

23 giugno 2023



**Ordine degli Ingegneri
della Provincia di Macerata**
Commissione Strutture e Geotecnica

Risposta sismica locale ed effetti di sito



**Politecnico
di Torino**

Dipartimento
di Ingegneria Strutturale,
Edile e Geotecnica

Prof. Ing. Sebastiano Foti

Email: sebastiano.foti@polito.it

www.soilmech.polito.it/people/foti_sebastiano

Sommario

- Premessa: evidenze della risposta sismica locale
- Amplificazione stratigrafica
 - Funzione di trasferimento
 - Metodo lineare equivalente
 - ✓ Prove di laboratorio
 - ✓ Indagini in sito
 - Metodi non lineari (cenni)
 - Metodi semplificati (norme tecniche)
- Amplificazione Topografica
- Microzonazione sismica
 - Esempi

Geotechnical Extreme Events Reconnaissance (GEER)

Geotechnical Extreme Events Reconnaissance
Turning Disaster Into Knowledge
Sponsored by the National Science Foundation

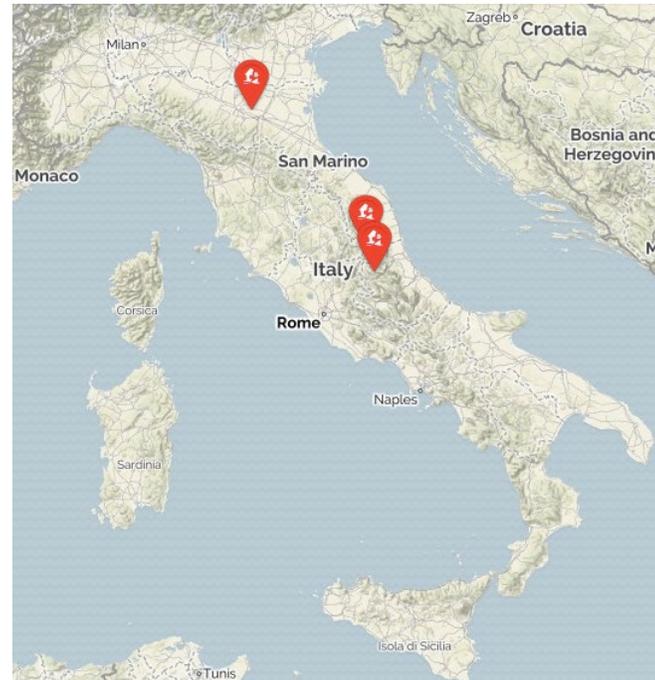
HOME ABOUT GEER ▾ RECONNAISSANCE REPORTS ▾ GEER ACTIVITIES ▾ JOIN

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

The screenshot shows a world map with numerous colored pins indicating geotechnical extreme events. The pins are color-coded by event type: red for Earthquake, green for Flood, blue for Hurricane, brown for Landslide, grey for Storm, purple for Tsunami, light blue for Typhoon, and orange for Fire. The map shows a high density of events in North America, Europe, and East Asia.

- Earthquake
- Flood
- Hurricane
- Landslide
- Storm
- Tsunami
- Typhoon
- Fire

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>

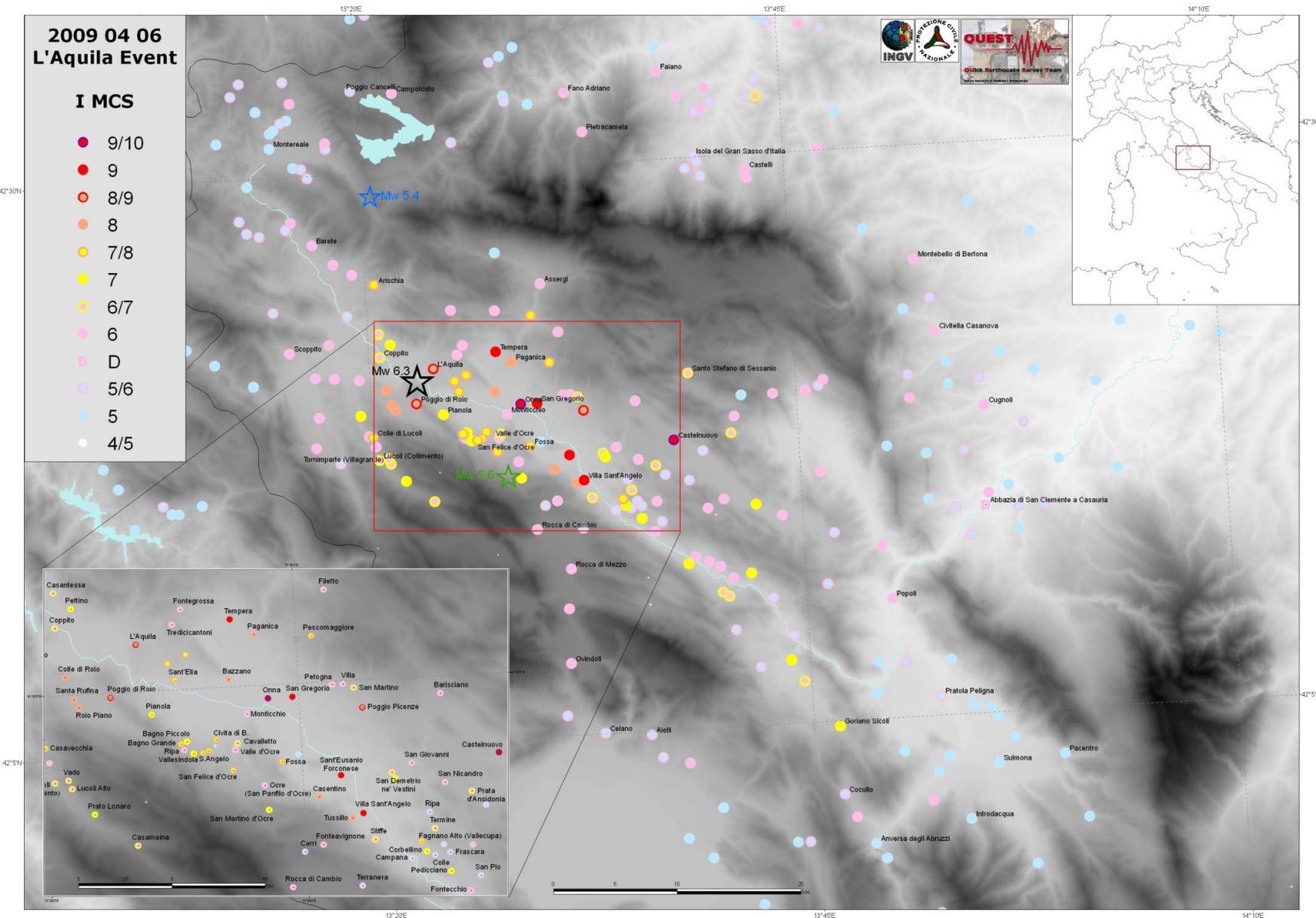
2009 L'AQUILA EARTHQUAKE



Event Date	:	04-06-2009
Location	:	L'Aquila, Italy
Report Date	:	09-01-2009
Event Category	:	Earthquake
EQ Magnitude	:	6.3
Report Number	:	GEER-016
DOI	:	doi:10.18118/G6F59R
Event Latitude	:	42.35
Event Longitude	:	13.4

File Upload :

File Title	File Version	File Date	File Type
Report		04-06-2009	Html



Osservando la distribuzione degli effetti del terremoto del 6/4/2009 si nota una marcata asimmetria della distribuzione degli effetti rispetto all'epicentro, con concentrazione delle maggiori intensità osservate ($I_{MCS} > 7$) nelle conche fluvio-lacustri e nel fondovalle dell'Aterno.

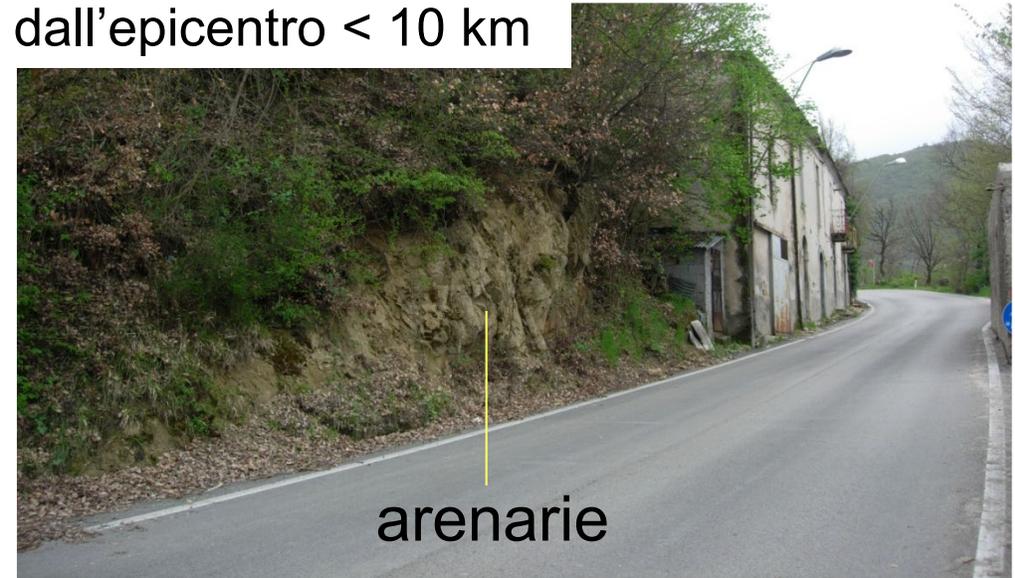


su depositi fluvio-lacustri
distanza dall'epicentro > 10 km

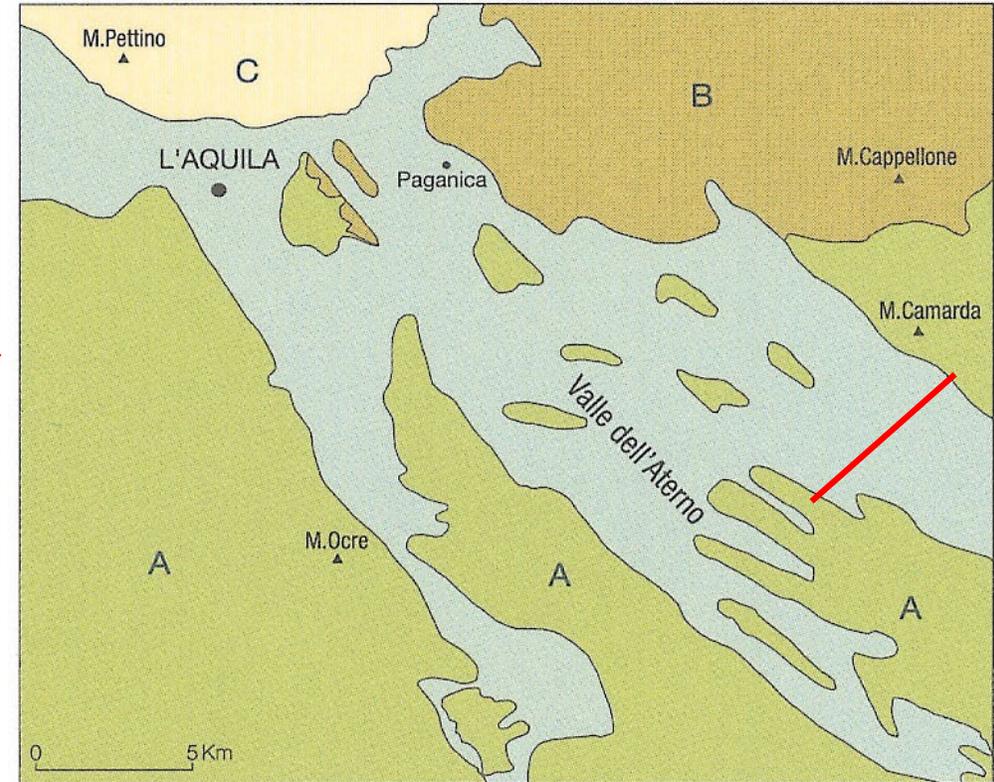
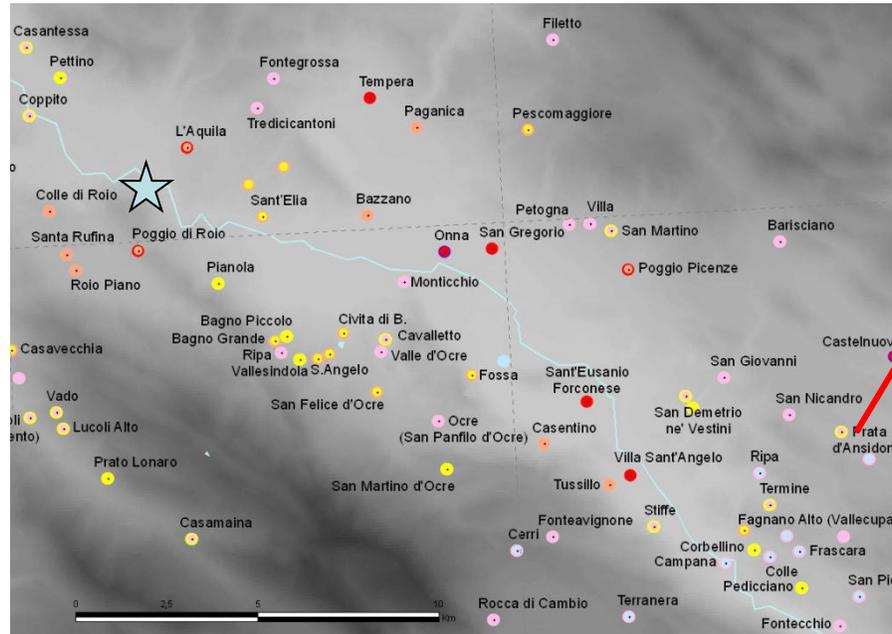


calcari

distanza dall'epicentro < 10 km



arenarie



E' evidente che la distribuzione degli effetti ha risentito delle condizioni stratigrafiche locali.

Prata d'Ansidonia

$I_{MCS} = VI-VII$

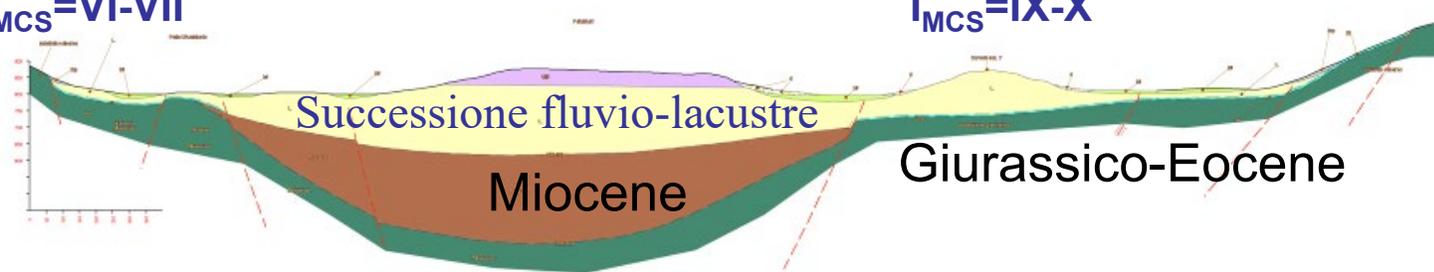
Castelnuovo

$I_{MCS} = IX-X$

S. Pio delle Camere

$I_{MCS} = V-VI$

- Depositi continentali quaternari
- A Successione M.Ocre - Valle Aterno - M.Camarda
- B Successione M.Capellone - Paganica
- C Successione M.Pettino



Successione fluvio-lacustre

Miocene

Giurassico-Eocene

2012 EMILIA EARTHQUAKE



Event Date	: 05-20-2012
Location	: Emilia, Italy
Report Date	: 07-13-2012
Event Category	: Earthquake
EQ Magnitude	: 5.9
Report Number	: GEER-030
DOI	: doi:10.18118/G6MS37
Event Latitude	: 44.5
Event Longitude	: 11.172
Sponsors	: EUCENTRE (Pavia, Italy)

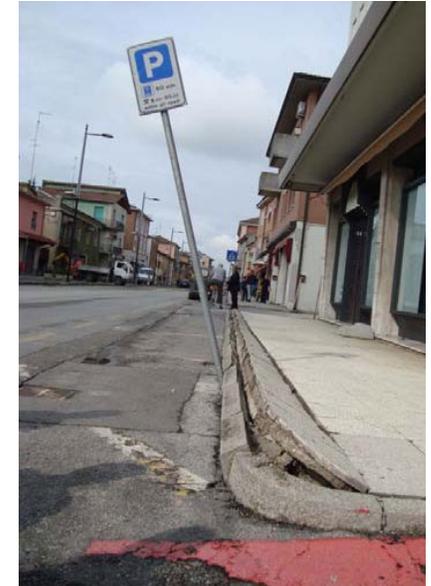
File Upload :

File Title	File Version	File Date	File Type
Final Report	Version 1	07-13-2012	PDF

Liquefazione

Emilia Romagna
Earthquake M5.9

May 20th, 2012



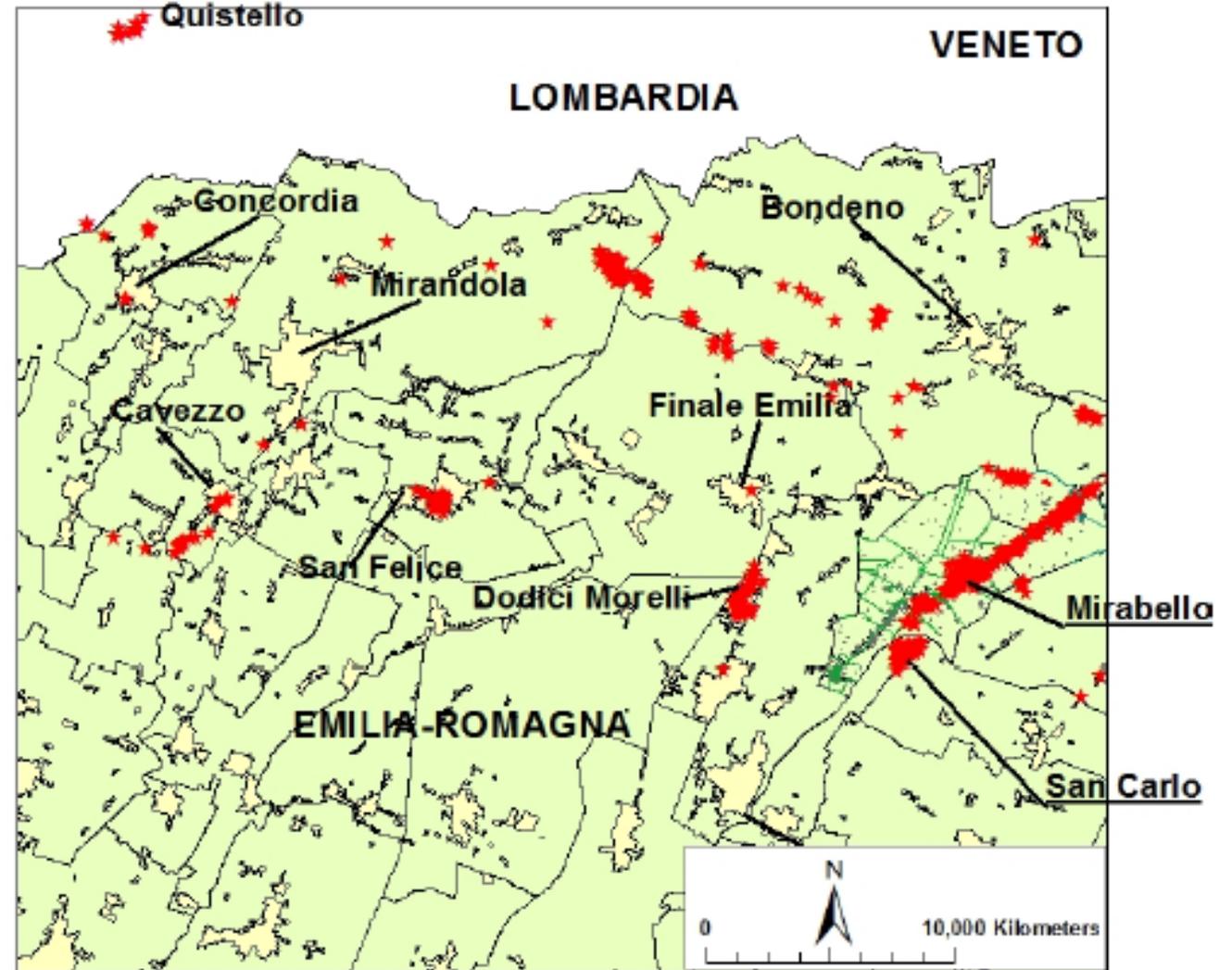
(courtesy prof. G. Vannucchi UniFI)

Liquefazione

Emilia Romagna
Earthquake M5.9

May 20th, 2012

Localizzazione
dei fenomeni di
liquefazione



(Courtesy prof. G. Vannucchi – UniFI)

2016 CENTRAL ITALY EARTHQUAKE SEQUENCE



Event Date	: 08-24-2016
Location	: Central Italy
Report Date	: 09-15-2016
Event Category	: Earthquake
Sequence of Events	: Yes
EQ Magnitude	: INGV 6.0, 5.9, 6.5
Report Number	: GEER-050
DOI	: doi:10.18118/G61S3Z
Event Latitude	: 42.69561
Event Longitude	: 13.251019
Team	: Jonathan P. Stewart (UCLA) Giuseppe Lanzo (Sapienza University of Rome)

File Title	File Version	File Date	Collaborators
Report Part 1 - 24 August event	Version 1	09-15-2016	: Italian Geotechnical Society; Italian Center for Seismic Microzonation and its Applications; Consortium ReLUIS, Centre of Competence of Department of Civil Protection; Disaster REcovery Team of Politecnico di Torino
Table S1	Version 1	11-22-2016	
Table S2	Version 1	11-22-2016	
Report Part 1 - 24 August event	Version 2	11-22-2016	
Report Part 2 - October events	Version 1	01-09-2017	
Report Part 2 - October events	Version 2	05-08-2017	
Electronic Supplement to Chapter 3	Version 1	05-08-2017	
Table S1	Version 2	05-08-2017	

Performance delle strutture e modelli di danneggiamento

I principali vantaggi di utilizzare un unico parametro sintetico (livello di danneggiamento) per ogni edificio sono:

1. L'individuazione dei modelli danneggiati, che combinati con le informazioni geologiche possono evidenziare la presenza degli effetti del sito;
2. Valutazione della vulnerabilità dalla tipologia dell'edificio

Damage Level	Description	Marker Color
D0	No damage	Dark Green
D1	Cracking of non-structural elements, such as dry walls, brick or stucco external cladding	Bright Green
D2	Major damage to the non-structural elements, such as collapse of a whole masonry infill wall; minor damage to load bearing elements	Yellow
D3	Significant damage to load-bearing elements, but no collapse	Orange
D4	Partial structural collapse (individual floor or portion of building)	Red
D5	Full collapse	Dark Red

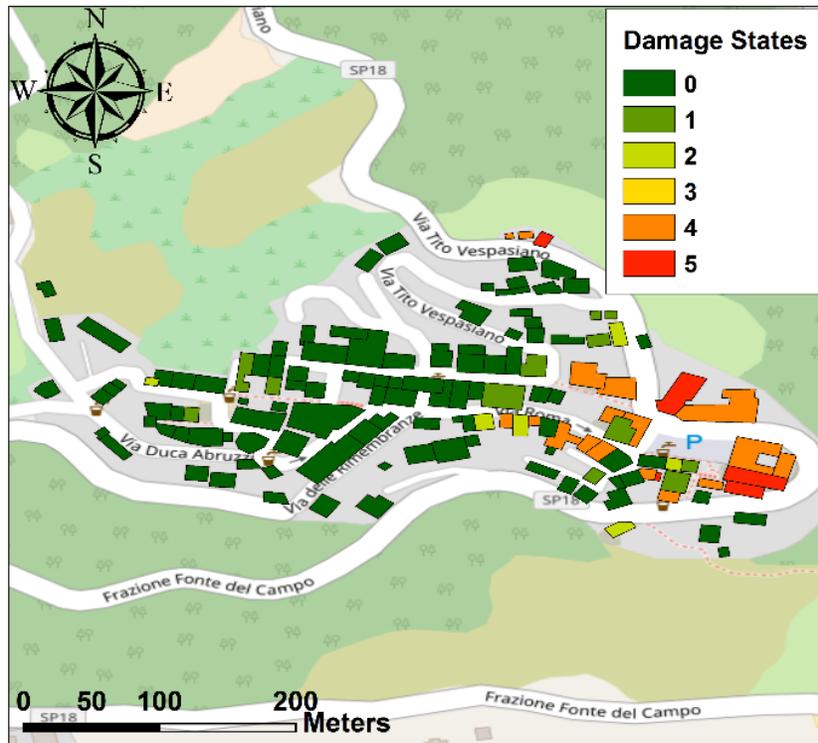
Accumoli

Accumoli è stata soggetta a una PGA stimata pari a 0.45g negli eventi di ottobre e di 0.56g nell'evento del 24 agosto.

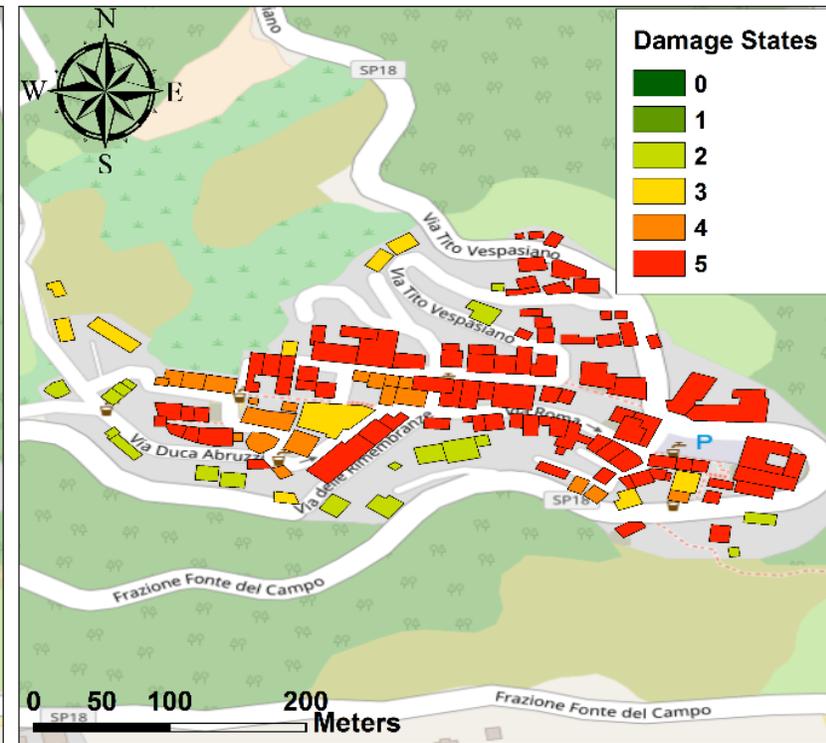
La sequenza di ottobre ha causato la totale devastazione del paese.

Gli edifici danneggiati ad agosto sono collassati dopo la sequenza di ottobre.

(a)



(b)



Evoluzione dei danni dopo gli eventi di agosto (a) e ottobre (b)

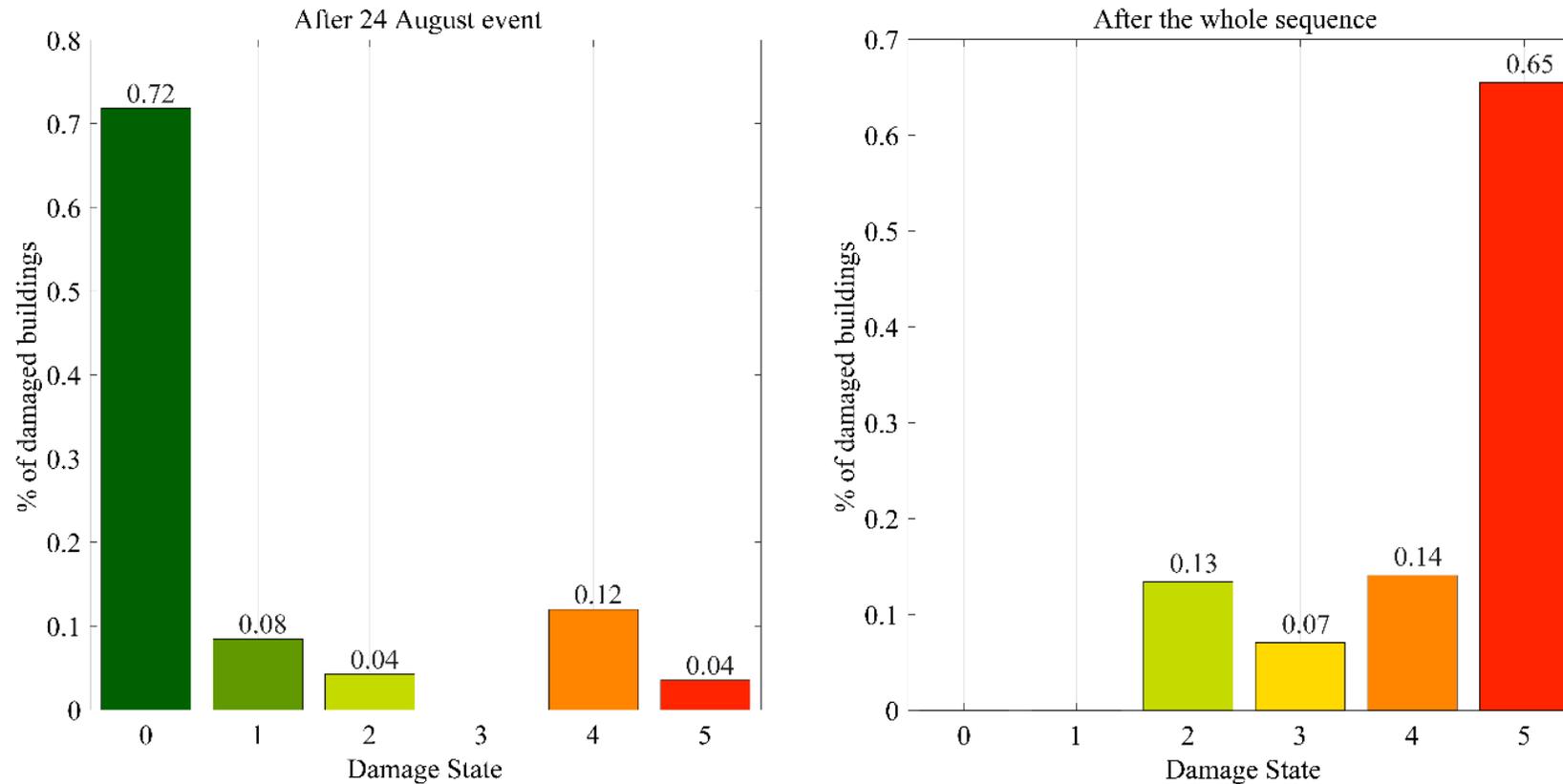
Accumoli



Accumoli

La sequenza di ottobre ha causato la totale devastazione del paese.

Gli edifici danneggiati ad agosto sono collassati dopo la sequenza di ottobre, con un drastico passaggio da basse classi di danneggiamento (DS0/DS1) a alte classi di danneggiamento (DS4/DS5).



Percentuale di strutture danneggiate dopo gli eventi di agosto (a) e ottobre (b)

Accumoli



Il municipio dopo gli eventi di agosto e ottobre



La vista dalla piazza dopo gli eventi di agosto e ottobre

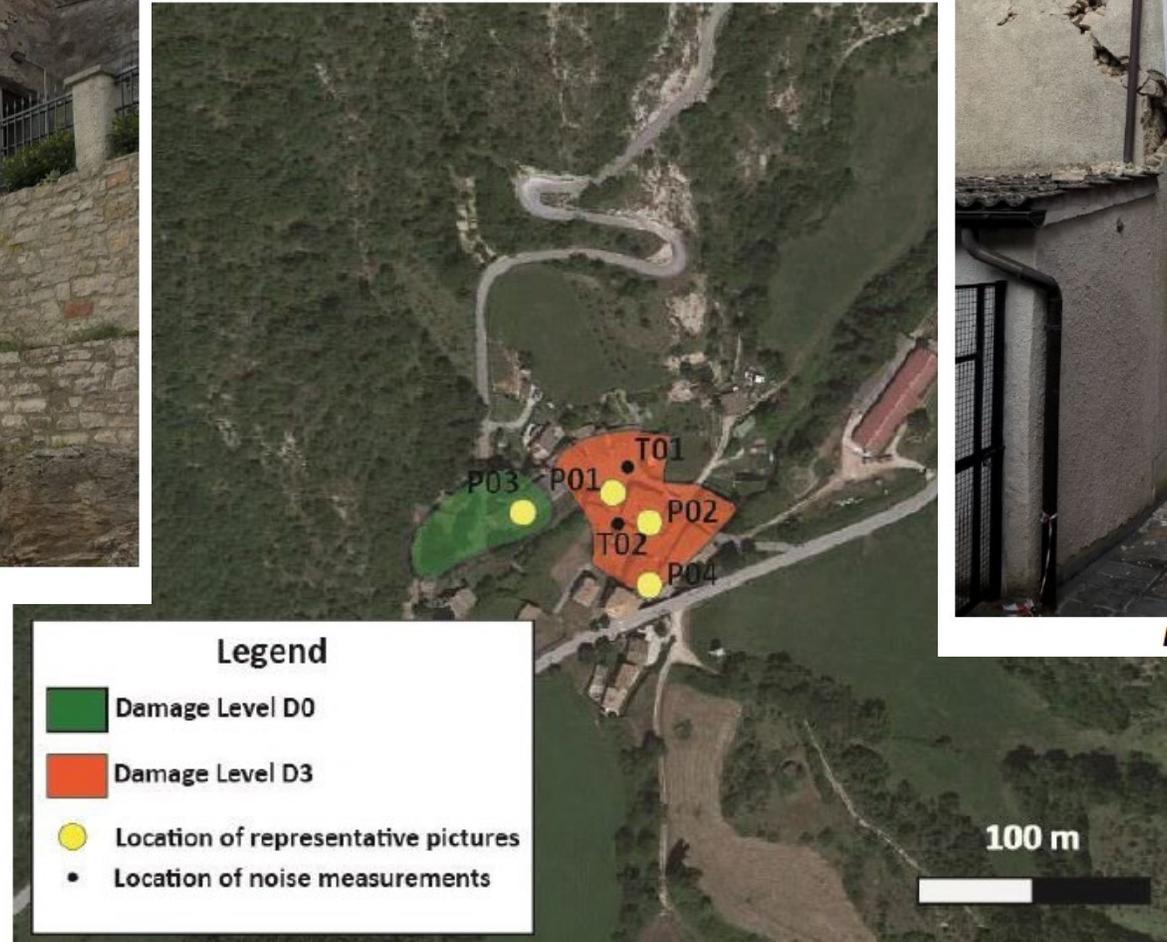
Fiume (Pieve Torrina)



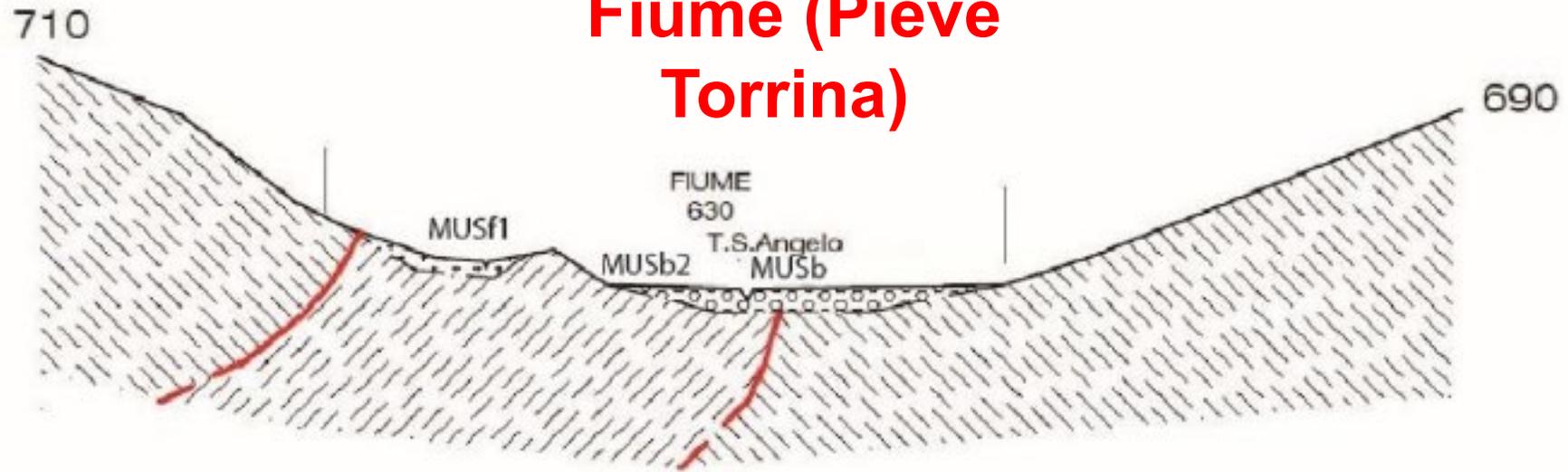
P03



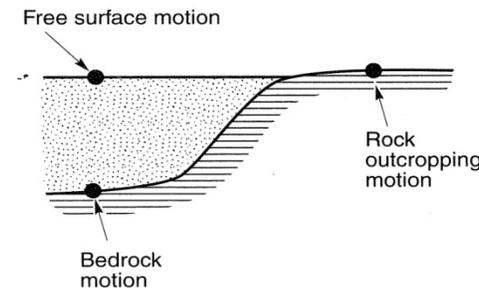
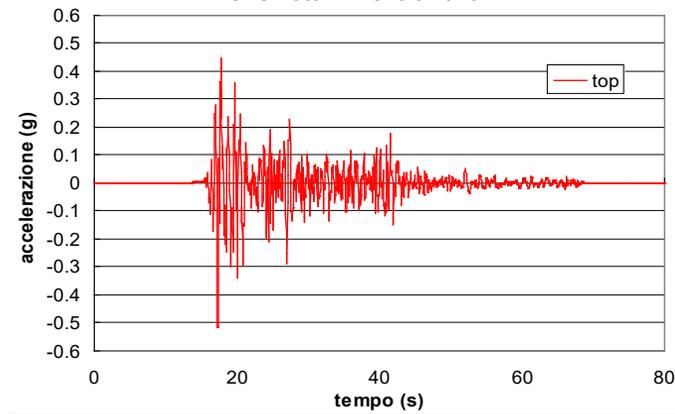
P02



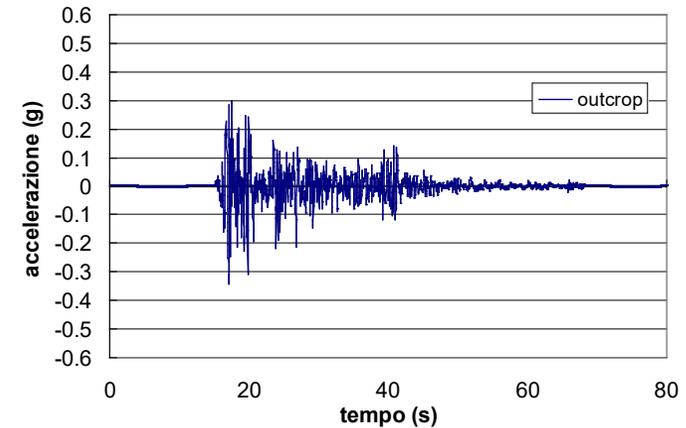
Fiume (Pieve Torrina)



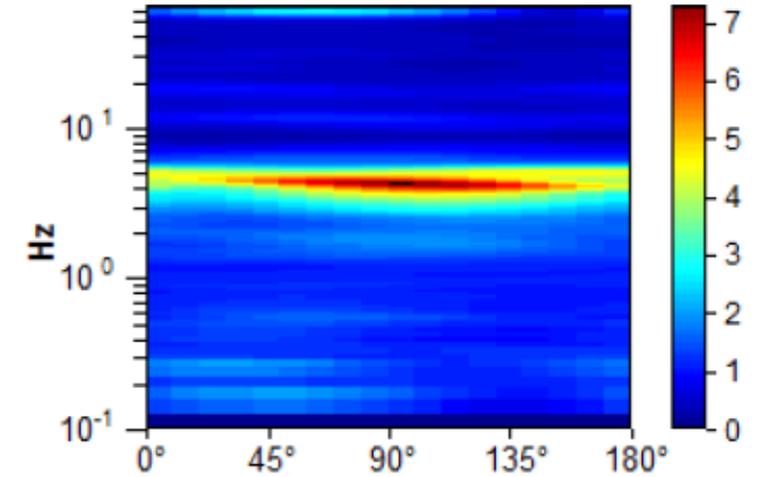
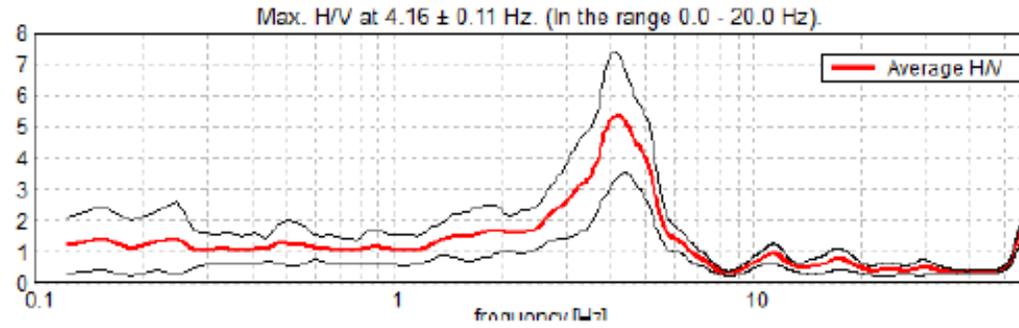
Classica condizione di amplificazione stratigrafica



