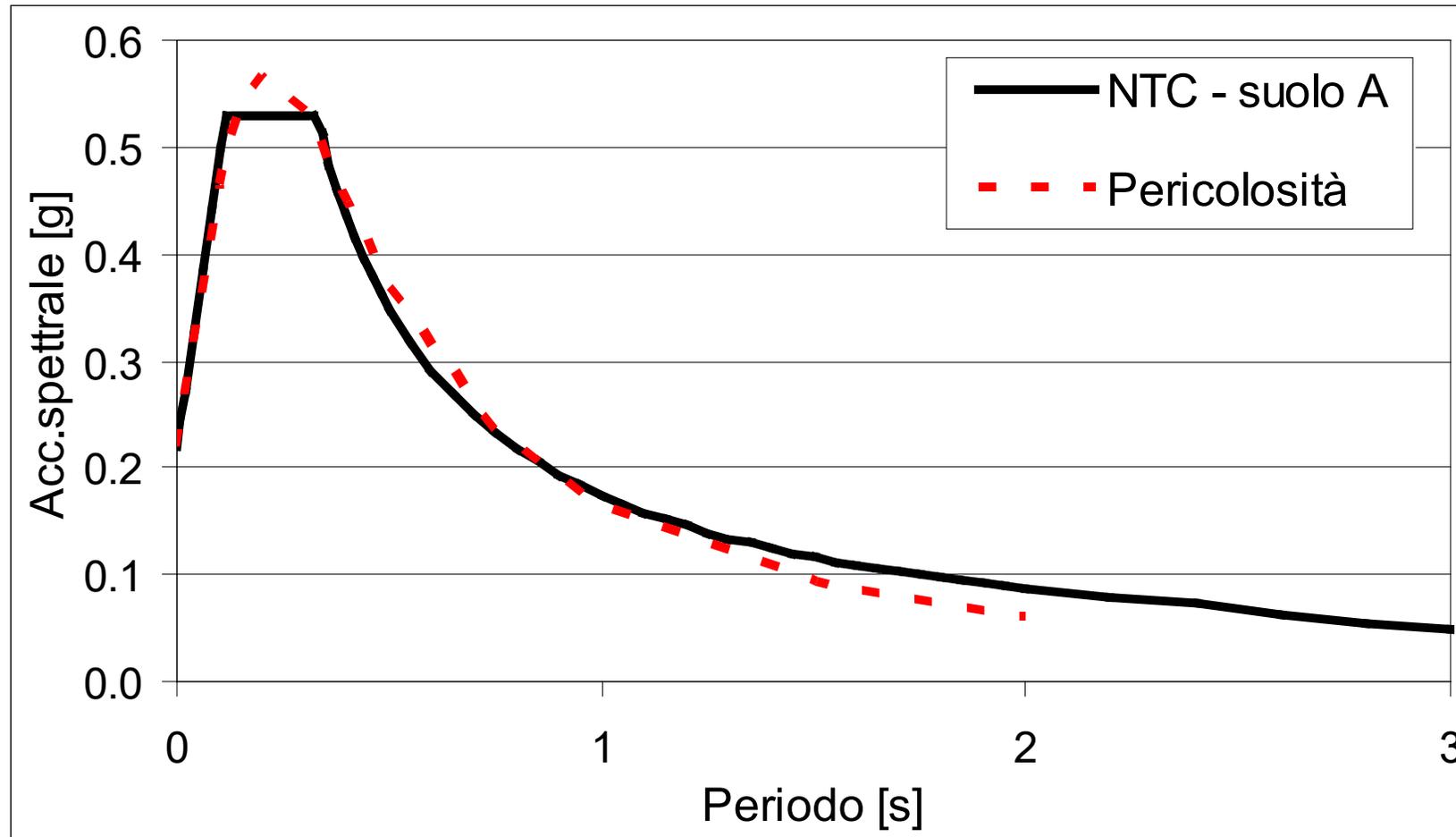
Spettro di risposta elastico di normativa

$$a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_o \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_o} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]$$



Determinazione parametri

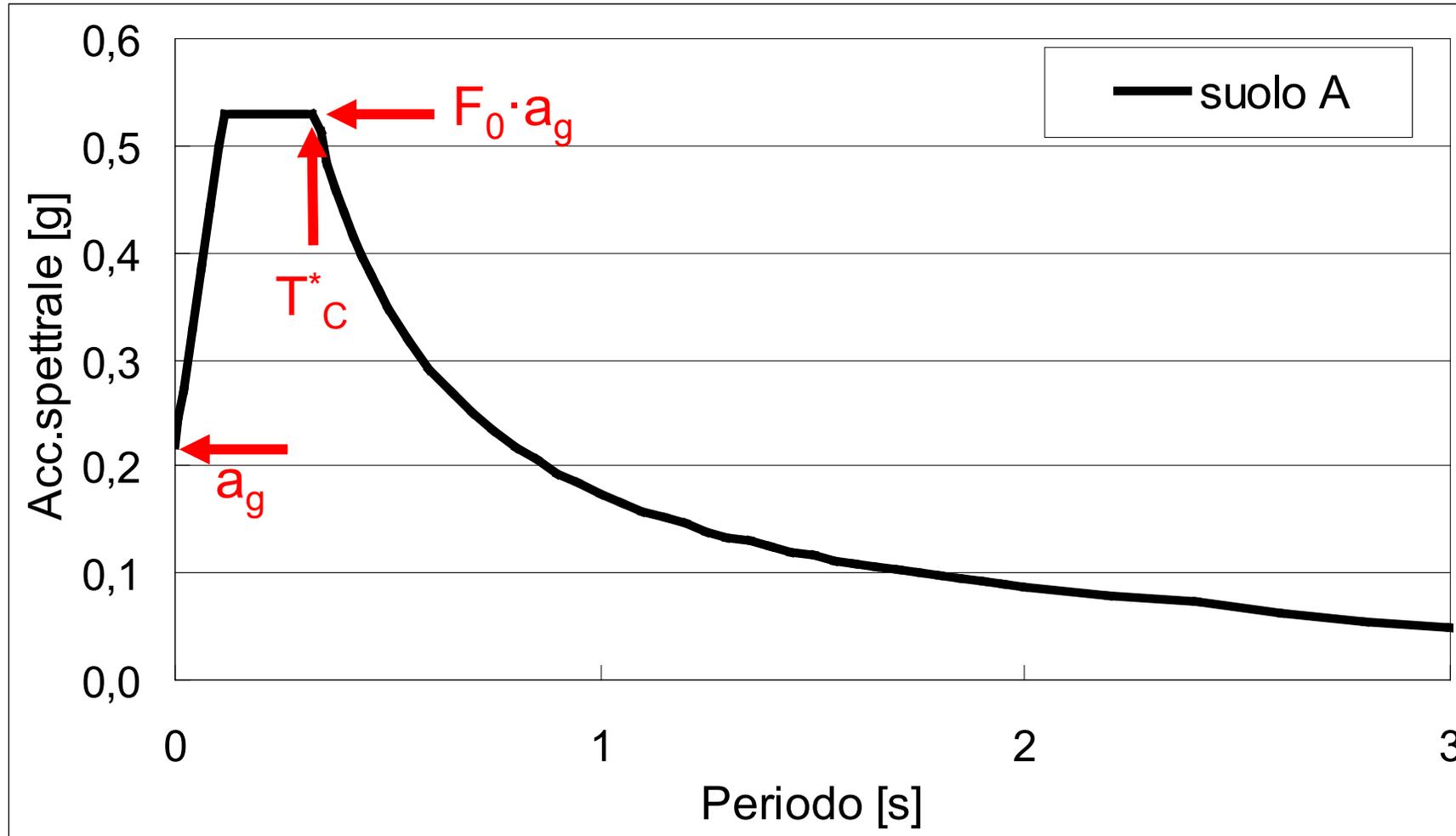
Prob. Ecced. 10% in 50 anni (suolo rigido)



Esempio: Udine

Prob. Ecced. 10% in 50 anni (sottosuolo rigido)

a_g	F_0	T_c^*
[g]	[-]	[s]
0.216	2.45	0.33



Parte 2 – Risposta sismica locale

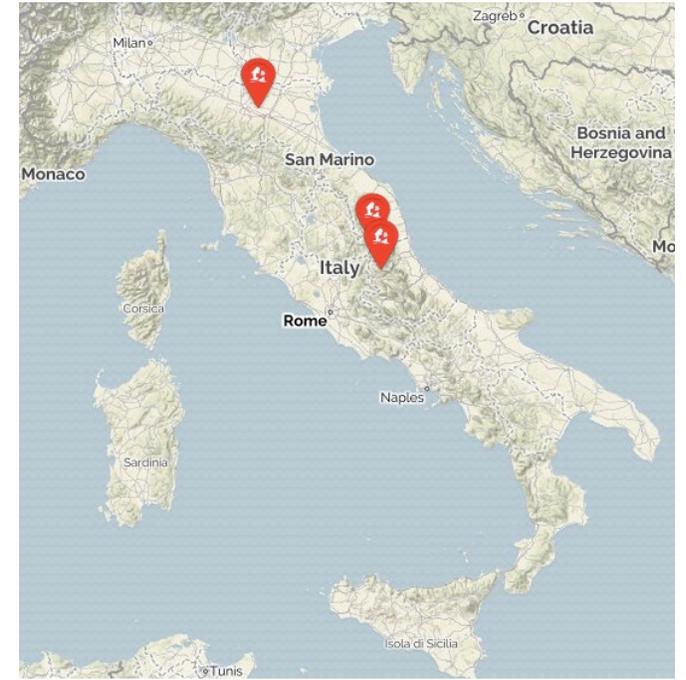
- Premessa: evidenze della risposta sismica locale
- Amplificazione stratigrafica
 - Funzione di trasferimento 1D
 - Caratterizzazione
 - ✓ Indagini in sito
 - ✓ Prove di laboratorio
 - Metodi semplificati (norme tecniche)
- Amplificazione Topografica

Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER)



The image shows a screenshot of the Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER) website. At the top left is the GEER logo, a gear with a globe inside, and the text "Geotechnical Extreme Events Reconnaissance" and "Turning Disaster Into Knowledge". Below this is "Sponsored by the National Science Foundation". To the right is a navigation menu with "HOME", "ABOUT GEER", "RECONNAISSANCE REPORTS", "GEER ACTIVITIES", and "JOIN". The main content is a world map with numerous red, green, blue, purple, and orange pins indicating event locations. A legend at the bottom identifies the event types: Earthquake (red), Flood (green), Hurricane (blue), Landslide (brown), Storm (grey), Tsunami (purple), Typhoon (light blue), and Fire (orange). The URL <http://www.geerassociation.org/> is displayed at the bottom of the map area.

Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER)



<http://www.geerassociation.org/>

Event Category	Event Name	Event Date	Location	Report Date	Report Number	DOI
 Earthquake	<u>2016 Central Italy Earthquake Sequence</u>	<u>August 24, 2016</u>	<u>Central Italy</u>	<u>September 15, 2016</u>	<u>GEER-050</u>	<u>doi:10.18118/G61S3Z</u>
 Earthquake	<u>2012 Emilia Earthquake</u>	<u>May 20, 2012</u>	<u>Emilia, Italy</u>	<u>July 13, 2012</u>	<u>GEER-030</u>	<u>doi:10.18118/G6MS37</u>
 Earthquake	<u>2009 L'Aquila Earthquake</u>	<u>April 06, 2009</u>	<u>L'Aquila, Italy</u>	<u>September 01, 2009</u>	<u>GEER-016</u>	<u>doi:10.18118/G6F59R</u>

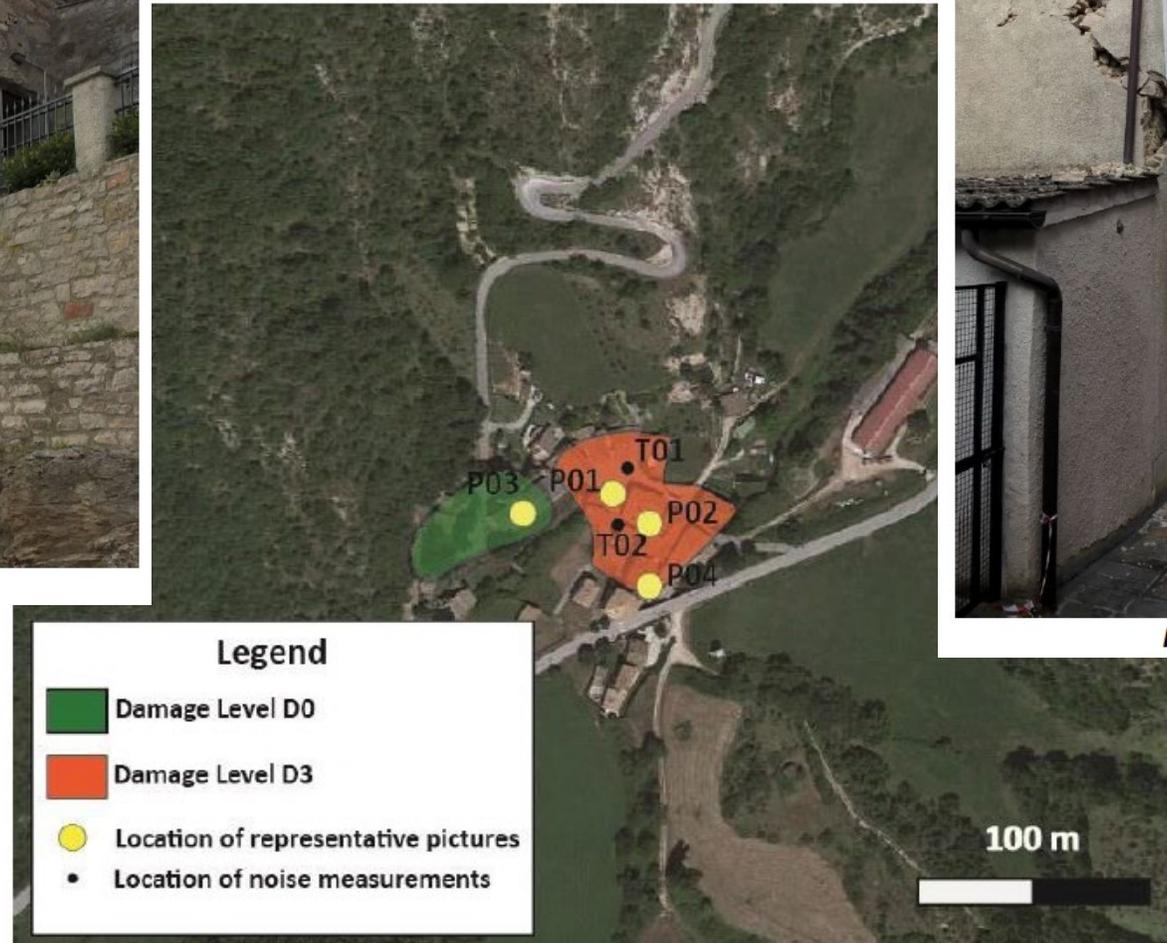
Fiume (Pieve Torrina)



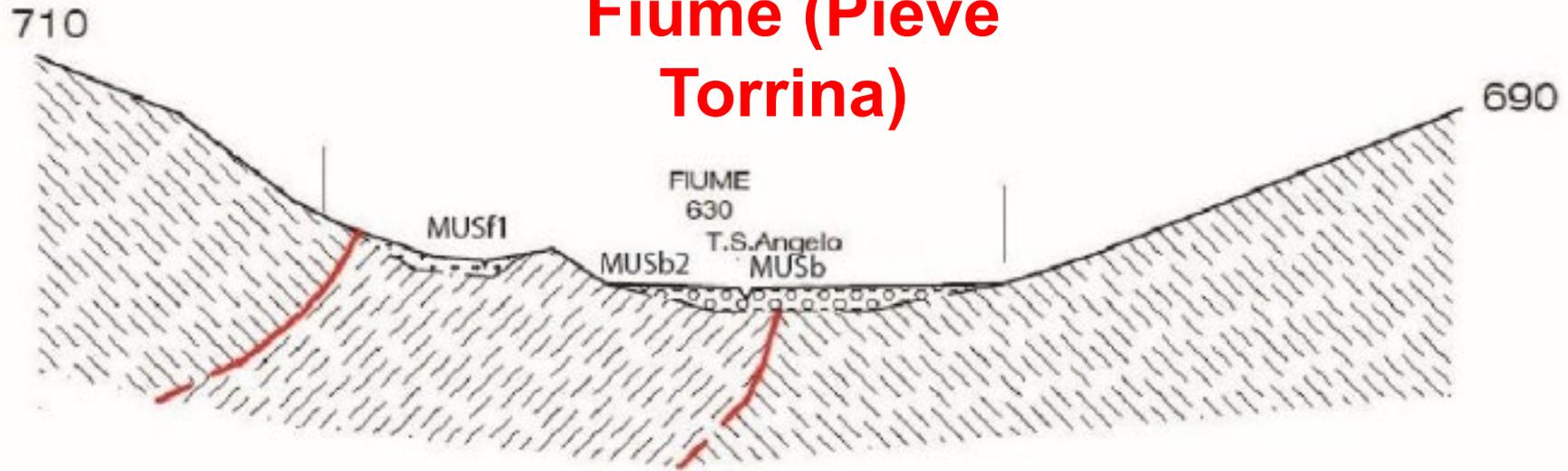
P03



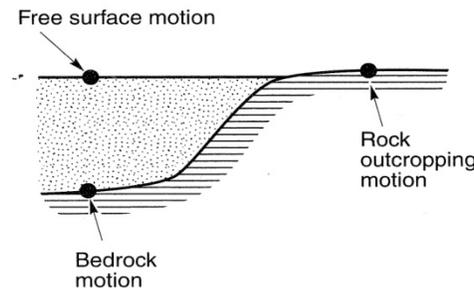
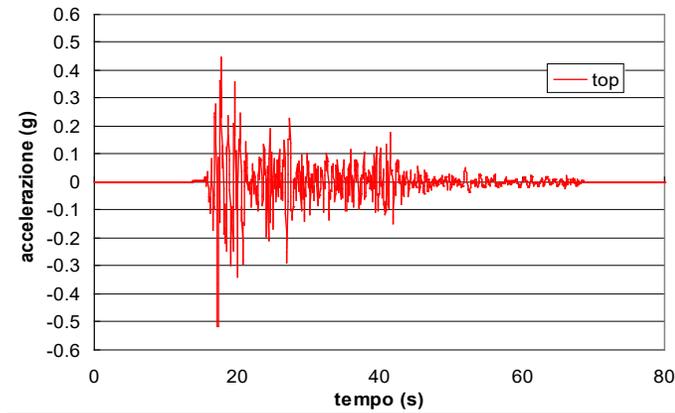
P02