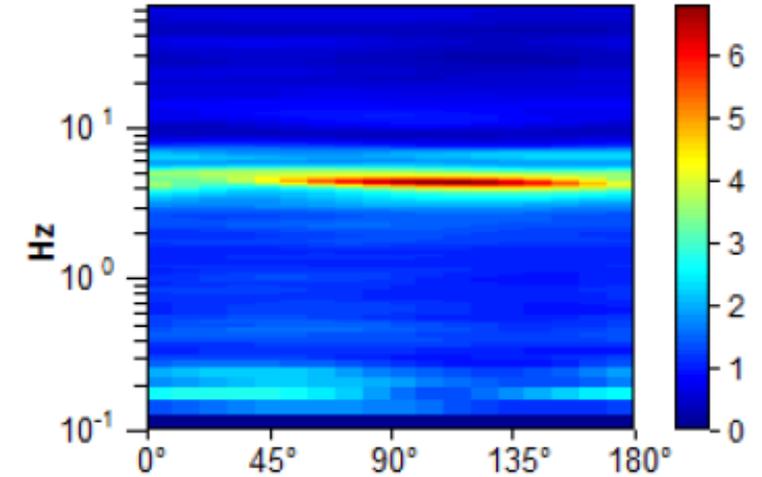
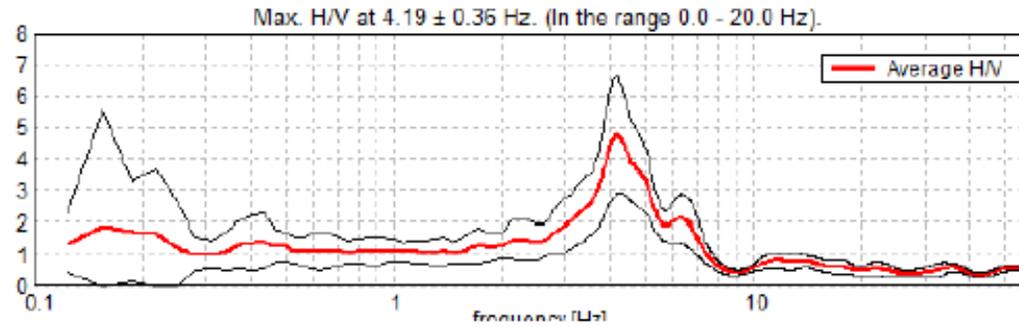
(a)



Fiume (Pieve Torrina)



T1

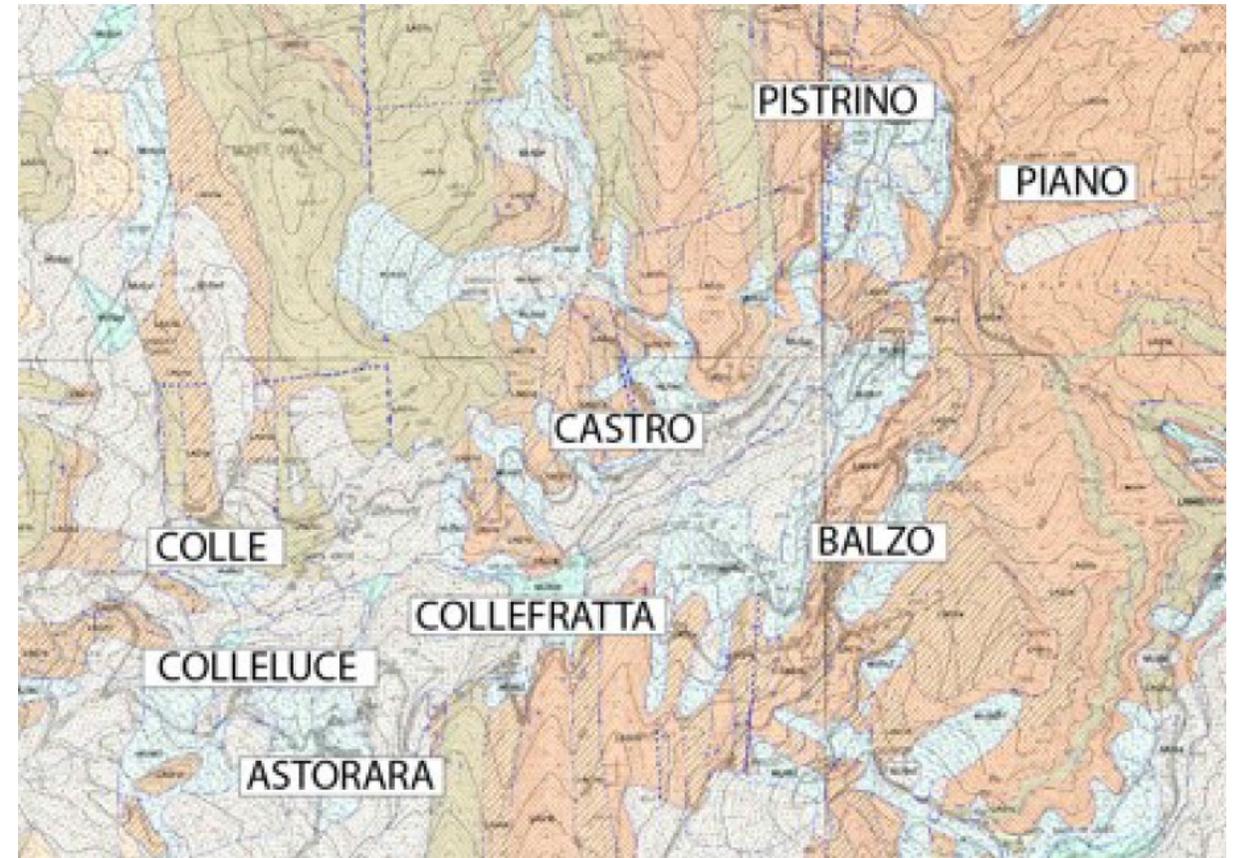
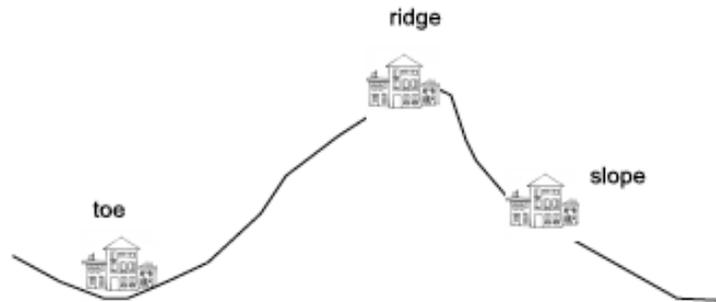


T2

Valutazioni sveditive 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)

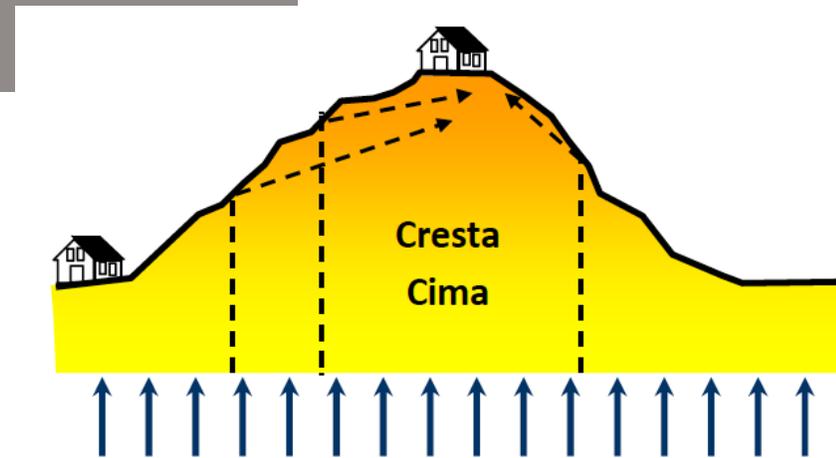
Castro: probabile amplificazione topografica/stratigrafica
D2-3 dopo agosto
D4-5 dopo ottobre



P17 (Pistrino)

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

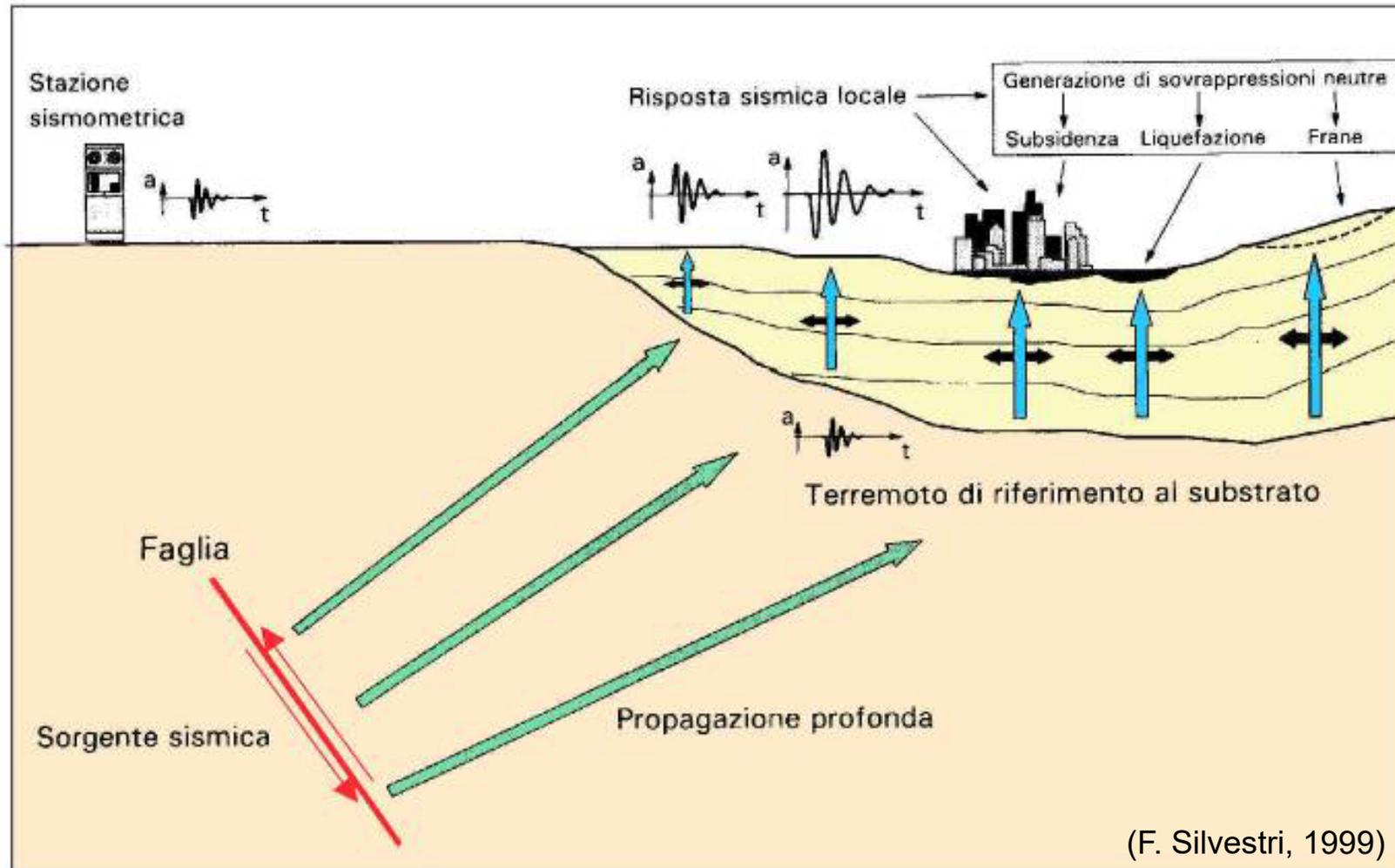
Comune di Montegallo: Castro



Comune di Montegallo: Castro



Geotecnica sismica



Pericolosità sismica italiana INGV → NTC 2008

CAMBIO DI PARADIGMA

Definizione dei valori di pericolosità su maglia geografica (0.05°)

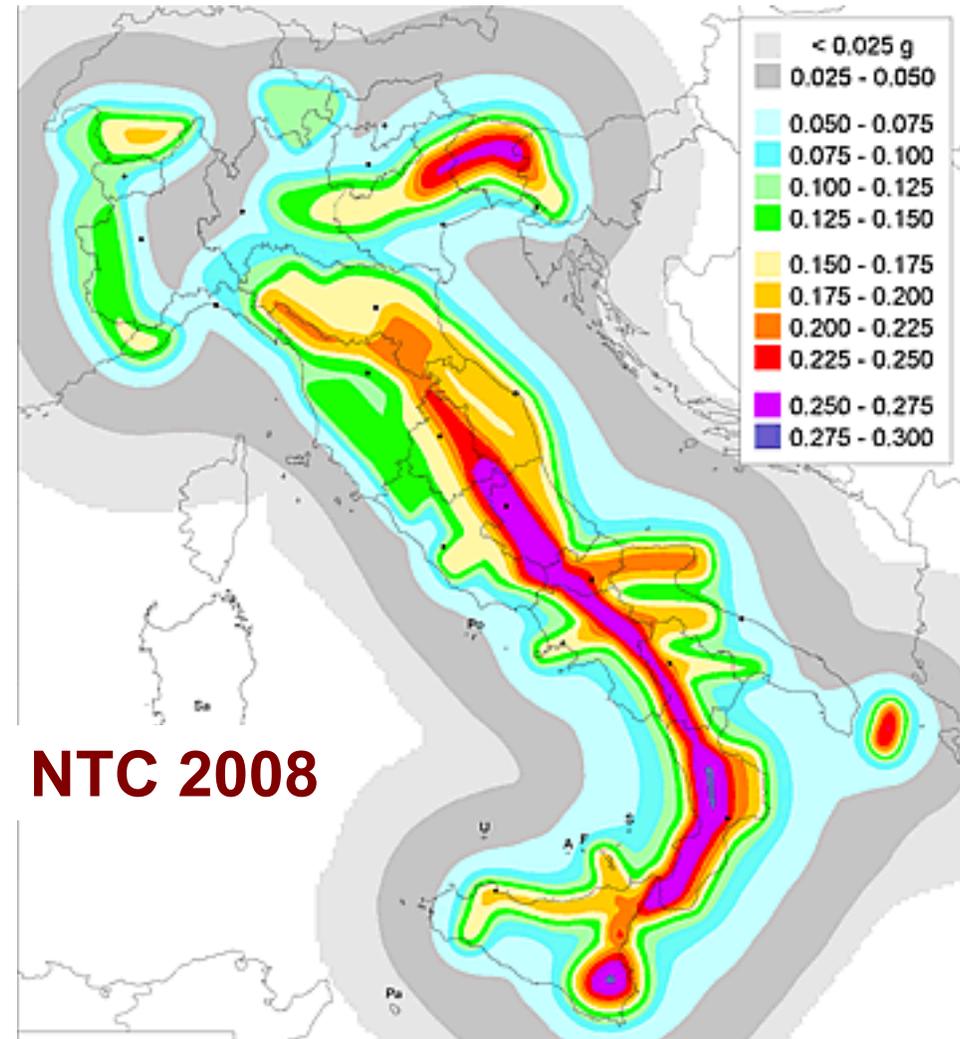
La pericolosità è definita in funzione del periodo di ritorno

Assegnati un periodo di riferimento e una probabilità di superamento si ottiene l'azione di progetto

Stati Limite		P_{V_R}
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Esempio: a_g
 probabilità superamento 10% in 50 anni
 (SLV strutture ordinarie)
 → $T_R = 475$ anni

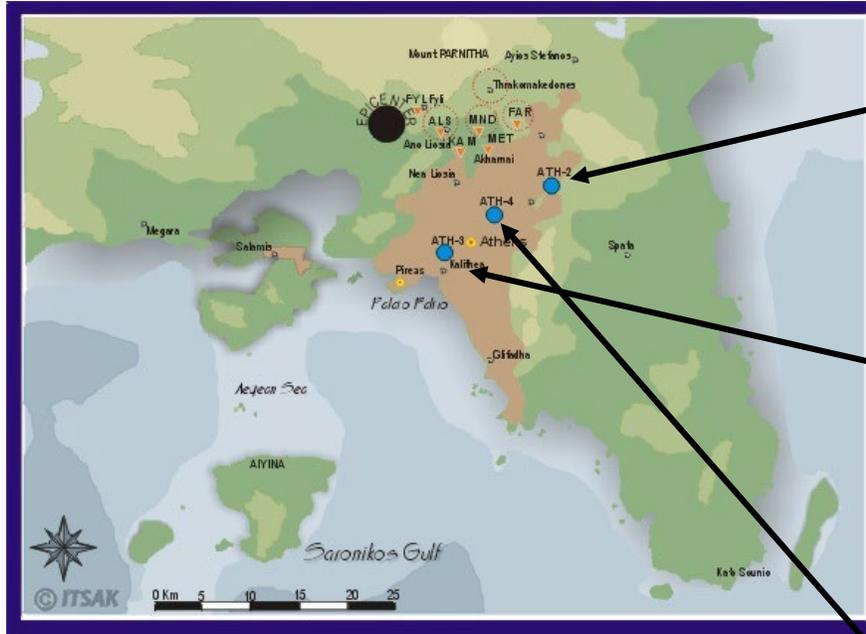
$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$



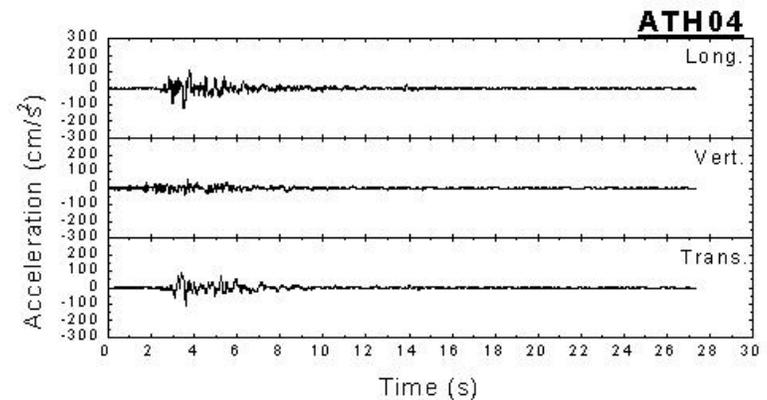
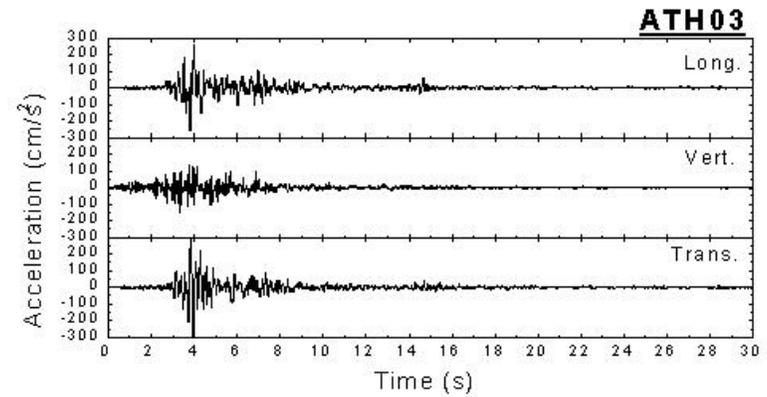
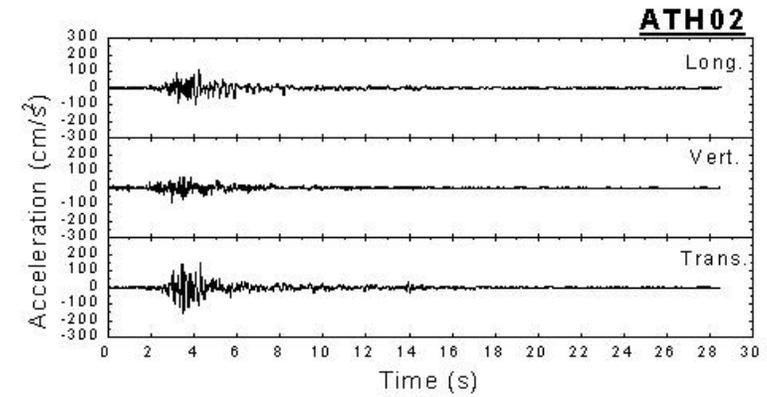
NTC 2008

sottosuolo cat. A ($V_{S,30} > 800 \text{ m/s}$)

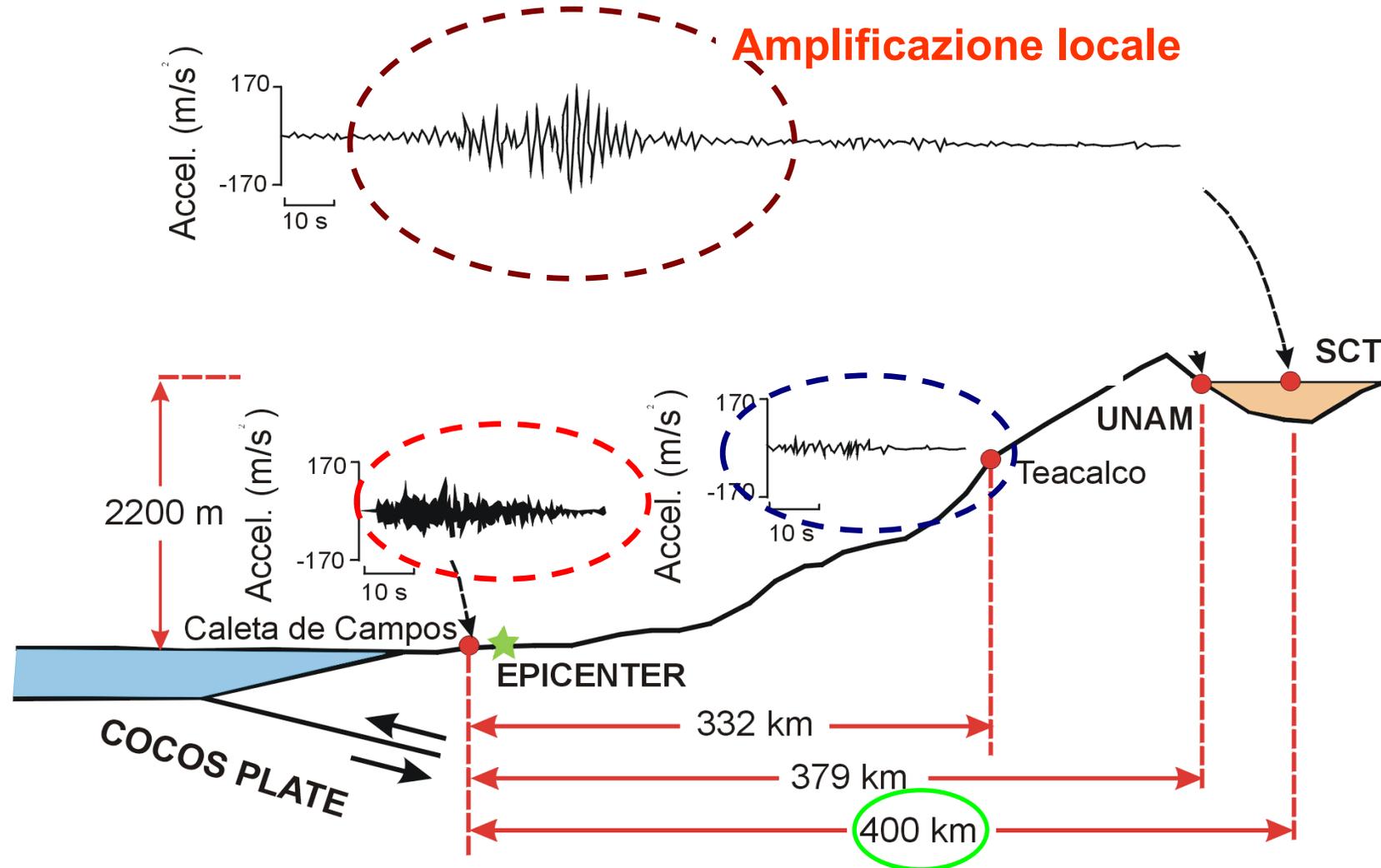
Amplificazione sismica locale



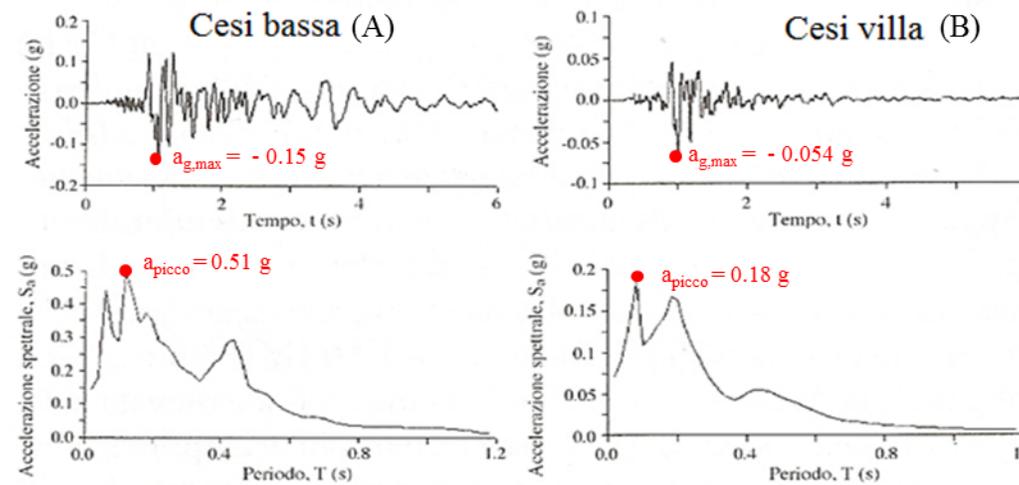
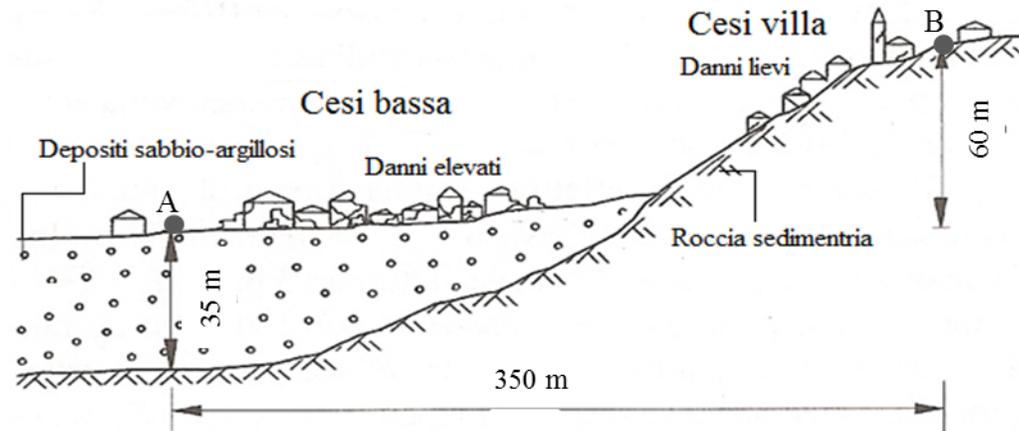
Registrazioni accelerometriche
del terremoto di Atene del 1999
($M=5.9$)



Città del Messico (Terremoto del 1985 M=8.1)



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

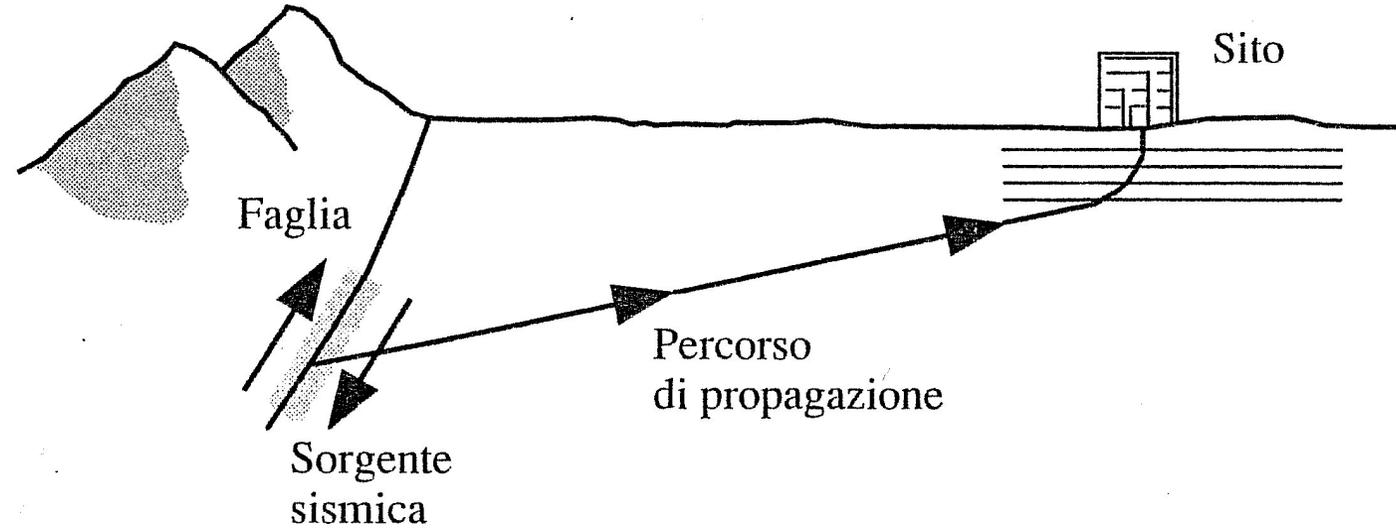
NTC 2018 (3.2.2):

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 .

Propagazione ipocentro-sito



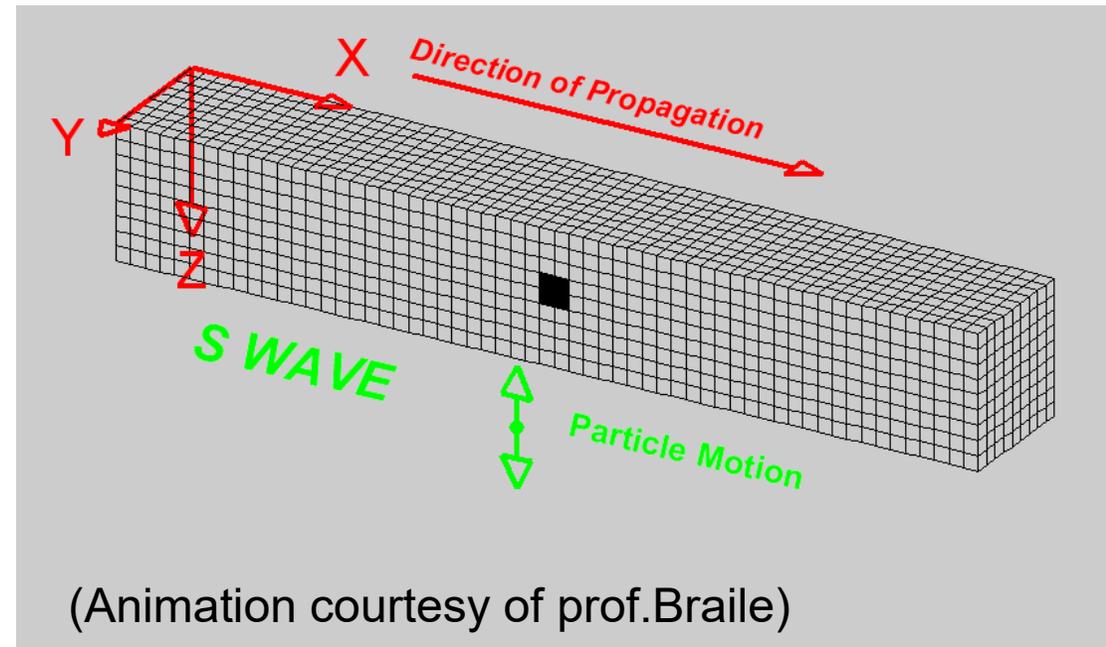
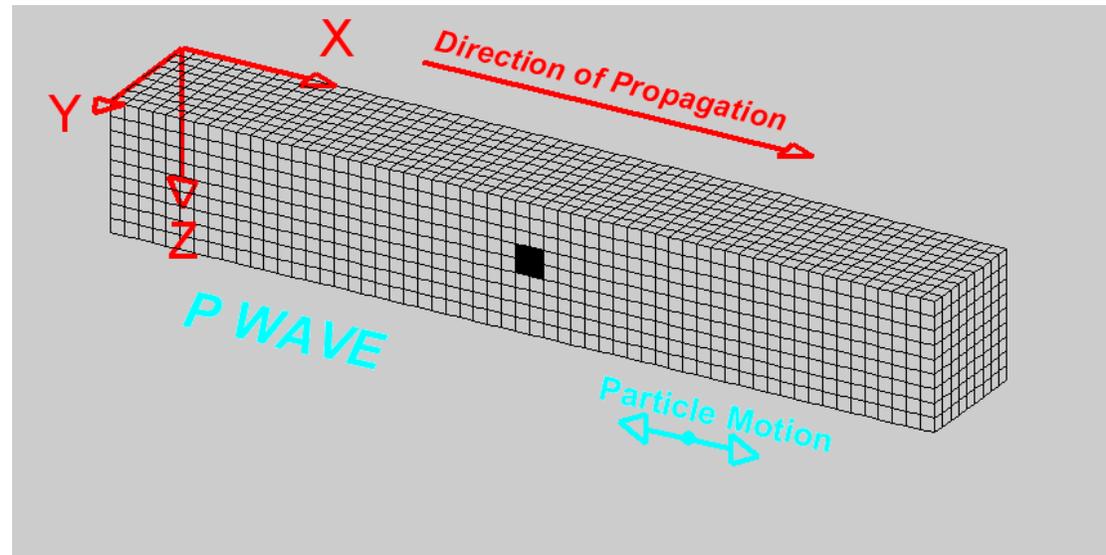
Onde di Volume

Onda di compressione
(onda Primaria – P)

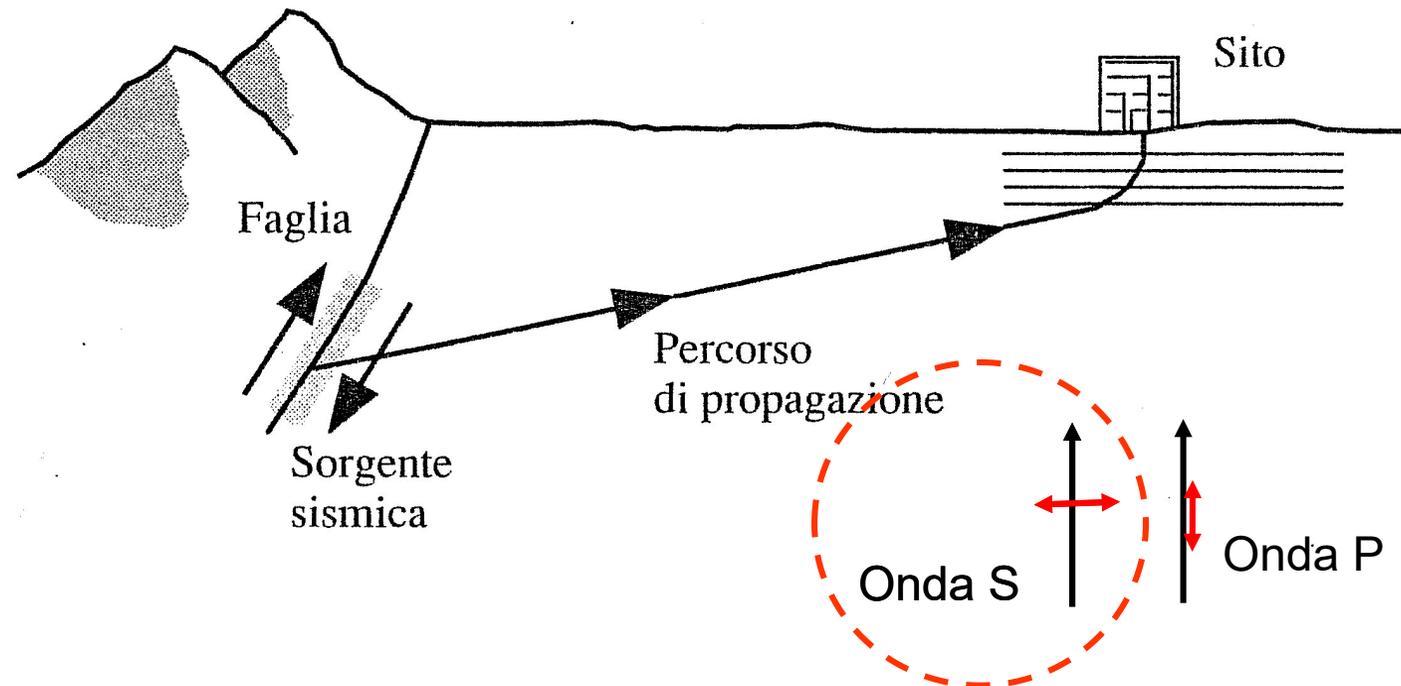
$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

Onda di taglio
(onda Secondaria – S)

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

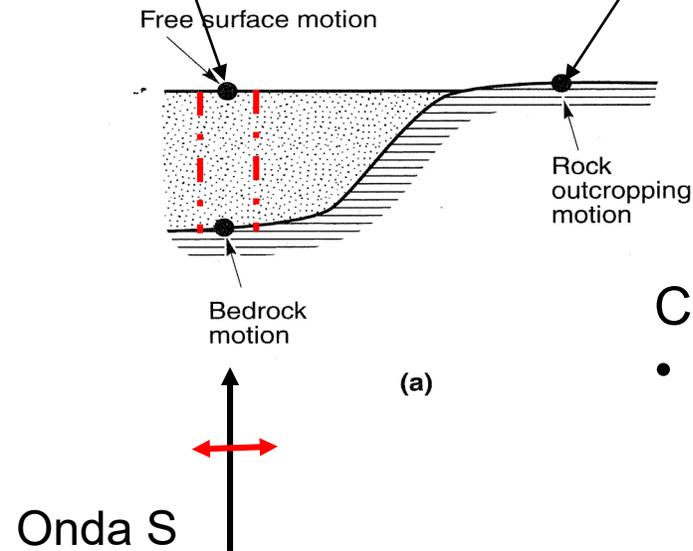
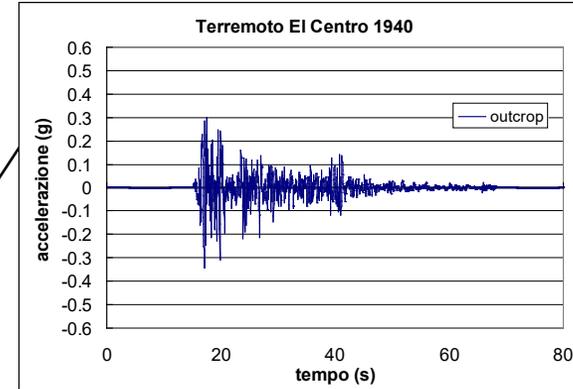
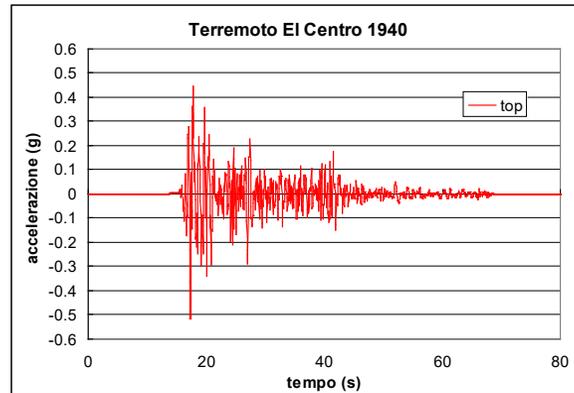


Propagazione ipocentro-sito



Componente orizzontale del moto più gravosa per la struttura e le opere geotecniche

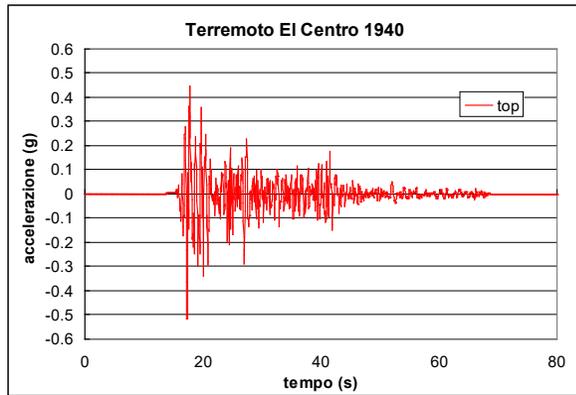
Risposta sismica locale: metodo lineare equivalente



Caratterizzazione dei depositi:

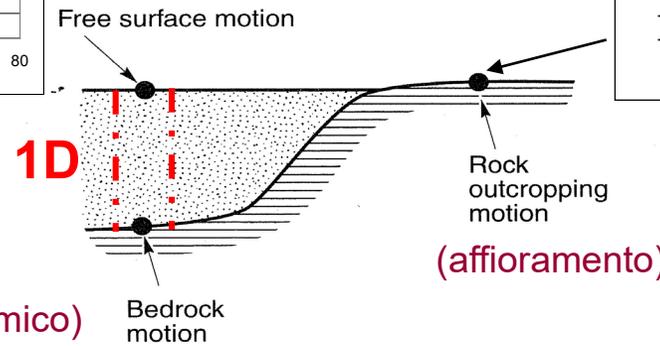
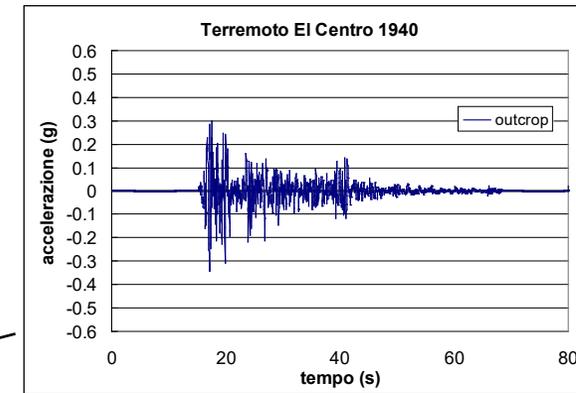
- Definizione della geometria (posizione del tetto del substrato sismico)
- Comportamento meccanico dei terreni soggetti a carichi ciclici

Risposta sismica locale

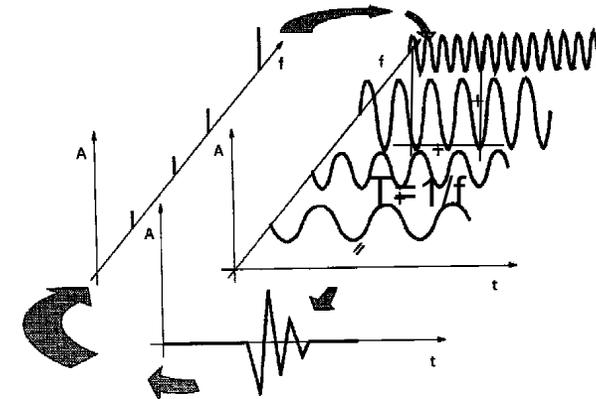
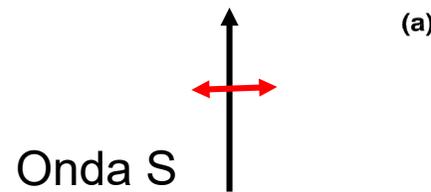


Rapporto di amplificazione

$$RA = \frac{a_{\max, \text{surface}}}{a_{\max, \text{outcrop}}}$$



Analisi di Fourier

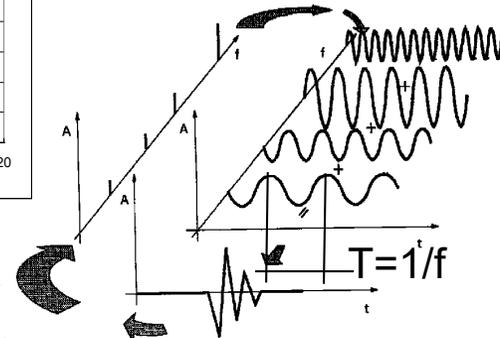
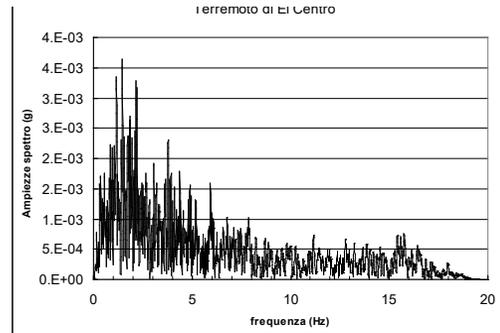


Funzione di amplificazione

$$A_r(\omega) = \frac{FFT(a_{\text{surface}})}{FFT(a_{\text{outcrop}})}$$

Risposta sismica locale e simulazioni numeriche

Ampiezza dello spettro di Fourier (+ fase dello spettro)

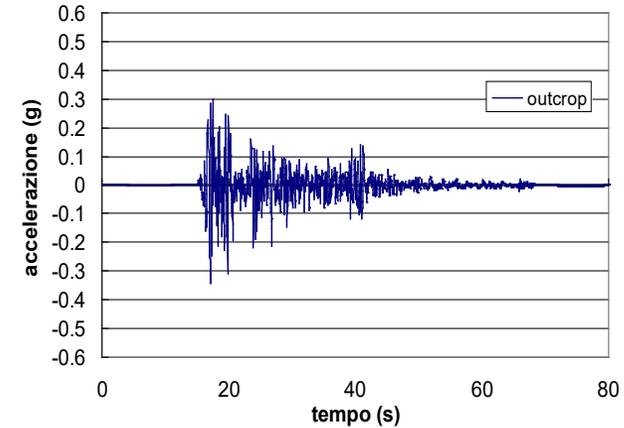


Analisi di Fourier
(Trasformata di Fourier)

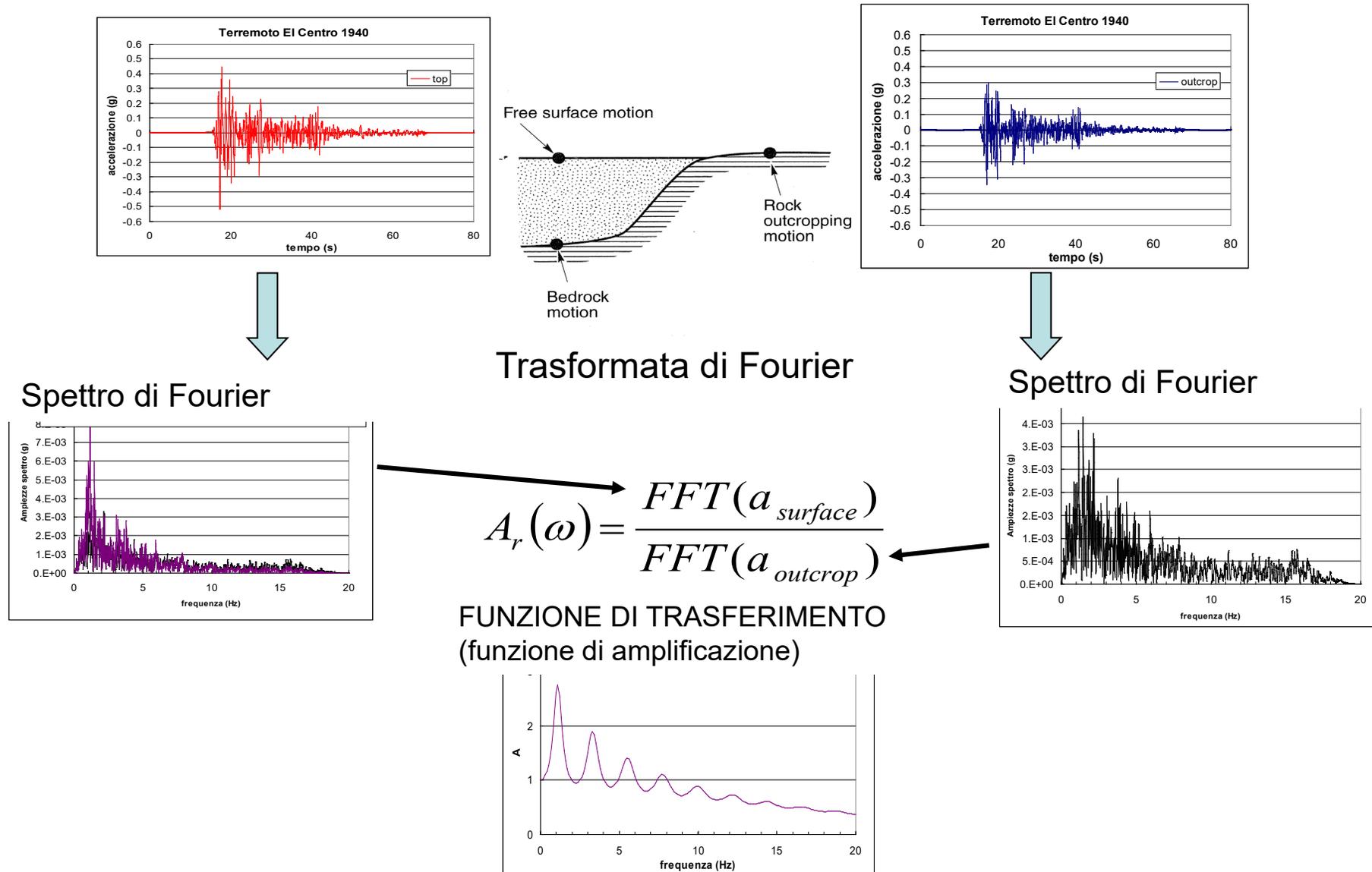
Sintesi
(Anti-trasformata di Fourier)



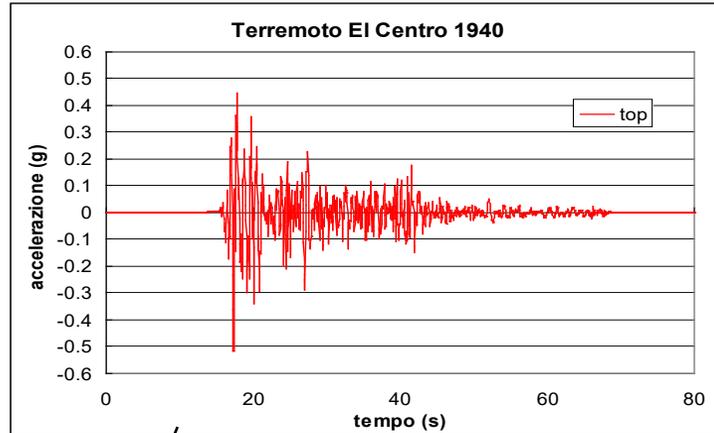
Terremoto El Centro 1940



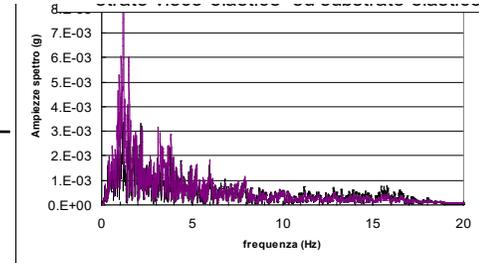
Valutazione a posteriori della risposta in frequenza



Valutazione analitica della RSL in dominio di frequenza

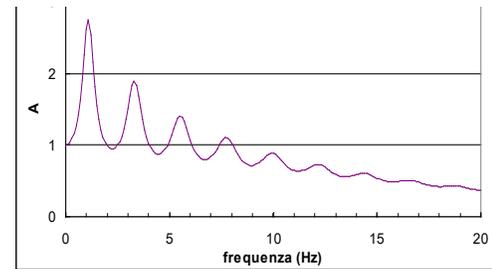


Ampiezza dello spettro di Fourier

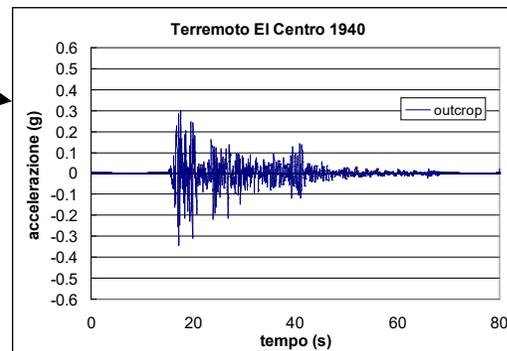
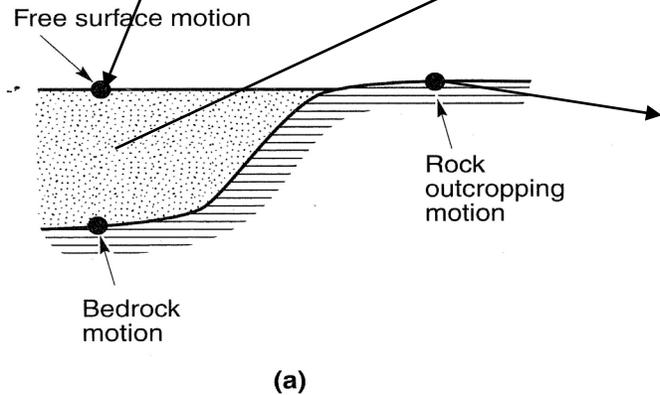


Trasformata
Inversa
Fourier

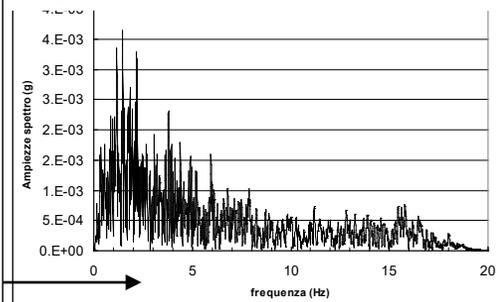
FUNZIONE DI TRASFERIMENTO
(funzione di amplificazione)



Simulazione della
propagazione

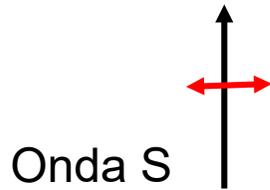
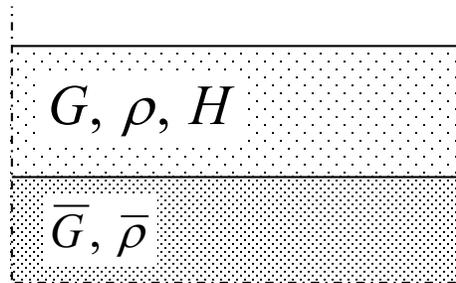
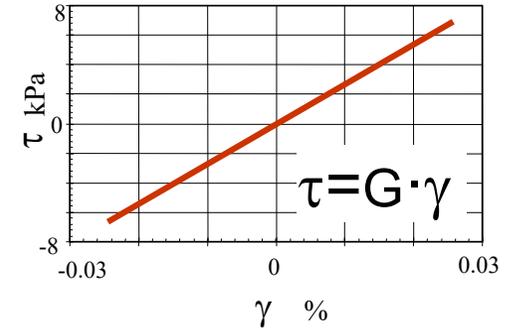


Ampiezza dello spettro di Fourier



Trasformata Fourier

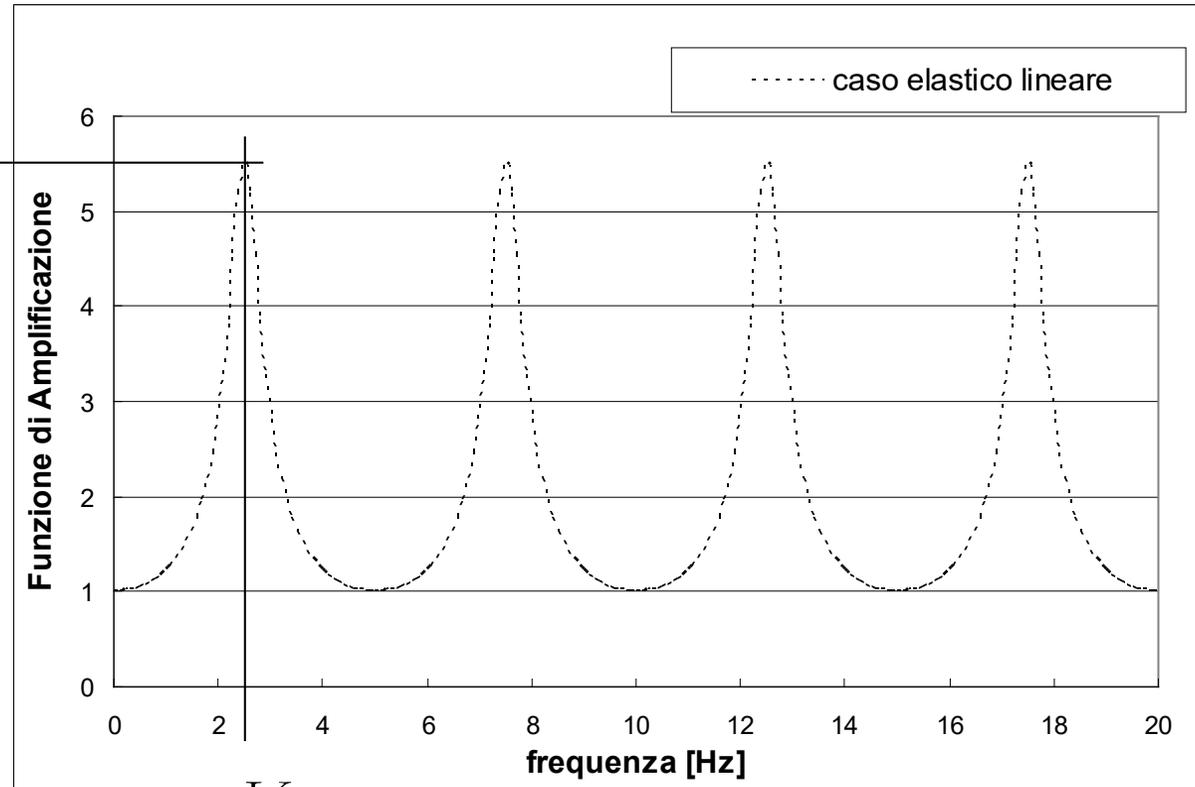
Risposta sismica locale: Modello 1D elastico lineare



$$\frac{1}{\alpha_z}$$

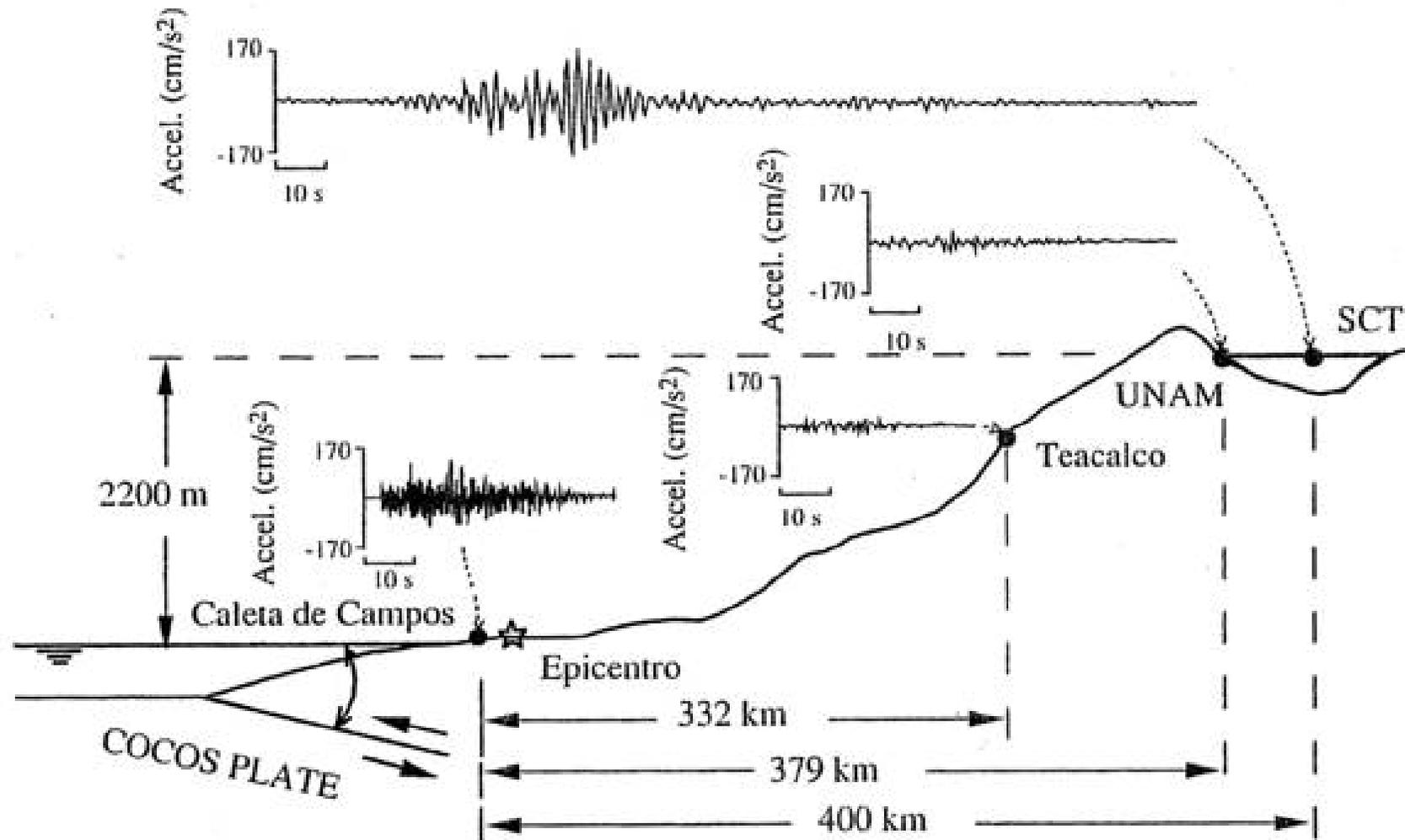
$$\alpha_z = \frac{\rho V_S}{\bar{\rho} \bar{V}_S}$$

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



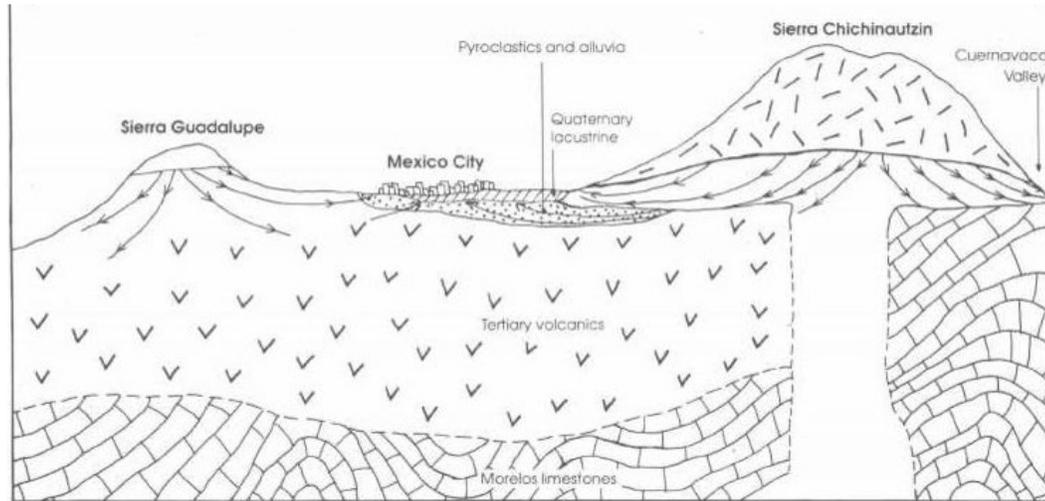
$$f_0 = \frac{V_S}{4H}$$

Città del Messico (Terremoto del 1985)

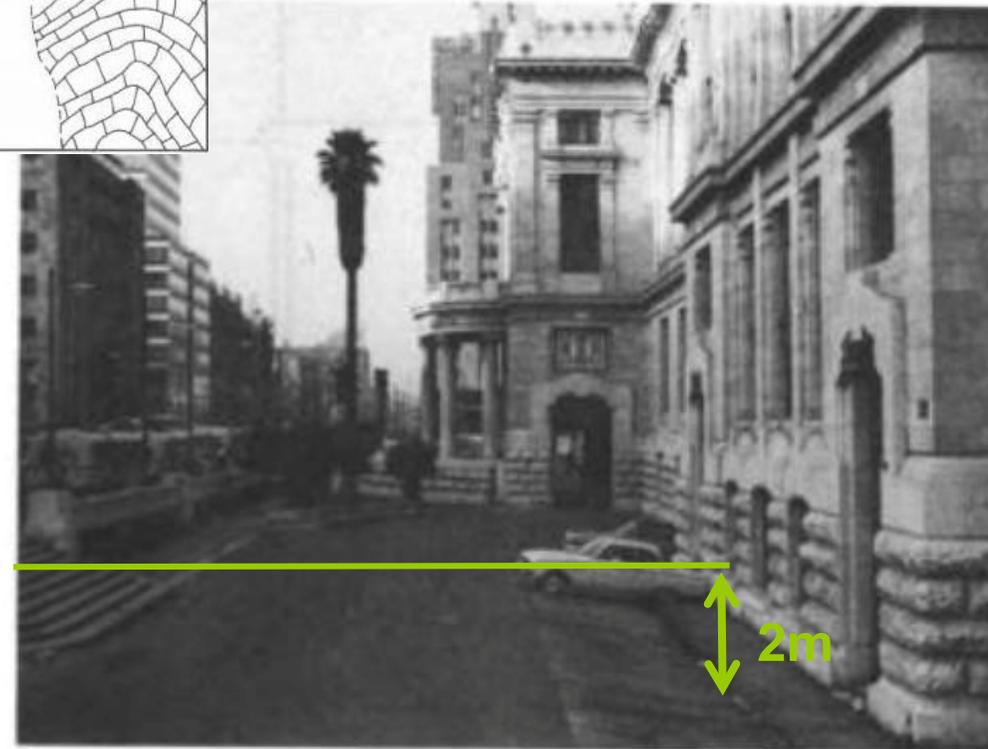


(Faccioli e Paolucci, 2005)

Geologia

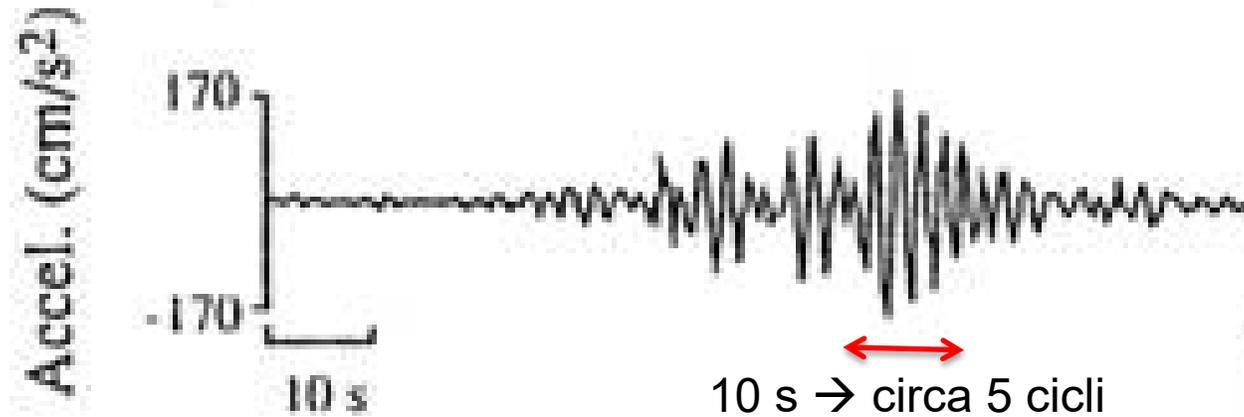


Palacio de las Bellas Artes, Mexico City



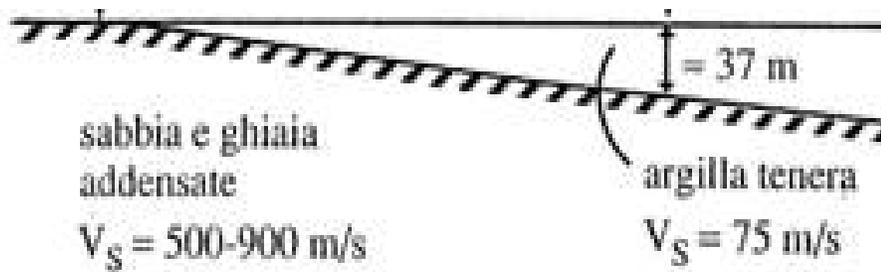
Città del Messico è costruita su un deposito lacustre di origine vulcanica, che presenta caratteristiche geotecniche molto peculiari con elevatissima deformabilità

Città del Messico (Terremoto del 1985)



→ T=2s

Periodo dominante

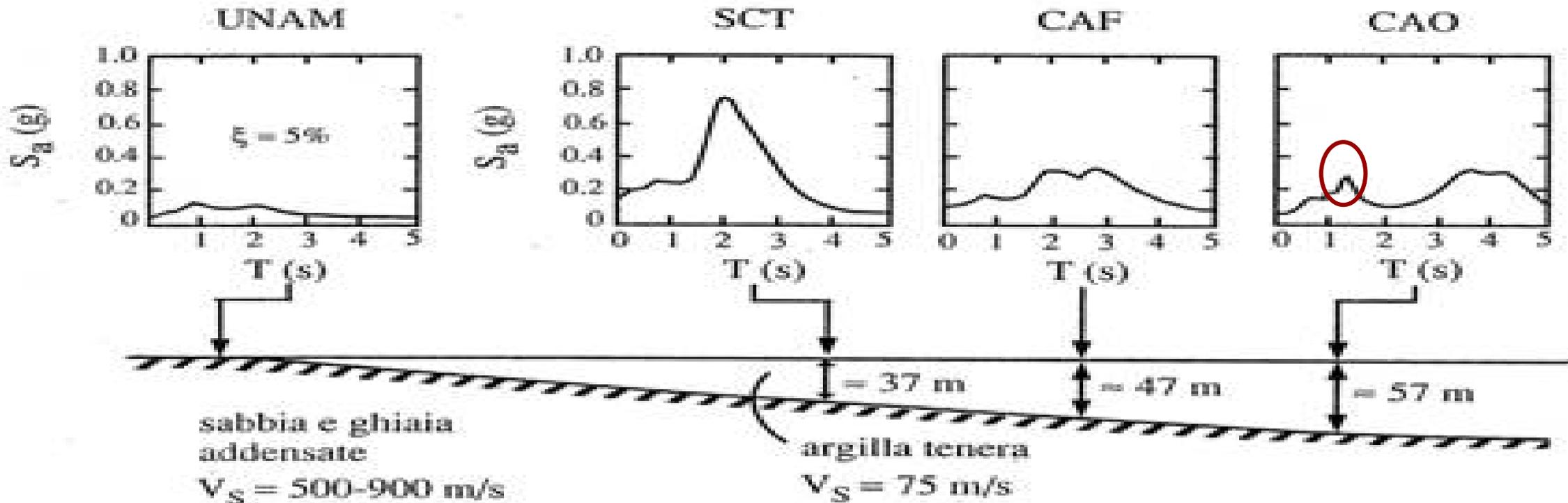


$$f_n = \frac{V_S}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 37} = 0.5 \text{ Hz}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = 2 \text{ s}$$

(inoltre: rapporto di smorzamento molto basso)

Città del Messico (Terremoto del 1985)



(Faccioli e Paolucci, 2005)

SCT

$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 37} = 0.5 \text{ Hz}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = 2 \text{ s}$$

CAF

$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 47} = 0.4 \text{ Hz}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = 2.5 \text{ s}$$

CAO

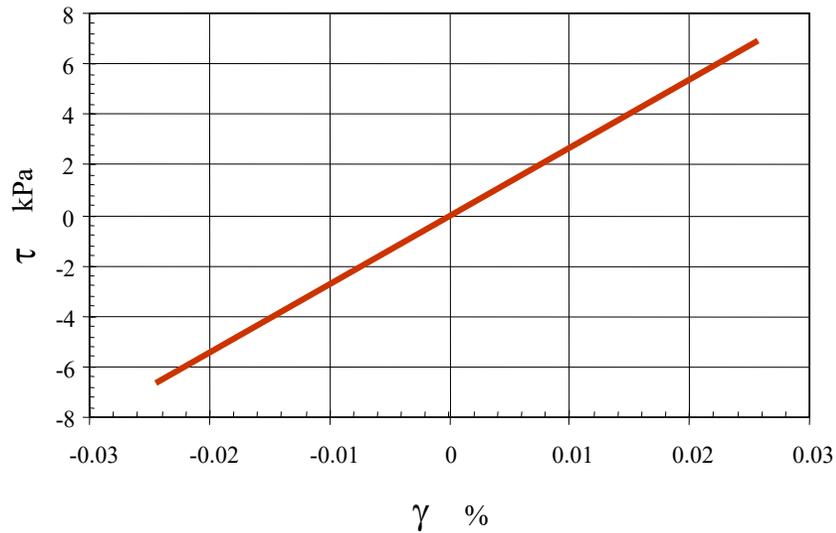
$$f_n = \frac{V_s}{4H} = \frac{75}{4 \cdot 57} = 0.33 \text{ Hz}$$

$$T_n = \frac{1}{f_n} = 3 \text{ s}$$

$$f_1 = \frac{3V_s}{4H} = \frac{3 \cdot 75}{4 \cdot 57} = 1 \text{ Hz}$$

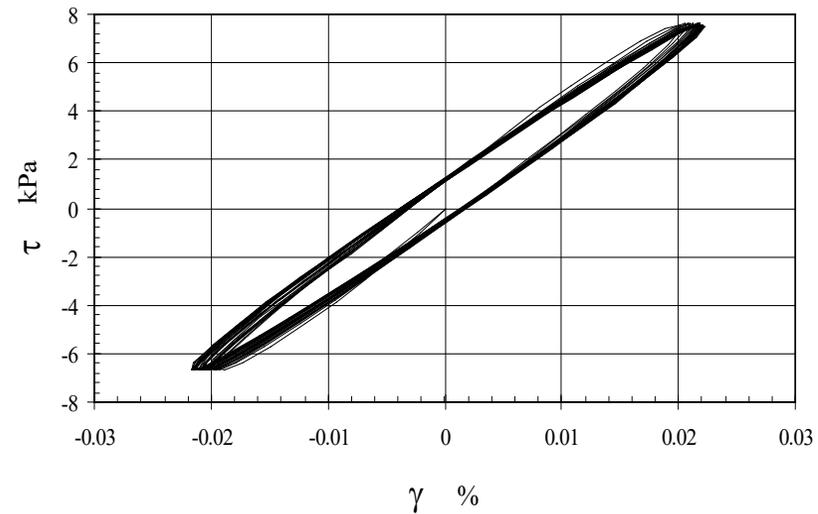
Evidenza sperimentale

Comportamento sforzi-deformazioni per un mezzo elastico lineare



$$\tau = G \cdot \gamma$$

Esempio di risultato sperimentale (prova di taglio torsionale ciclico)



Rappresentazione del comportamento ciclico dei terreni

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

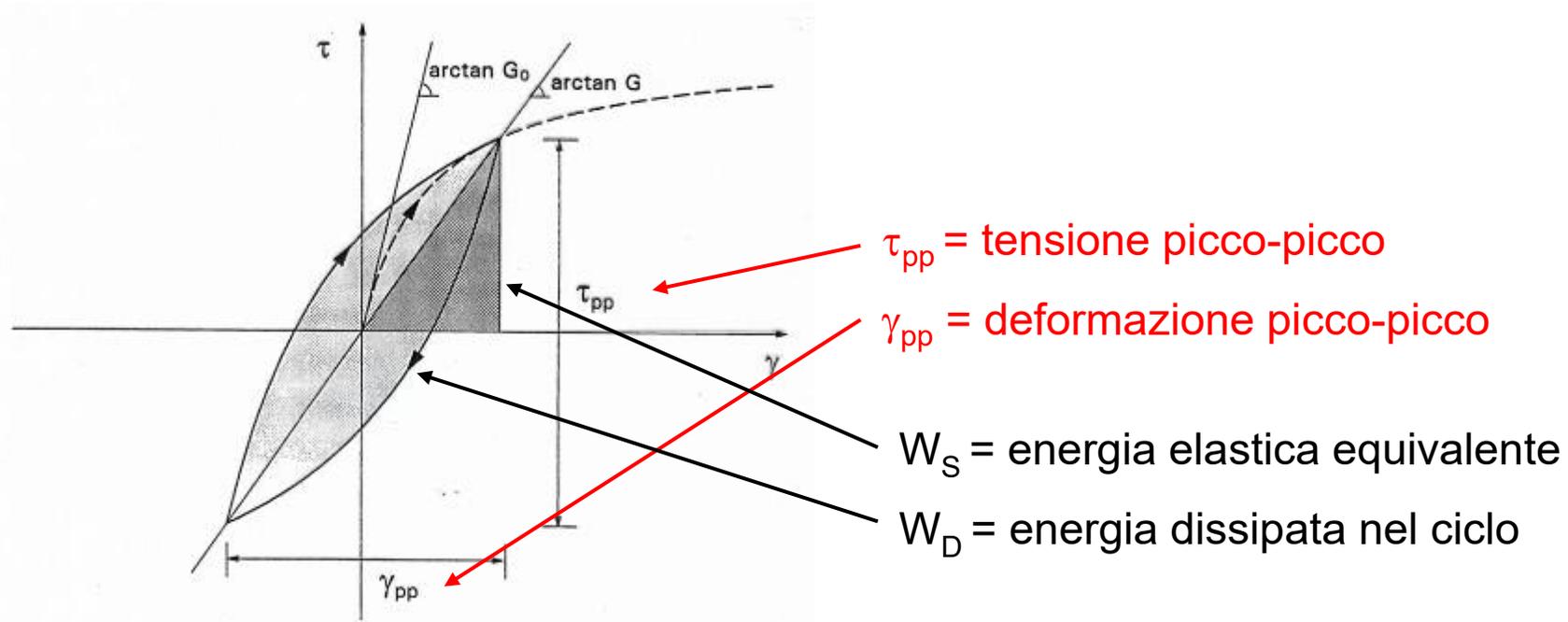
G = modulo di taglio

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

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

D = fattore di smorzamento (*damping*)

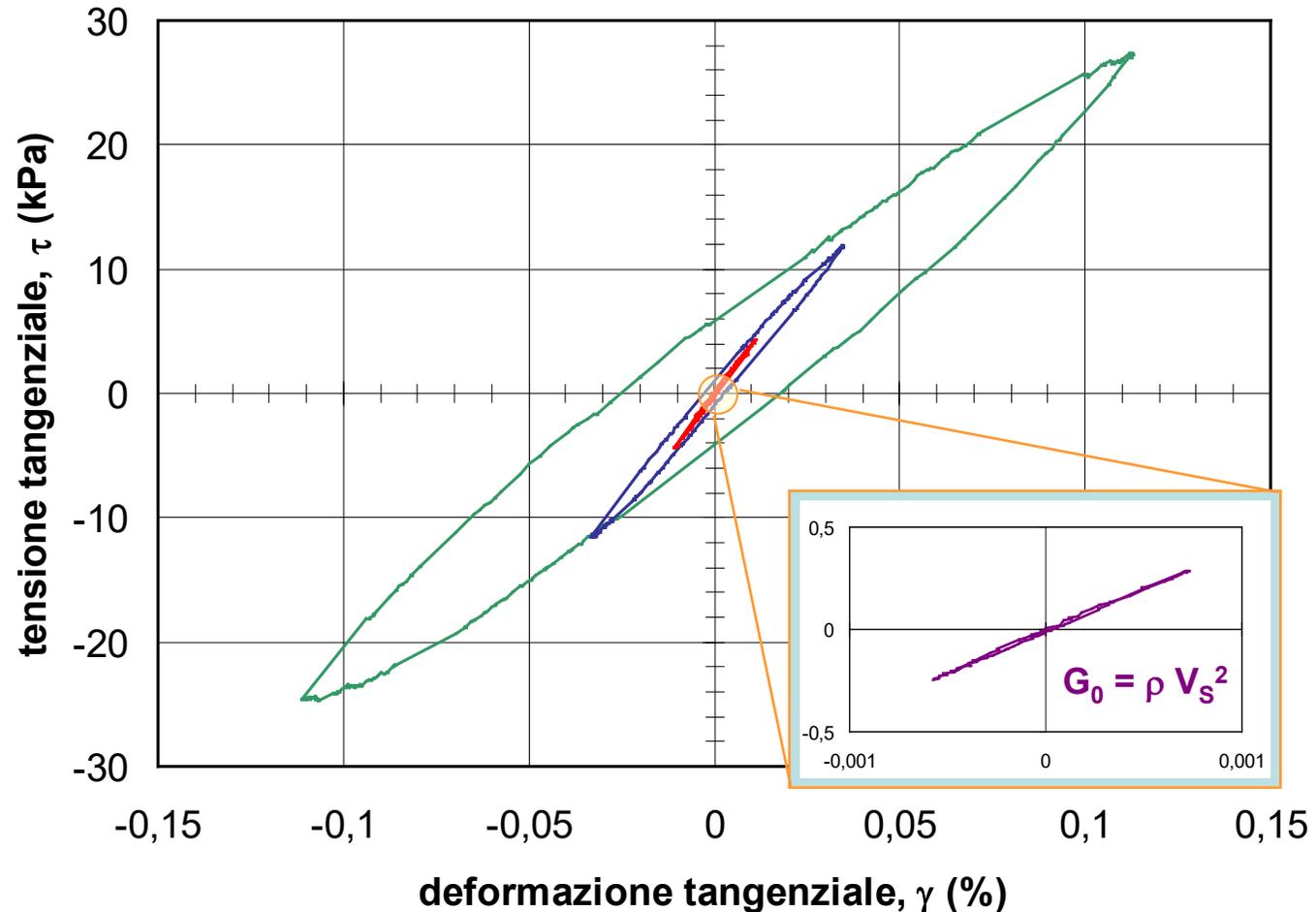
$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S}$$



Evidenza sperimentale della natura del legame τ - γ

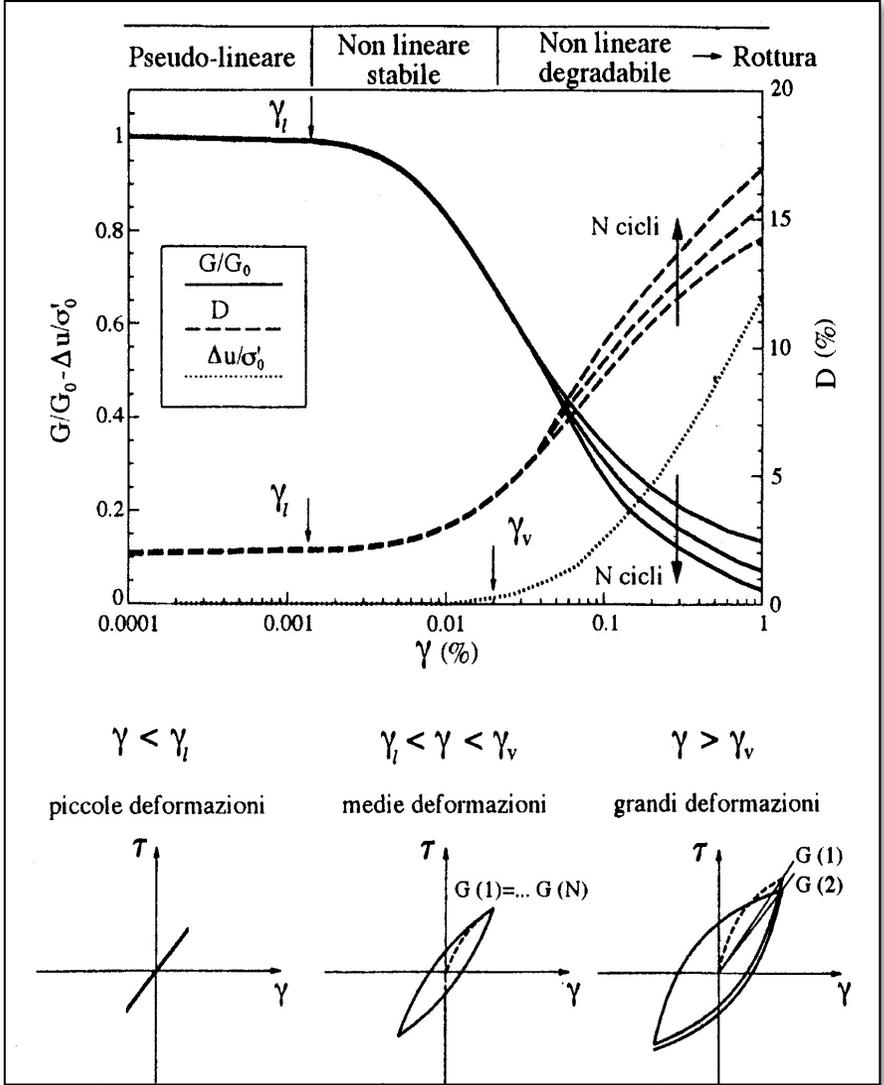
All'aumentare del livello di sollecitazione, il ciclo tensione-deformazione:

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



(cortesia prof. Silvestri)

Curve di riduzione 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

lineare $\gamma_t^l \rightarrow$ Comportamento non lineare. Poca influenza del numero di cicli (risposta stabile). Deformazioni plastiche limitate.

volumetrica $\gamma_t^v \rightarrow$ Grandi deformazioni plastiche (deformazioni volumetriche permanenti e accumulo sovrappressione interstiziale). Cicli non più stabili.