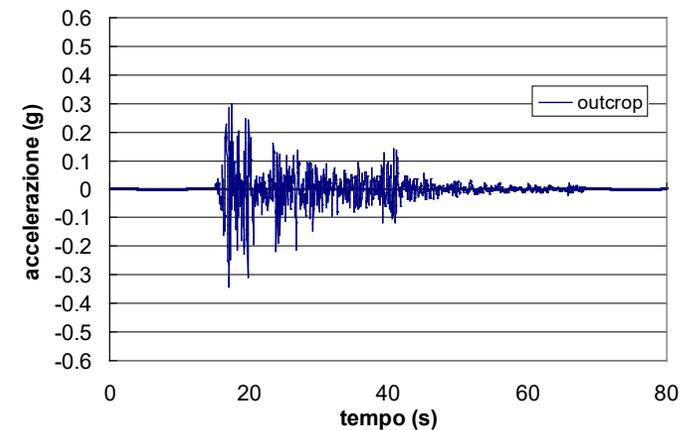
Fiume (Pieve Torrina)



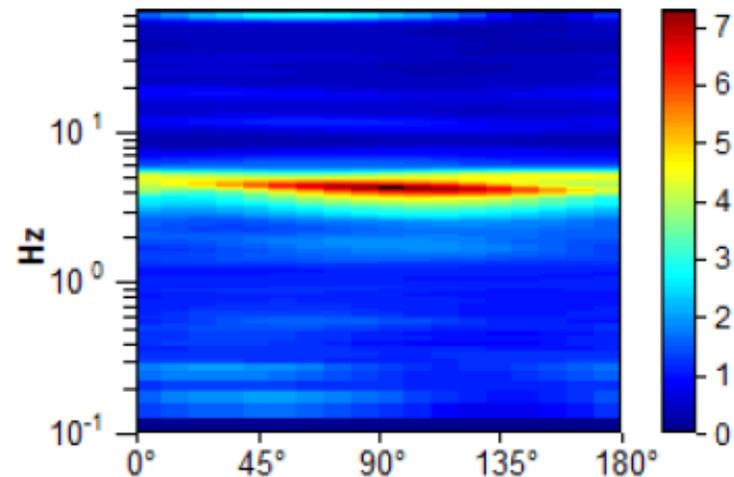
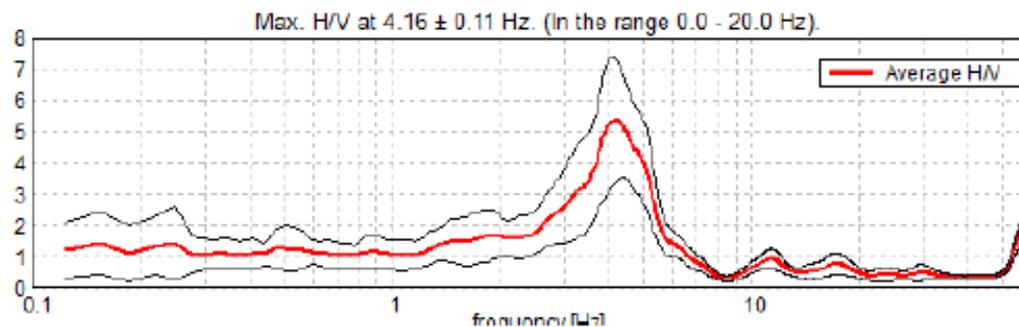
Classica condizione di amplificazione stratigrafica



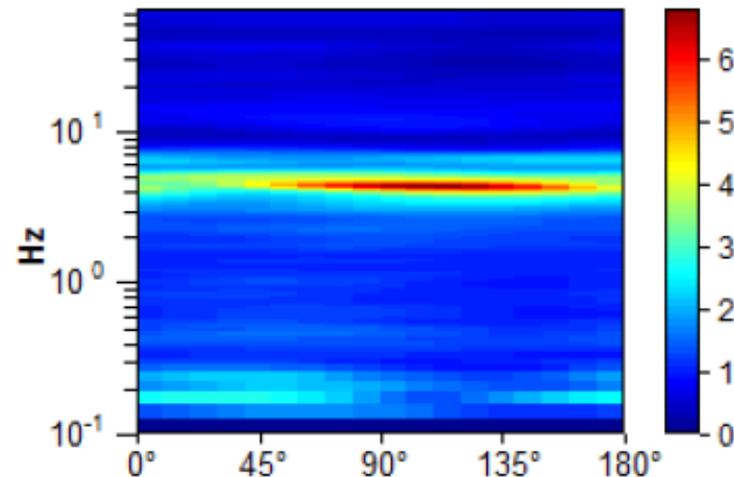
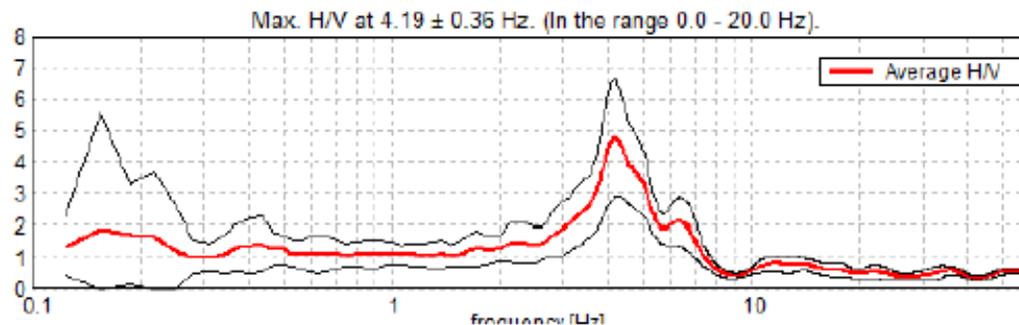
(a)



Fiume (Pieve Torrina)



T1

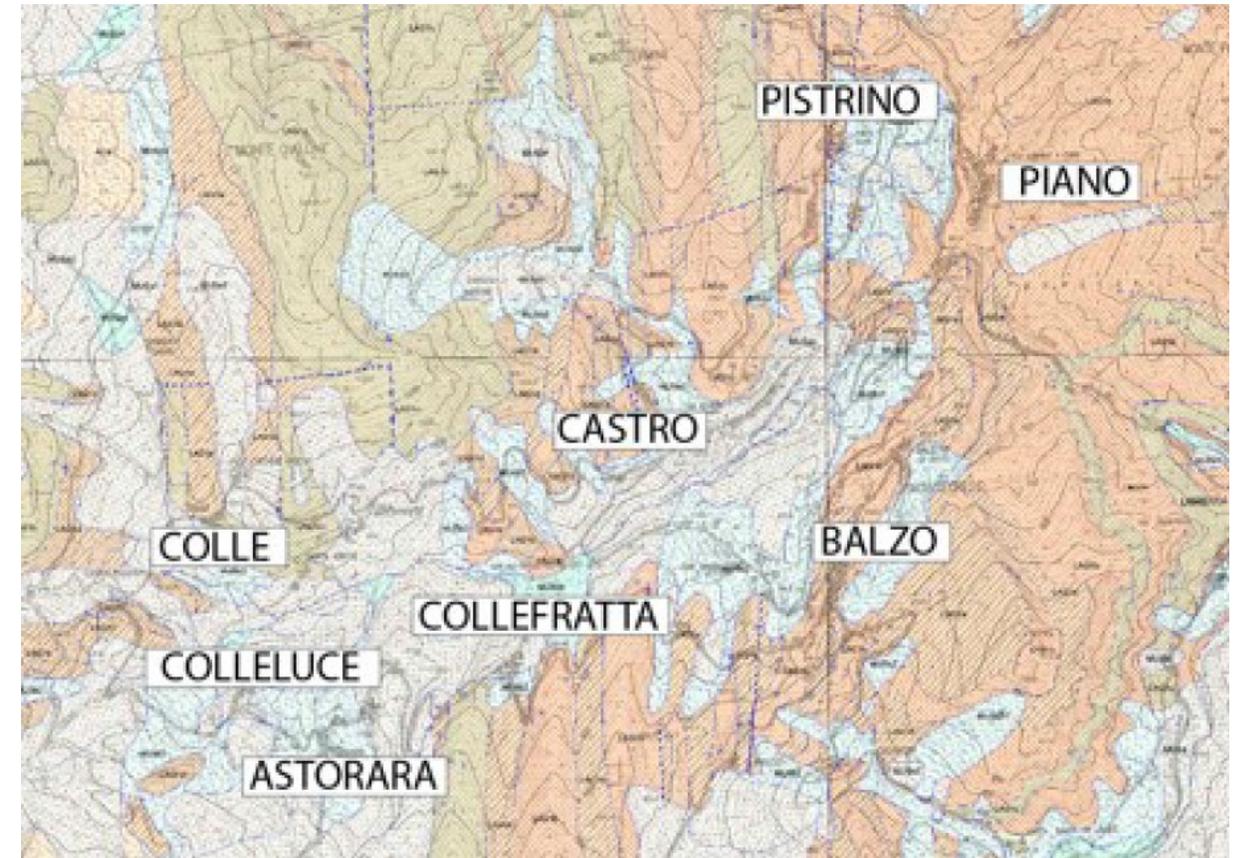
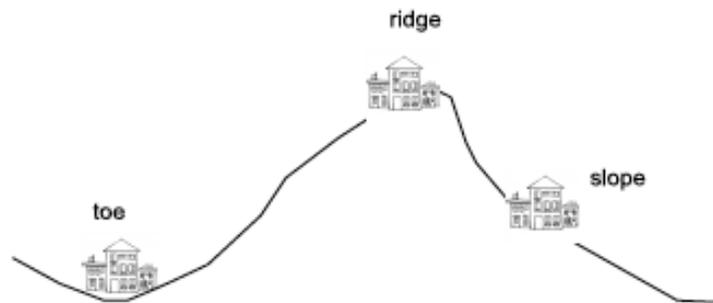


T2

Valutazioni speditive con analisi delle vibrazioni ambientali (tecnica HVSR) che mostrano condizioni di risonanza a 4Hz ca. ($T=0,25s$)

Comune di Montegallo

#	Hamlet	Geological setting	Active landslides	Topographic features (see Fig. 5.81)	Structures (see Table 5.22)	Average damage level
1	Astorara	Laga Flysch, pelitic-arenaceous facies**	no	slope	P13-P14	D0-D1
2	Balzo	Laga Flysch, pelitic-arenaceous facies	no	ridge	-	-
3	Castro	Laga Flysch, pelitic-arenaceous facies	yes	ridge	P15-P18	D3-D4
4	Colle	Laga Flysch, arenaceous facies	no*	slope	P01- P03	D2-D3
5	Collefratte	eluvial-colluvial deposits	yes	ridge	P19-P20	D2-D3
6	Colleluce	eluvial-colluvial deposits	yes	slope	P21-P22	D1-D2
7	Piano	Laga Flysch, pelitic-arenaceous facies	no	toe	P10-P11	D0-D1
8a	Pistrino (lower part)	eluvial-colluvial deposits**	yes	slope	P04-P06	D2-D3
8b	Pistrino (upper part)	eluvial-colluvial deposits**	yes	slope	P07-P09	D0-D1
9	Propezzano	Laga Flysch, arenaceous facies	no	ridge	P12	-



Comune di Montegallo



P10 (Piano)



P11 (Piano)

Piano: D0 dopo entrambe le scosse principali (anche per strutture molto vulnerabili)



P05 (Castro)



P06 (Castro)

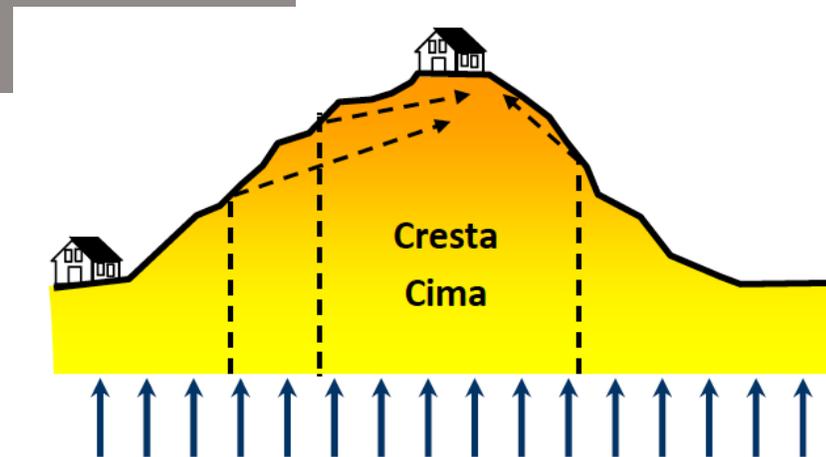
Castro: probabile amplificazione topografica/stratigrafica
D2-3 dopo agosto
D4-5 dopo ottobre



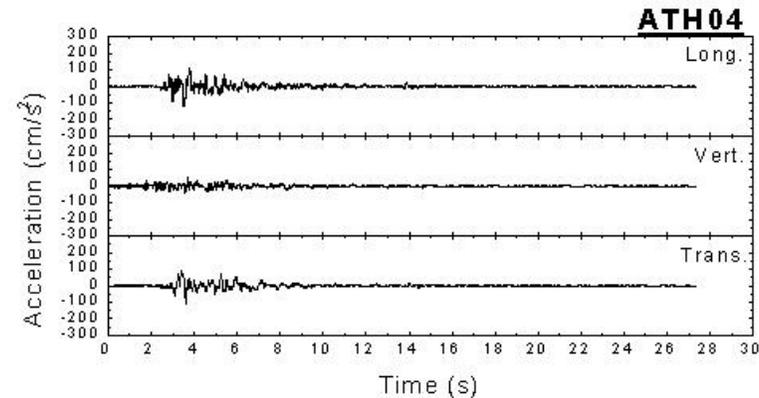
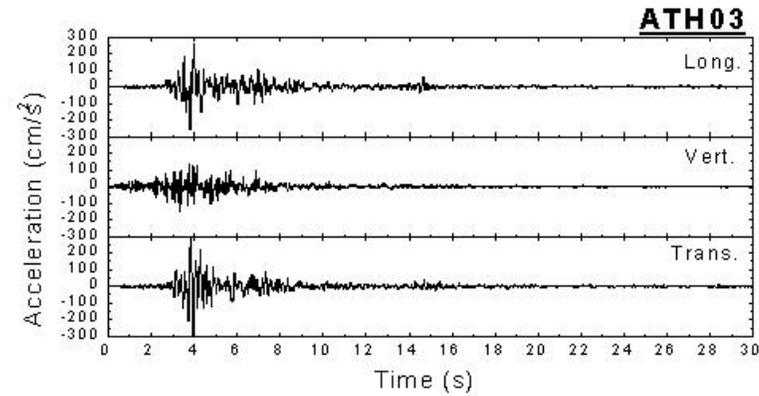
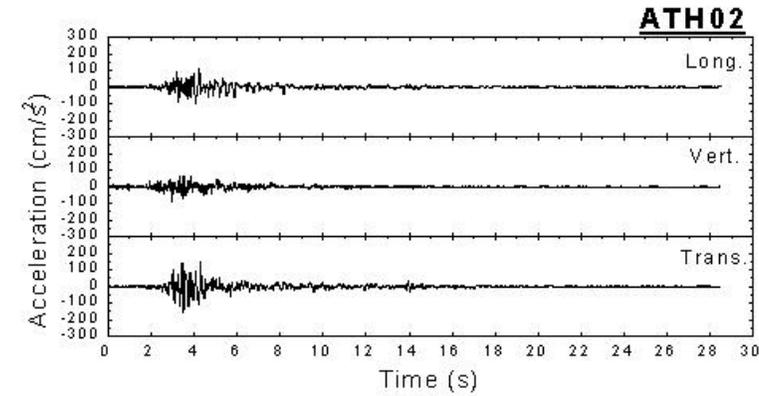
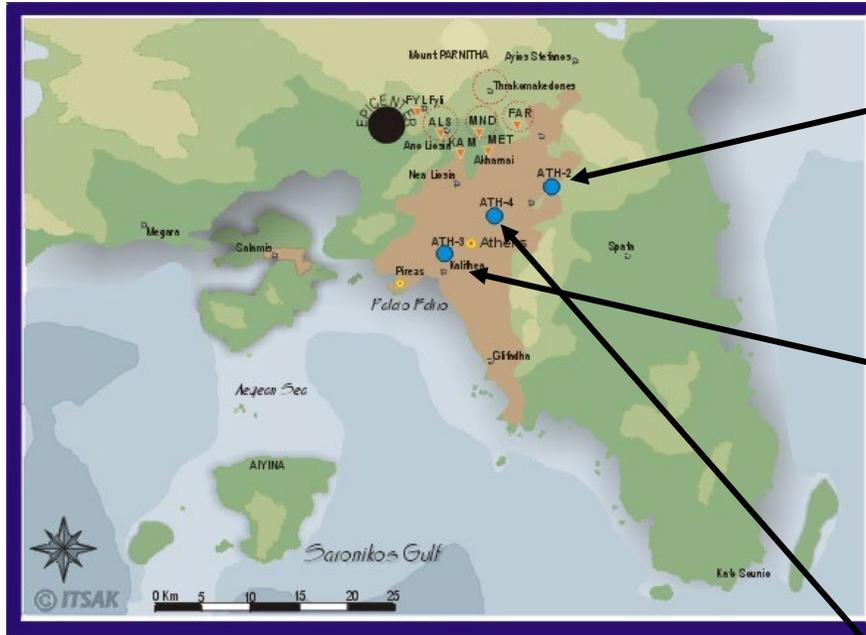
P17 (Pistrino)