Codici di calcolo

- 1D
 - Metodo Lineare Equivalente
 - Total stress (SHAKE, EERA, STRATA, DEEPSOIL, MARTA)
 - Non-linear
 - Total stress (CHARSOIL, MASH, NONLI3, TESS1, NERA, DEEPSOIL);
 - Effective stress (DESRA-2C, DESRAMOD);
 - Advanced non-linear (DYNA 1-D, CYCLIC 1-D, CYBERQUAKE)
- 2D – 3D: (QUAD4M, GEFDYN, FLAC, PLAXIS, OPENSEES)

Metodo lineare equivalente 1D

(Idriss & Seed, 1968)

Modellazione serie di strati piani e paralleli:

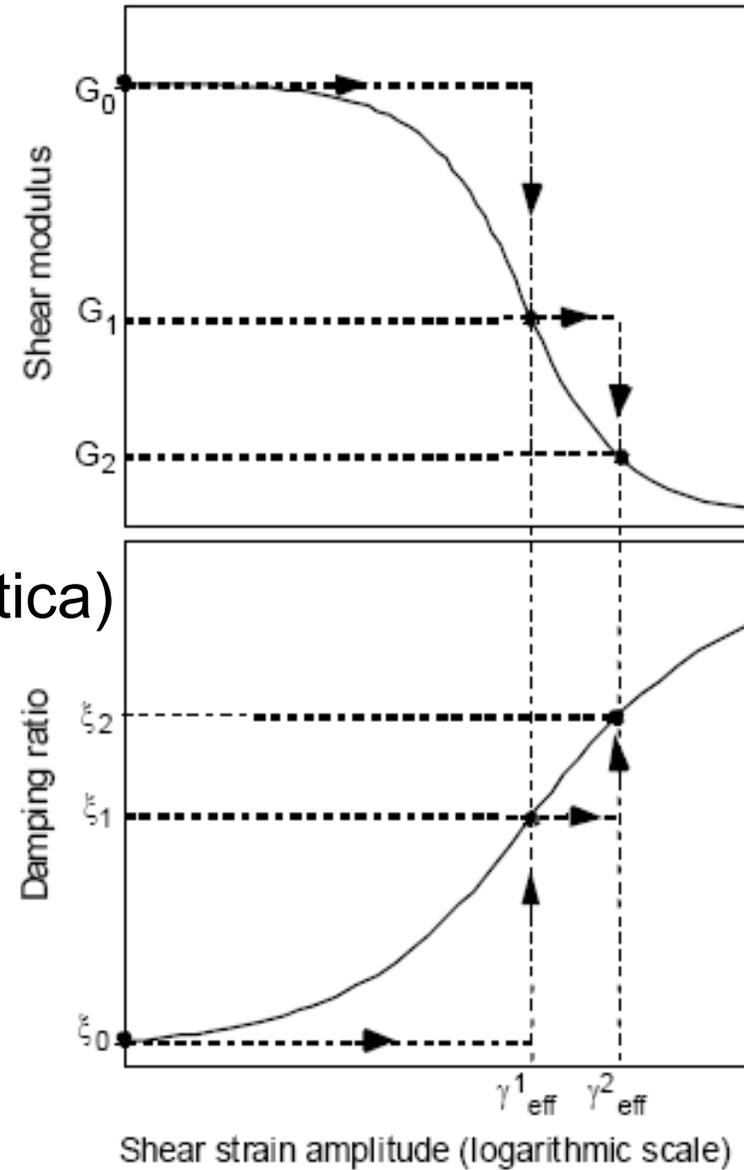
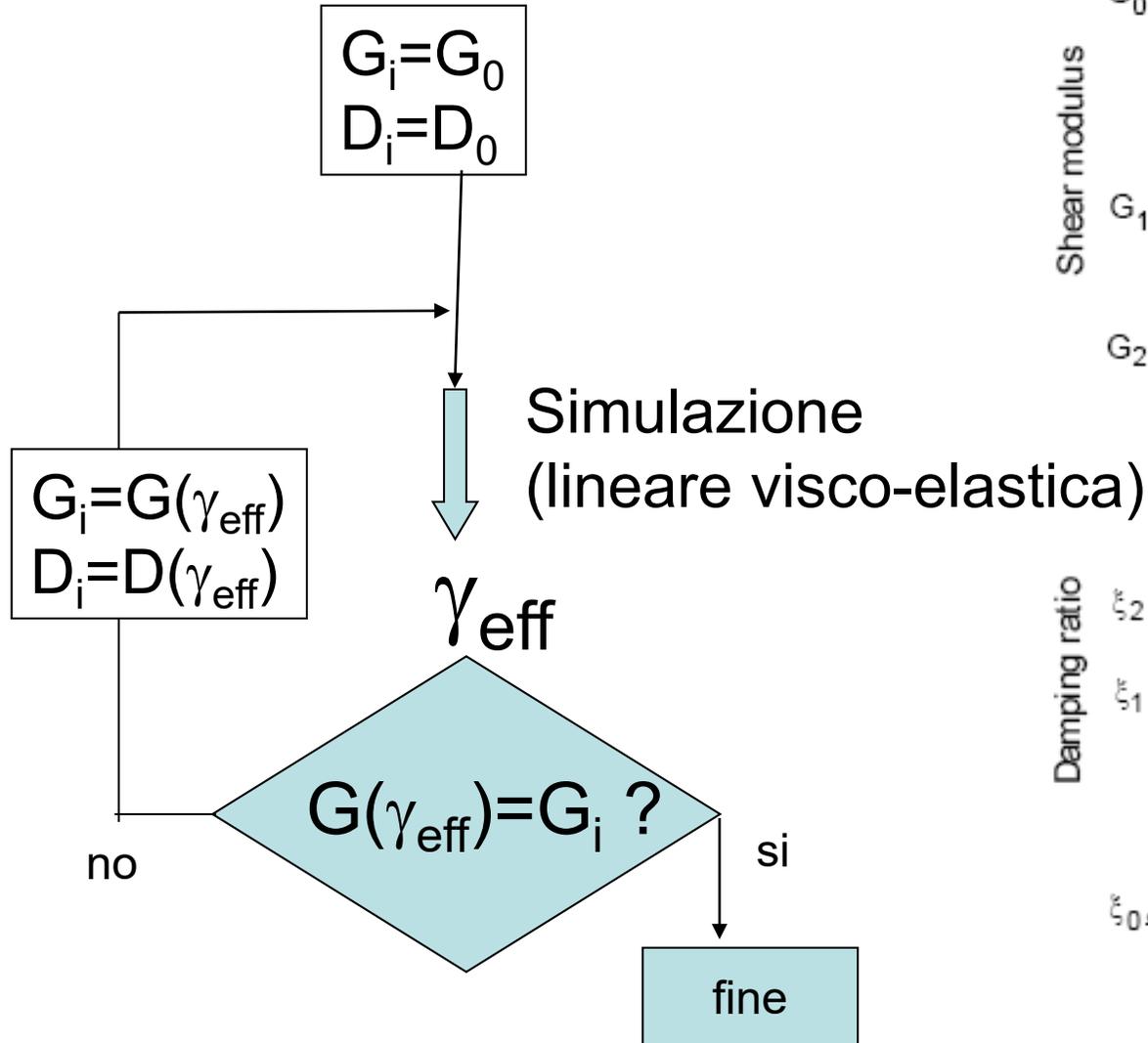
Per ciascun strato si definiscono caratteristiche fisiche e curve di variazione del modulo e del rapporto di smorzamento

Procedimento iterativo di correzione dei moduli

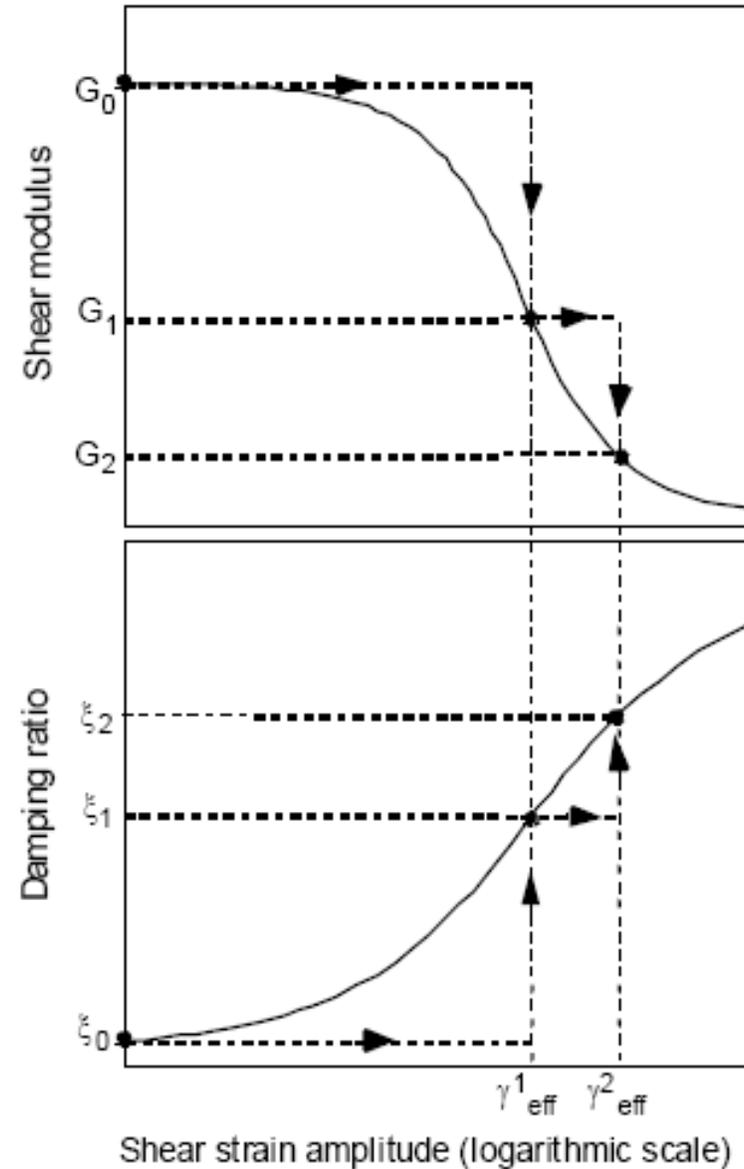
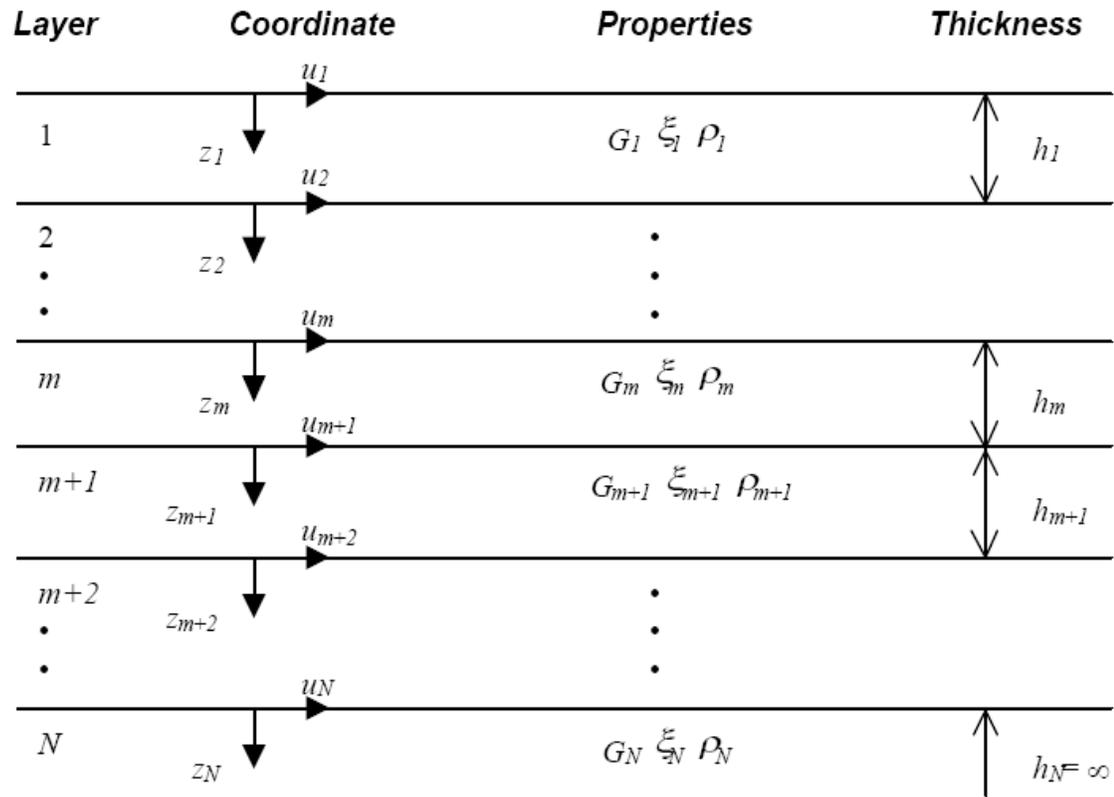
Risultato finale: stima di moto sismico e stato tensionale (σ) in ciascun punto del deposito di terreno per un dato evento sismico inserito come storia temporale (accelerazione) al bedrock

Metodo lineare equivalente

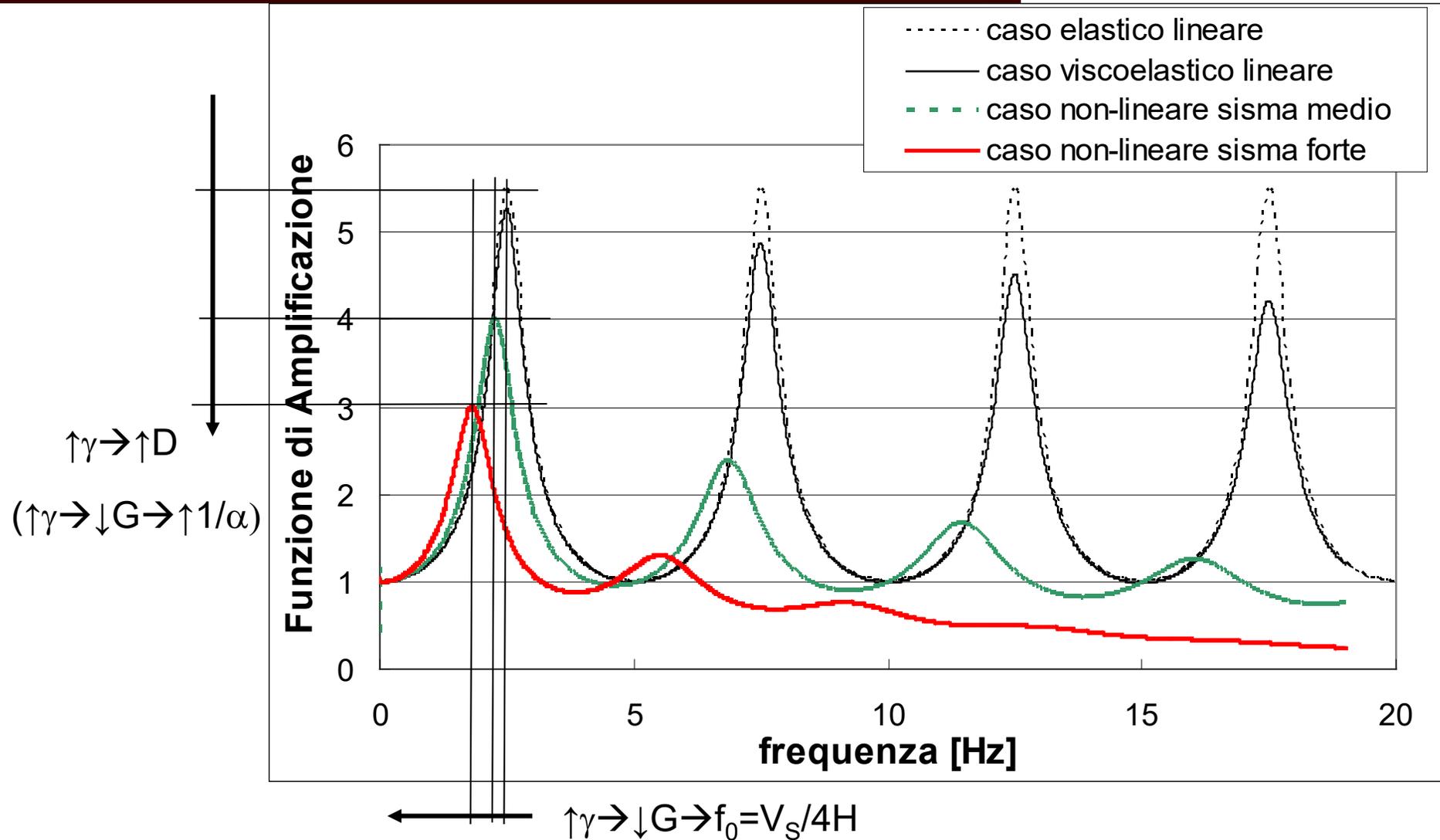
(Idriss & Seed, 1968)



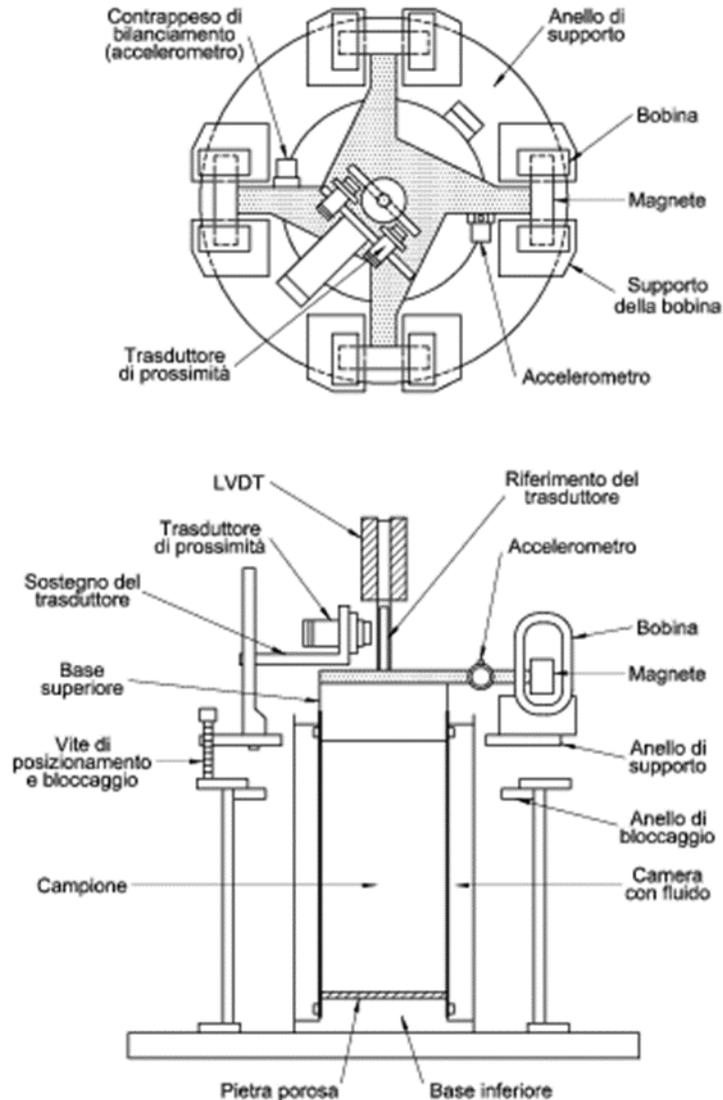
Shake (1D) (Idriss & Schnabel, 1972)



Modello 1D: effetto della non-linearità



Taglio torsionale ciclico

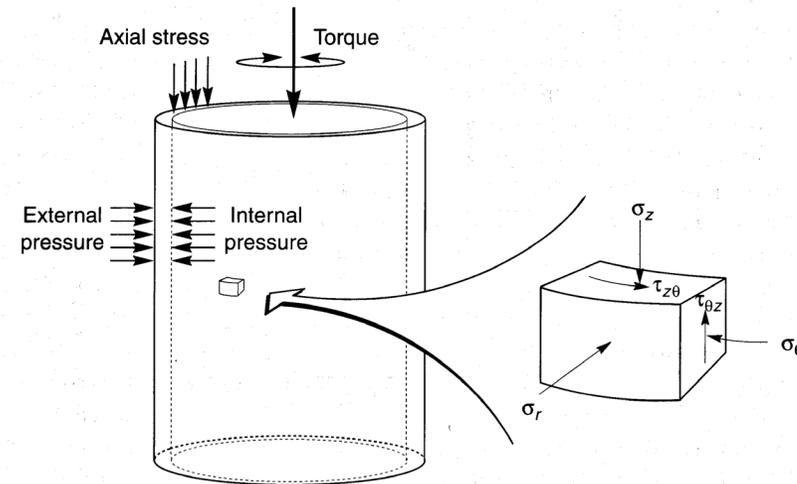


(Lancellotta, 2004)

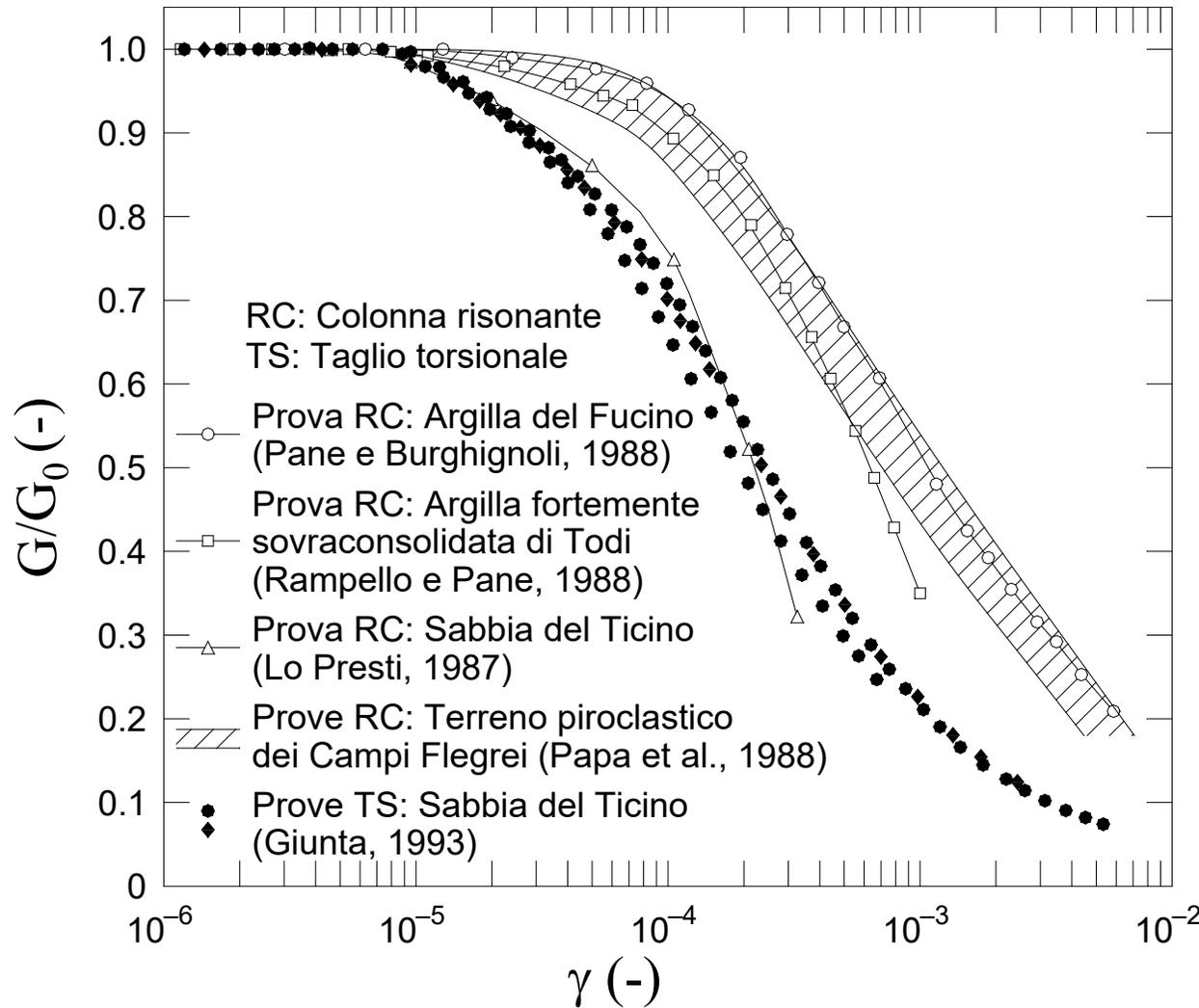


Vengono applicate sollecitazioni torsionali cicliche utilizzando un sistema elettromagnetico che genera una coppia oscillante in corrispondenza della base superiore del provino. Ripetendo la prova con diversi valori di forzante è possibile ricostruire la variazione della risposta in funzione della deformazione del provino.

(Kramer, 1996)



Curve di riduzione del modulo (terreni italiani)



Soglia elastica
($G/G_0 > 0.99$)

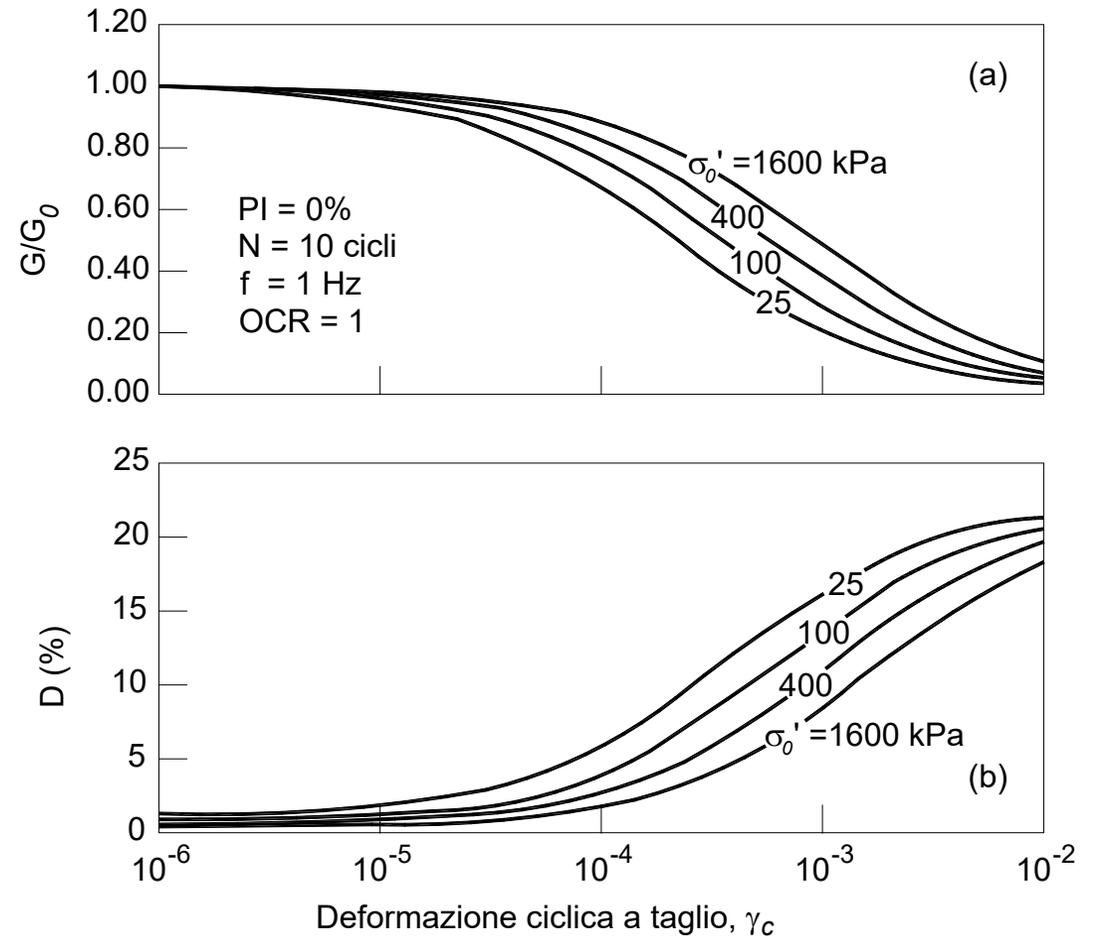
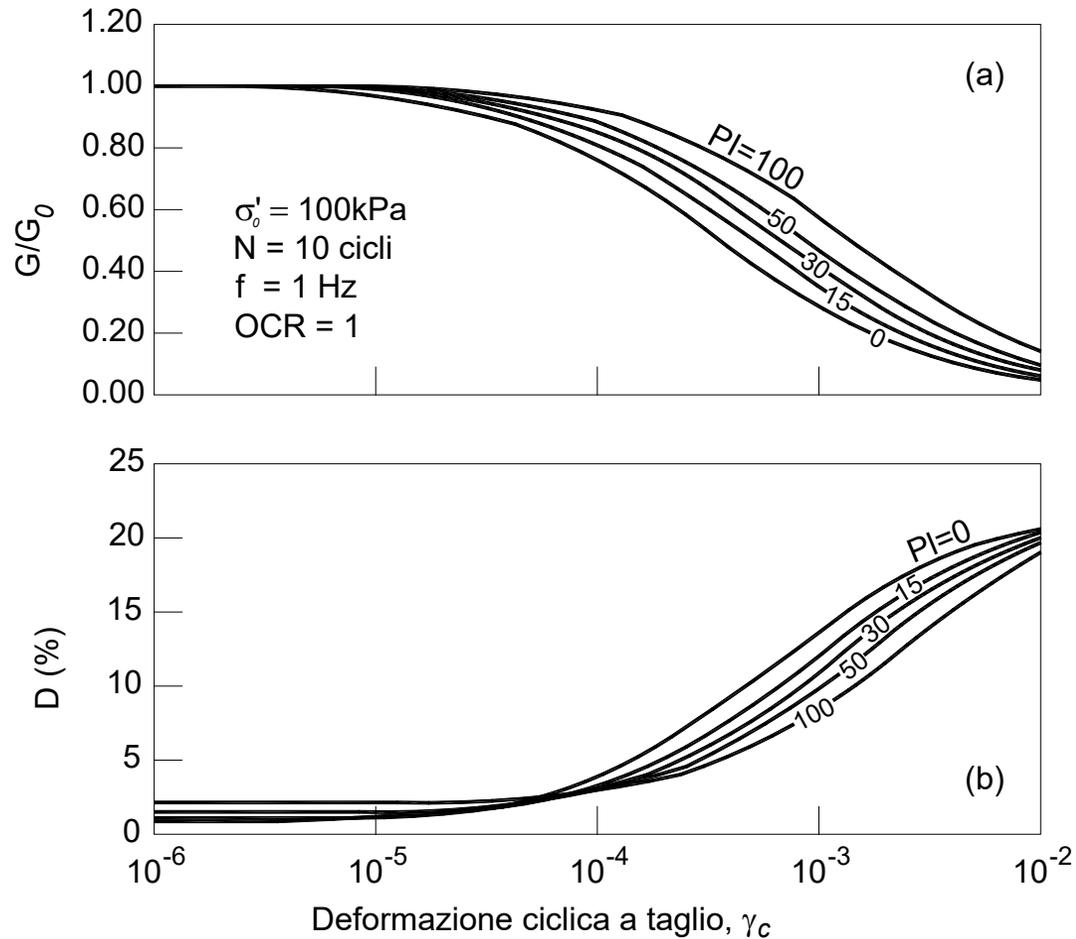
aumenta con pressione
di confinamento e
indice di plasticità
(contenuto fine)

limite inf.: 5×10^{-6}
(e.g. sabbia a 20 kPa)

limite sup.: 10^{-4}
(e.g. caolinite a 200 kPa)

(da Lancellotta e Calavera, 1999)

Curve di riduzione del modulo e del rapporto di smorzamento

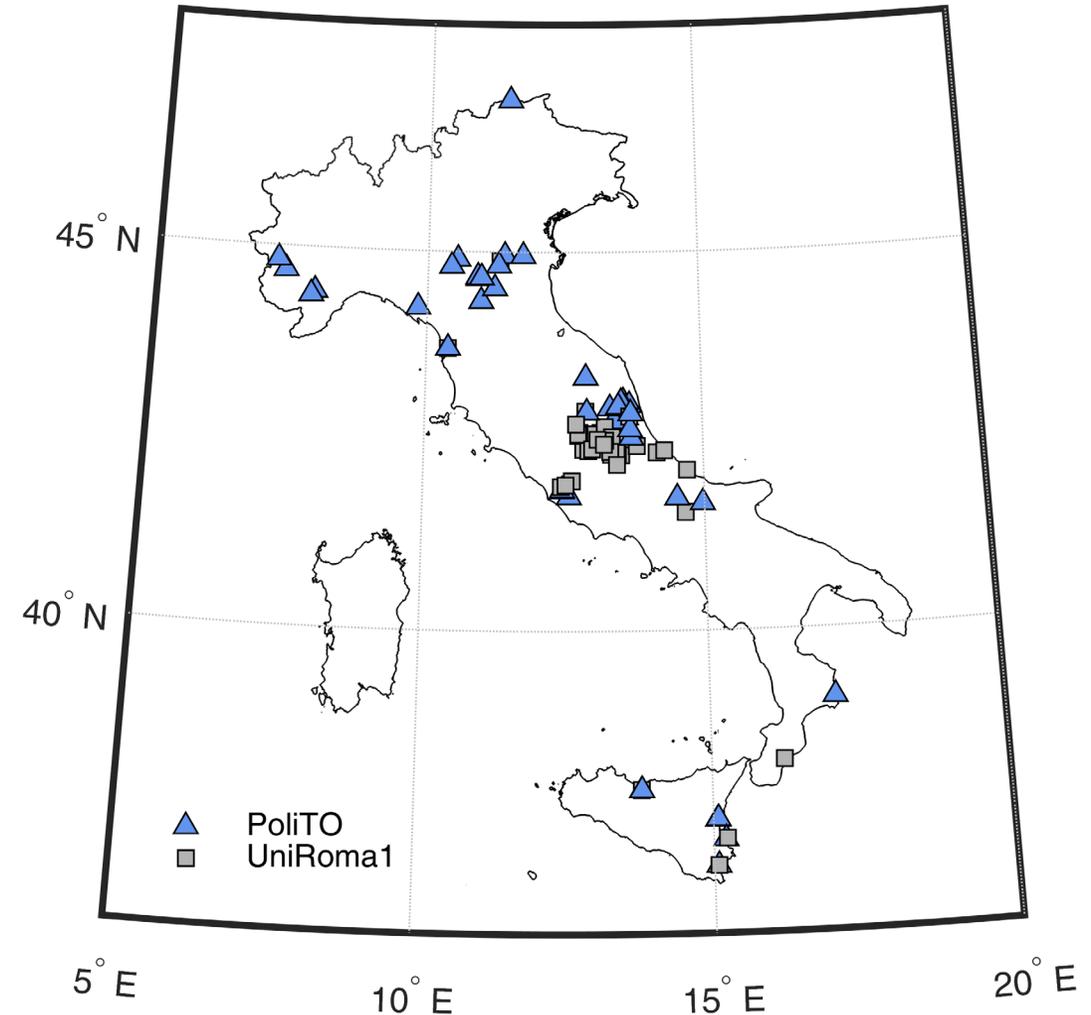


(Darendeli, 2001)

Database of RC and DSDSS tests from PoliTO and UniRoma1

It includes the results of cyclic and dynamic laboratory tests performed on Italian natural soils in the past 30 years:

- **252 laboratory tests: 110 RC** (PoliTO) and **142 CSDSS** (UniRoma1) tests



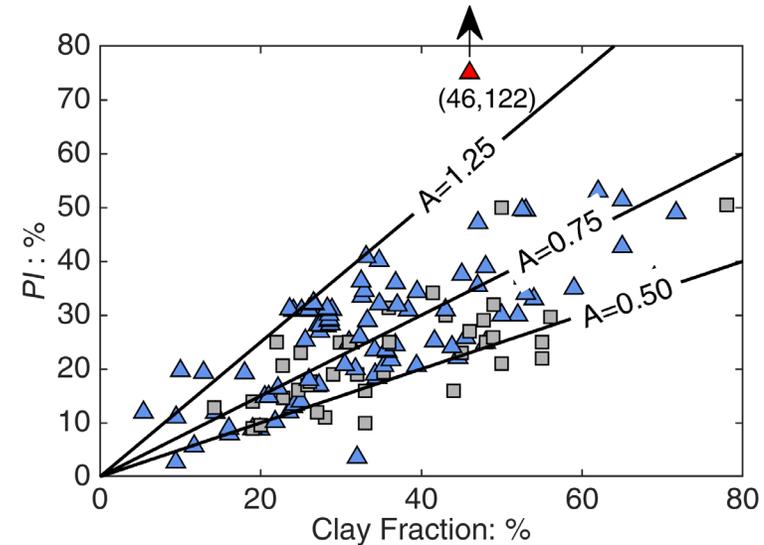
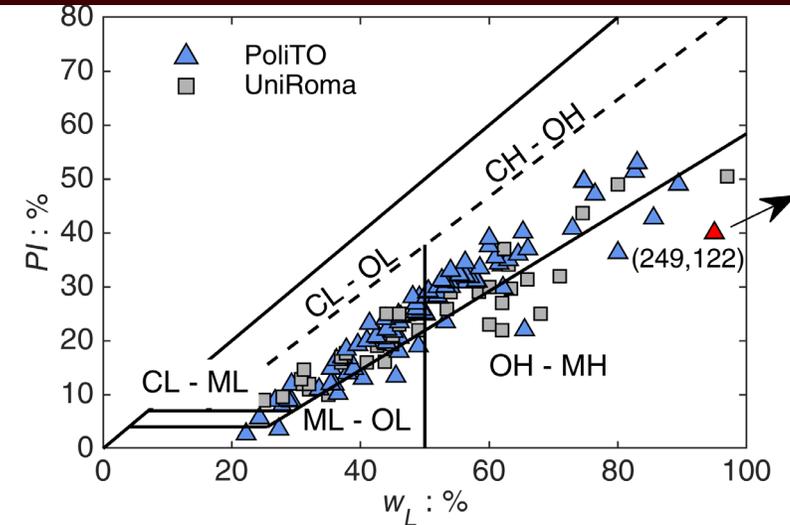
(Ciancimino et al. 2022 submitted to BEE)

Database of RC and DSDSS tests from PoliTO and UniRoma1

It includes the results of cyclic and dynamic laboratory tests performed on Italian natural soils in the past 30 years:

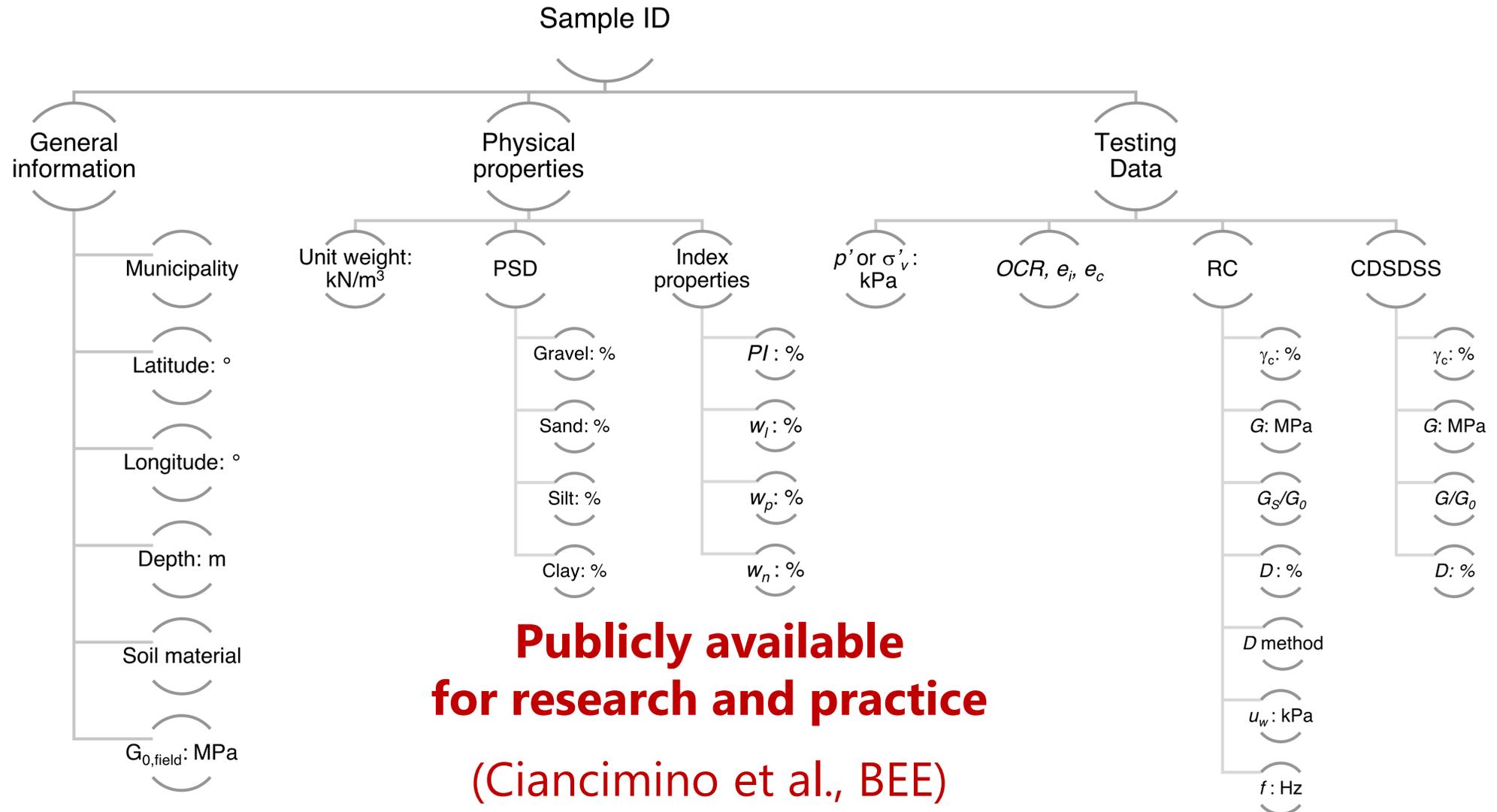
- **252 laboratory tests: 110 RC** (PoliTO) and **142 CSDSS** (UniRoma1) tests
- Low-to-normal active clays and silts
- $0\% < PI < 60\%$
- $20 \text{ kPa} < p' < 1100 \text{ kPa}$
- $7 \text{ MPa} < G_0 < 340 \text{ MPa}$

(Ciancimino et al. 2022 submitted to BEE)

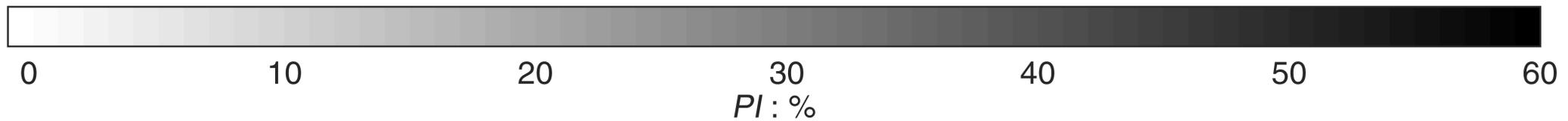
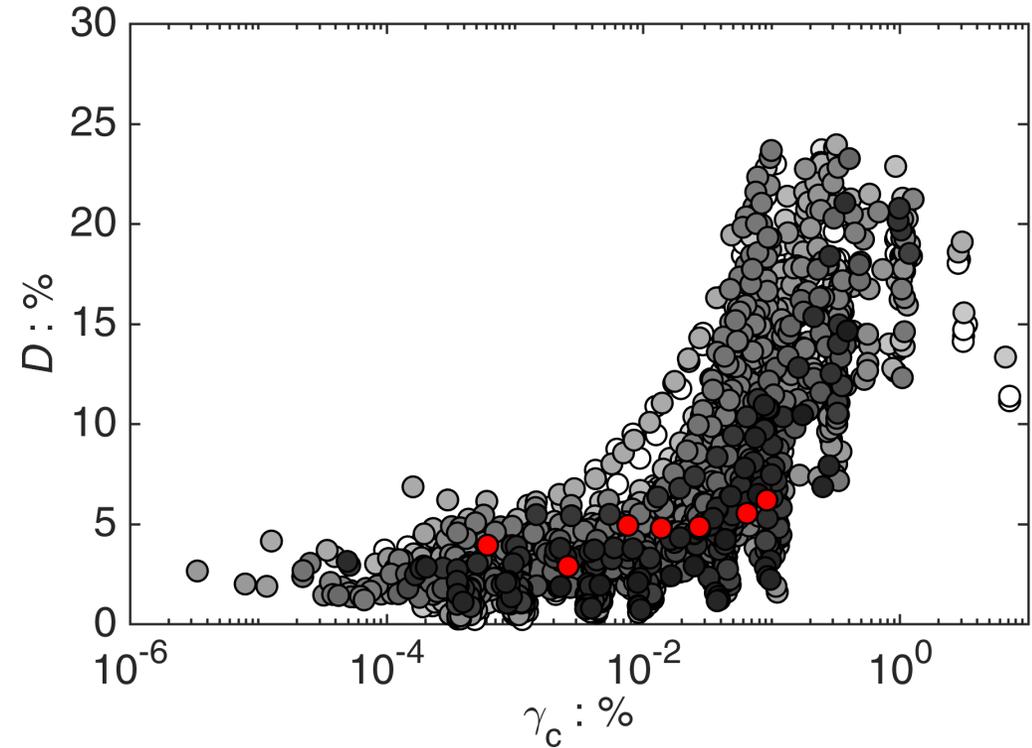
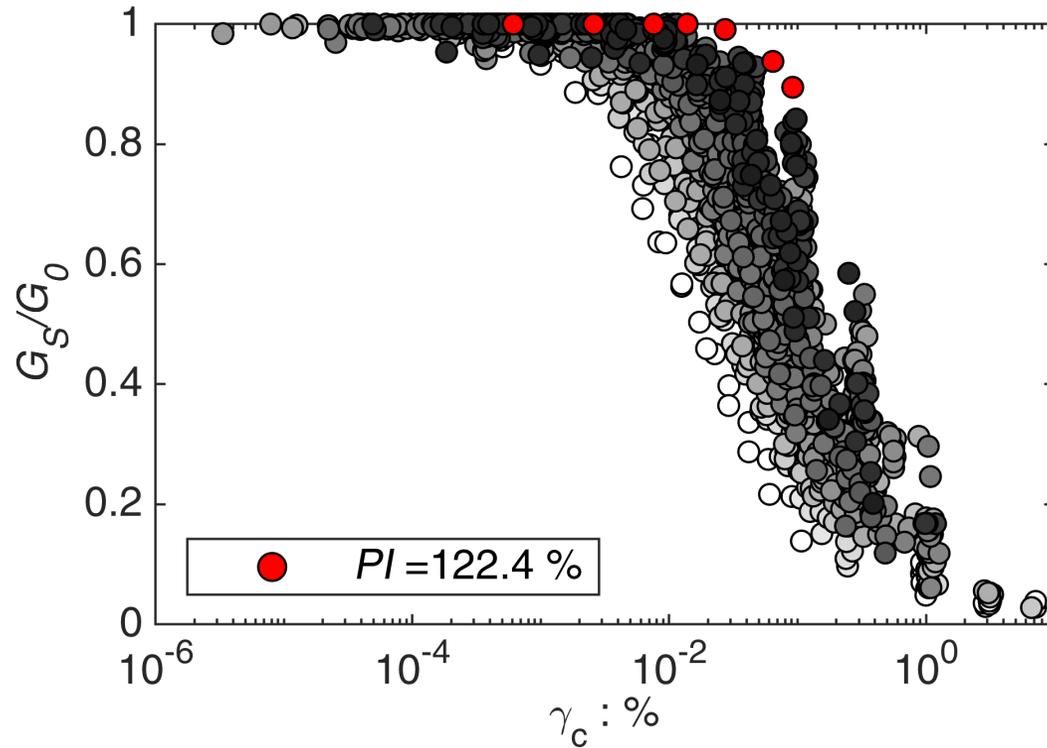


Database of RC and DSDSS tests from PoliTO and UniRoma1

(Ciancimino et al. 2022 submitted to BEE)

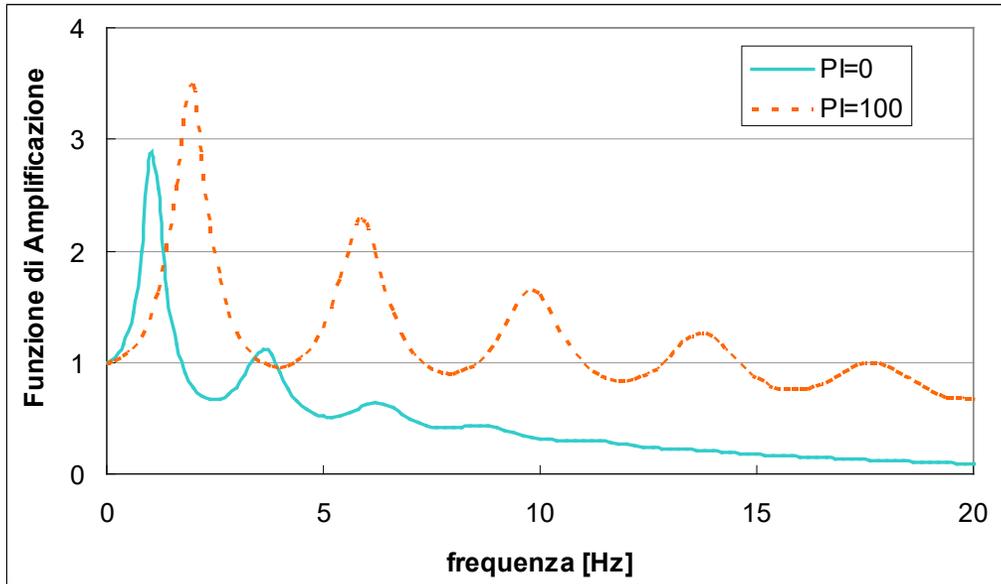
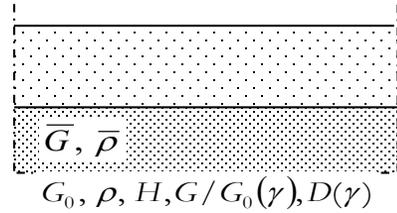


Modulus Reduction and Damping ratio curves

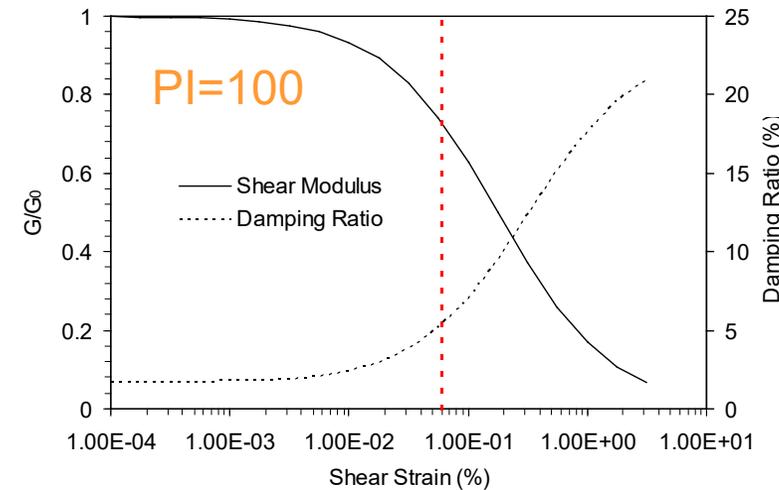
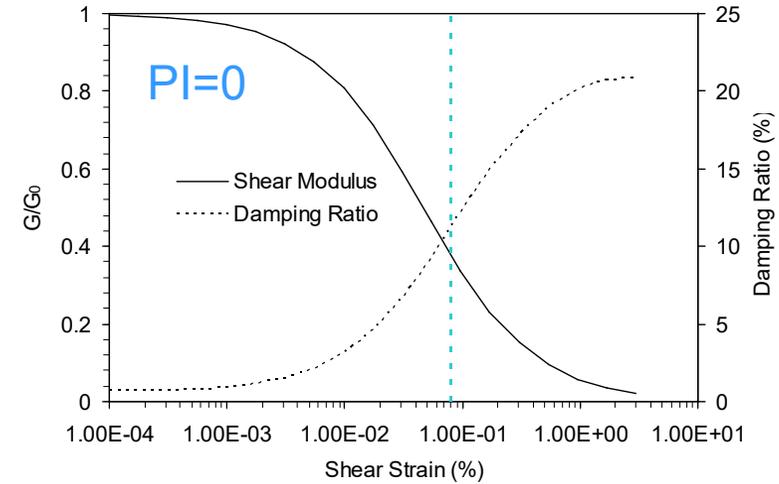


(Ciancimino et al. 2022 submitted to BEE)

Confronto amplificazione PI=0 vs PI=100



Parametri equivalenti in mezzeria strato



Argilla di Città del Messico

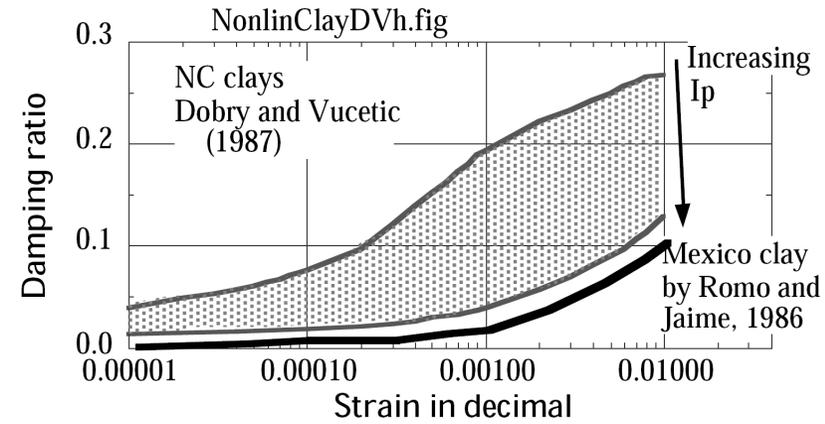
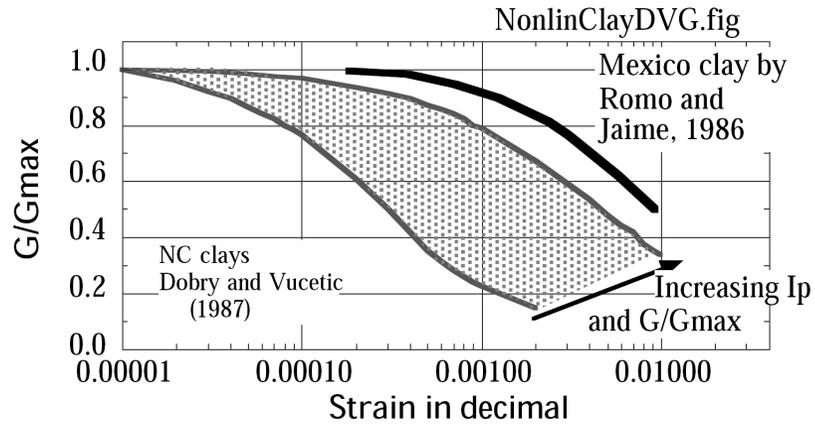
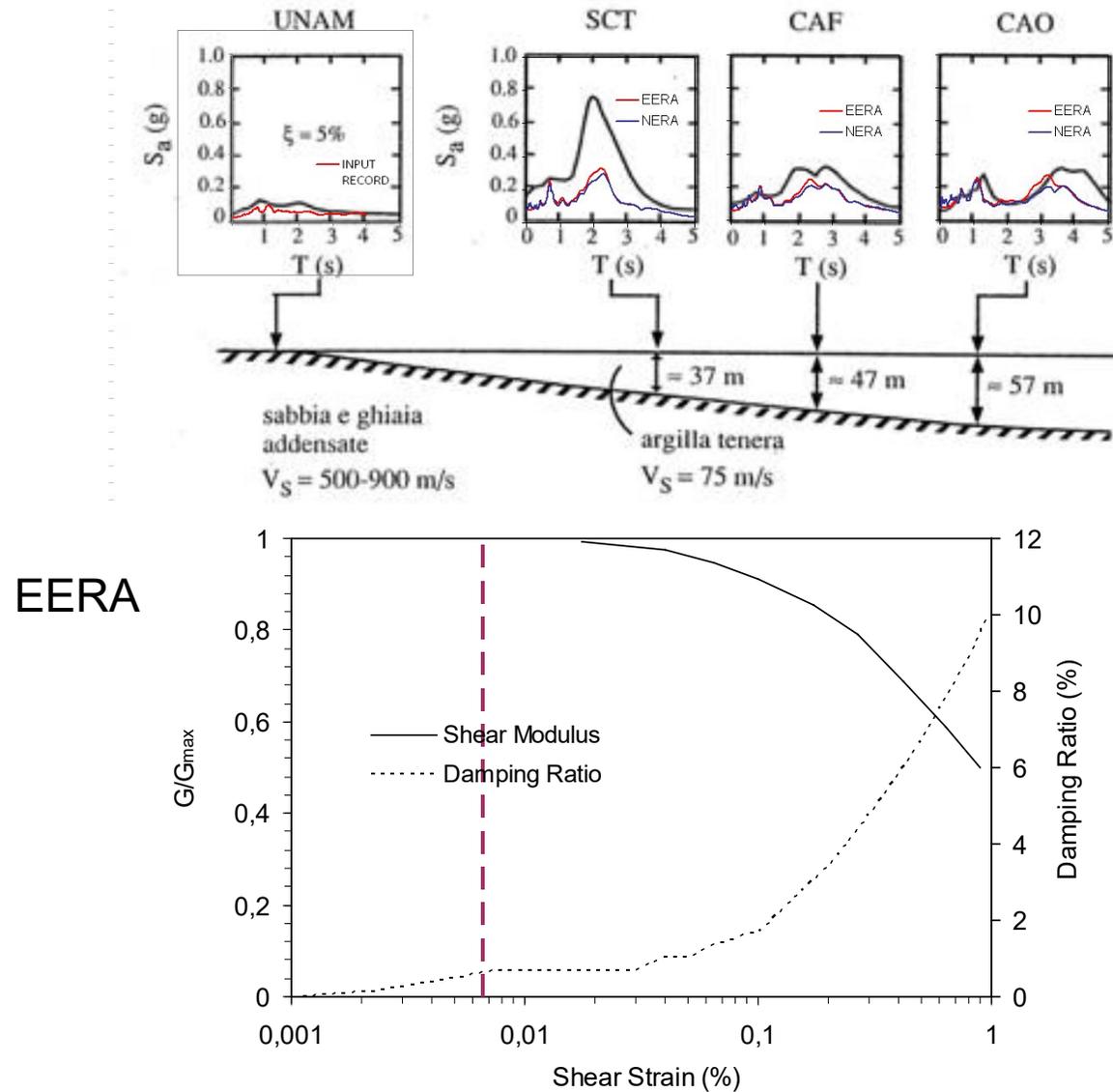


Table 1. Typical ranges of mineralogical and geotechnical index properties of different soft lacustrine and marine sediments.

	Leda clay						
	Glacial Lake Albany ^a	St. Lawrence Valley, New York ^a	Hawkesbury, Ontario ^b	Drammen, Norway ^c		Fucino, Italy ^d	Mexico City ^e
Depositional environment	Fresh water	Brackish	Brackish	Saline	Saline, leached	?	?
Approx. age of sediment column (years)	15 000	12 000	12 000	10 000	10 000	64 000	600 000
Carbonate content (%)	2–20	10–27	2–13	0–3	0–3	10–70	10–30
Smectite content (%)	—	—	5–12	Rare	Rare	?	4–16
Clay-size fraction (%)	20–40	30–70	75–90	30–65	30–65	25–50	20–50
Organic matter (%)	—	—	1	—	—	?	6
Sensitivity	2–15	20 to >100	2–30	8–10	200	?	?
Liquid limit water content (%)	40–60	22–45	50–80	35–50	20–43	80–120	338 avg.
Plastic limit water content (%)	20–30	16–25	20–30	25–30	18–25	45–60	80 avg.
Plasticity index	2–30	5–23	20–50	10–20	5–10	25–70	308 avg.
Pore-water salinity (g/L)	0	?	1–15	21	1	?	?
Typical natural water content range (%)	20–40	39–71	40–80	40–50	40–50	60–120	50–400

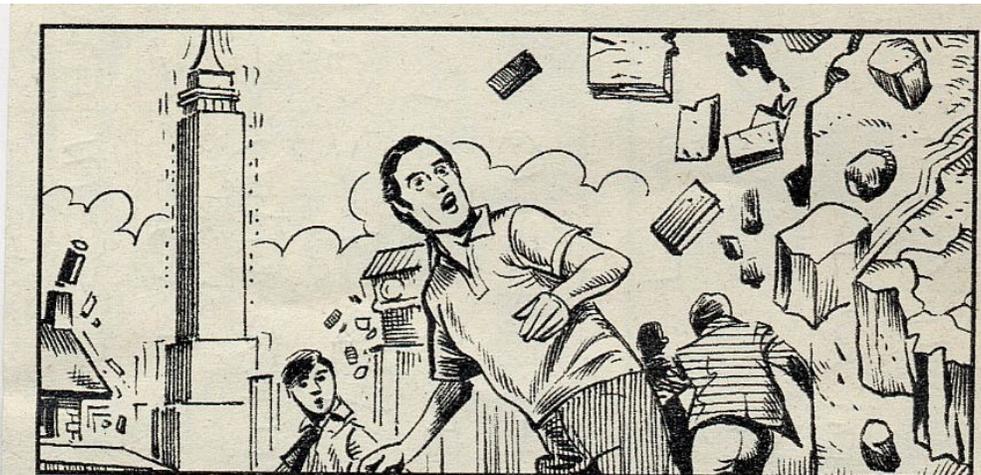
Simulazione numerica per Mexico City 1985



Opinione popolare ...

Il terremoto di Città del Messico del 1985

Strano ma vero!



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

ne siamo proprio sicuri?

(cortesia G. Lanzo)

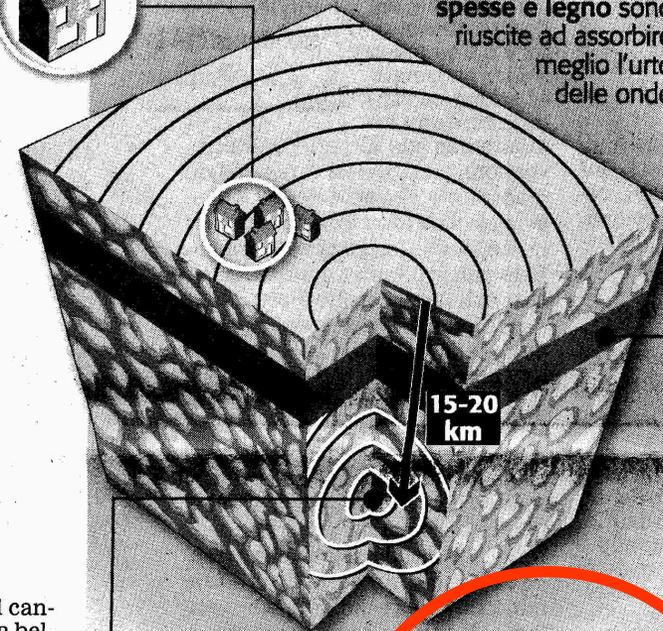
Il terremoto in Emilia-Romagna del sett. 2003

La sua ser-
li entità
ti, sono

Perché i danni sono stati limitati

CASE IN PIETRA

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



nel can-
ma bel-
ed era

PROFONDITA'

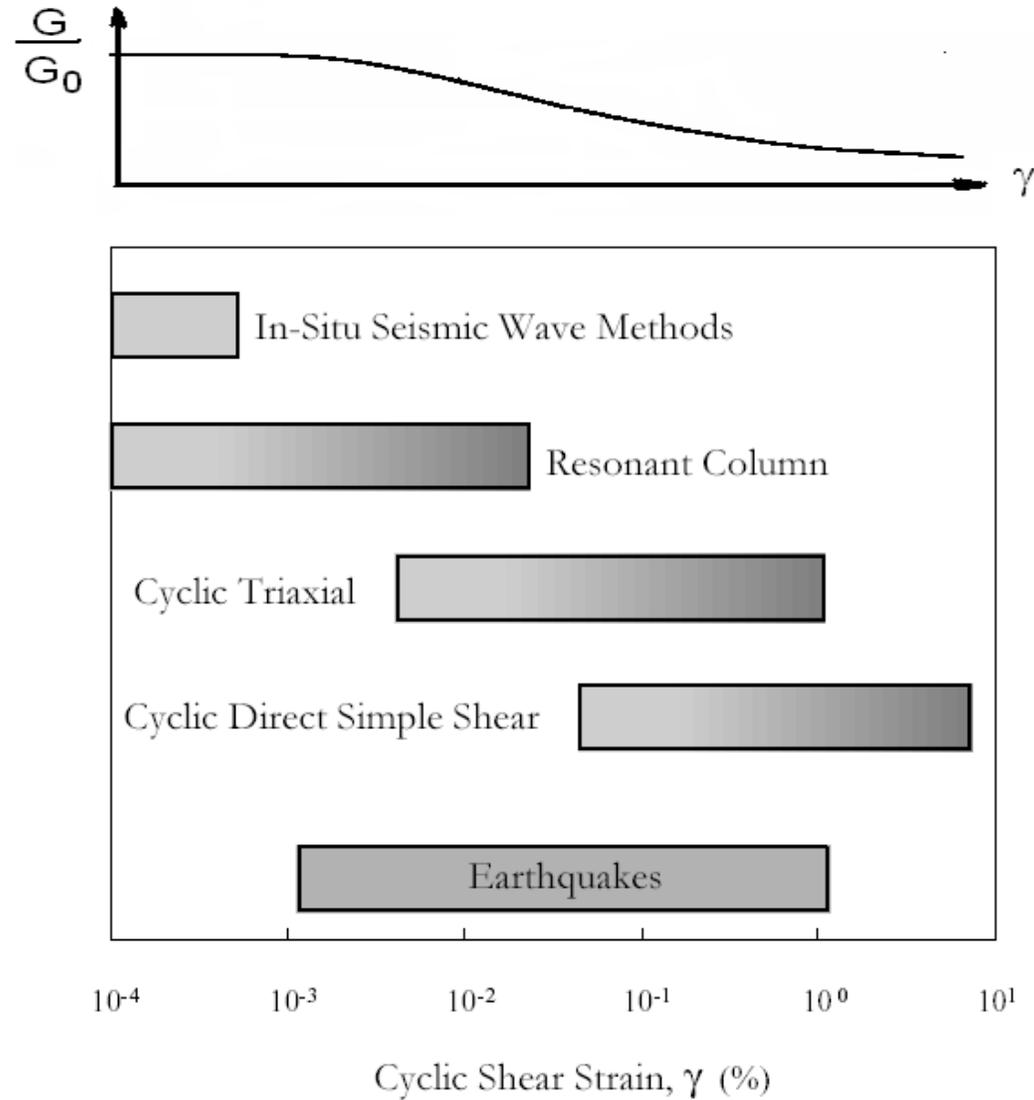
La profondità focale dell'ipocentro è stata di 15-20 chilometri dentro la crosta terrestre. L'onda sismica ha avuto più spazio per smaltire l'effetto devastante

TERRENO ARGILLOSO

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

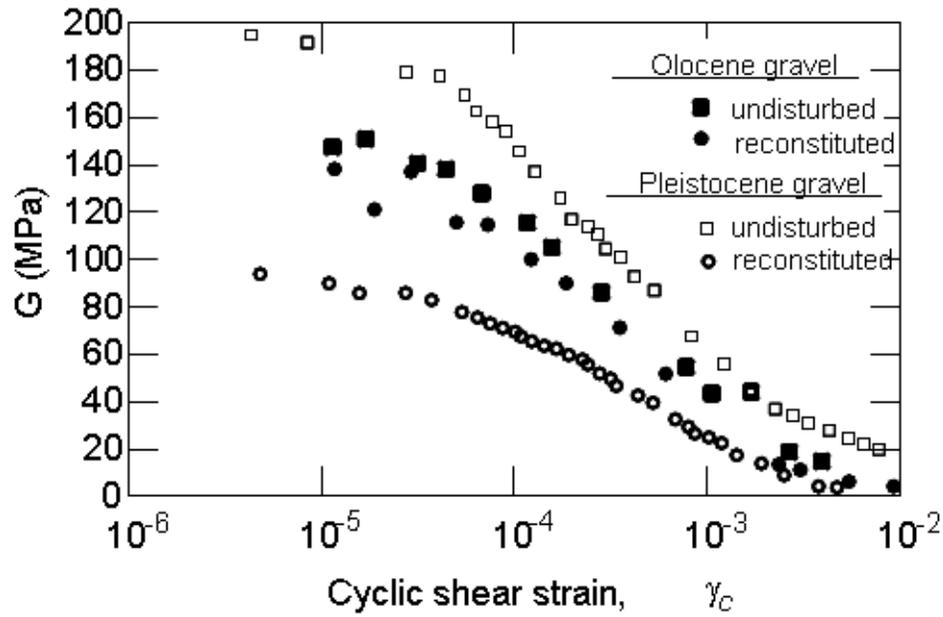
La sal-
Non ha
ico del-
oti: «Se
e zone
sempio
ro ret-
ticular-
mmor-
profon-

Intervallo di deformazioni per diverse prove

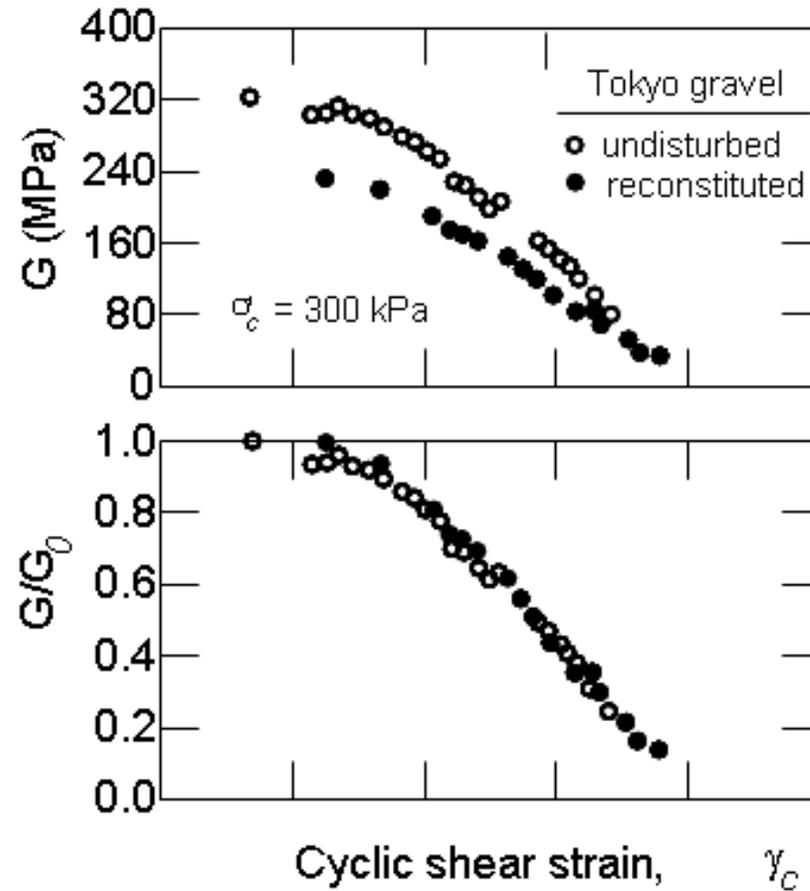


(Ishihara, 1996)

Curve di variazione del modulo G

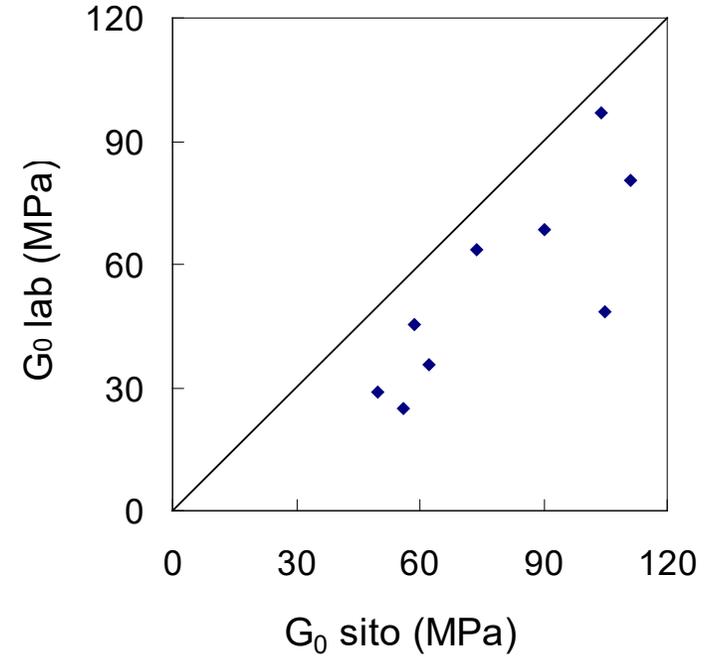
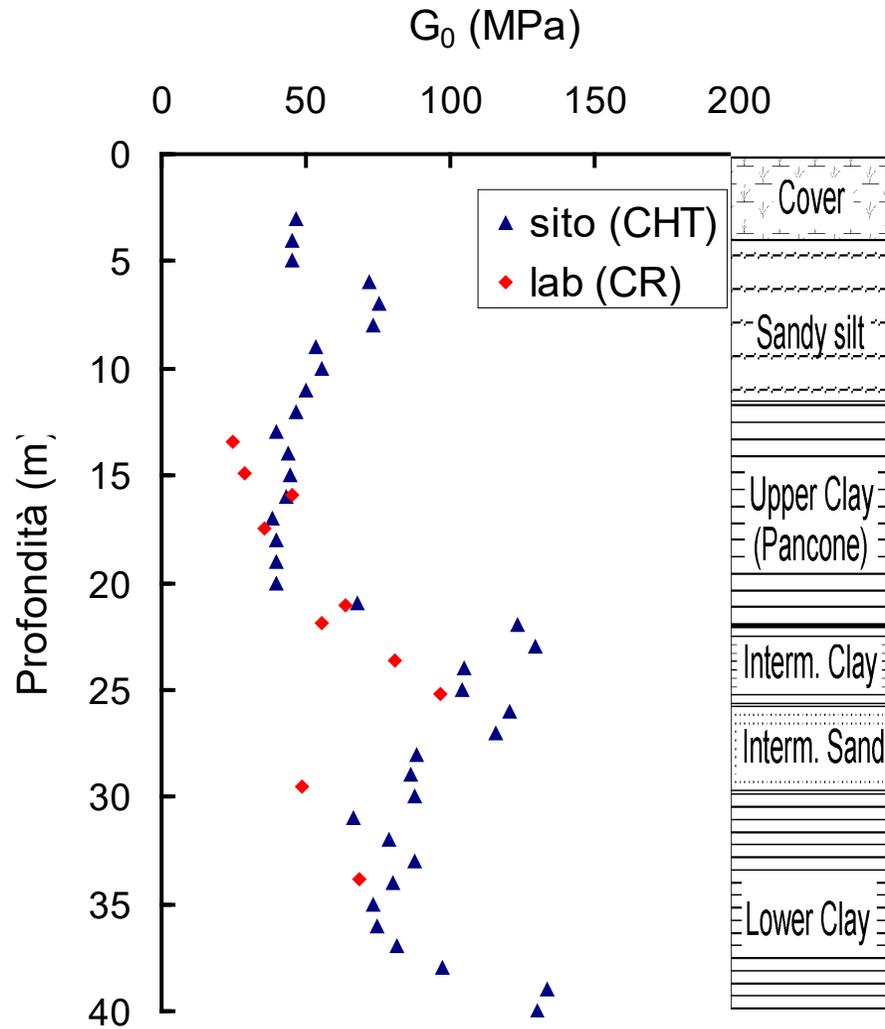


(Goto et al., 1994)



(Hatanata e Uchida, 1995)

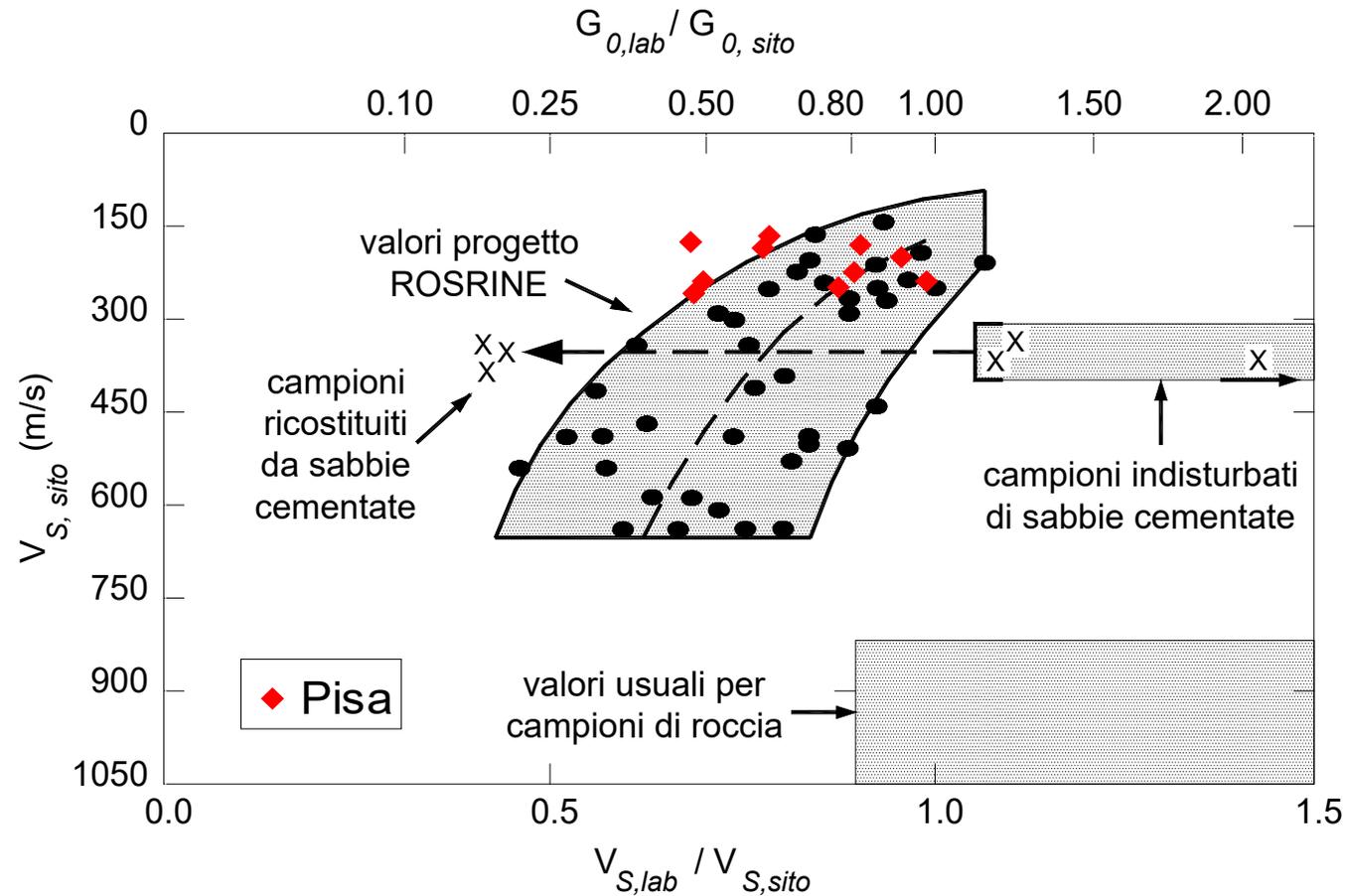
Site vs Lab (Pisa)



$$G_0 = \rho V_S^2$$

(Cross-Hole Test)

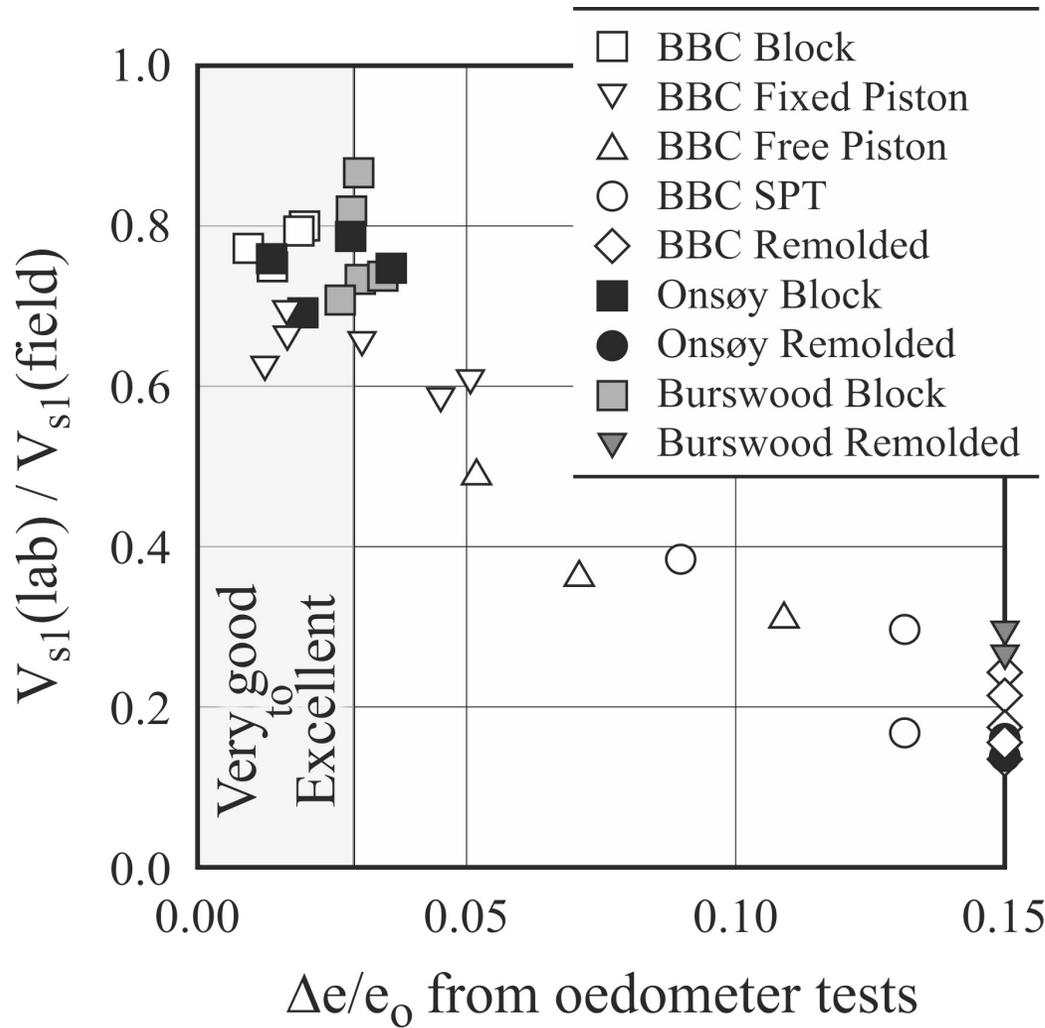
G₀ site vs lab



$$G_0 = \rho V_S^2$$

(Stokoe e Santamarina, 2000)

Valutazione della qualità dei campioni "indisturbati"



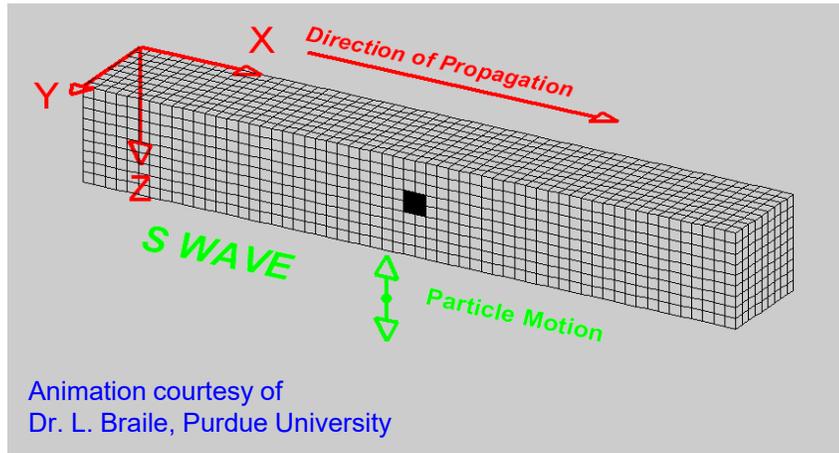
Un elevato rapporto $V_{s1}(\text{lab}) / V_{s1}(\text{sito})$ è indice di una buona qualità del campione

Il criterio può essere utilizzato anche per i terreni a grana grossa

DeGroot et al (2011).