Pistrino:
Danni differenziati a poche centinaia di metri di distanza
A Pistrino di sopra, anche strutture molto vulnerabili hanno subito pochi danni

Comune di Montegallo: Castro

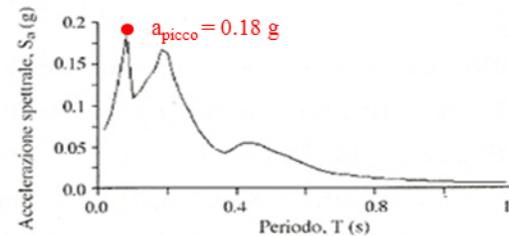
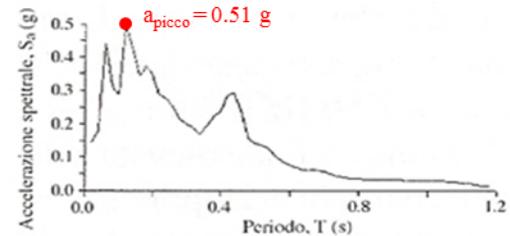
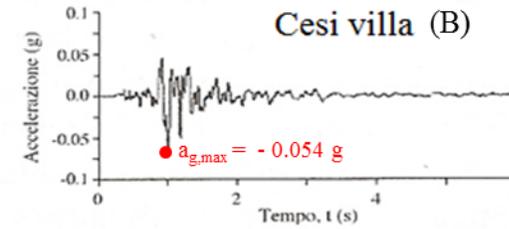
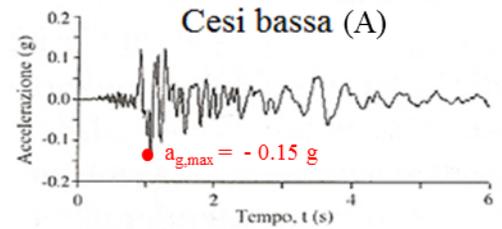
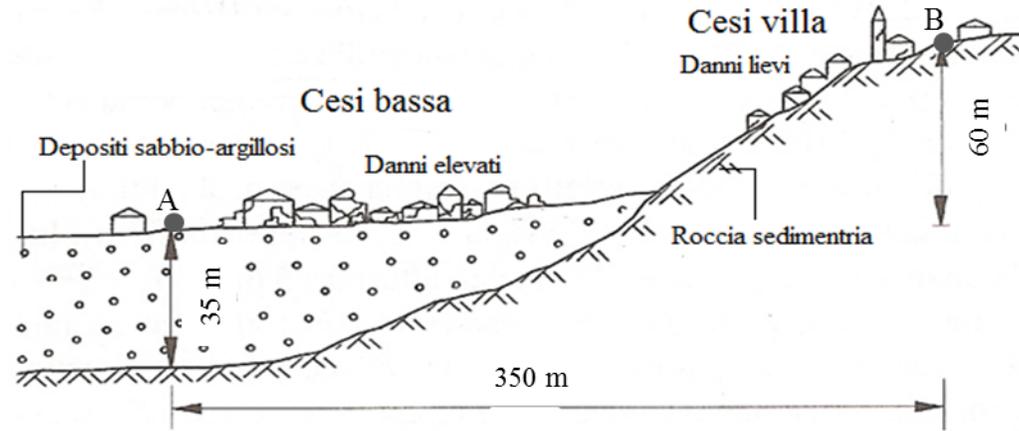


Amplificazione sismica locale



Registrazioni accelerometriche
del terremoto di Atene del 1999
($M=5.9$)

Risposta Sismica Locale



Lanzo et al., 2000

Confronto tra le risposte di sito di Cesi Bassa e Cesi Villa (sisma Umbro-Marchigiano 1997)

- accelerogrammi;
- spettri di risposta

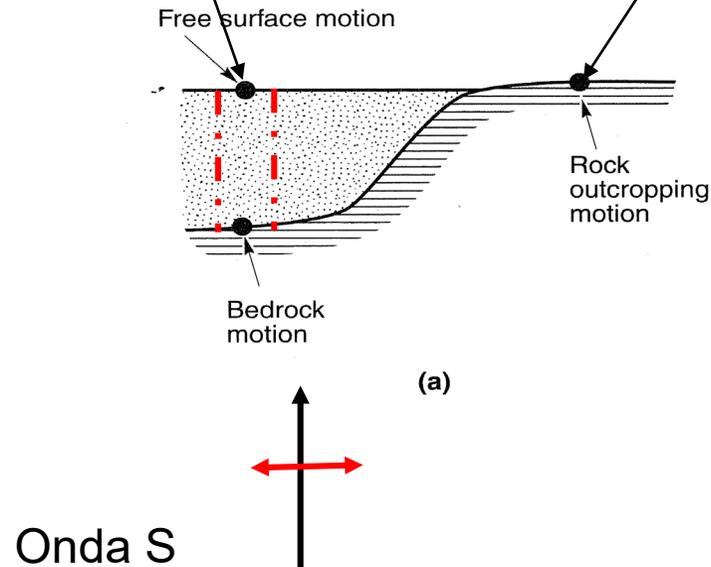
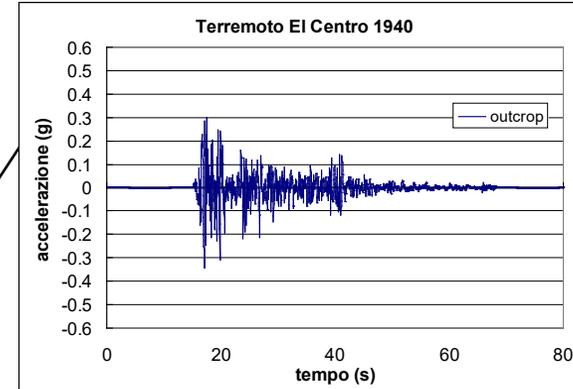
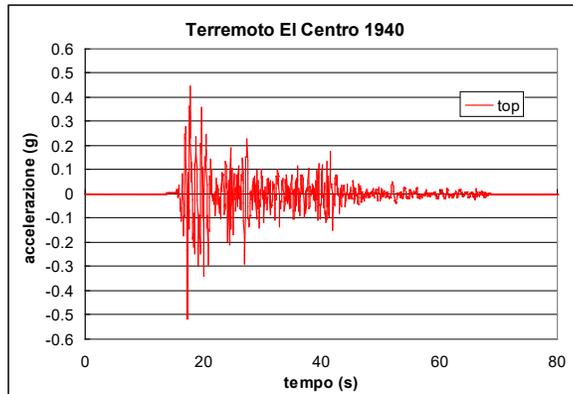
Studi di risposta sismica locale

NTC 2018 (3.2.2):

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.

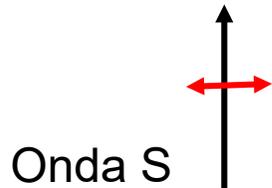
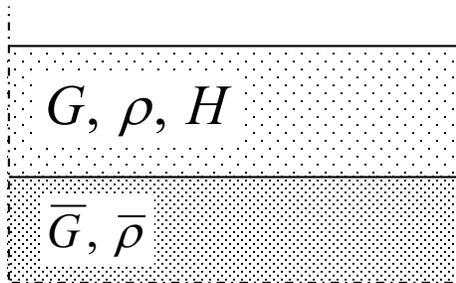
In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S .

Risposta sismica locale: metodi 1D



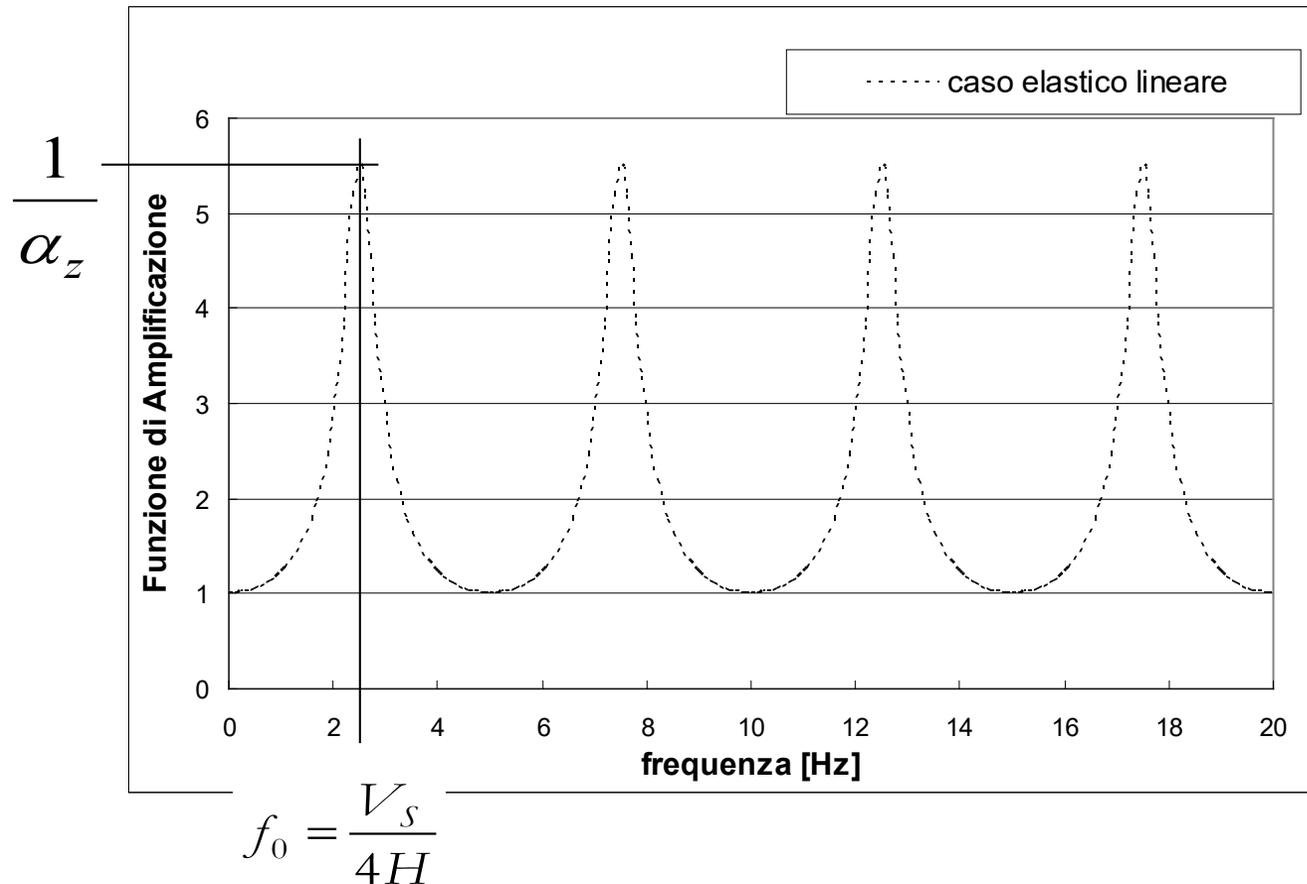
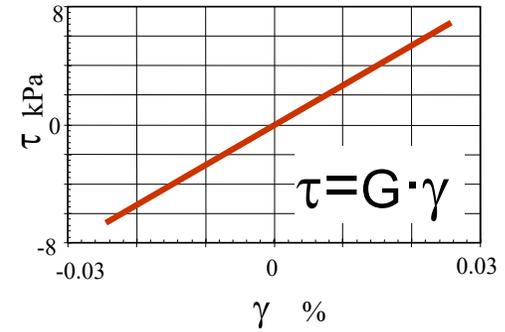
- Caratterizzazione dei depositi:
- Definizione della geometria (posizione del tetto del substrato sismico)
 - Comportamento meccanico dei terreni soggetti a carichi ciclici

Risposta sismica locale: Modello 1D elastico lineare

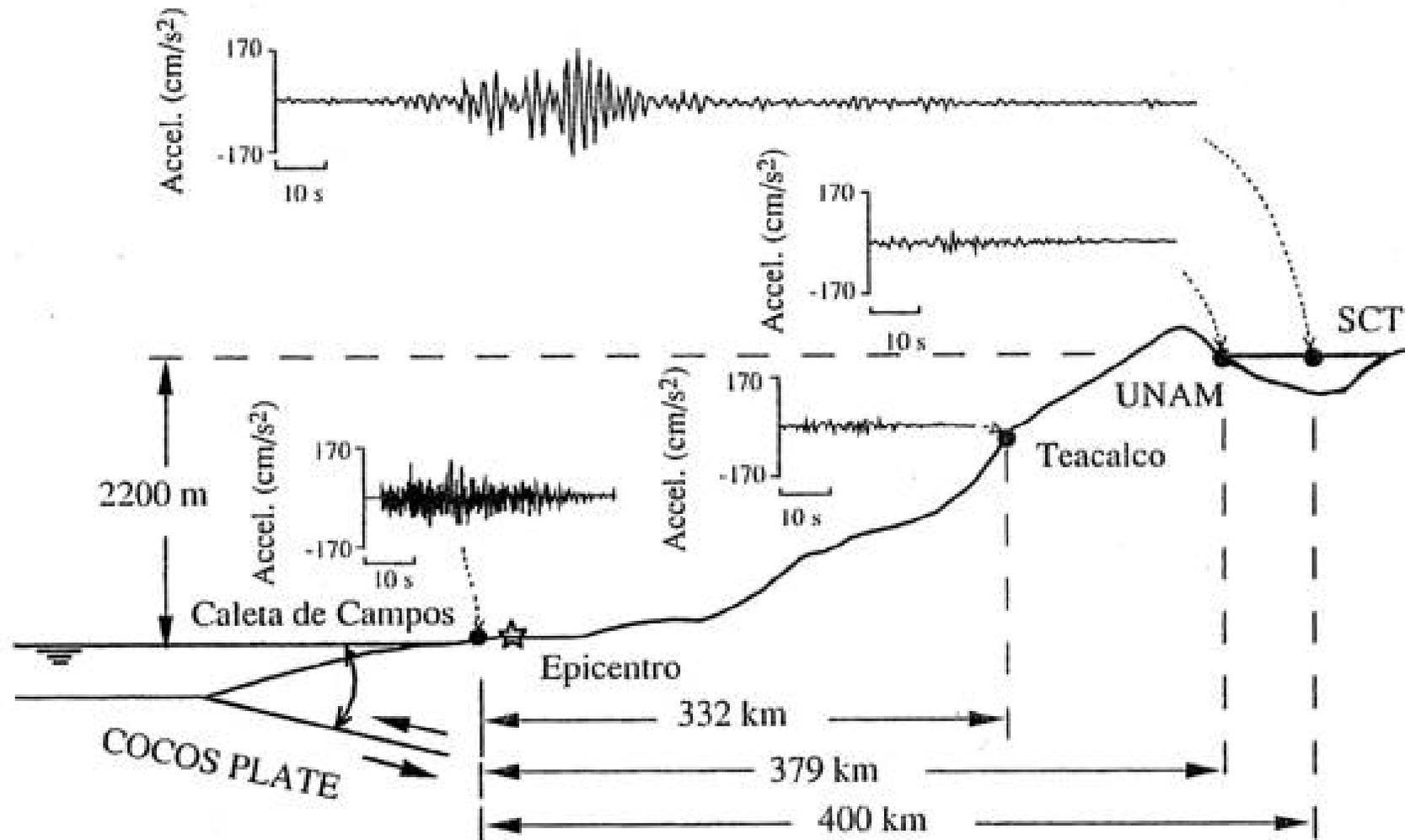


$$\alpha_z = \frac{\rho V_S}{\bar{\rho} \bar{V}_S}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \bar{V}_S = \sqrt{\frac{\bar{G}}{\bar{\rho}}}$$