Metodi Sismici

Onde di taglio

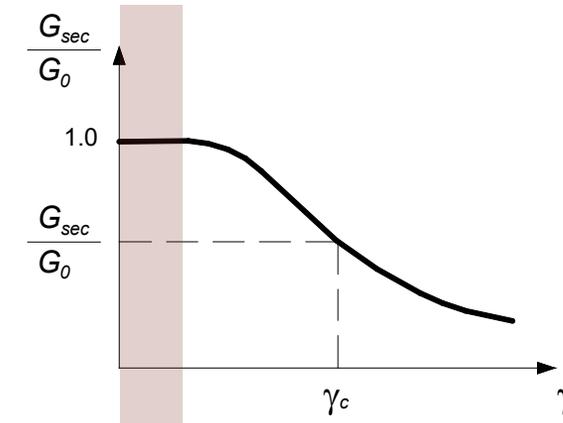
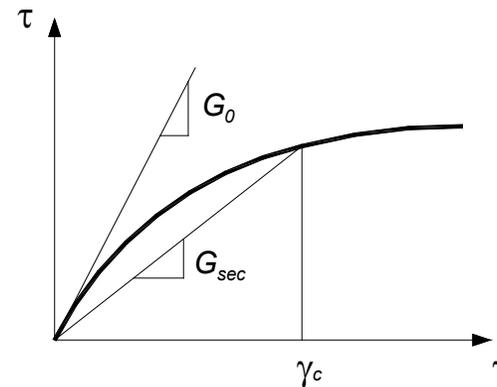


In un mezzo elastico lineare

$$G = \rho V_S^2$$

Nei terreni

$$G_0 = \rho V_S^2$$



Deformazioni indotte
in una prova geofisica

Onde di Volume

Mezzo omogeneo elastico lineare isotropo

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

V_S : Velocità di propagazione dell'onda di taglio

V_P : velocità di propagazione dell'onda di compressione

ρ : densità di massa

$$V_P = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

G : modulo di taglio

M : modulo longitudinale (confinamento lateralmente)

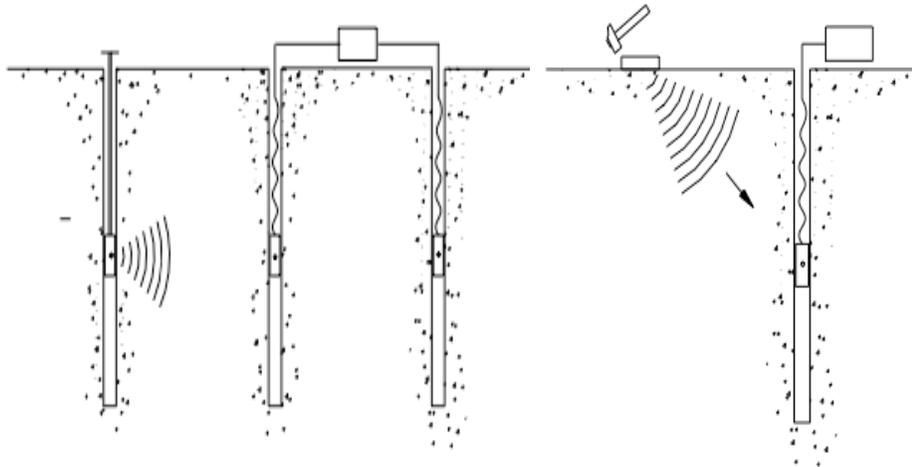
Nota: nei terreni saturi V_P è fortemente influenzata dalla compressibilità del fluido interstiziale (acqua) $\rightarrow V_P > 1480 \text{ m/s}$

Nelle prove in sito, considerata la frequenza caratteristica delle onde sismiche, il comportamento è sempre non drenato

Equazioni di Biot: legame V_p, V_s , porosità (indice dei vuoti)

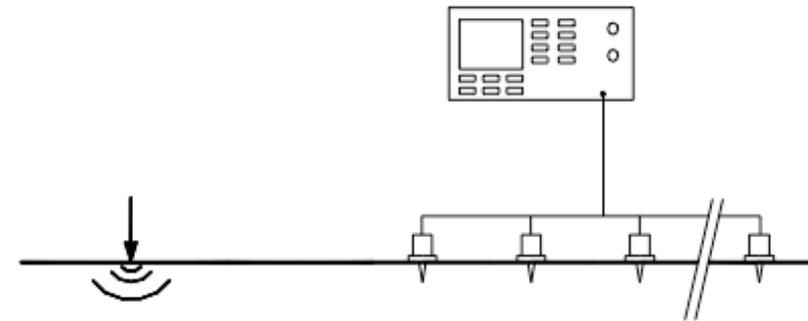
Metodi Sismici

in foro (o invasivi)



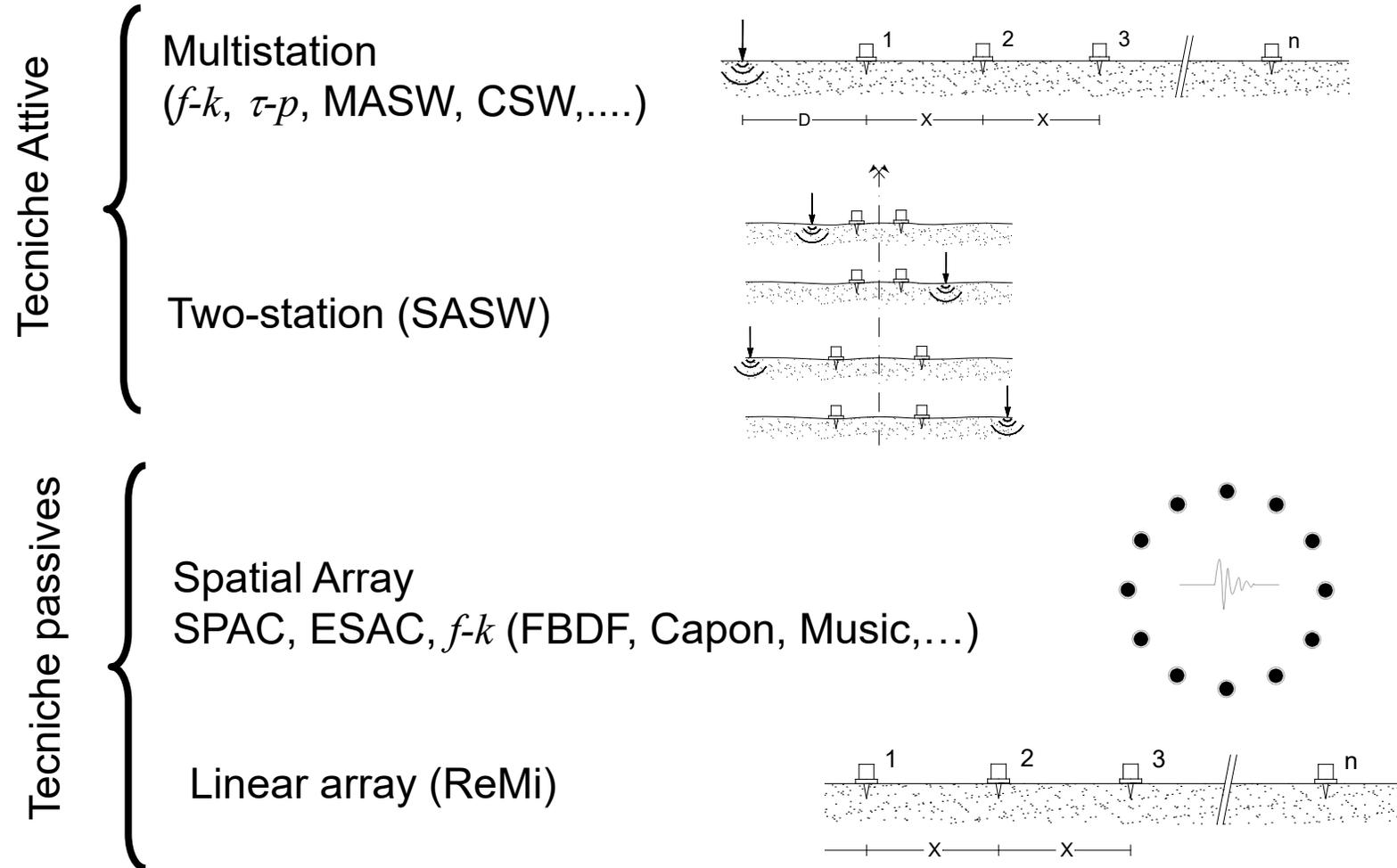
Cross-Hole Test (CHT)
 Down-Hole Test (DHT)
 Seismic Cone (SCPT)
 Seismic Dilatometer (SDMT)
 P-S Suspension Logging
 Vertical Seismic Profiling (VSP)

di superficie (o non invasivi)



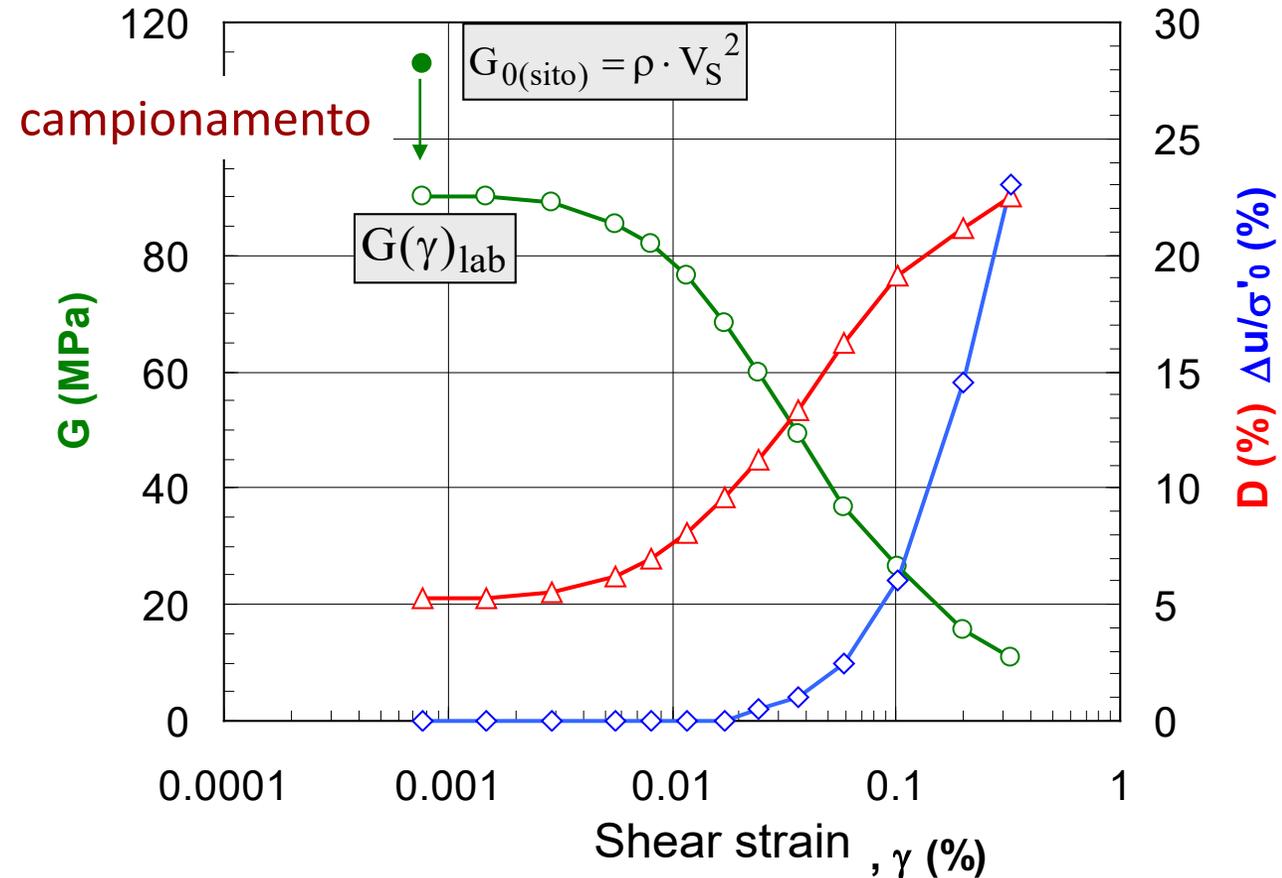
Surface Waves Methods SWM
 (SASW, MASW, AVA)
 Seismic Refraction
 (P-waves or SH-waves)
 Seismic Reflection
 (P-waves or SH-waves)

Prove basate sulla propagazione di onde superficiali (SWM)



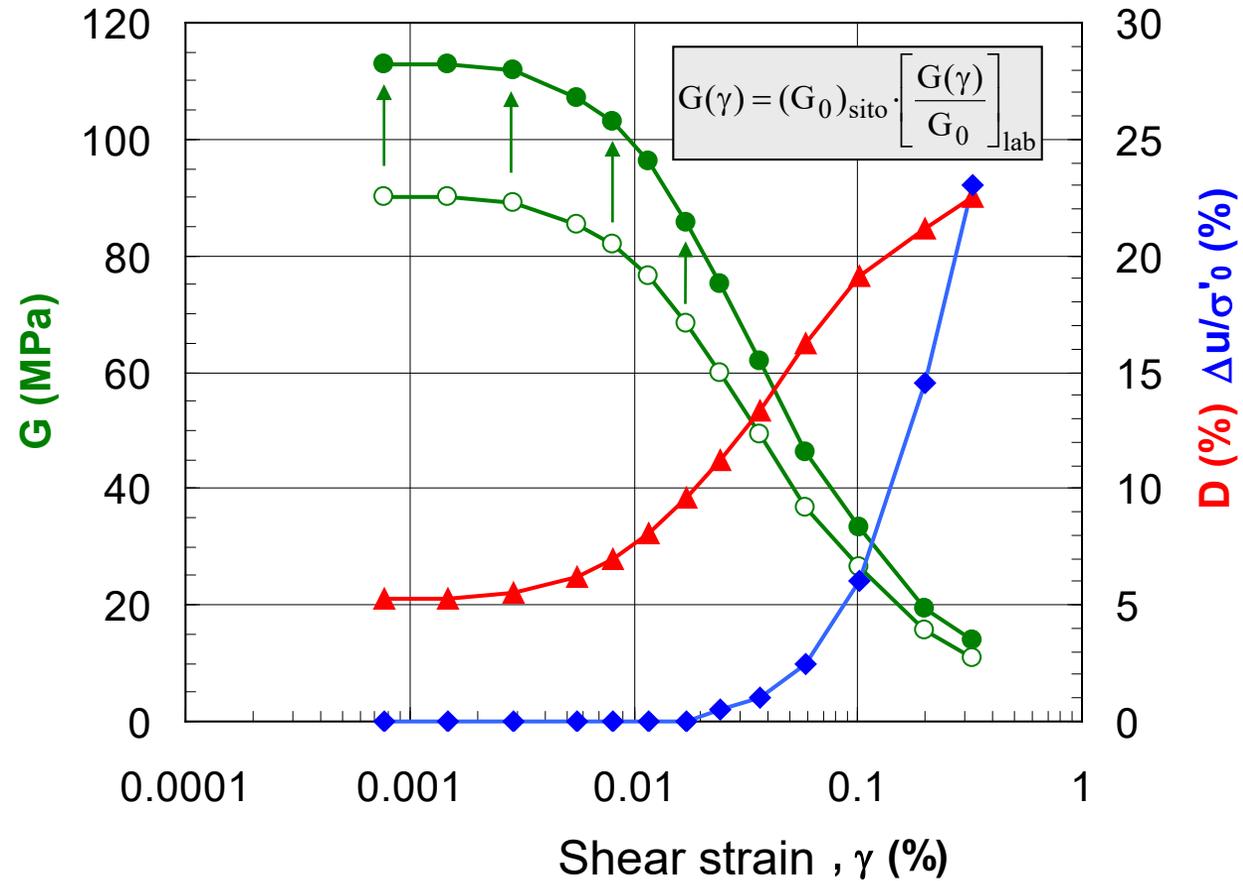
?

Strategia di caratterizzazione



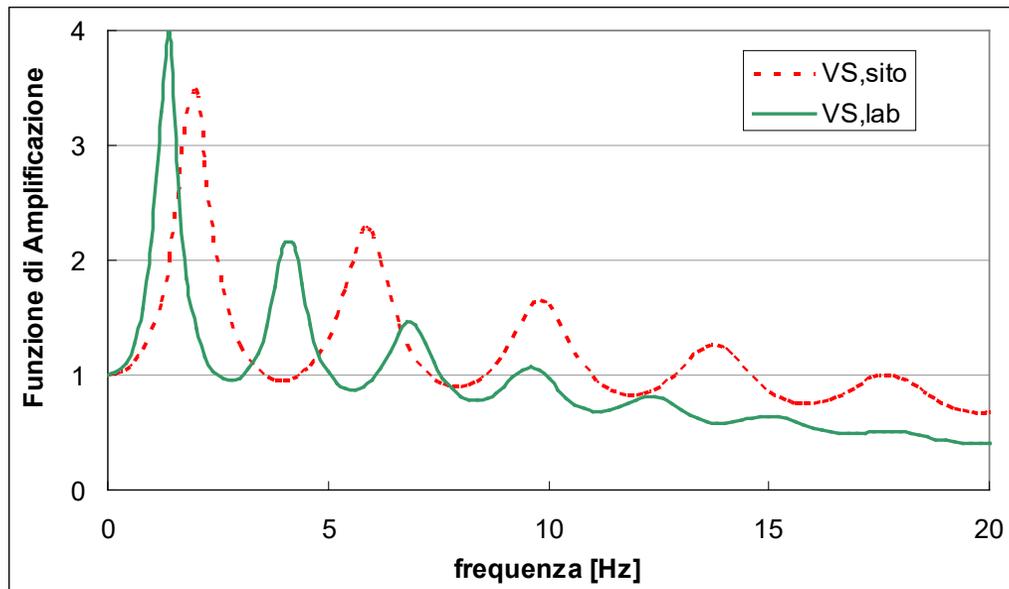
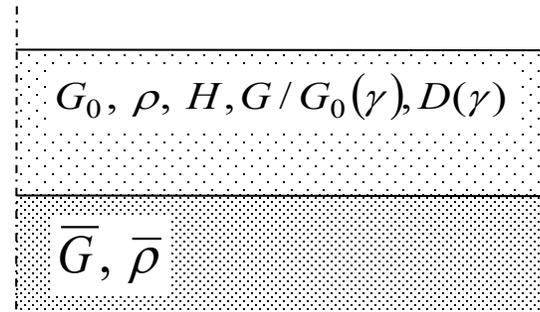
- G_0 dalle prove geofisiche in sito
- $G/G_0(\gamma)$ e $D(\gamma)$ da prove di laboratorio

Strategia di caratterizzazione

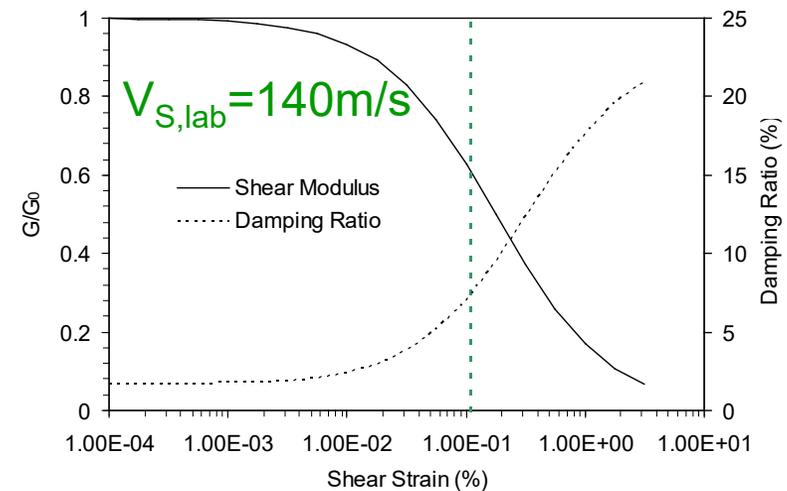
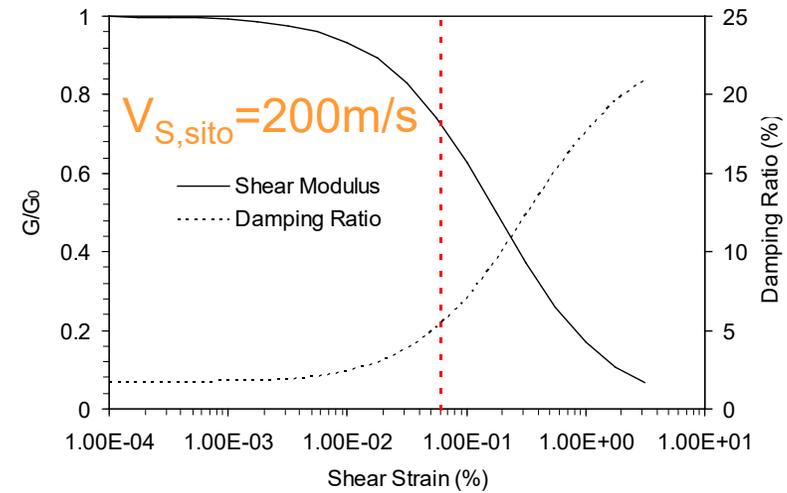


- G_0 dalle prove geofisiche in sito
- $G/G_0(\gamma)$ e $D(\gamma)$ da prove di laboratorio

Confronto amplificazione $G_{0,sito} - G_{0,lab}$

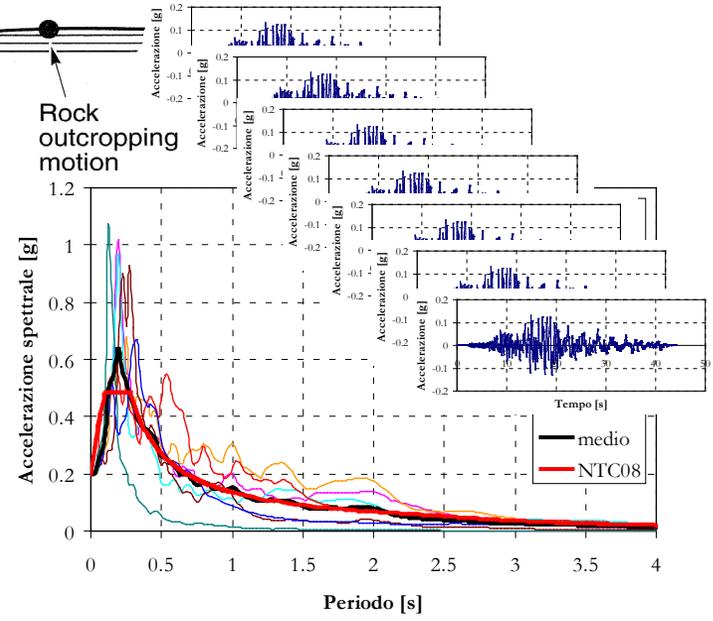
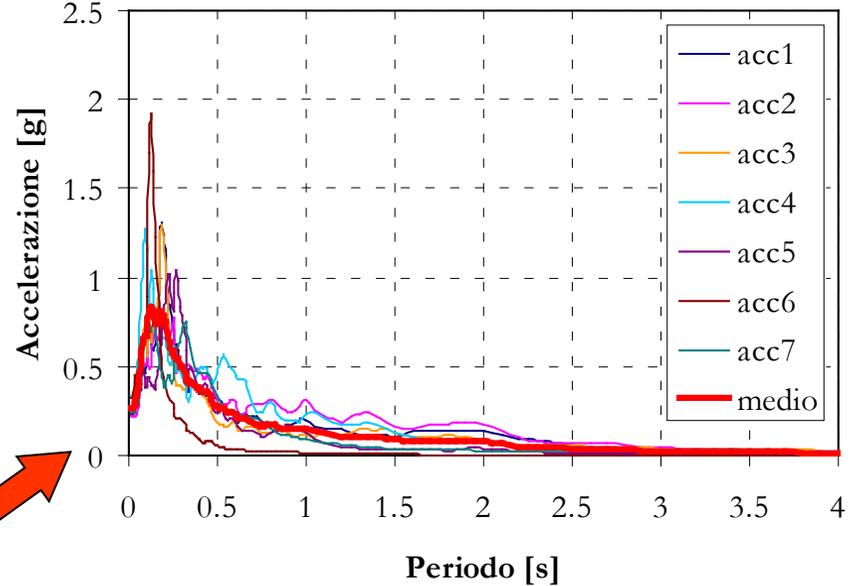
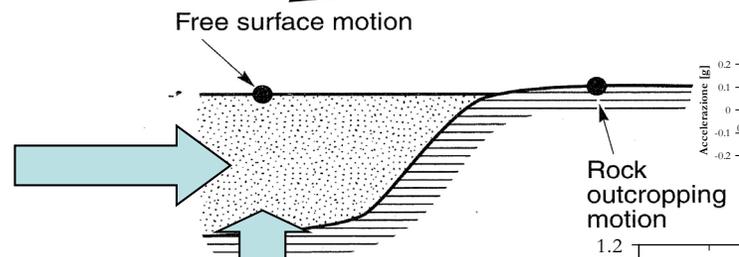
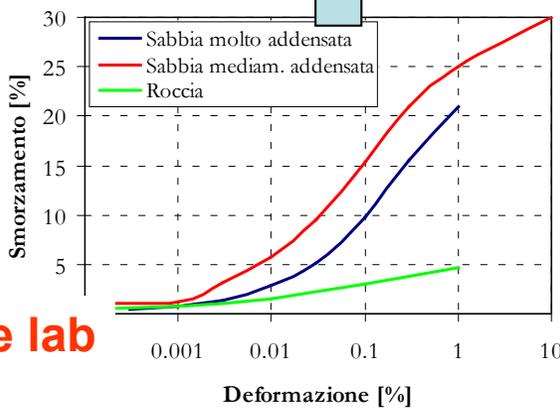
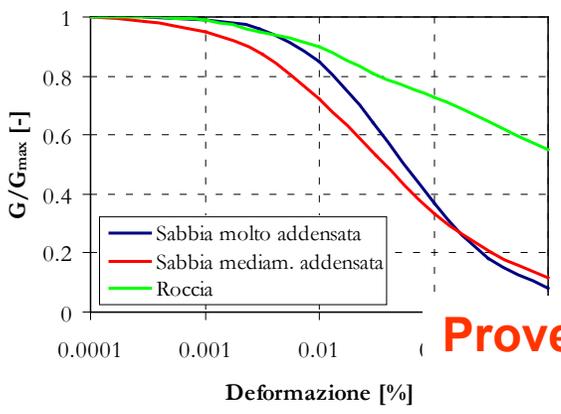
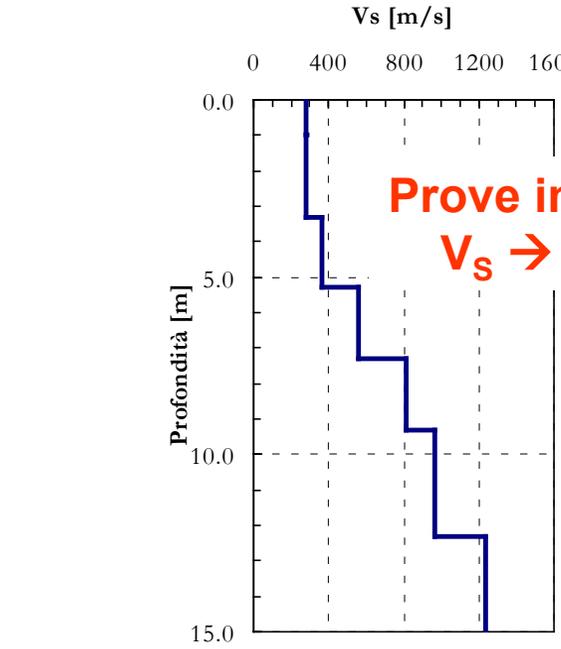


Parametri equivalenti in mezzeria strato



Esempio RSL

(Lai et al., 2009)



Limitazioni Metodo Lineare Equivalente

- Valori di G e D costanti durante l'intera simulazione
- Per materiali molto deformabili in cui si producono deformazioni cicliche elevate
→ sovrastima del rapporto di smorzamento → sottostima azione sismica
- Criticità per depositi di terreno di elevato spessore (deformazioni molto elevate in profondità → condizioni di rottura)
- Analisi in termini di tensioni totali
- Impossibilità di tener conto di degradazione nel tempo (es. effetto del numero di cicli, accumulo sovrappressioni interstiziali)

Metodi non-lineari

Table 1. Mass representation and constitutive models used in nonlinear codes

Nonlinear Code	Mass Representation	Constitutive Model
D-MOD_2	Lumped Mass	MKZ (Matasovic and Vucetic , 1993)
DEEPSOIL	Lumped Mass	Extended MKZ (Hashash and Park, 2001)
OpenSees	Distributed Mass	Multi-yield surface plasticity (Ragheb, 1994; Parra, 1996; Yang, 2000)
SUMDES	Distributed Mass	Bounding surface plasticity (Wang, 1990) and other models
TESS	Distributed Mass	HDCP (EPRI, 1993)

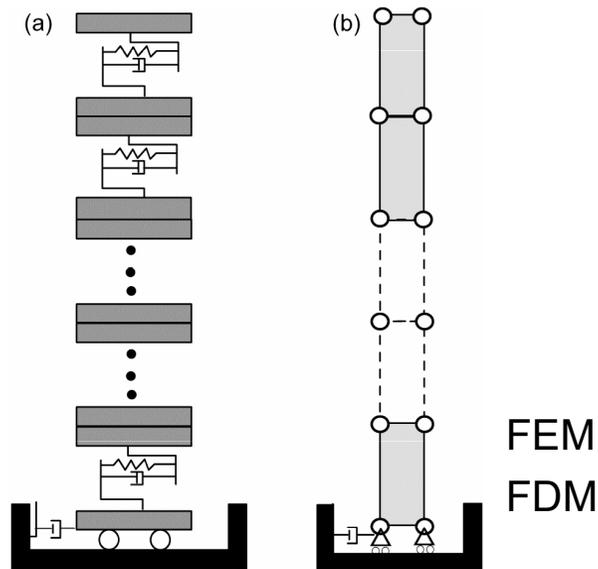


FIG. 1. (a) lumped mass system;
(b) distributed mass system

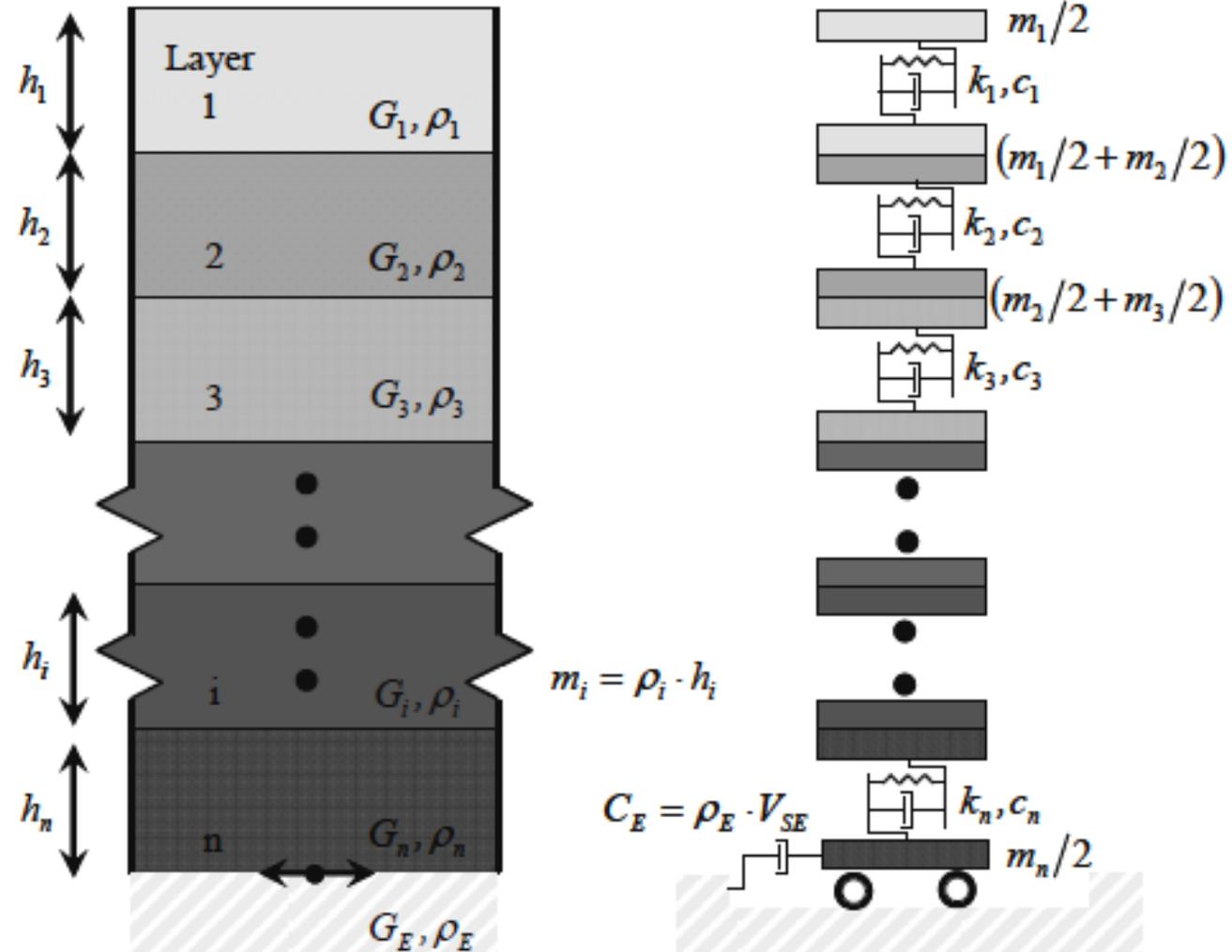
+ commercial FEM-FDM codes (Plaxis, FLAC, ...)

- Integrazione passo-passo nel tempo delle equazioni del moto $[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g$
- Necessità di modelli costitutivi per la risposta ciclica dei terreni in grado di riprodurre il comportamento osservato nelle prove sperimentali in laboratorio

1D

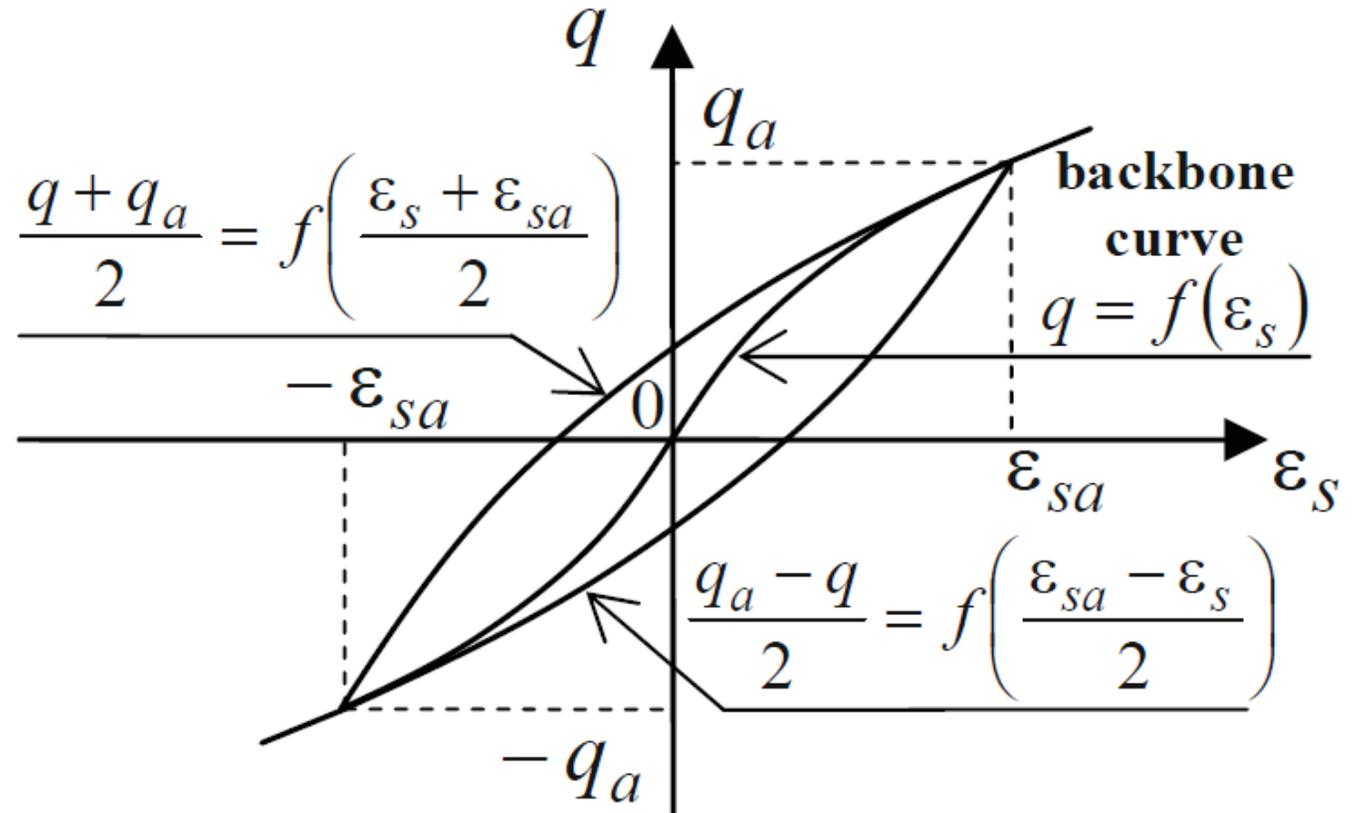
modelli al continuo

modelli a massa concentrata



Modellazione semplificata dei cicli di isteresi

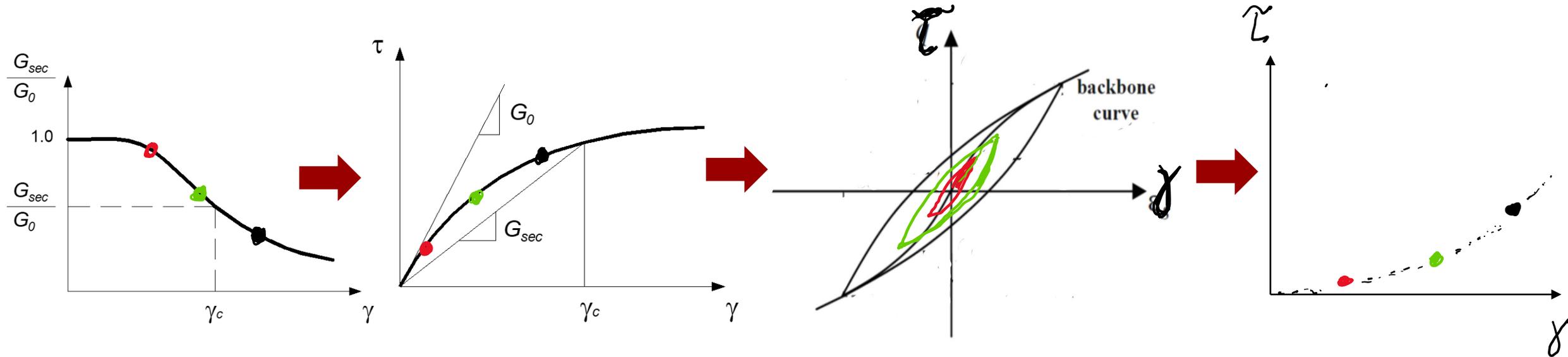
Curva scheletro + criteri di masing



Data la curva scheletro (backbone curve) che deve riprodurre la curva di riduzione del modulo osservata nelle prove di laboratorio, la curva del rapporto di smorzamento in funzione della deformazione al taglio è implicitamente definita

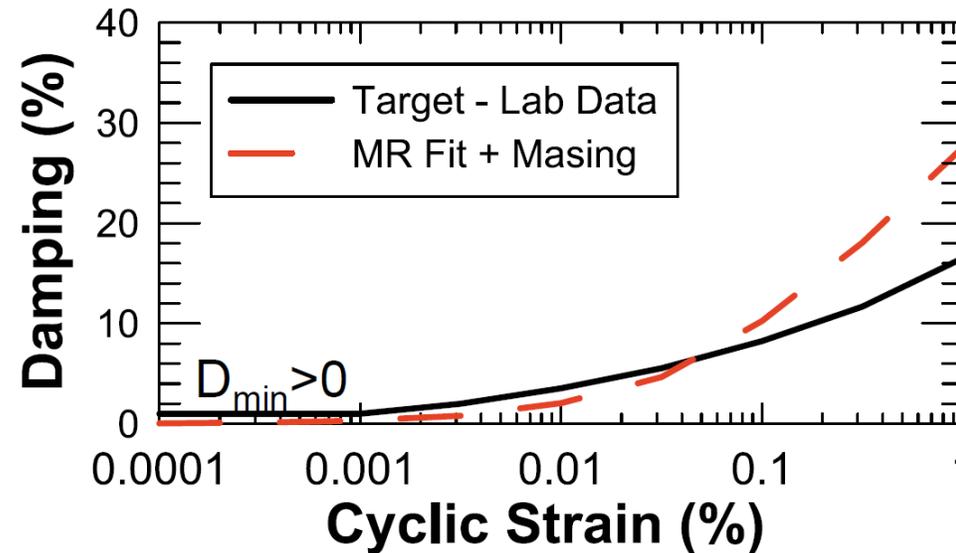
Modellazione semplificata dei cicli di isteresi

Curva scheletro + criteri di masing



Data la curva scheletro (backbone curve) che deve riprodurre la curva di riduzione del modulo osservata nelle prove di laboratorio, la curva del rapporto di smorzamento in funzione della deformazione al taglio è implicitamente definita

Damping ratio

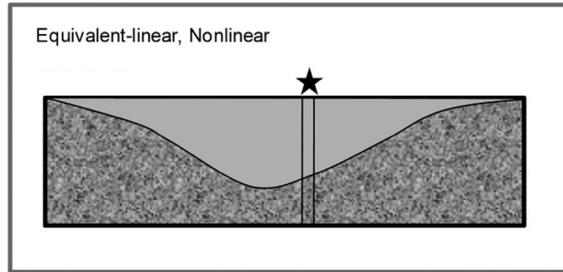


Grandi deformazioni:
lo smorzamento isteretico derivante
dai criteri di Masing sovrastima
quello osservato sperimentalmente

Piccole deformazioni: lo smorzamento puramente isteretico derivante dai criteri di Masing è nullo o quasi e quindi non è in grado di riprodurre adeguatamente lo smorzamento a piccole deformazioni che è dovuto all'attrito e all'interazione tra scheletro solido e fluido interstiziale → necessità di introdurre uno smorzamento addizionale nel modello (Rayleigh damping)

Incertezze nelle analisi non lineari

NONLINEAR APPROACH



Le analisi non lineari sono affetti da rilevanti incertezze di modello dovute alla variabilità dei modelli costitutivi adottati e all'implementazione dei codici numerici



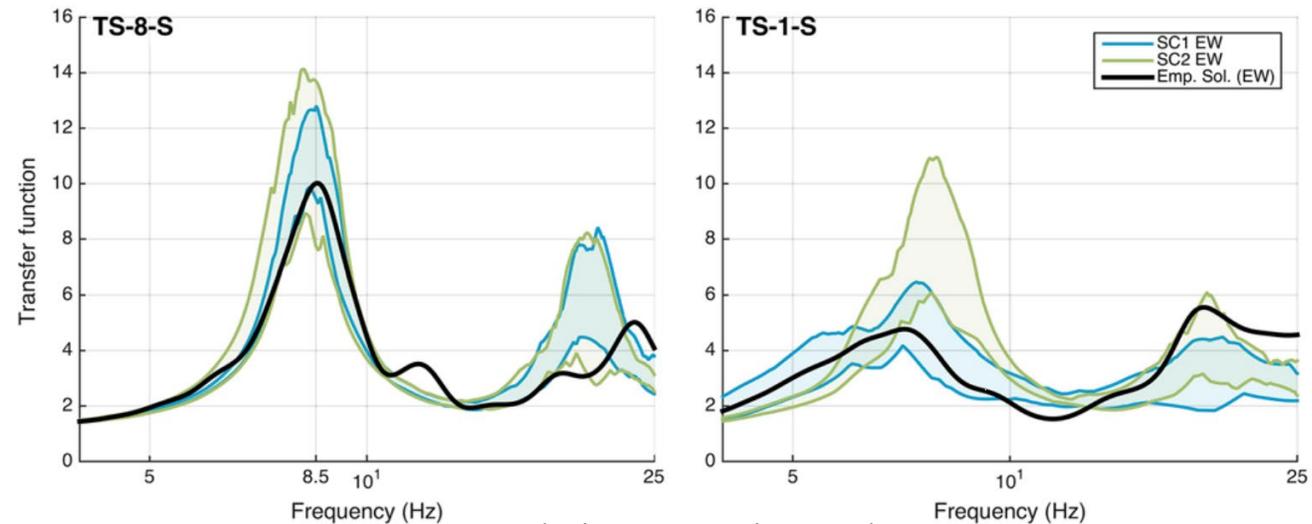
Progetto PRENOLIN (Régnier et al. 2016, 2018)

Due fasi:

1. Verifica (dati sintetici)
2. Validazione (dati reali)

23 diversi codici numerici
(commerciali e/o di ricerca)

Aspetti critici: schema di integrazione numerica, formulazione dello smorzamento, calibrazione dei parametri (soprattutto per le analisi in tensioni efficacy) e condizioni al contorno imposte



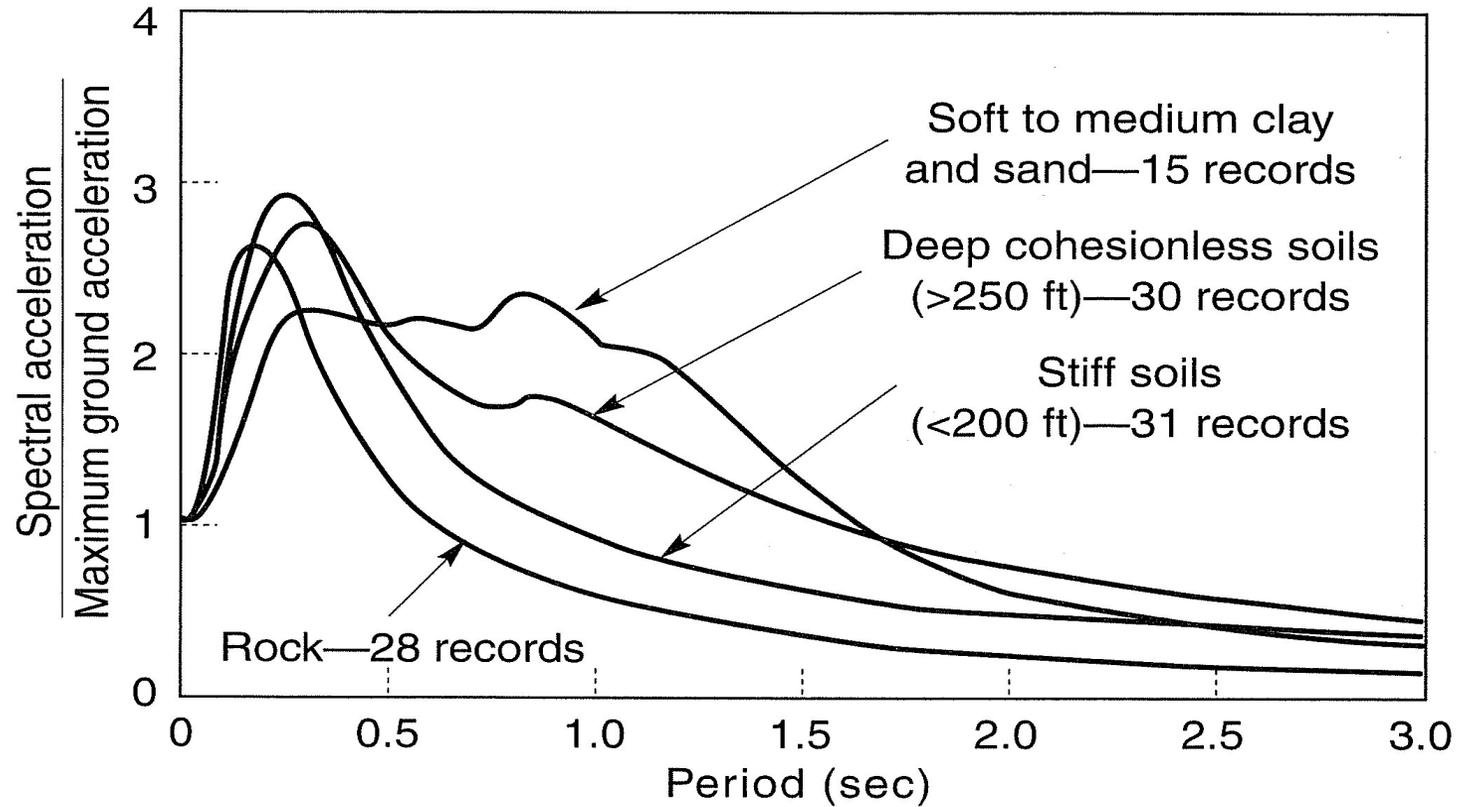
(Régnier et al. 2018)

Studi di risposta sismica locale

NTC 2008 (3.2.2):

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi, come indicato nel § 7.11.3. In assenza di tali analisi, per la definizione dell'azione sismica si può fare riferimento a un approccio semplificato, che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III).