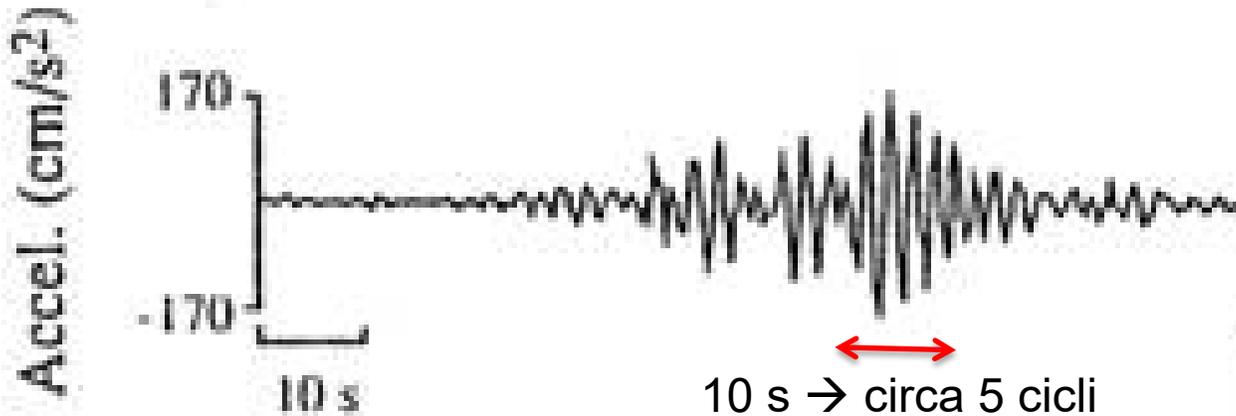


Città del Messico (Terremoto del 1985)

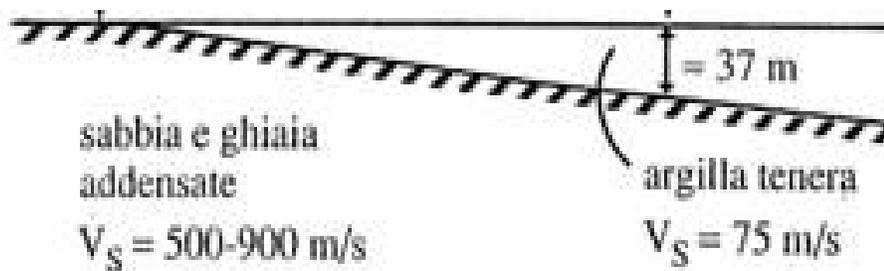


(Faccioli e Paolucci, 2005)

Città del Messico (Terremoto del 1985)



→ T=2s
Periodo dominante

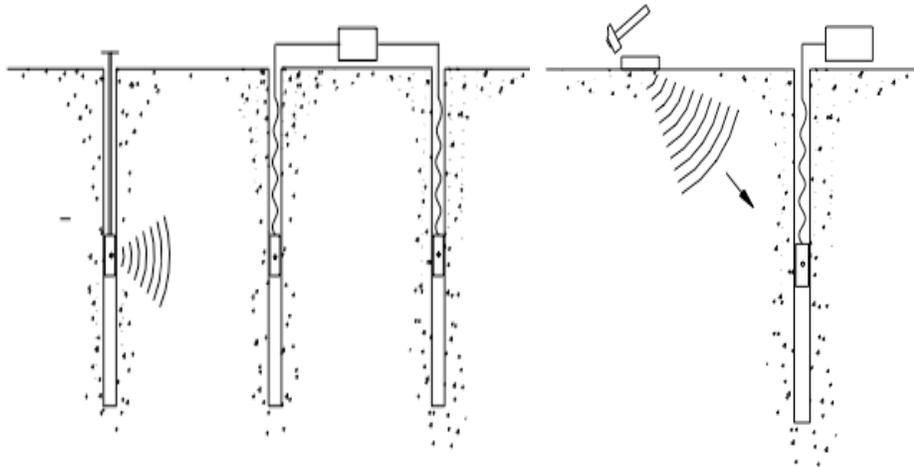


$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 37} = 0.5 \text{ Hz} \quad T_n = \frac{1}{f_n} = 2 \text{ s}$$

(inoltre: rapporto di smorzamento molto basso)

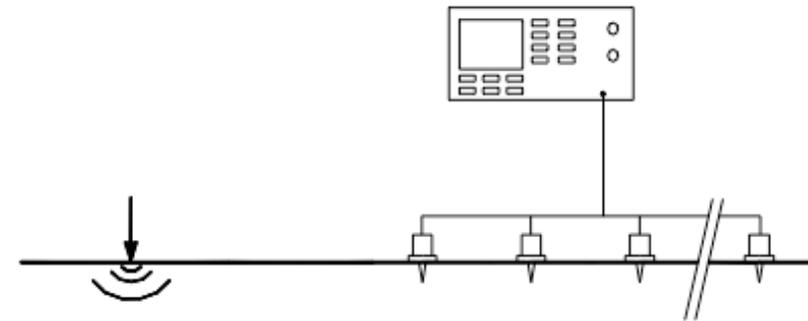
Prove geofisiche - Metodi Sismici

in foro (o invasivi)



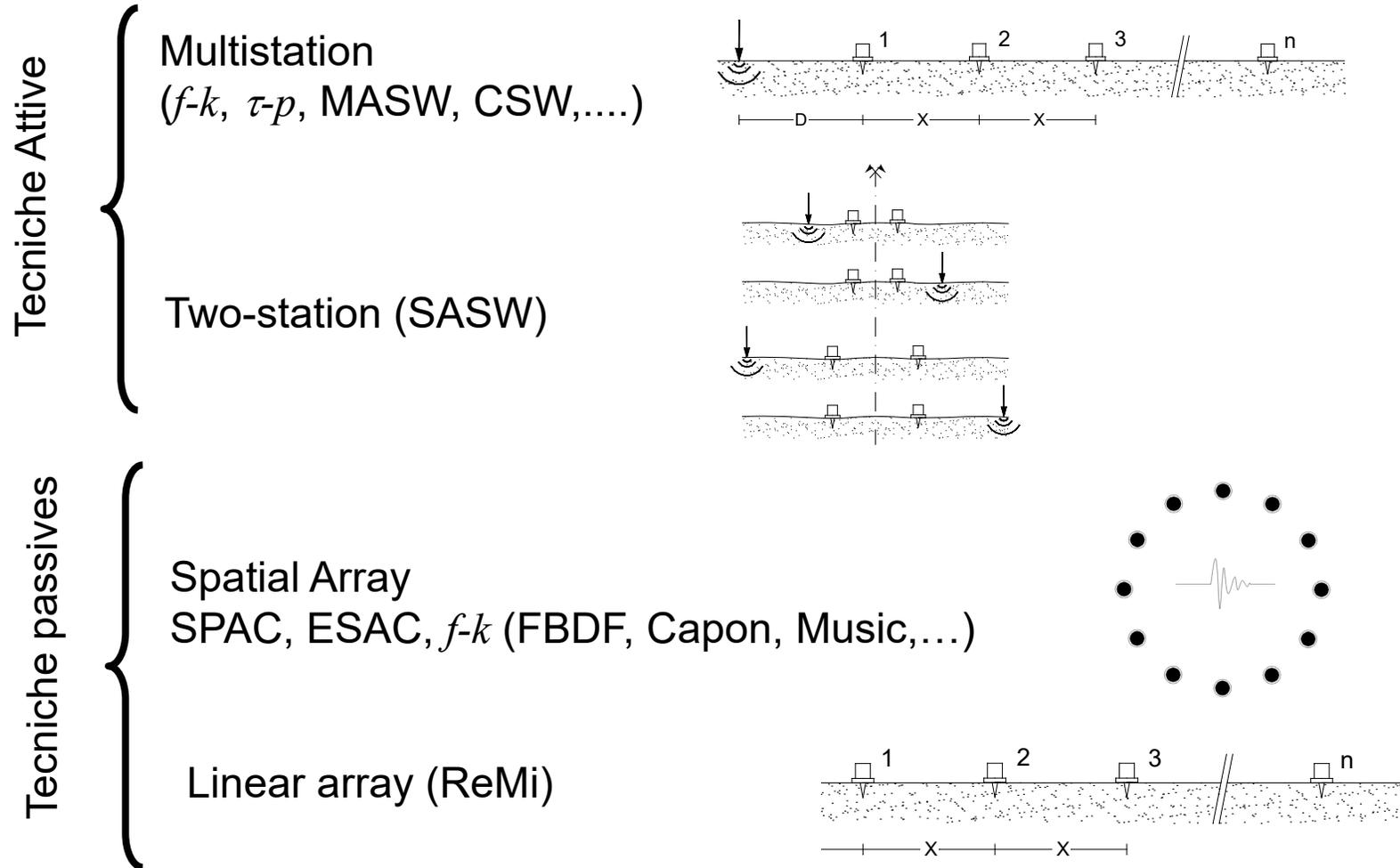
Cross-Hole Test (CHT)
Down-Hole Test (DHT)
Seismic Cone (SCPT)
Seismic Dilatometer (SDMT)
P-S Suspension Logging
Vertical Seismic Profiling (VSP)

di superficie (o non invasivi)



Surface Waves Methods SWM
(SASW, MASW, AVA)
Seismic Refraction
(P-waves or SH-waves)
Seismic Reflection
(P-waves or SH-waves)

Prove basate sull'analisi di onde superficiali (SWM)





ORIGINAL RESEARCH PAPER

Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project

Sebastiano Foti¹  · Fabrice Hollender² · Flora Garofalo¹ ·
Dario Albarello³ · Michael Asten⁴ · Pierre-Yves Bard⁵ ·
Cesare Comina⁶ · Cécile Cornou⁵ · Brady Cox⁷ ·
Giuseppe Di Giulio⁸ · Thomas Forbriger⁹ · Koichi Hayashi¹⁰ ·
Enrico Lunedei³ · Antony Martin¹¹ · Diego Mercerat¹² ·
Matthias Ohrnberger¹³ · Valerio Poggi¹⁴ · Florence Renalier¹⁵ ·
Deborah Sicilia¹⁶ · Valentina Socco¹

Received: 5 October 2016 / Accepted: 30 July 2017

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10518-017-0206-7>



a cura del Centro per la Microzonazione Sismica e le sue applicazioni

**Linee guida
per le buone pratiche
dell'analisi delle onde
superficiali**

Un prodotto del progetto InterPACIFIC



Collana a cura del Centro MS



Confronto tra prove invasive e non-invasive

Prove in foro

Prove SWM

Vantaggi

Misure dirette: interpretazione semplice ed accurata

Buona risoluzione anche per strati profondi

Standard di prova (CHT-DHT)

Informazioni aggiuntive sulla stratigrafia dal foro di sondaggio o dalla penetrazione della sonda CPT-DMT

Costi ridotti e flessibilità in termini di tempi di esecuzione e localizzazione

Non intrusivi (importante per caratterizzazione di discariche o siti contaminati)

Proprietà medie (comportamento dinamico globale del deposito di terreno)

Caratterizzazione di vaste aree

Svantaggi

Costi

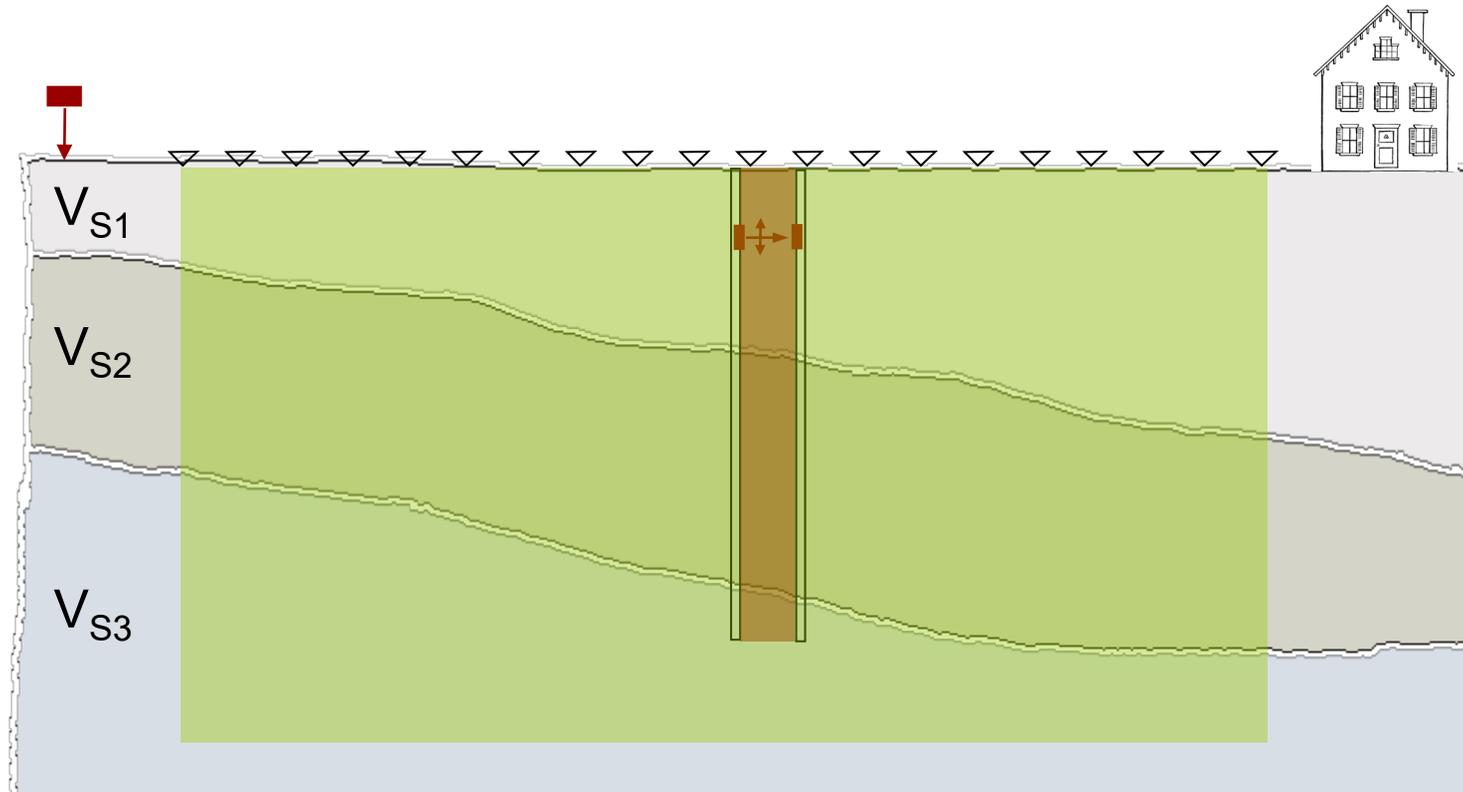
Necessità di pianificazione anticipata (esecuzione fori)

Misura locale

Interpretazione complessa (misure indirette basate su processi di inversione e/o elaborazione dati onerosa)

Accuratezza e risoluzione in profondità

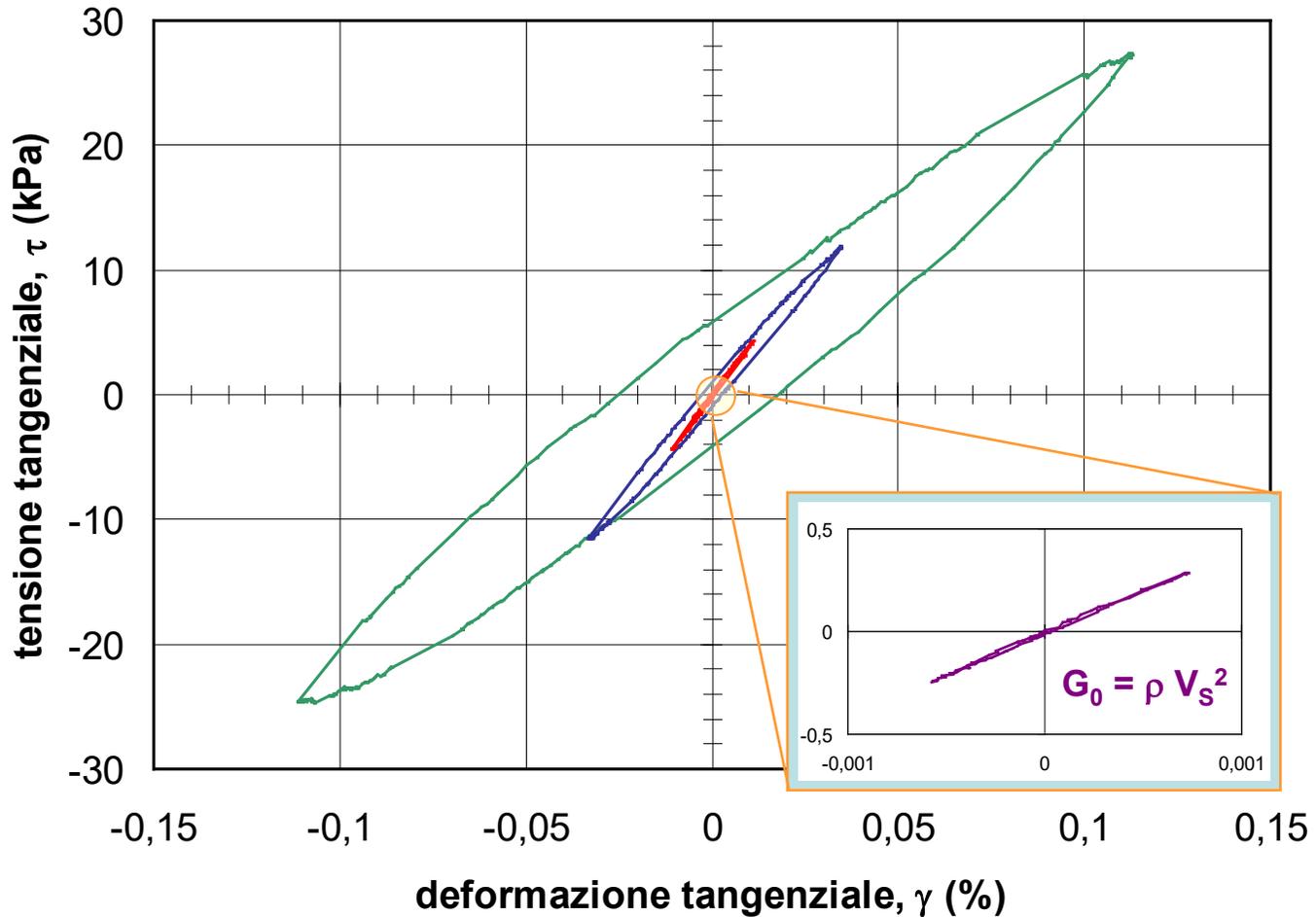
Confronto tra prove invasive e non-invasive



Evidenza sperimentale della natura del legame τ - γ

All'aumentare del livello di sollecitazione, il ciclo tensione-deformazione:

- si inclina sempre di più \rightarrow la non linearità si accentua
- si allarga progressivamente \rightarrow la dissipazione di energia aumenta



(cortesia prof. Silvestri)

Rappresentazione del comportamento ciclico dei terreni

In condizioni di carico ciclico possono definirsi i c.d. parametri equivalenti:

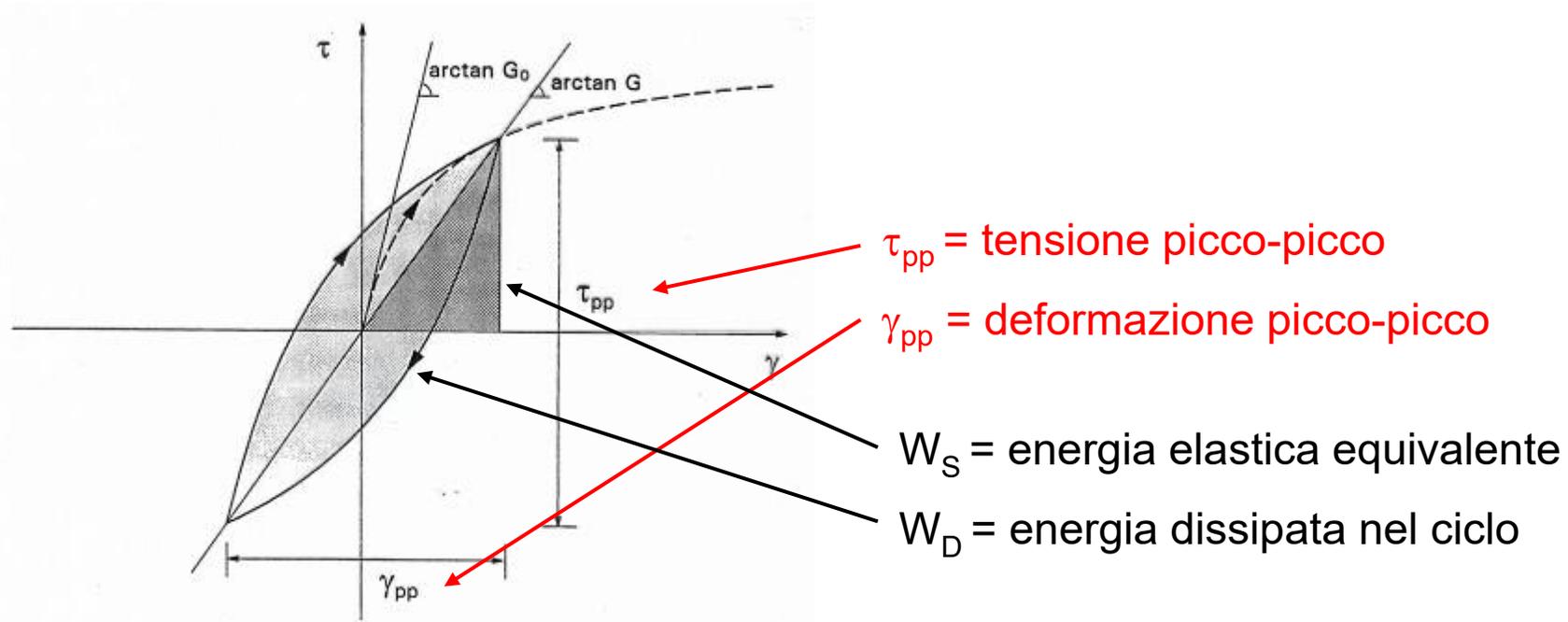
G = modulo di taglio

($G_0 =$ rigidezza a basse deformazioni $= \rho V_S^2$)

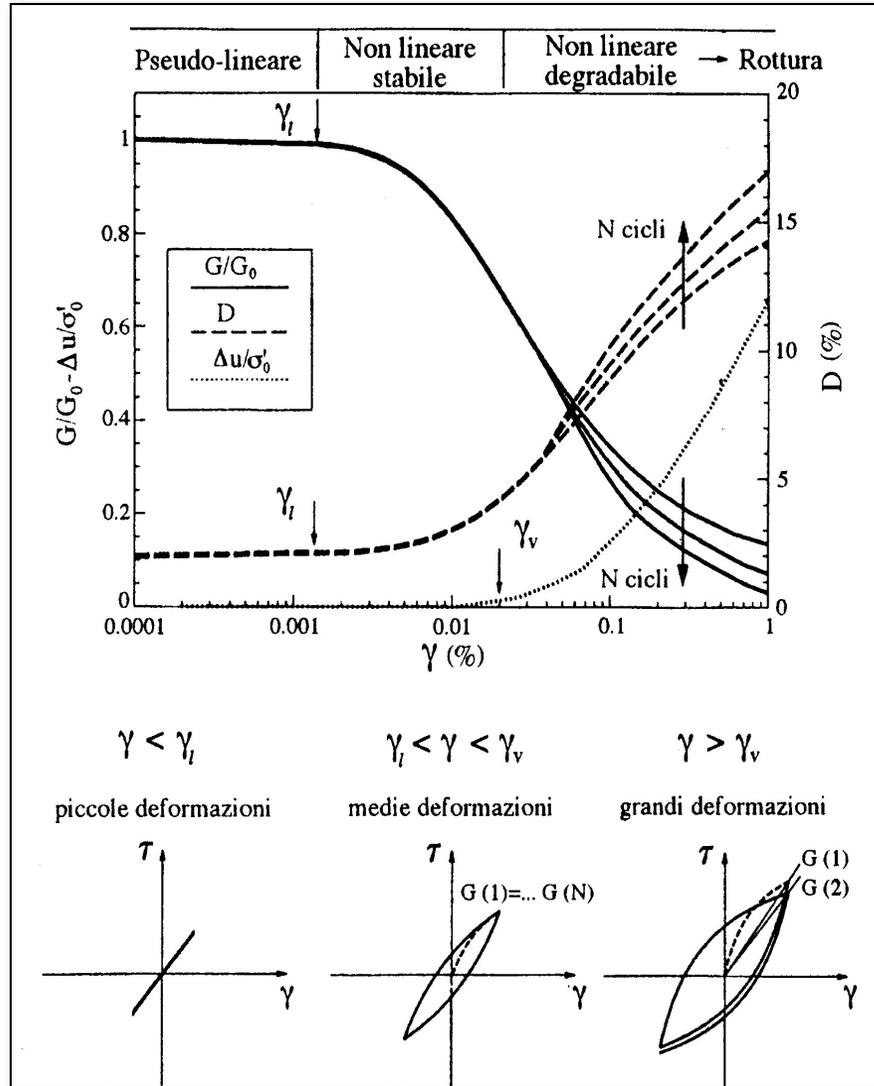
$$G = \frac{\tau_{pp}}{\gamma_{pp}}$$

D = fattore di smorzamento (*damping*)

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$



Curve di variazione del modulo e del rapporto di smorzamento



(Lanzo e Silvestri, 1999)

Threshold Strain Values (Valori di Soglia) (Vucetic, 1994)

Praticamente relazione sforzi deformazioni lineare. Poca dissipazione

γ_t^l →

Comportamento non lineare. Poca influenza del numero di cicli (risposta stabile). Deformazioni plastiche limitate.

γ_t^v →

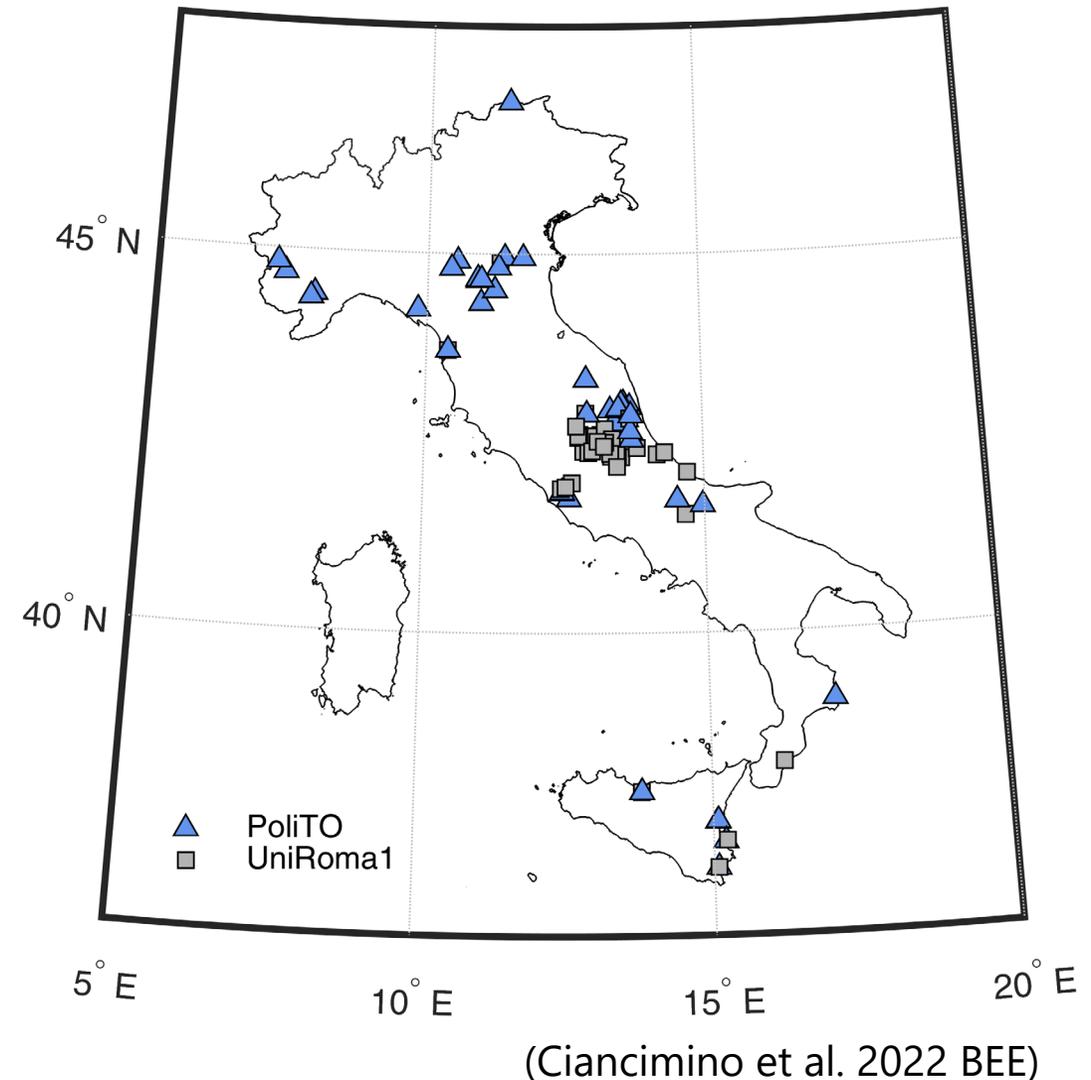
volumetrica

Grandi deformazioni plastiche (deformazioni volumetriche permanenti e accumulo sovrappressione interstiziale). Cicli non più stabili.

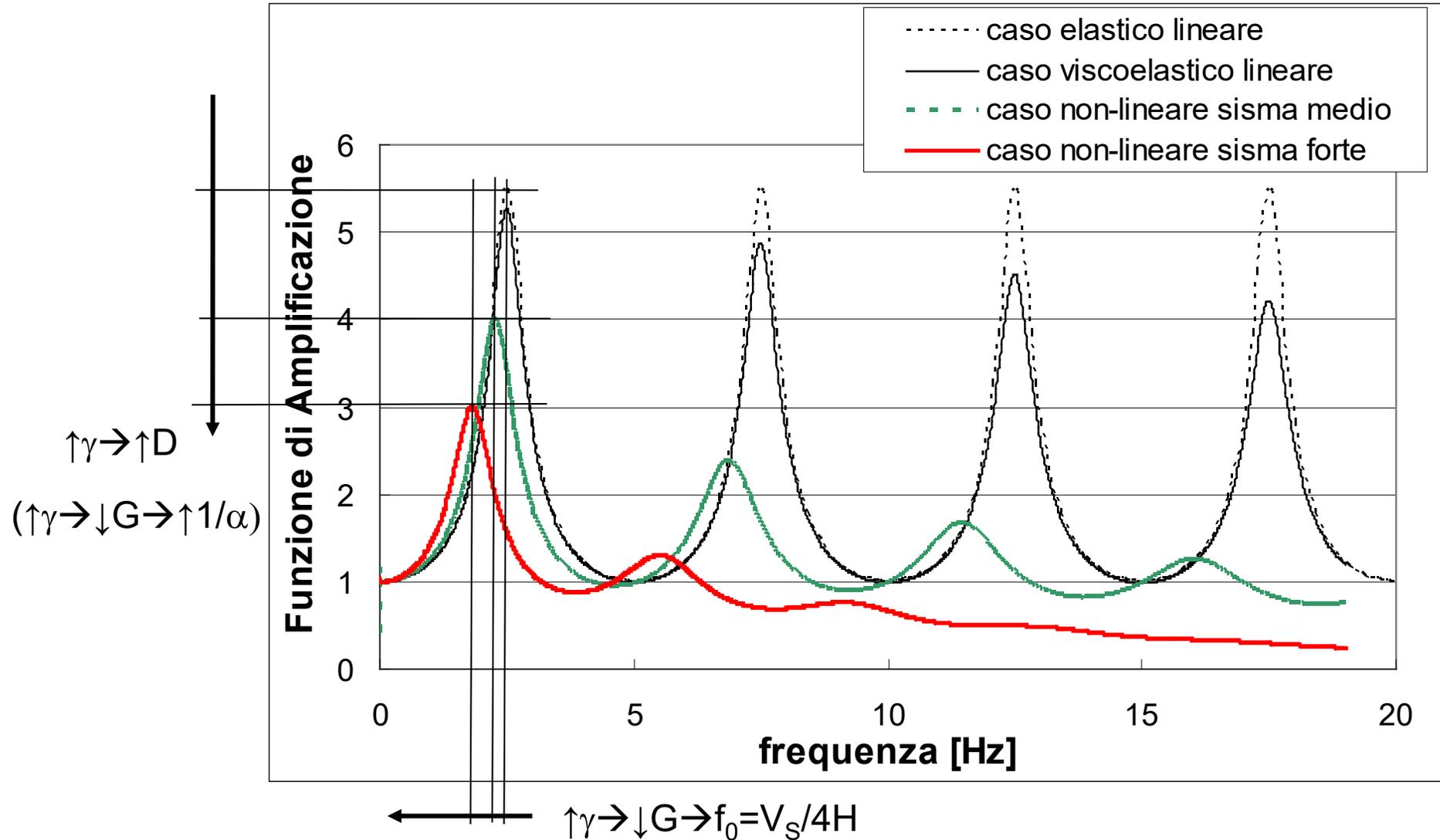
Database di prove dinamiche e cicliche

Include i risultati di prove cicliche e dinamiche su terreni naturali in Italia:

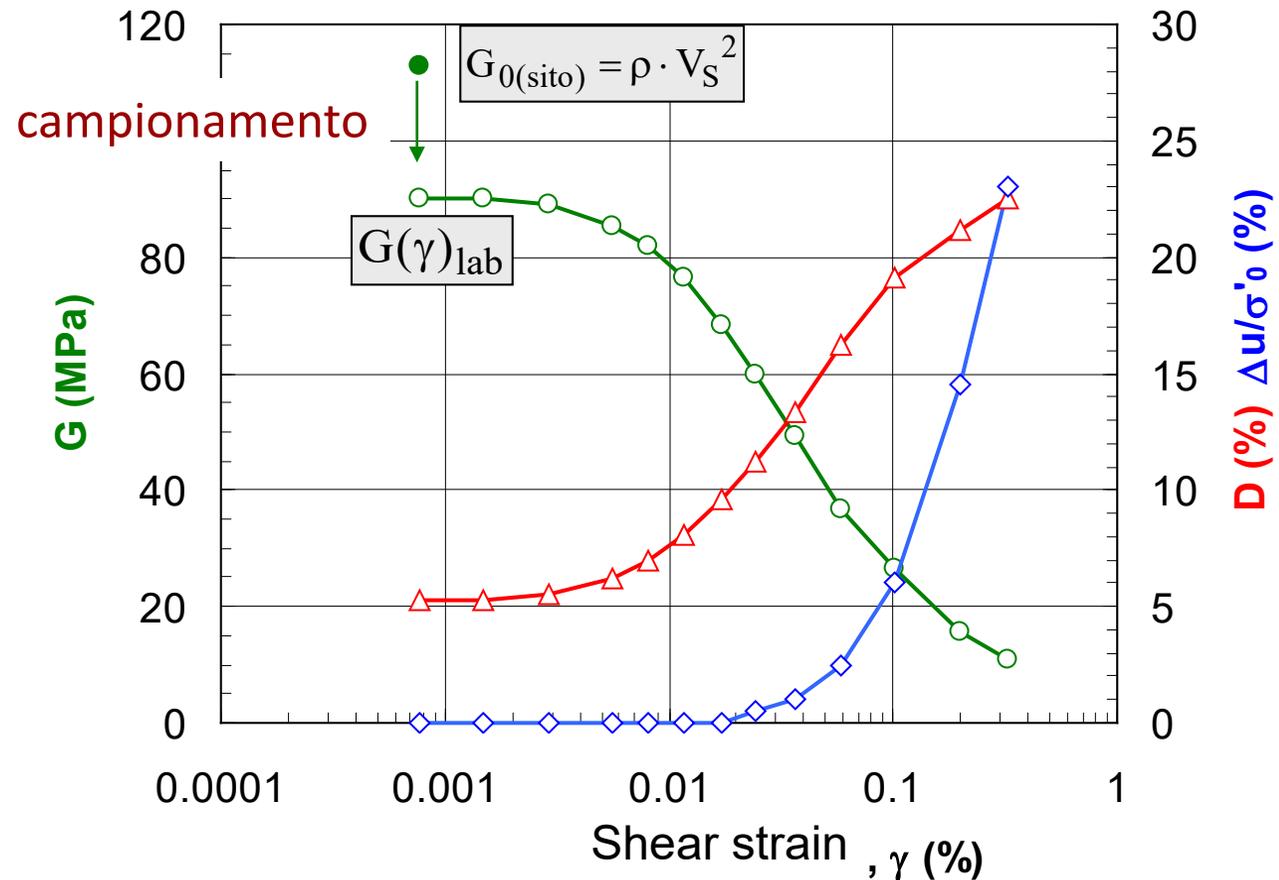
- **252 prove di laboratorio: 110 Colonna Risonante (PoliTO) e 142 Taglio semplice ciclico (UniRoma1)**
- Argille e limi a bassa/normale attività
- $0 \% < PI < 60 \%$
- $20 \text{ kPa} < p' < 1100 \text{ kPa}$
- $7 \text{ MPa} < G_0 < 340 \text{ MPa}$



Modello 1D: effetto della non-linearità

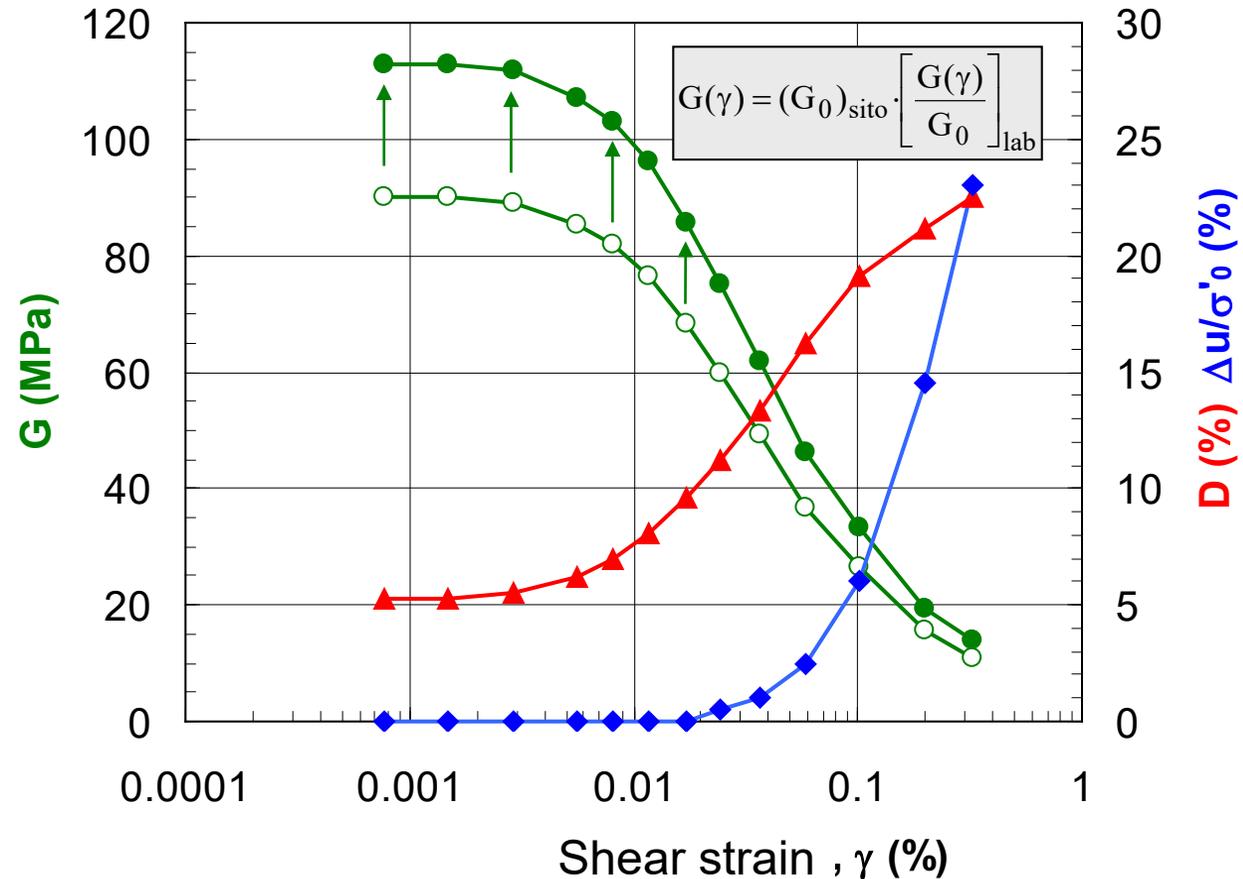


Strategia di caratterizzazione



- G_0 dalle prove geofisiche in sito
- $G/G_0(\gamma)$ e $D(\gamma)$ da prove di laboratorio

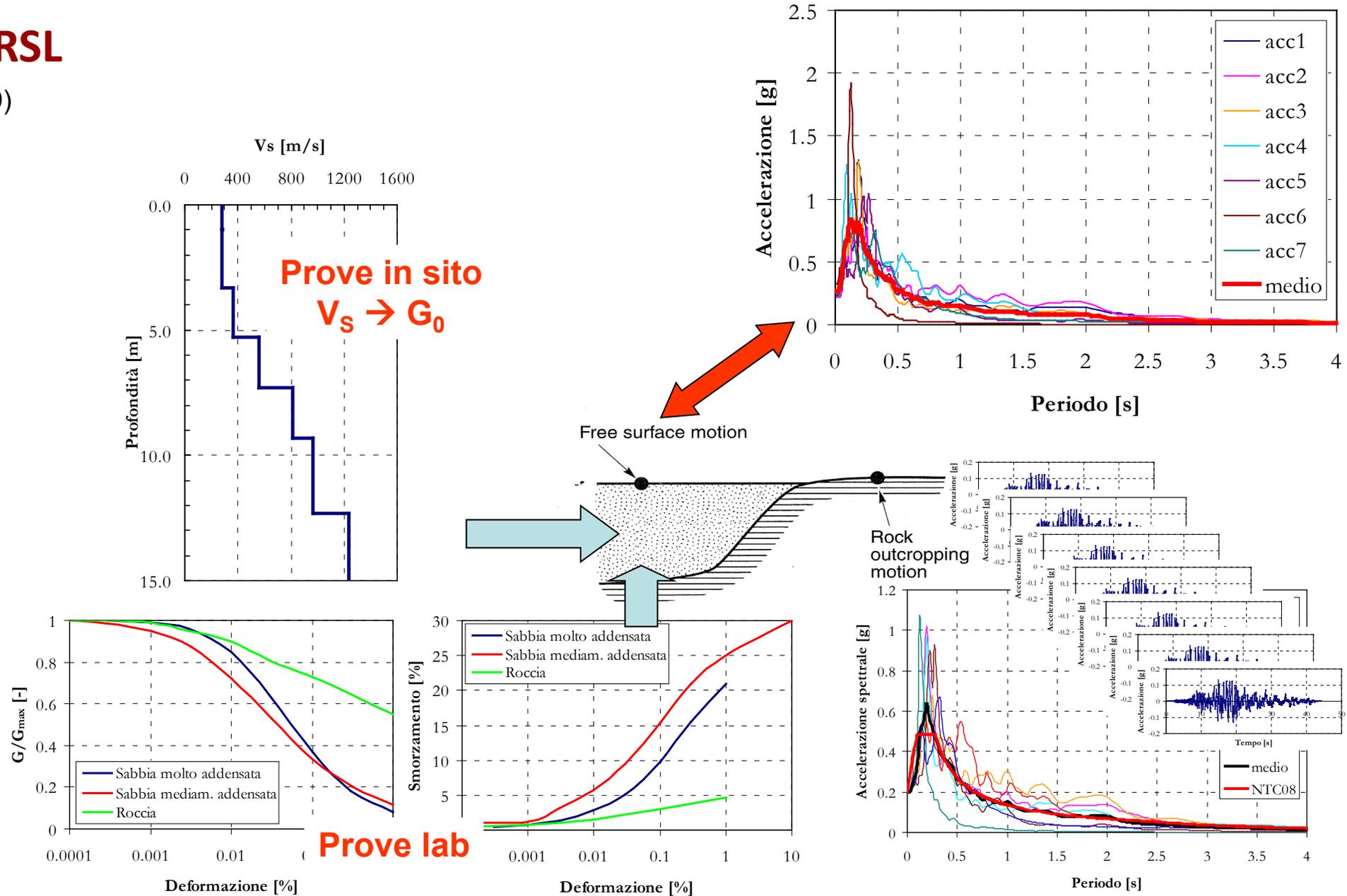
Strategia di caratterizzazione



- G_0 dalle prove geofisiche in sito
- $G/G_0(\gamma)$ e $D(\gamma)$ da prove di laboratorio

Esempio RSL

(Lai et al., 2009)



Categorie di sottosuolo

NTC 2018 (3.2.2):

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 .

Categorie di sottosuolo

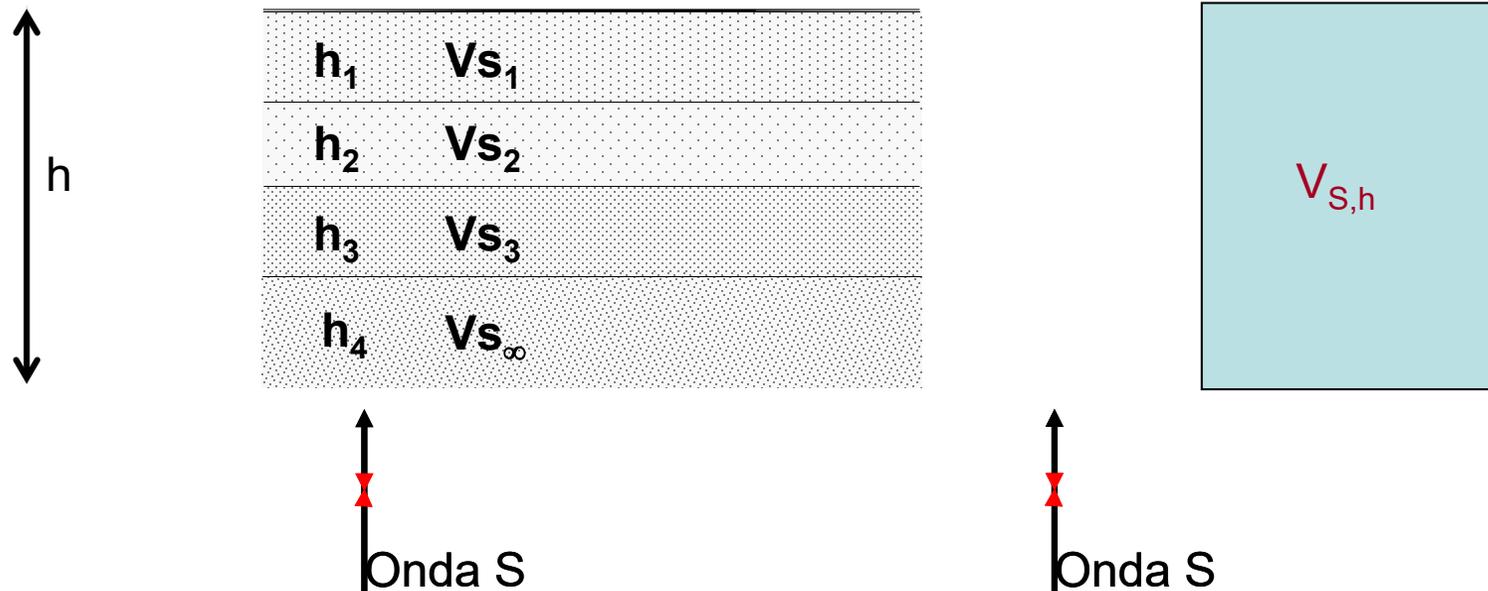
Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , 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.
C	<i>Deposit</i> i 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.
D	<i>Deposit</i> i 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.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Stima semplificata RSL: $V_{S,h}$

$$V_{S,h} = \frac{h}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Rappresenta la velocità media in termini di lentezza, basata sul tempo che l'onda di taglio impiega a percorrere i 30 m



NB: h a partire dal piano di imposta della fondazione

Stima semplificata RSL: $V_{S,30}$

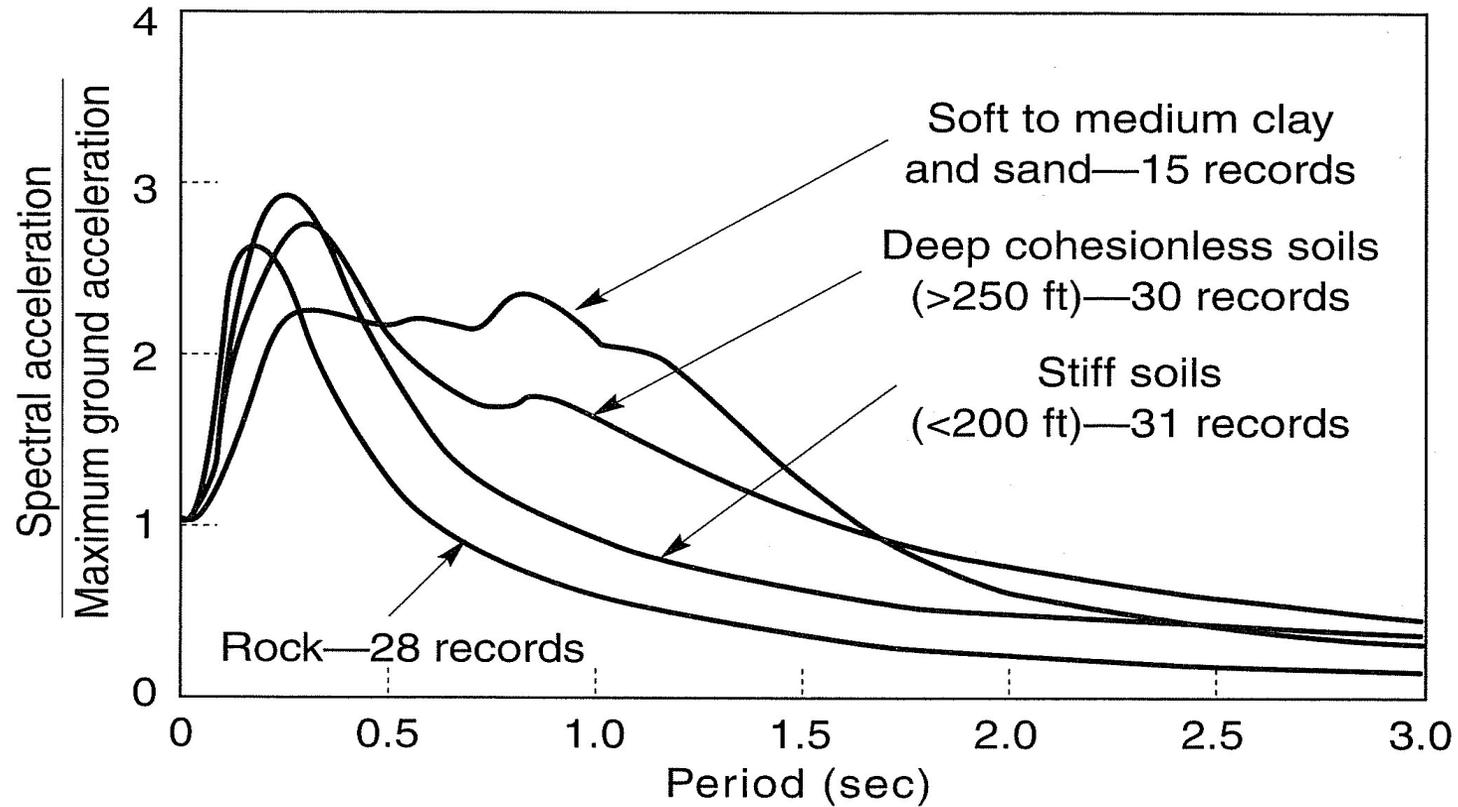
$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

Rappresenta la velocità media in termini di lentezza, basata sul tempo che l'onda di taglio impiega a percorrere i 30 m