Spettri di risposta per tipologie di sottosuolo

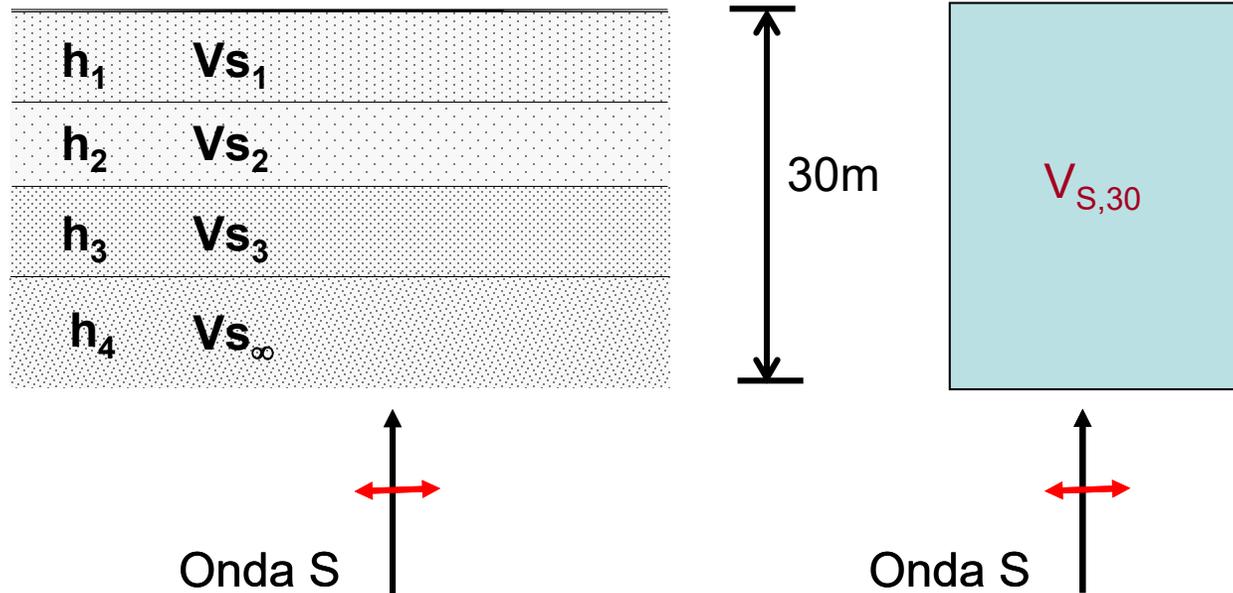


(Seed et al., 1976)

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

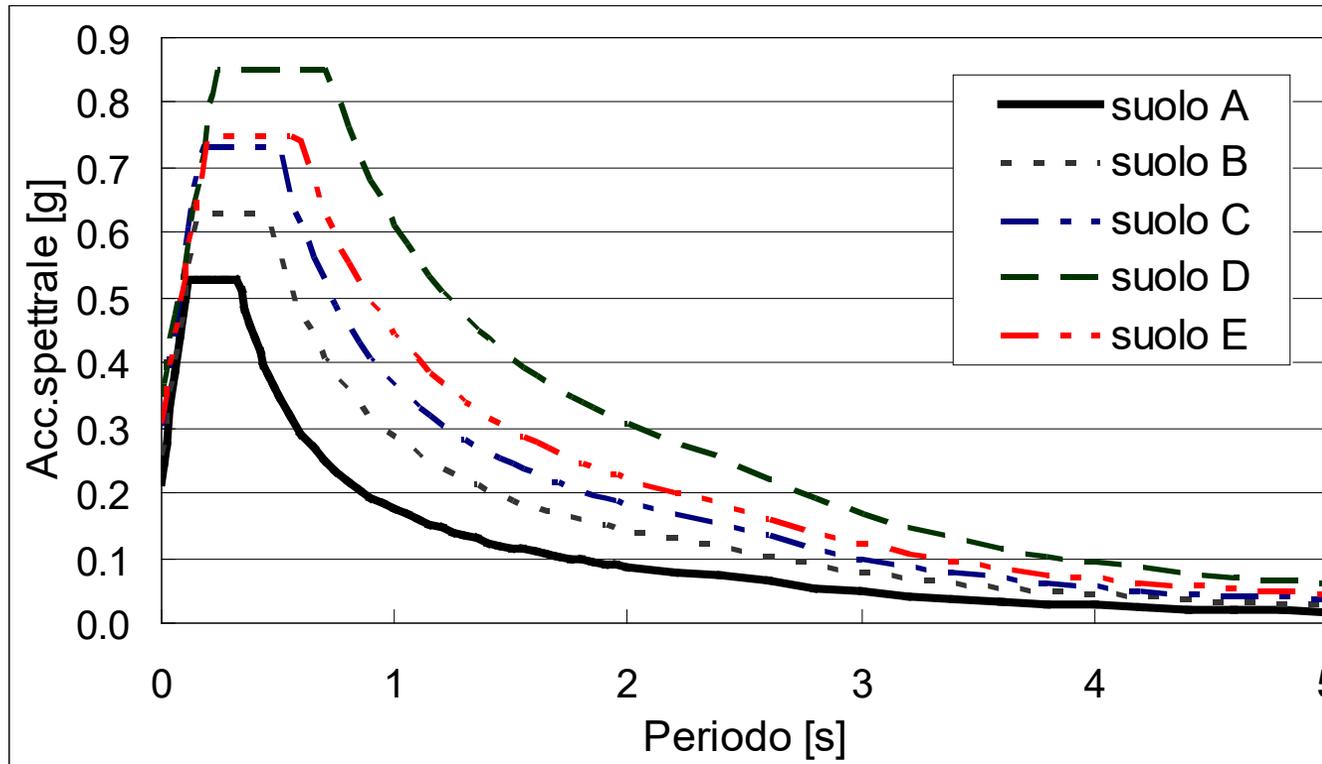


NB: 30m a partire dal piano di imposta della fondazione

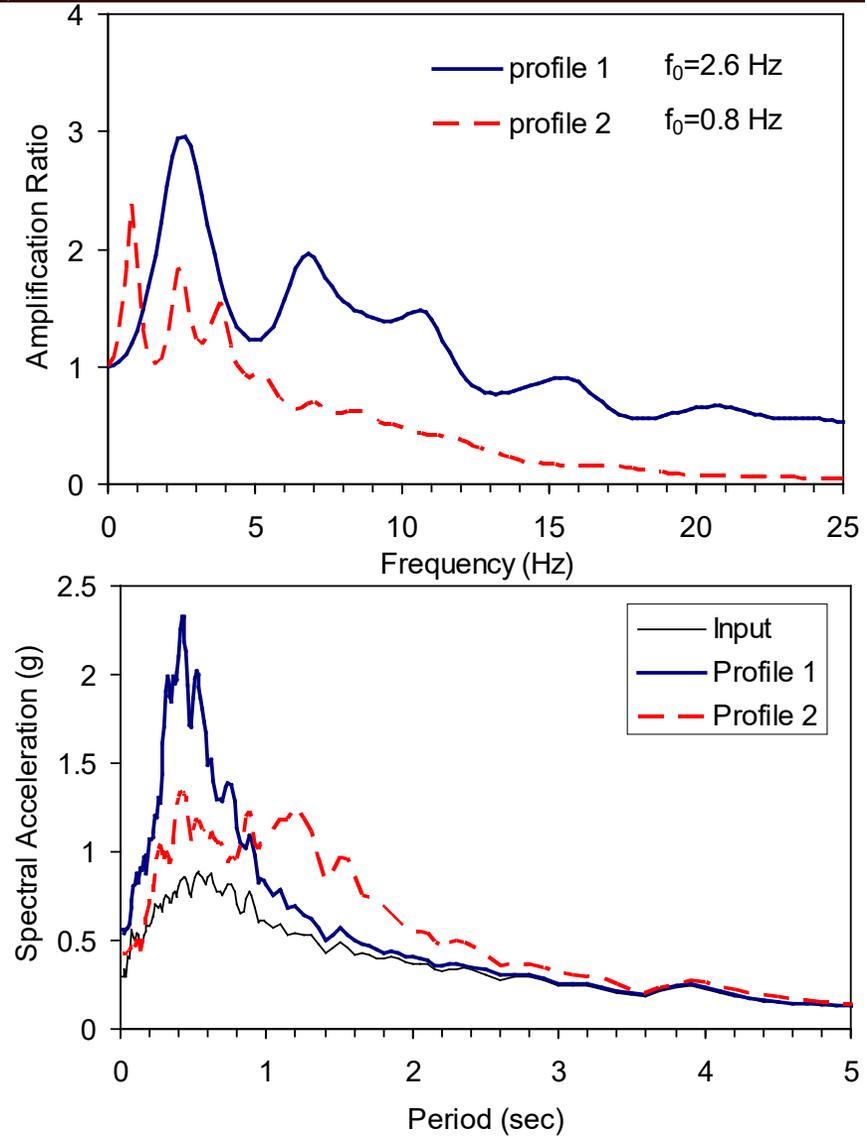
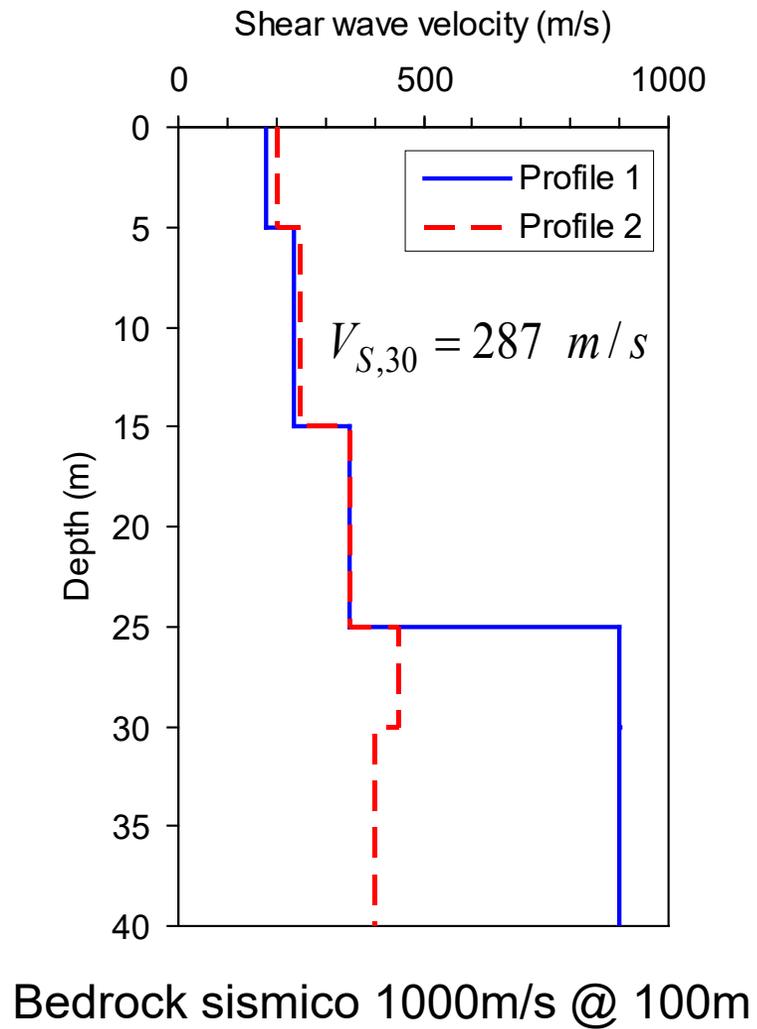
**NTC 2018
(Udine)**

Categoria	$V_{s,30}$
A	> 800
B	360 – 800
C	180 - 360
D	< 180
E (C, D su A)	

Spettri di risposta elastici

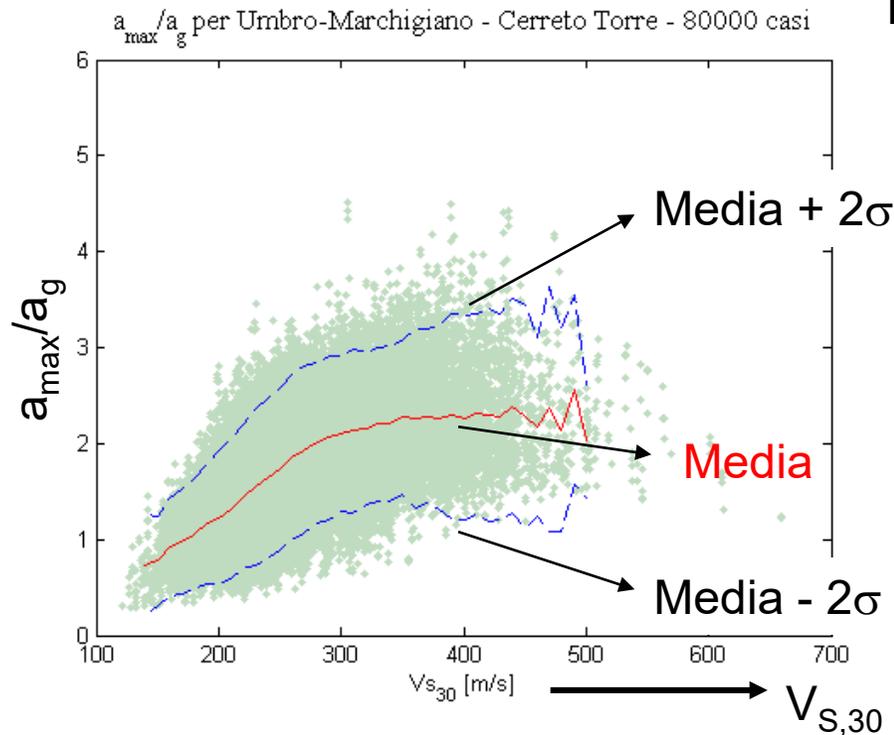


Confronto 2 siti con stessa $V_{S,30}$

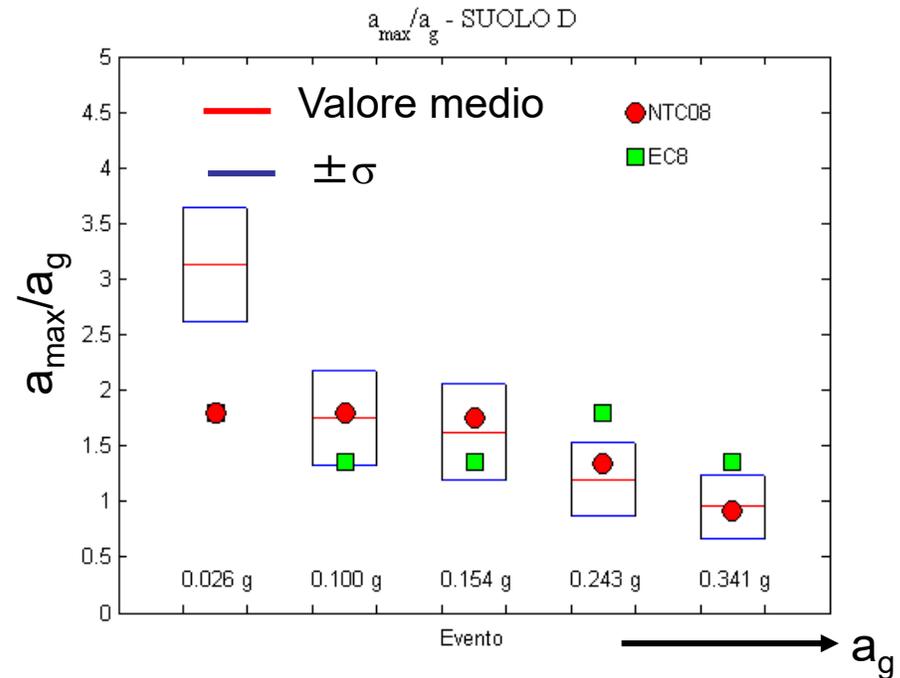


Analisi parametriche RSL e metodi semplificati

(Pettiti e Foti, 2013)

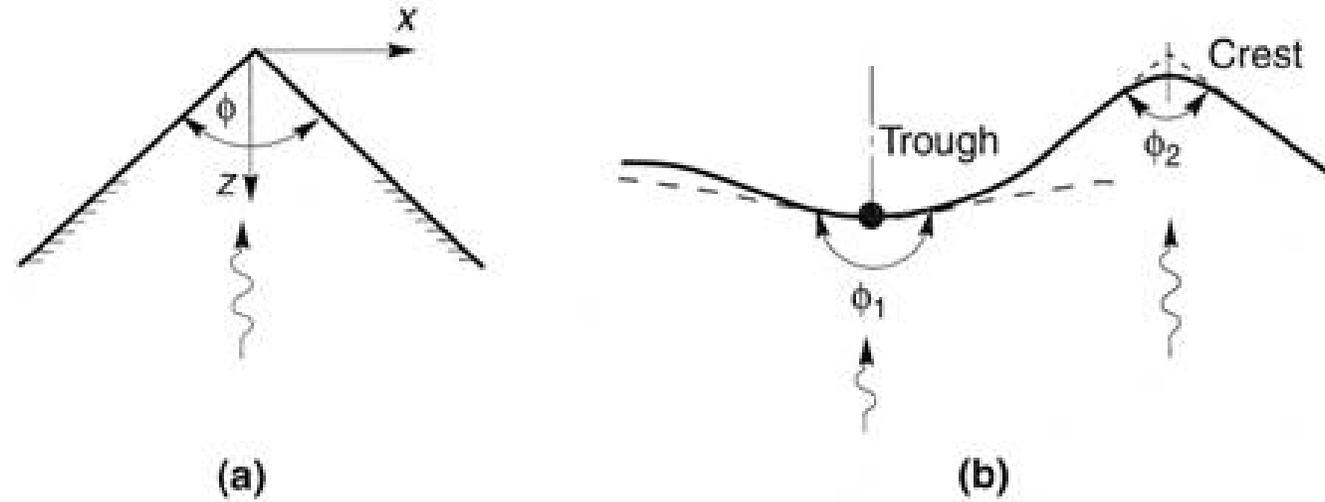


Esempio: valutazione su 80000 profili



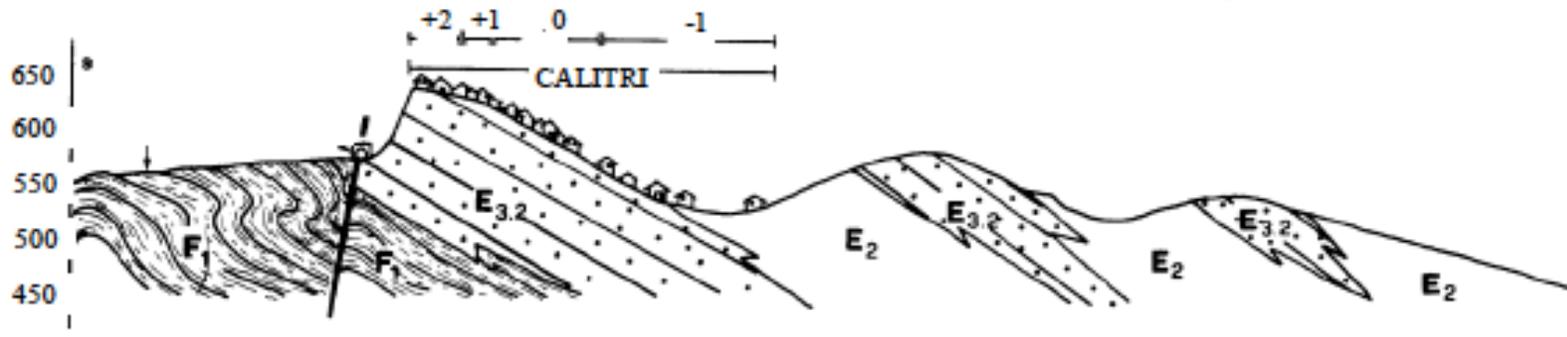
- L'approccio semplificato rappresenta una fortissima semplificazione
 - $V_{S,30}$ non è sempre rappresentativa
 - I fattori di amplificazioni sono valori ricavati su insiemi di dati ristretti
- Valutazione non necessariamente a favore di sicurezza, anzi
- Non esiste un modo per discriminare tra situazioni 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



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

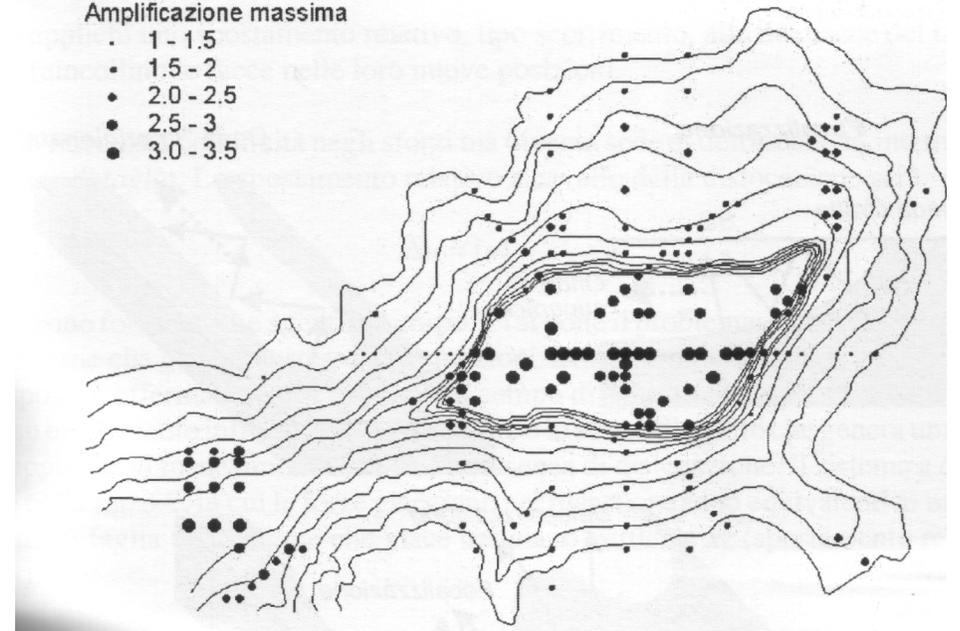
Esempio: Civita di Bagnoreggio



a)

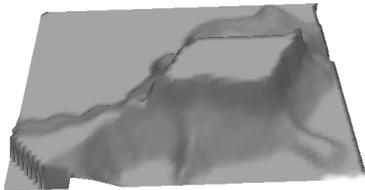
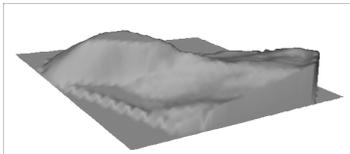
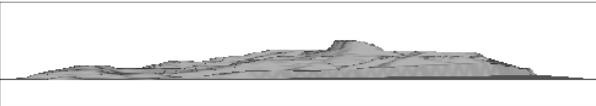
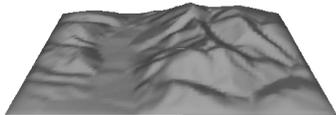
Amplificazione massima

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



(Faccioli e Paolucci, 2005)

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.

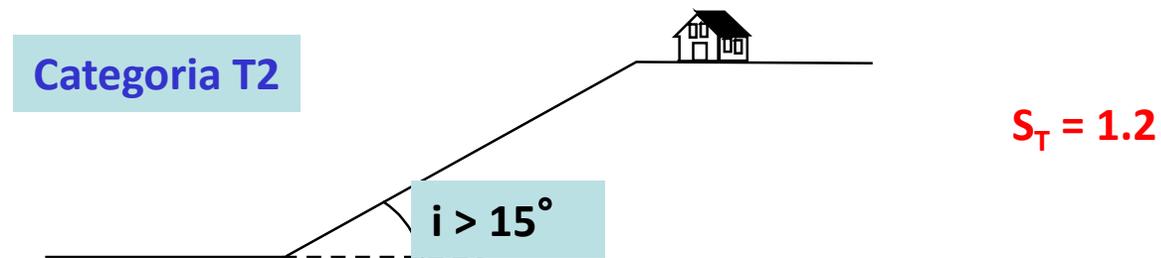
SITE			<i>EC8</i>	<i>3D</i>	<i>2D_{SV}</i>
CIVITA		<i>Isolated cliff</i>	1.2	1.75	1.30
ALTINO		<i>Isolated cliff</i>	1.2	1.30	1.22
MT. TITANO		<i>Ridge</i>	1.4	1.58	1.32
CASTELLARO		<i>Ridge</i>	1.2	1.25	1.28

(cortesia R. Paolucci,
Politecnico di Milano)

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



Evidenze della variabilità spaziale

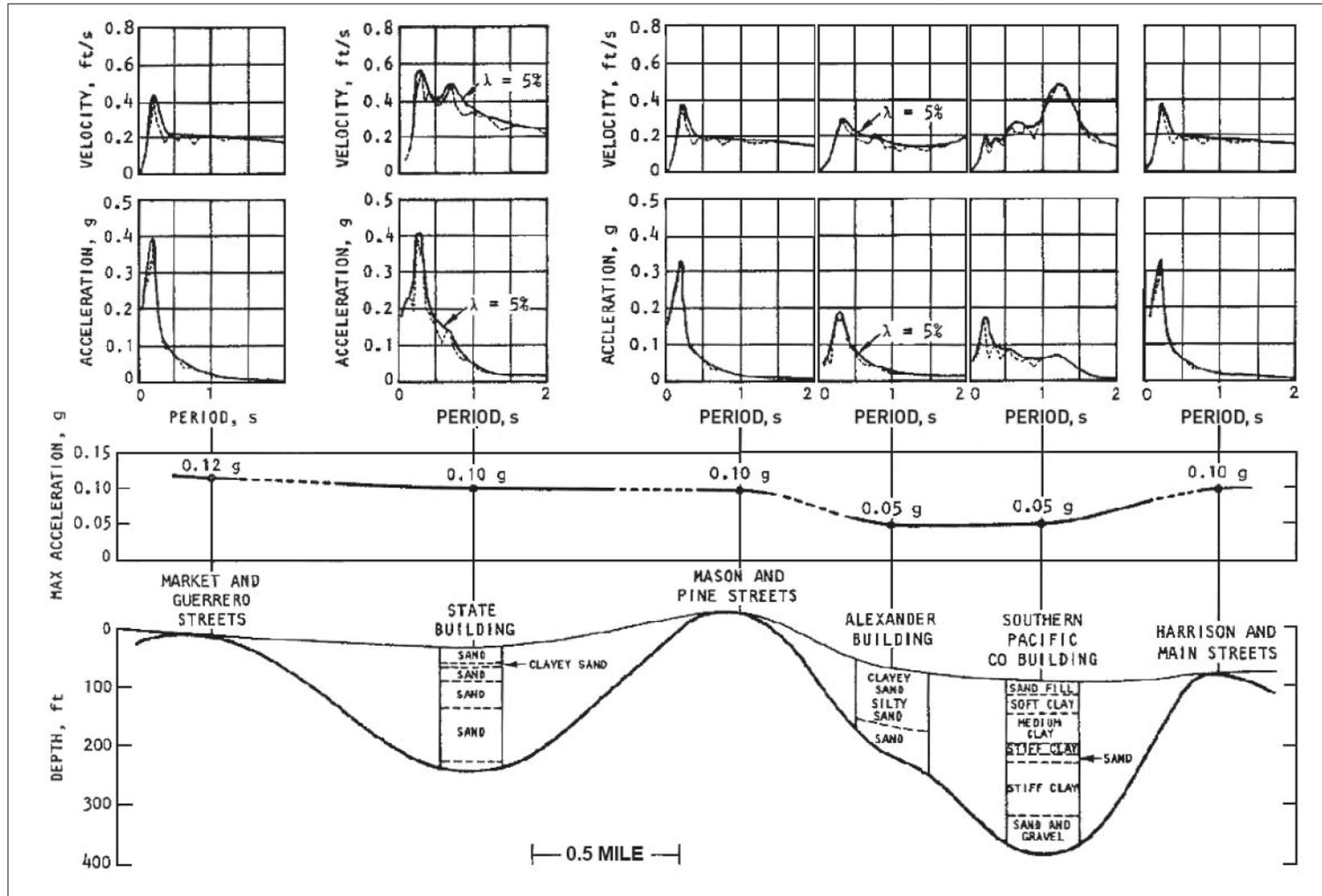


Figura 1.1-1 - Variazione dello scuotimento su una sezione di 4 miglia di S. Francisco, nel terremoto del 1957 (Seed e Idriss, 1969).

Microzonazione sismica (MS)

Valutazione della pericolosità sismica locale attraverso l'individuazione di zone del territorio caratterizzate da comportamento sismico omogeneo. La microzonazione sismica (MS) ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente grande (scala comunale o sub comunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture.

Lo studio di MS viene sintetizzato in una carta del territorio nella quale sono indicate:

- le zone in cui il moto sismico non viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di affioramento rigida e pianeggiante e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono equiparati a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base;
- le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante, a causa delle caratteristiche litostratigrafiche del terreno e/o geomorfologiche del territorio;
- le zone in cui sono presenti o suscettibili di attivazione fenomeni di deformazione permanente del territorio indotti o innescati dal sisma (instabilità di versante, liquefazioni, fagliazione superficiale, cedimenti differenziali, ecc.).

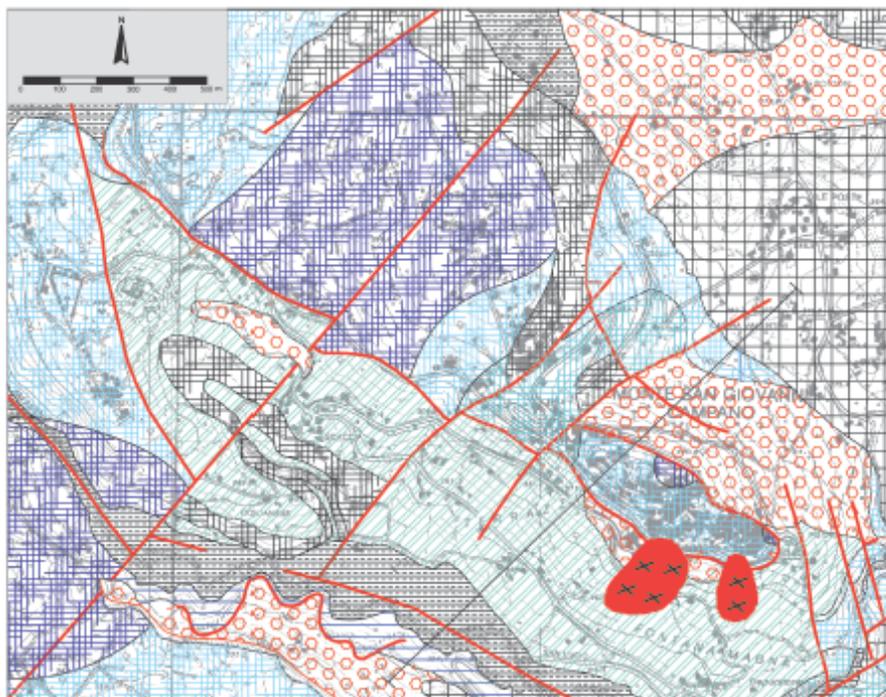
I risultati della MS sono utilizzati per la programmazione territoriale, la pianificazione urbanistica, la pianificazione dell'emergenza e il supporto alla normativa tecnica.

Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica

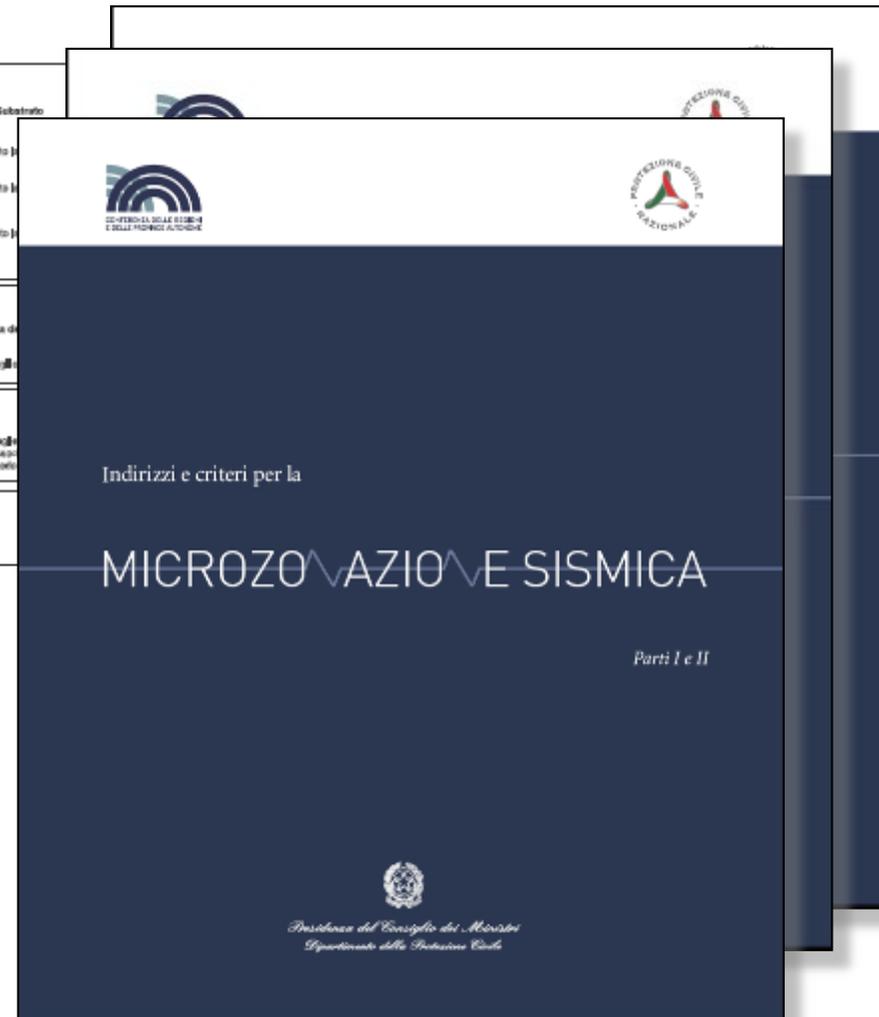
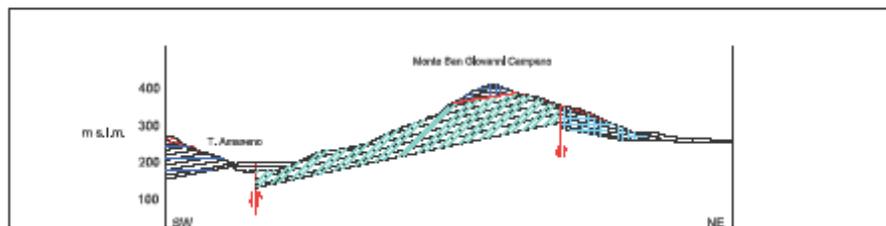
MONTE SAN GIOVANNI CAMPANO (FR)

CARTA DELLE MICROZONE OMOGENEE IN PROSPETTIVA SISMICA

ve autonome - Commissione protezione civile - Subcommittee 8 (Attivazione della normativa)
Dipartimento della protezione civile
erati per la microzonazione sismica"