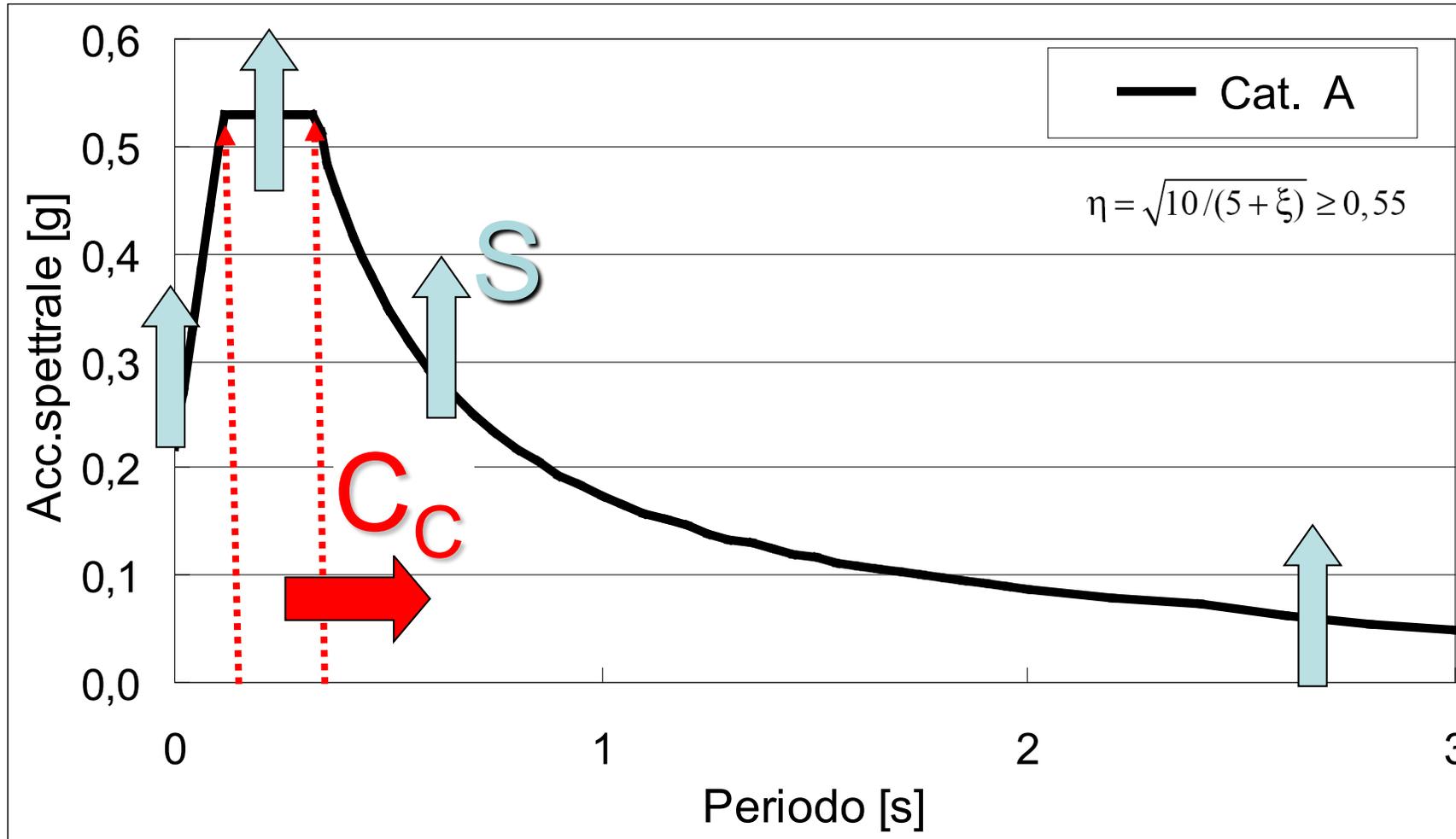
NB: 30m a partire dal piano di imposta della fondazione

Spettri di risposta per tipologie di sottosuolo



(Seed et al., 1976)

Spettro di risposta elastico (NTC2018)



Fattori di amplificazione stratigrafica

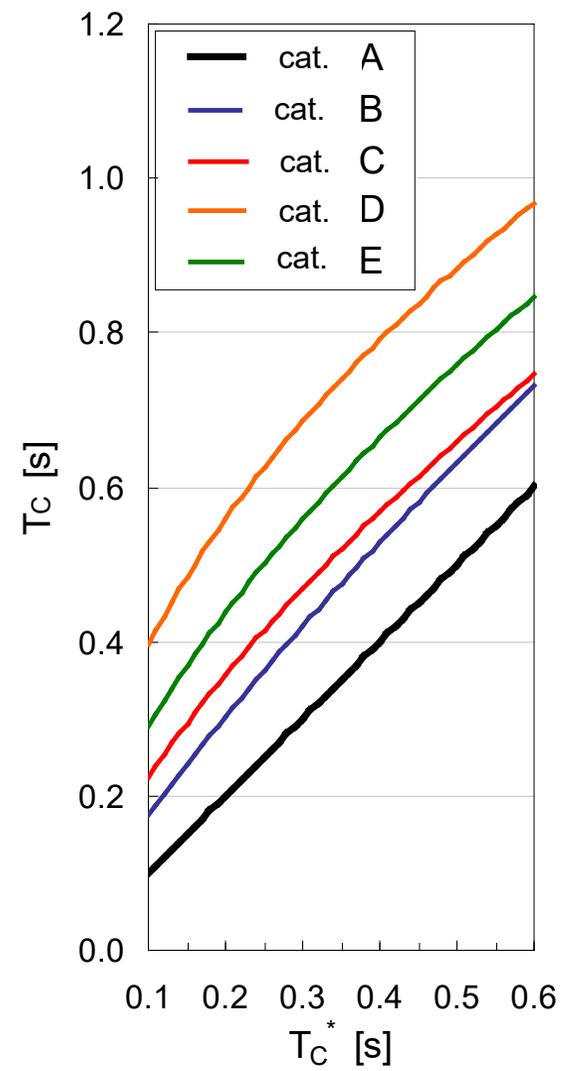
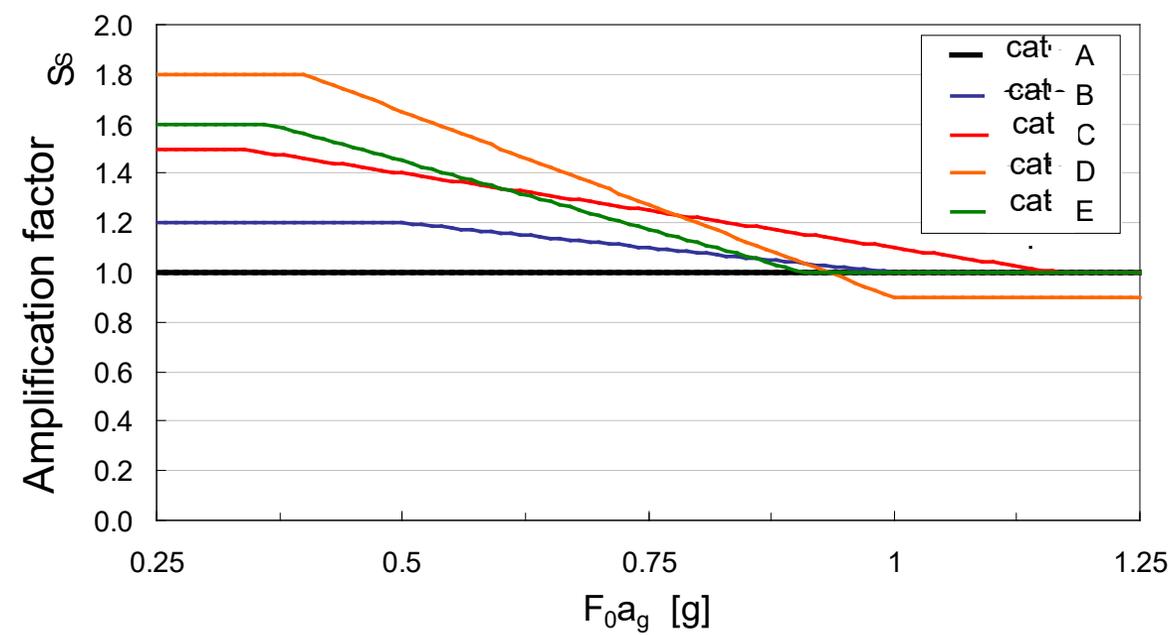
Categoria sottosuolo	S_s	C_c
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_{fg}}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_{fg}}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_{fg}}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_{fg}}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

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

Fattori di amplificazione stratigrafica

$$S_S = f(V_{S,30}; F_0 a_g / g) [0.90 \div 1.8]$$

Influenza della non linearità della risposta



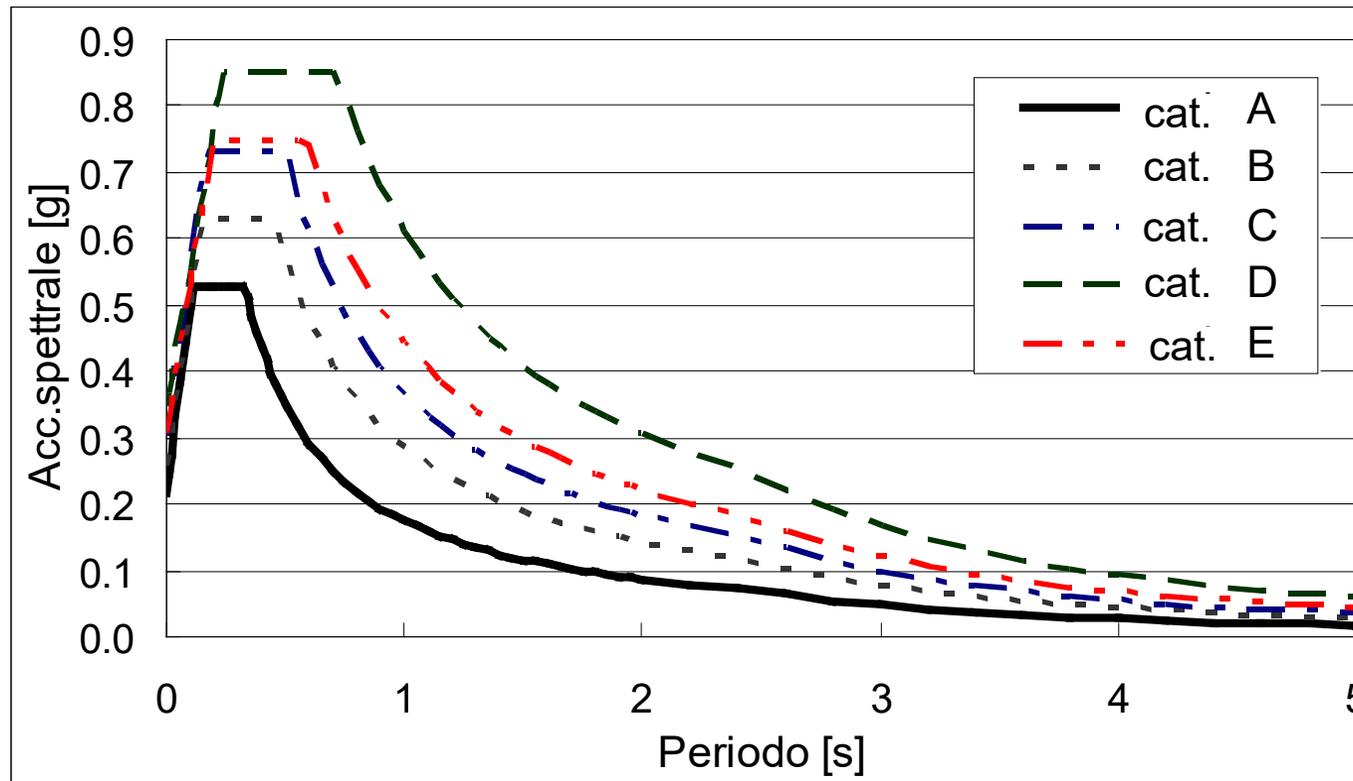
Esempio NTC 2018: Udine

a_g F_0 Tc^*
0.216 **2.45** **0.33**

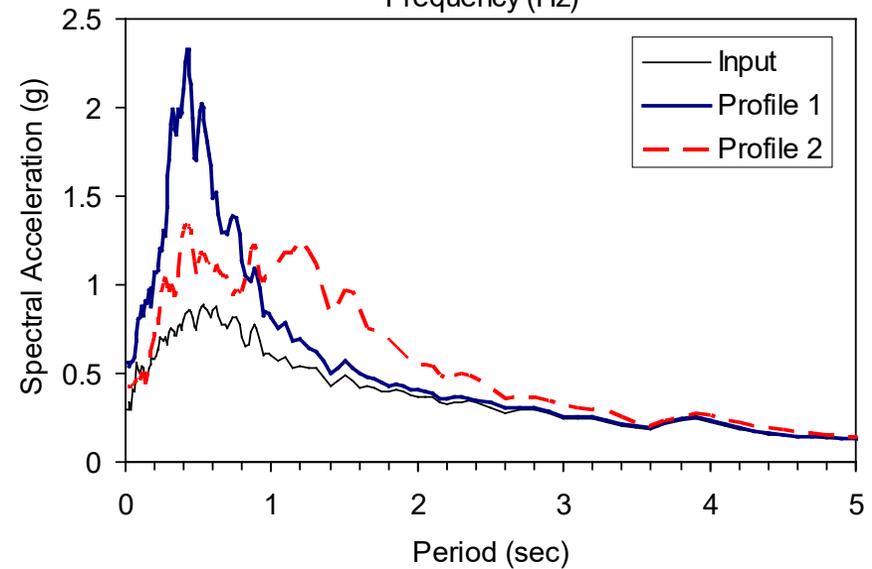
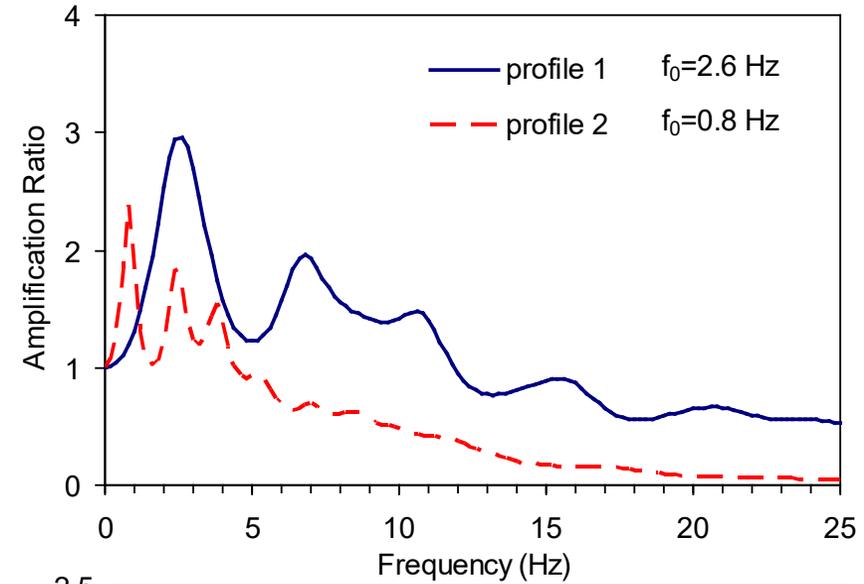
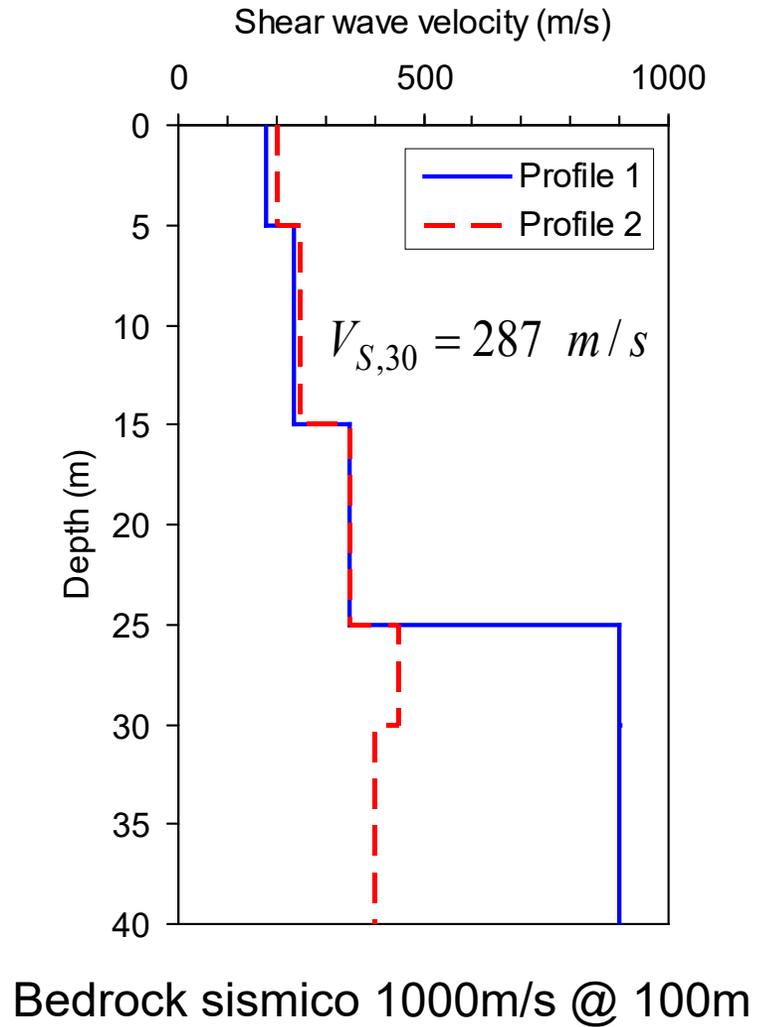
$$S_S \cdot a_g$$