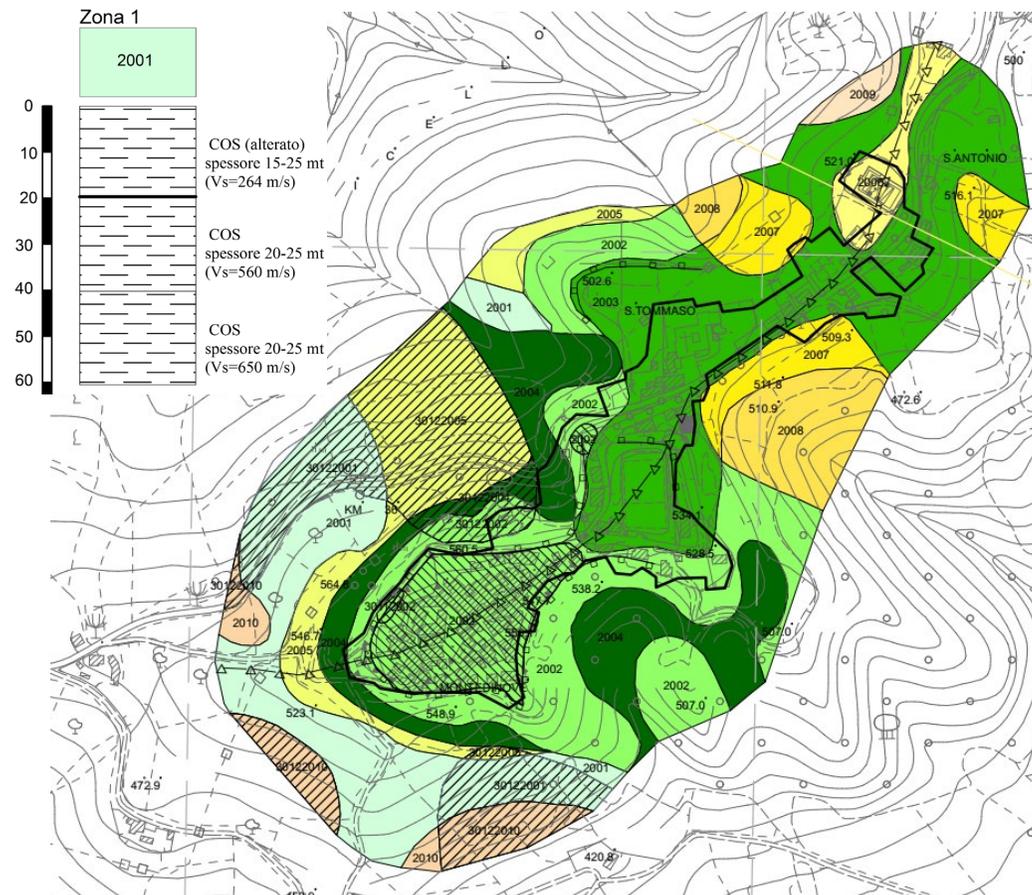
LEGENDA



Seismic Microzonation

The main objectives

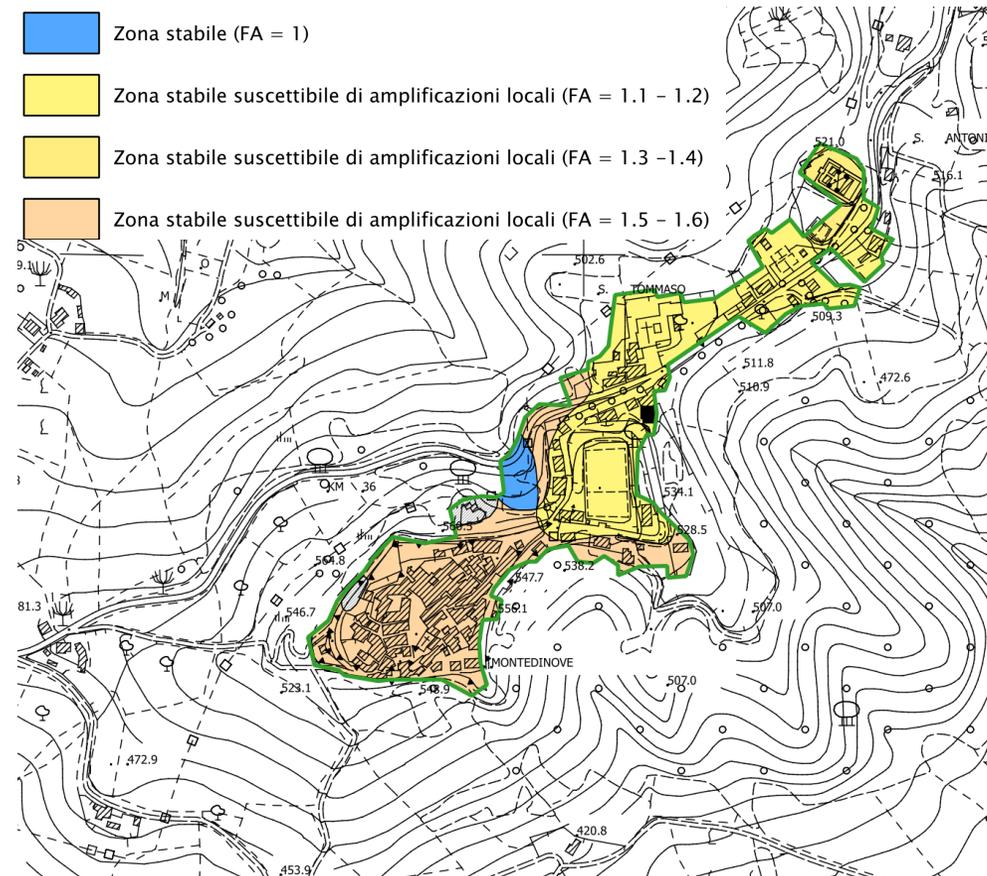
- 1) Definition of the MOPS (homogeneous micro-areas from the seismic perspective):
 - Expected instabilities (e.g. liquefaction, slope instabilities, fault ruptures)
 - Expected level of ground shaking amplification



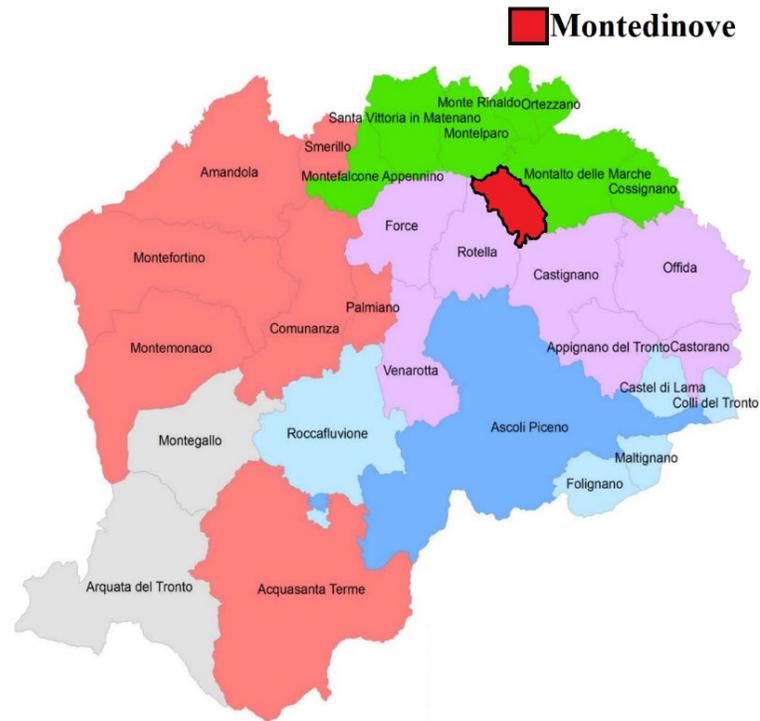
Seismic Microzonation

The main objectives

- 1) Definition of the MOPS (homogeneous micro-areas from the seismic perspective):
 - Expected instabilities (e.g. liquefaction, slope instabilities, fault ruptures)
 - Expected level of ground shaking amplification
- 2) Quantification of the stratigraphic/topographic seismic amplification at the urban scale

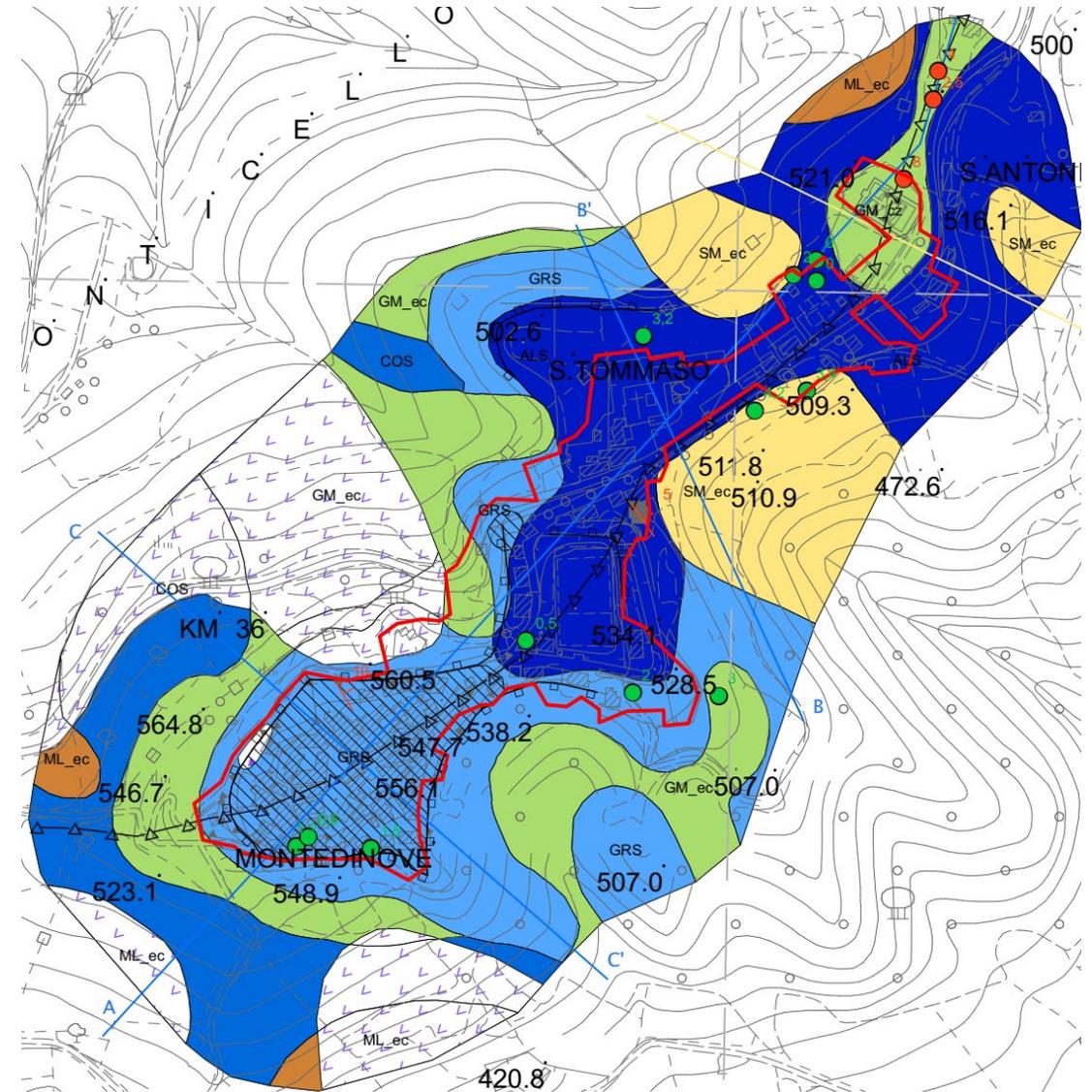


Microzonazione Sismica – Montedinove (AP)



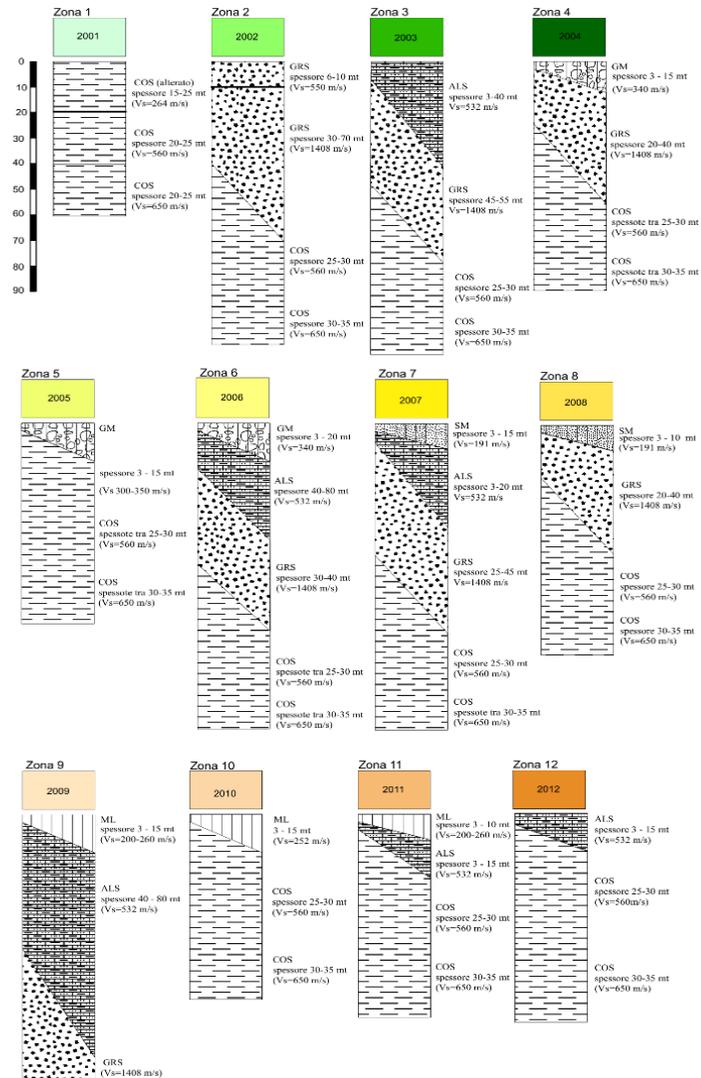
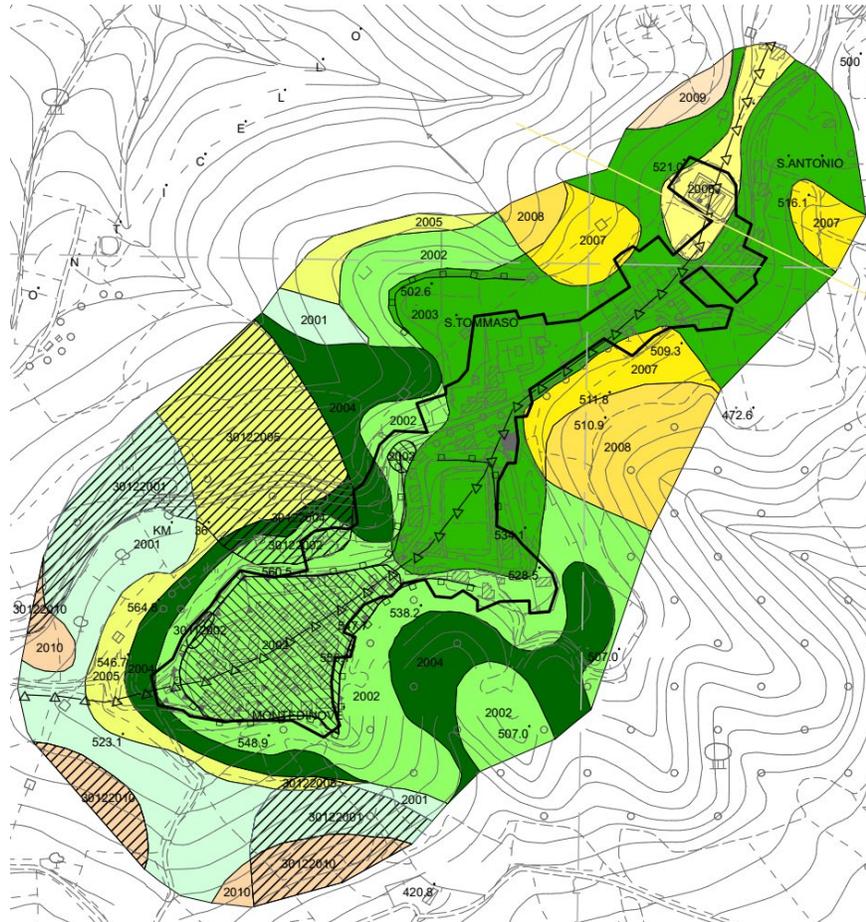
Microzonazione Sismica L1 – Montedinove (AP)

Carta geologica



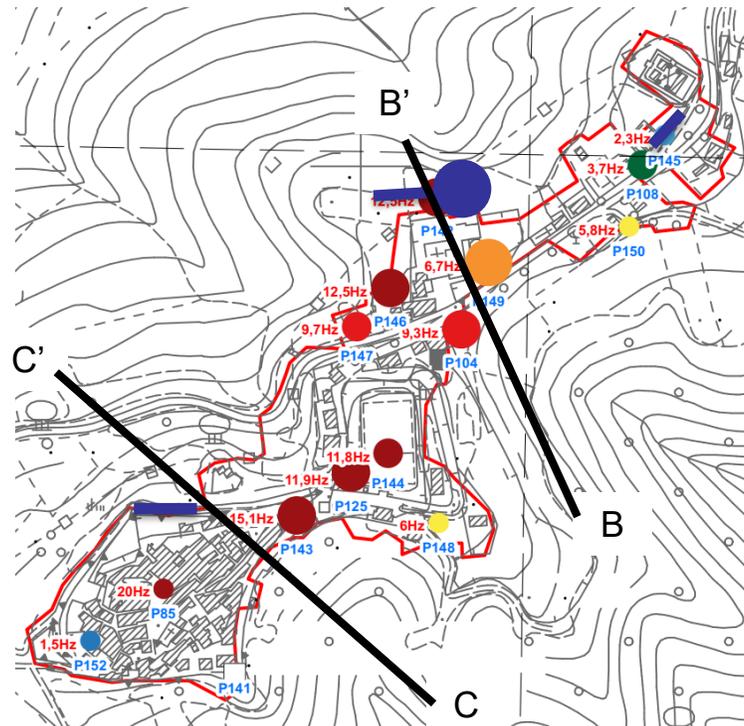
Microzonazione Sismica L1 – Montedinove (AP)

Zone a comportamento sismico omogeneo



Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)

Indagini geotecniche integrative

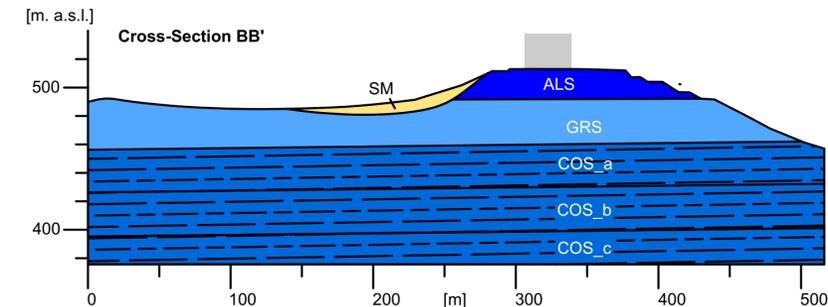
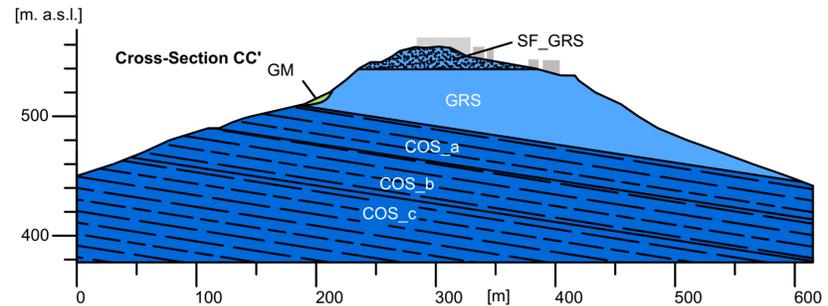
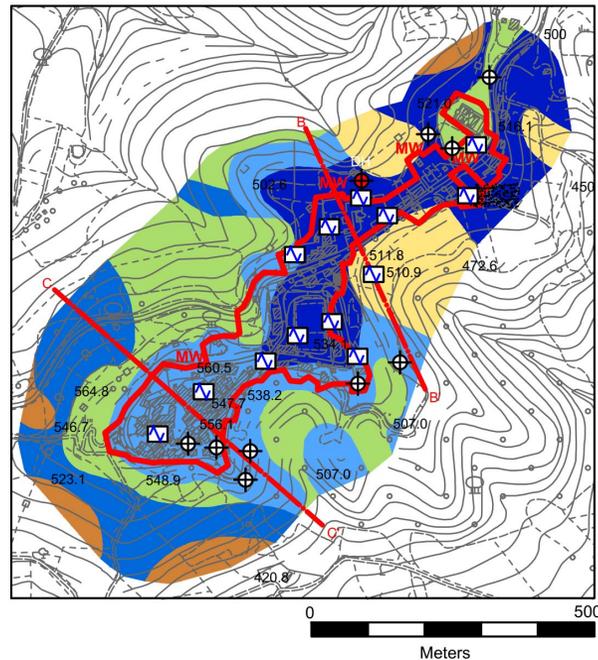


- 14 HVSR;
- 3 MASW;
- 1 Down Hole;
- Prove di laboratorio:
 - granulometrie;
 - Prove di classificazione;
 - Prove di colonna risonante.
- 2 simulazioni numeriche della risposta sismica locale su modelli bidimensionali.

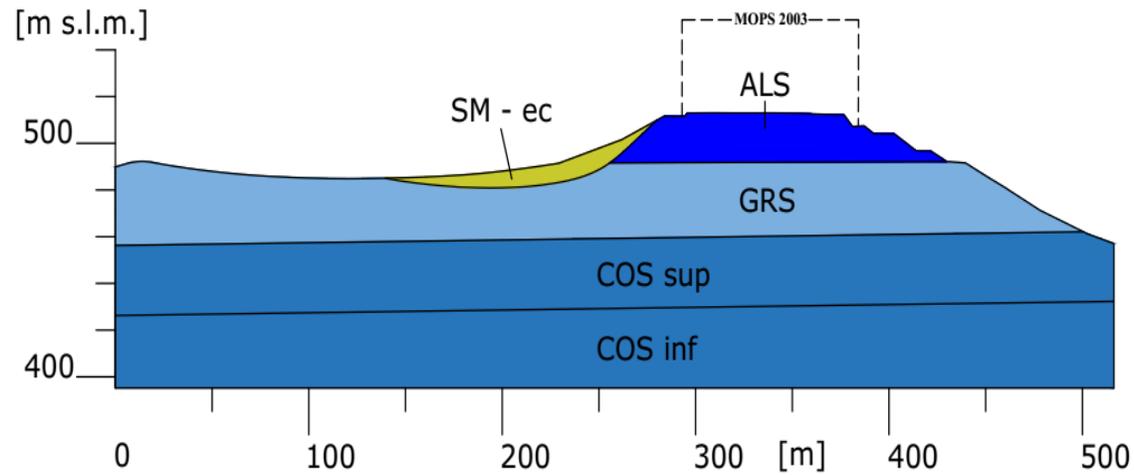
Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)

La topografia locale è caratterizzata da un rilievo collinare in direzione **NE-SW**. Il centro storico è collocato su una alternanza di litotipi stratificati (**ALS**) al di sotto della quale si ritrova un substrato di materiali granulari cementati (**GRS**) parzialmente alterati nella parte superiore (**SF_GRS**).

Gli strati sottostanti sono costituiti dalla formazione delle Argille Azzurre (**COS**). Sui fianchi del rilievo, sono presenti degli accumuli di detrito con spessori tra 3-15 m, classificabili come ghiaie e ghiaie sabbiose (**GM**) o sabbie e sabbie limose (**SM**).

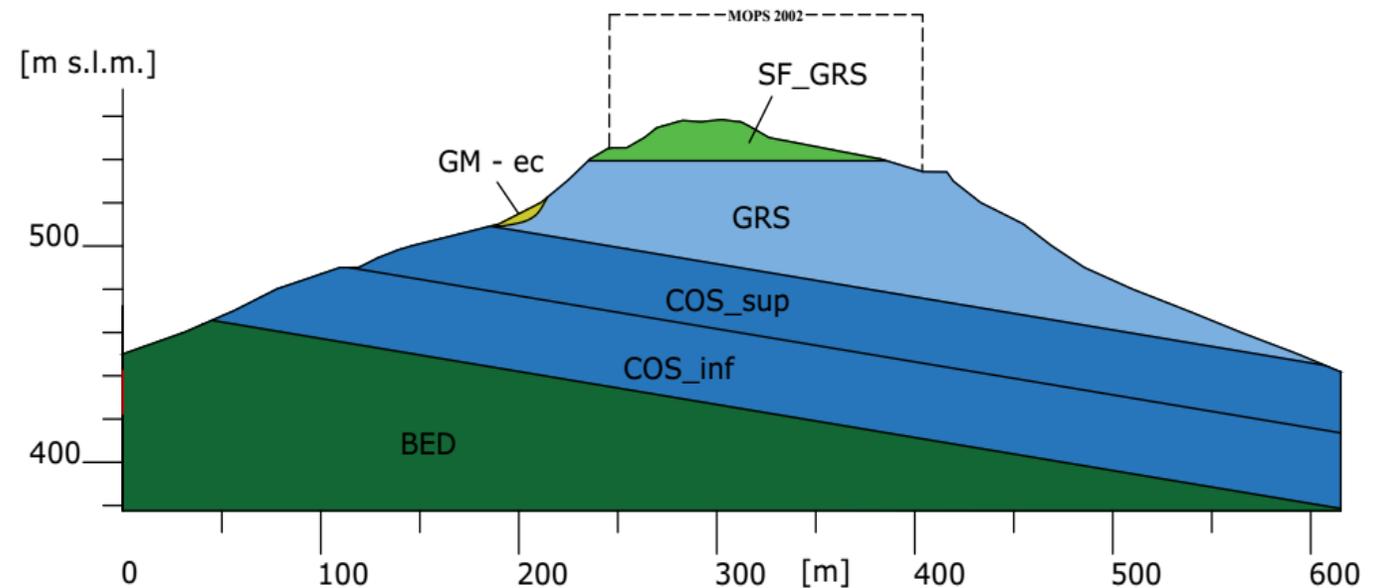


Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)



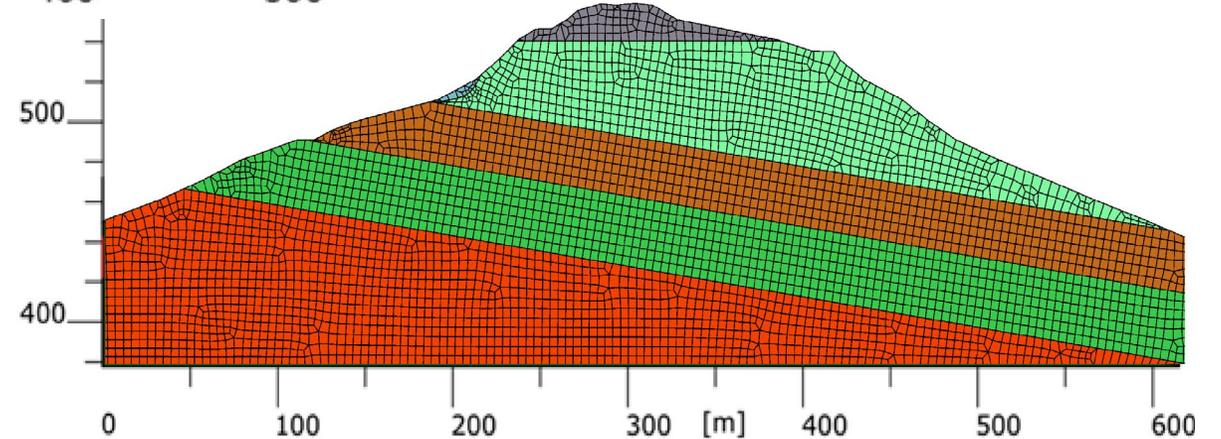
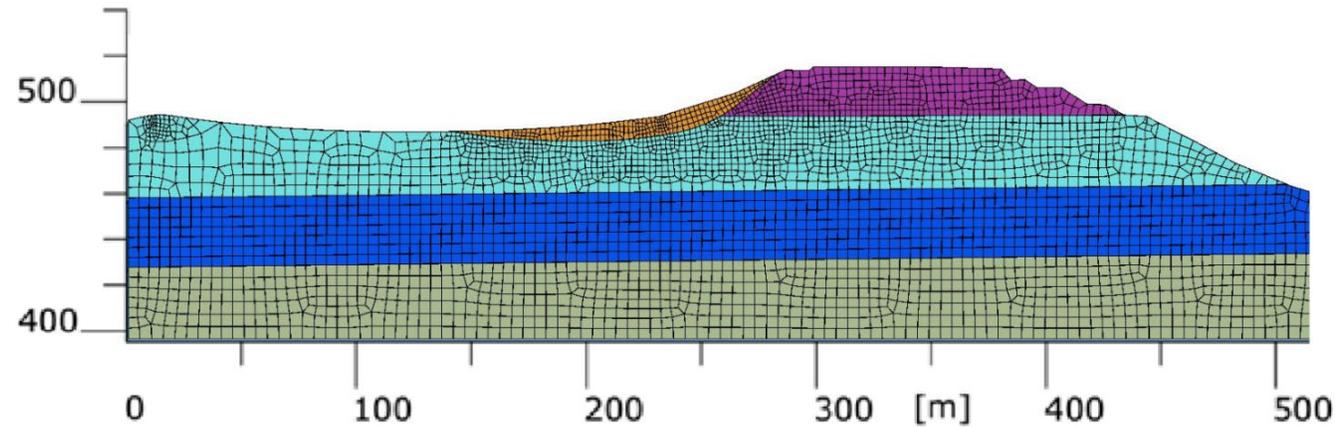
Sezione BB'

Sezione CC'



Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)

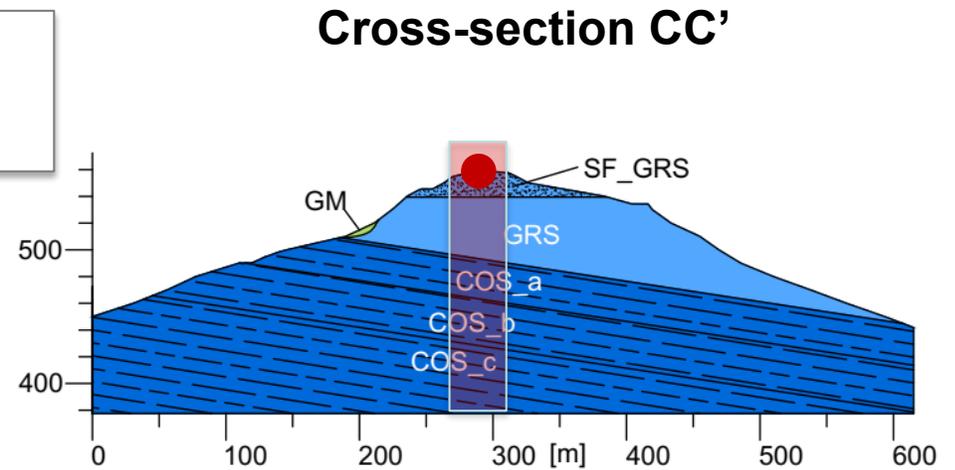
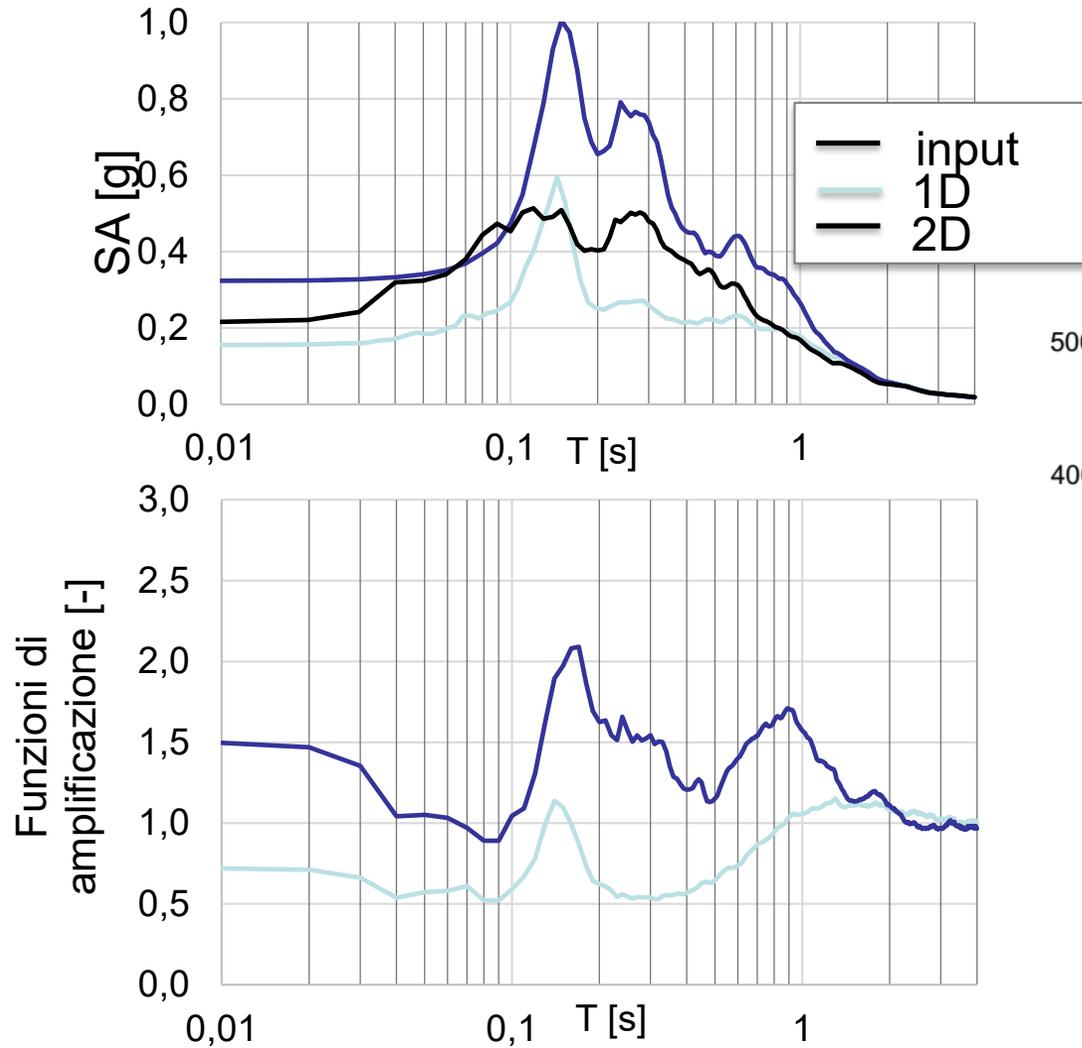
Modelli FEM 2D (metodo lineare equivalente)



(software:LSR2D - STACEC)

Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)

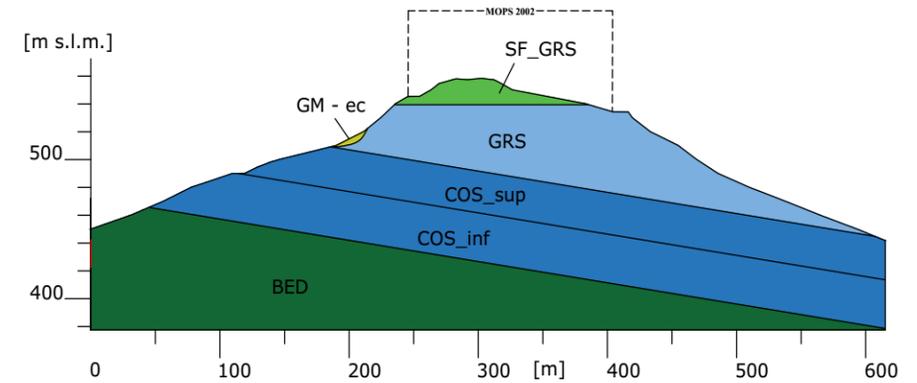
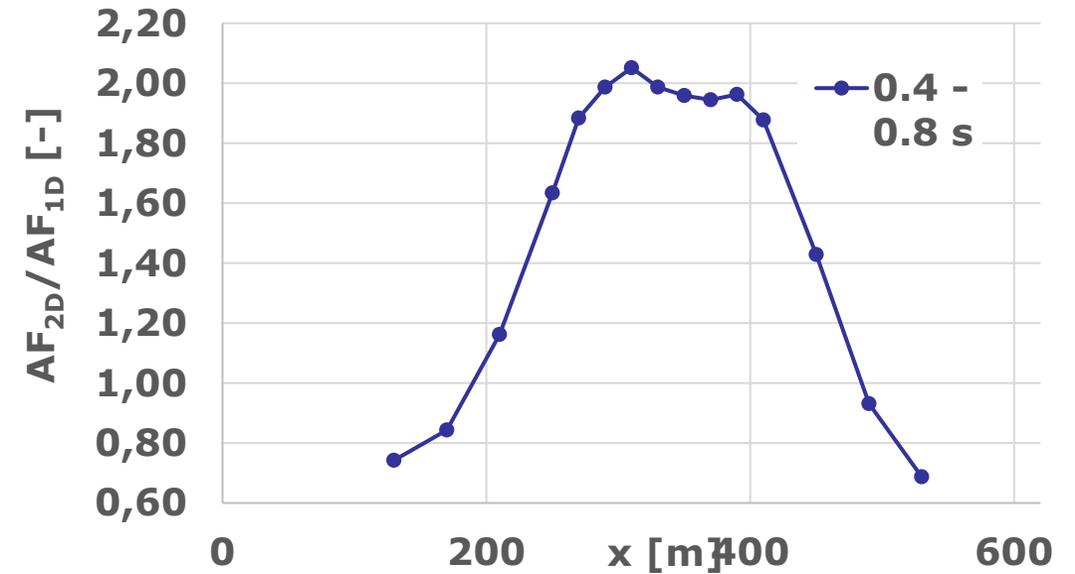
Analisi 1D vs Analisi 2D



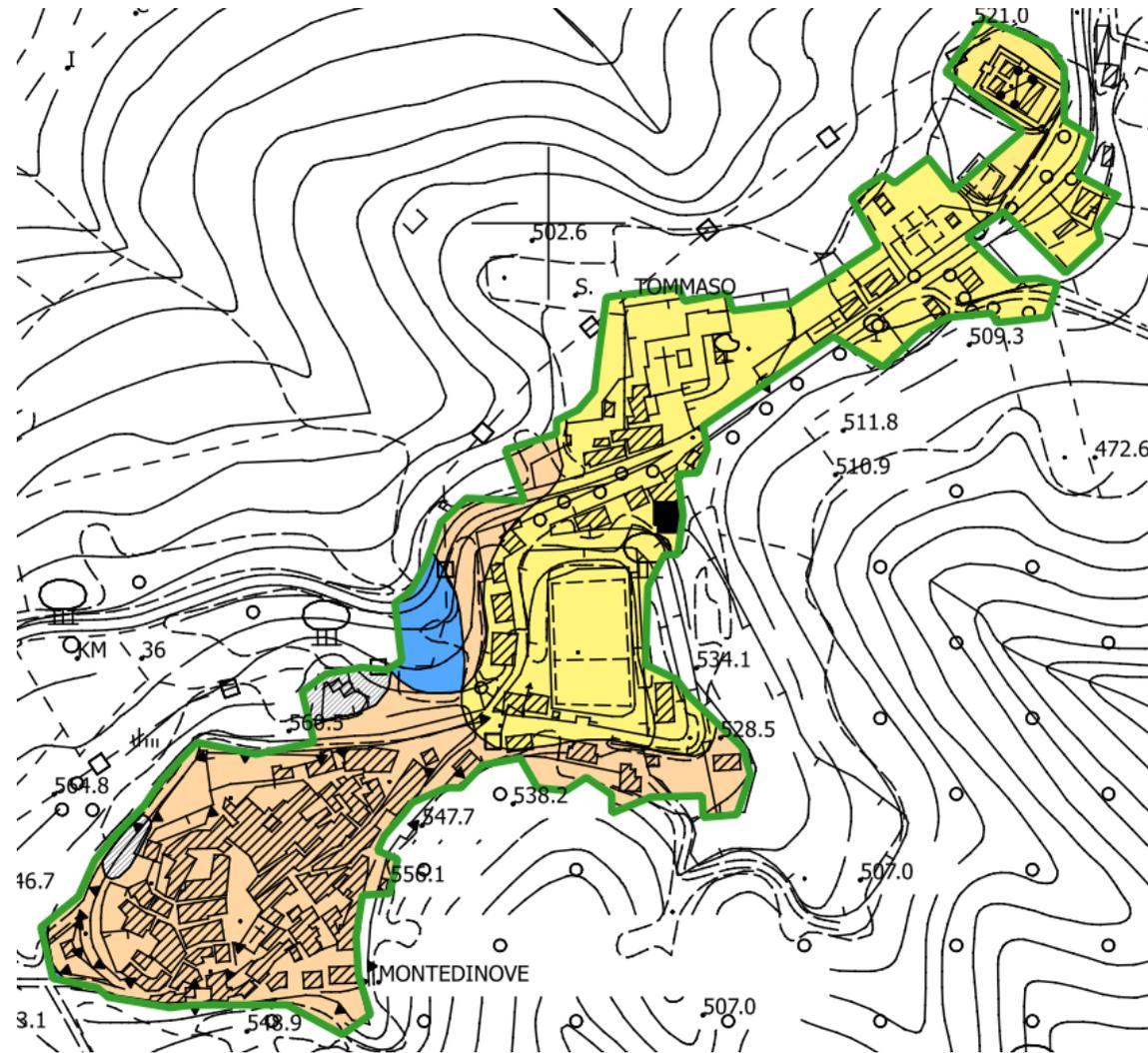
- ✓ Importanza dello strato COS (meno rigido del GRS)
→ **substrato sismico profondo**
- ✓ Marcati effetti **2D** effects
- ✓ Rilevanti effetti di non-linearità nei sedimenti superficiali

Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)

Effetti bidimensionali

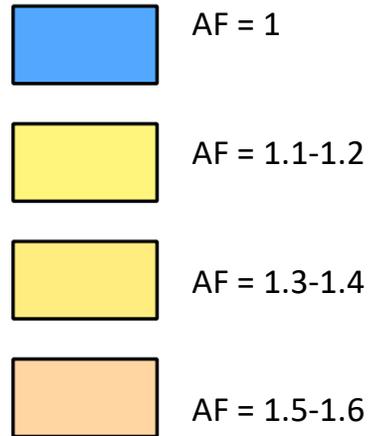


Microzonazione Sismica L3 – Montedinove (AP)



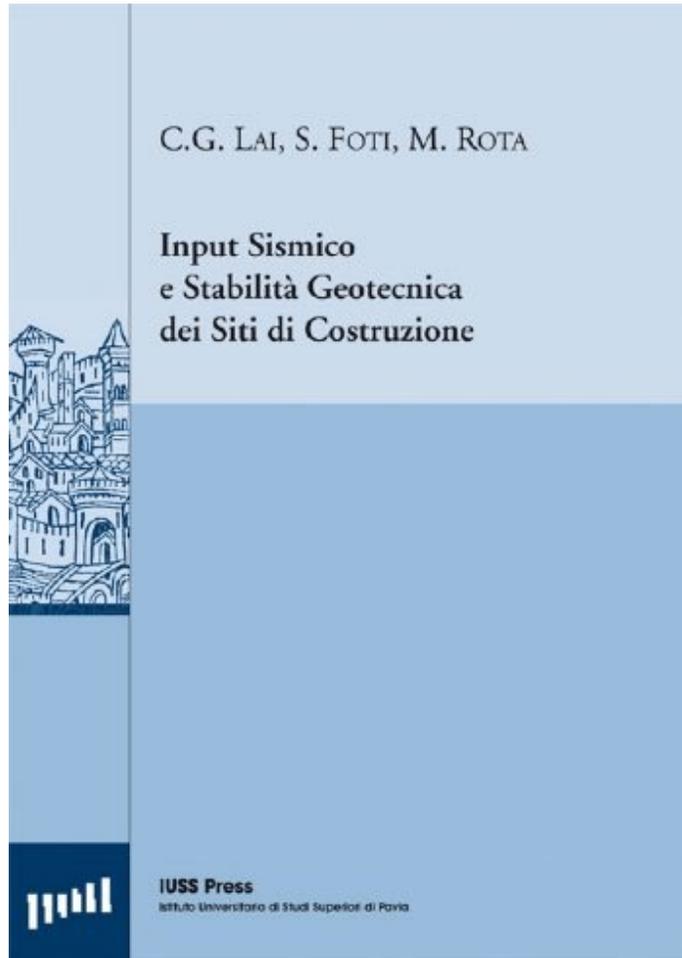
Mappa dei fattori di amplificazione

$T = 0.1 - 0.5 \text{ s}$



Nota: il fattore per il range di periodi proprio $T = 0.1 - 0.5 \text{ s}$ è applicabile per strutture da 1 a 5 piani circa ($T \approx 0,1s * n_{\text{piani}}$) (appropriato considerati gli edifici presenti nel comune)

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