Spettri di risposta elastici

Categoria sottosuolo	S_S
A	1
B	1.19
C	1.38
D	1.61
E	1.42

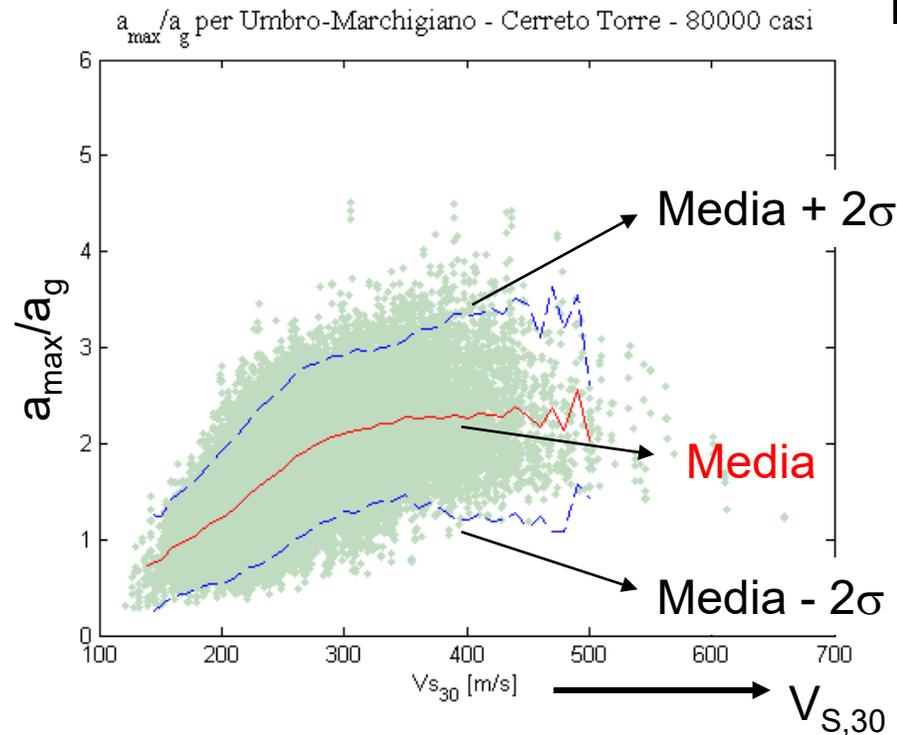


Confronto 2 siti con stessa $V_{S,30}$

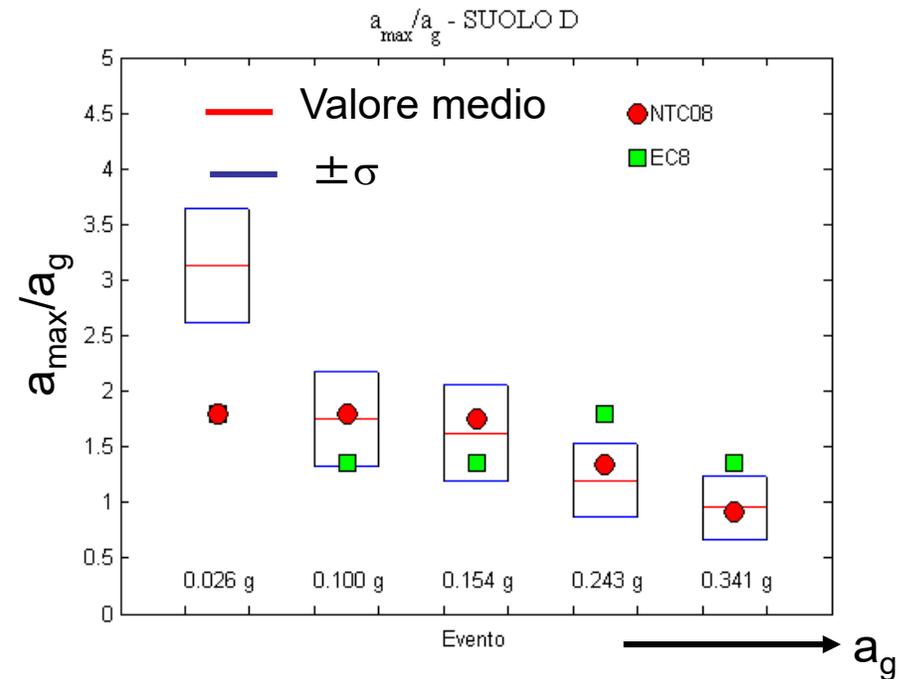


Analisi parametriche RSL vs. approccio semplificato

(Pettiti e Foti, 2013)

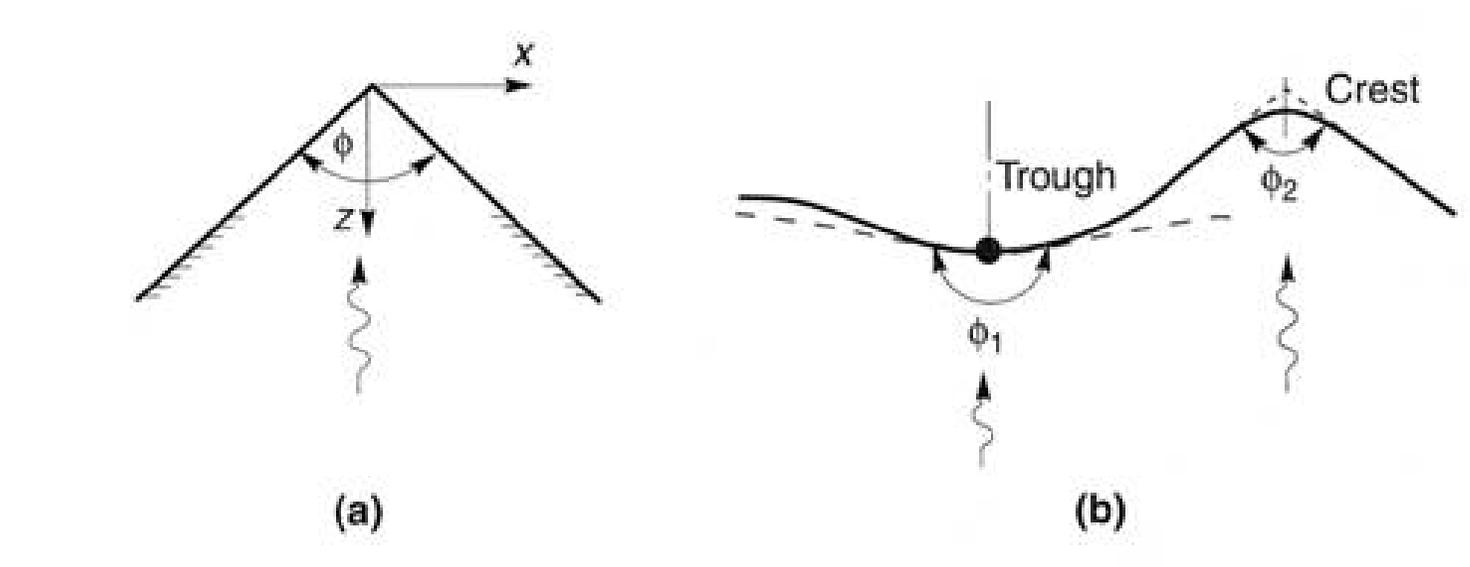


Esempio: valutazione su 80000 profili



- L'approccio semplificato rappresenta una fortissima semplificazione
 - $V_{s,30}$ non è sempre rappresentativa
 - I fattori di amplificazioni sono valori ricavati su insiemi di dati ristretti
- Valutazione non necessariamente a favore di sicurezza, anzi
- Non esiste un modo per discriminare tra situazioni in cui si ottiene una stima per eccesso (a favore di sicurezza) o per difetto (sfavore)

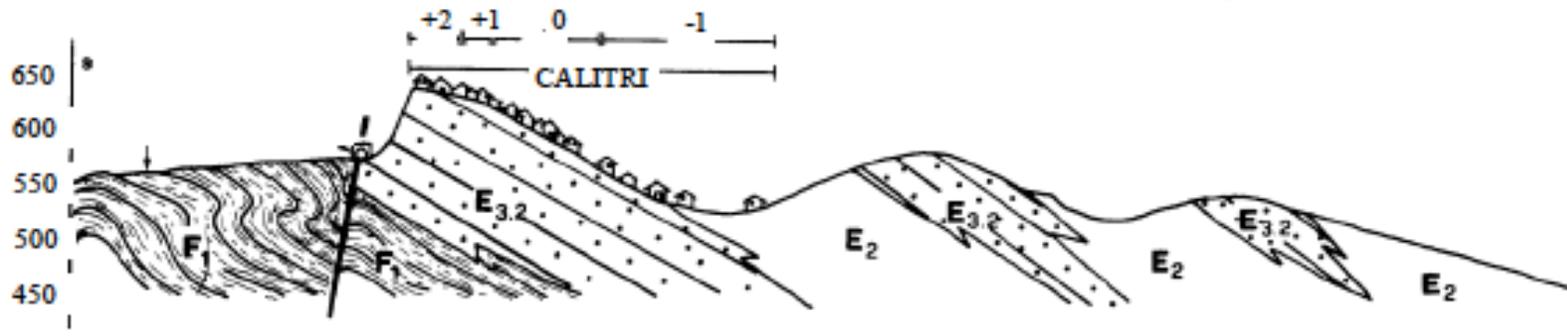
Amplificazione Topografica



$$A = \frac{2\pi}{\varphi}$$

Eq. Sanchez-Serma, 1990
Vedi Faccioli&Paolucci, 1995

Amplificazione Topografica



Distribuzione dei danni nell'abitato di Calitri colpito dal terremoto dell'Irpinia del 23/11/1980, e sua correlazione con l'elevazione topografica.

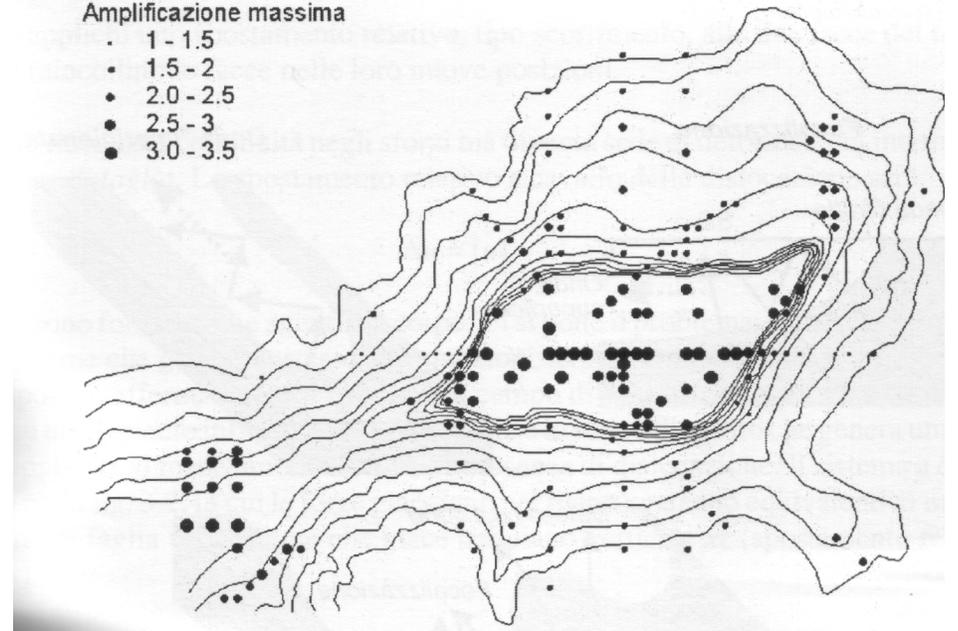
Esempio: Civita di Bagnoreggio



a)

Amplificazione massima

- 1 - 1.5
- 1.5 - 2
- 2.0 - 2.5
- 2.5 - 3
- 3.0 - 3.5

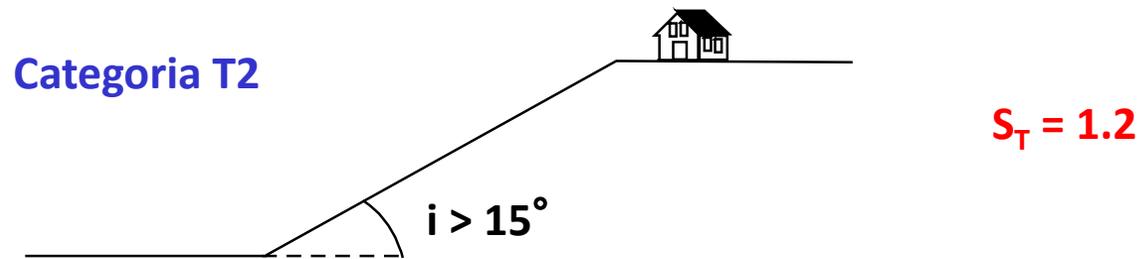


(Faccioli e Paolucci, 2005)

Categorie e fattori di amplificazione topografica (EC8 & NTC2018)

per strutture erette sopra o in vicinanza di pendii o rilievi
con inclinazione $i > 15^\circ$ e dislivello $H \geq 30$ m
l'azione sismica viene moltiplicata per il fattore di amplificazione topografica S_T .
Il coefficiente decresce linearmente con l'altezza del versante fino alla base, dove $S_T = 1$.

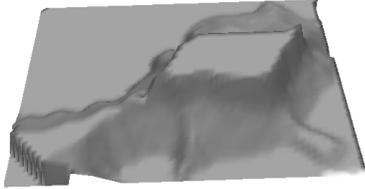
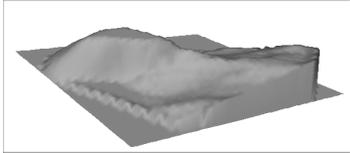
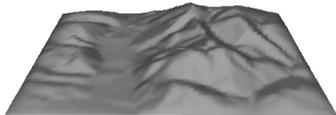
➔ in prossimità del ciglio superiore di pendii



➔ sommità di rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base

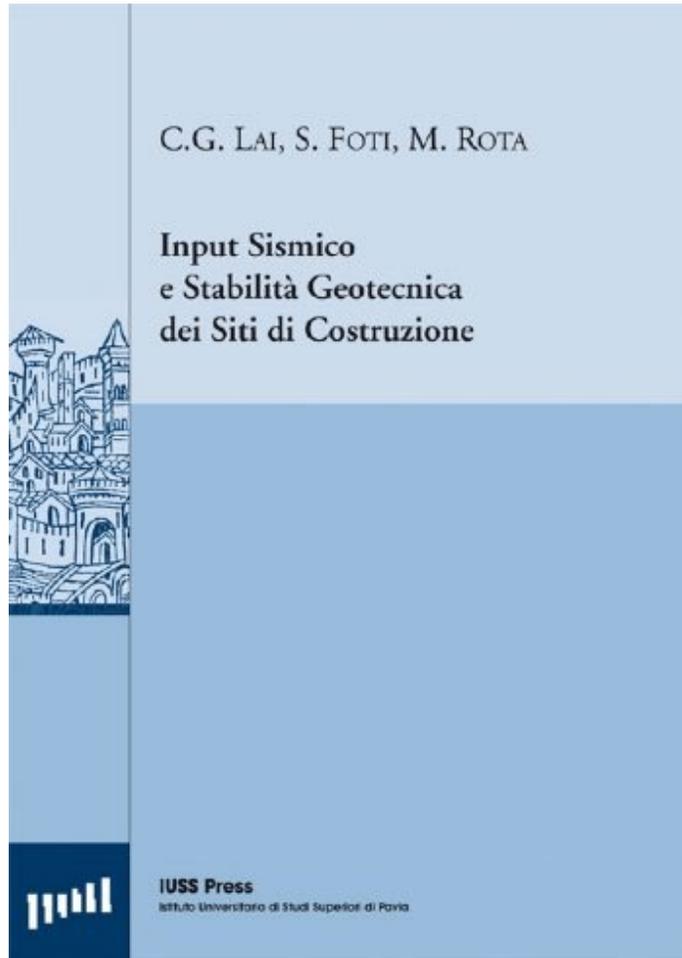


Rappresentazione di alcuni rilievi topografici in Italia, e confronto tra i fattori topografici previsti da normativa e calcolati sulla base di analisi numeriche 2D e 3D.

SITE		<i>EC8</i>	<i>3D</i>	<i>2D_{SV}</i>
CIVITA		<i>1.2</i>	<i>1.75</i>	<i>1.30</i>
ALTINO		<i>1.2</i>	<i>1.30</i>	<i>1.22</i>
MT. TITANO		<i>1.4</i>	<i>1.58</i>	<i>1.32</i>
CASTELLARO		<i>1.2</i>	<i>1.25</i>	<i>1.28</i>

(cortesia R. Paolucci,
Politecnico di Milano)

Per approfondimenti:



COLLANA DI MANUALI
DI PROGETTAZIONE ANTISISMICA
ReLuis – Eucentre - DPC



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

Grazie per l'attenzione

Email: sebastiano.foti@polito.it
www.soilmech.polito.it/people/foti_sebastiano



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6 / 13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**PERICOLOSITÀ SISMICA, CATEGORIE DI SOTTOSUOLO
E AZIONI SISMICHE DI PROGETTO**

Sebastiano Foti



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica