

Protezione civile: verso una governance più forte per la riduzione del rischio

webinar sulla pericolosità sismica locale nella Regione Campania

15 dicembre 2020

Criticità relative al calcolo dell'amplificazione sismica: le inversioni di velocità
Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Giuseppe Naso

Criticità relative al calcolo dell'amplificazione sismica: le inversioni di velocità

Tematiche tecniche curate da

Stefania Fabozzi ¹, Gaetano Falcone ¹, Giuseppe Naso ²

Con la collaborazione di

Stefano Catalano ³, Massimiliano Moscatelli ¹, Alessandro Pagliaroli ⁴, Edoardo Peronace ¹,
Attilio Porchia ¹, Gino Romagnoli ¹

¹ *Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (CNR IGAG)*

([stefania.fabozzi](mailto:stefania.fabozzi@igag.cnr.it); [gaetano.falcone](mailto:gaetano.falcone@igag.cnr.it); [massimiliano.moscatelli](mailto:massimiliano.moscatelli@igag.cnr.it); [edoardo.peronace](mailto:edoardo.peronace@igag.cnr.it); [attilio.porchia](mailto:attilio.porchia@igag.cnr.it); [gino.romagnoli](mailto:gino.romagnoli@igag.cnr.it))@igag.cnr.it

² *Dipartimento di protezione Civile (DPC) - giuseppe.naso@protezionecivile.it*

³ *Università di Catania (UNICT) - catalano@unict.it*

⁴ *Università di Chieti Pescara (UNICH) - alessandro.pagliaroli@unich.it*

Tematiche trattate e obiettivo della presentazione

1. Risposta sismica locale a supporto della microzonazione sismica
2. Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia
3. Inversioni singole del profilo di velocità (tipiche di orizzonti rigidi clastici e vulcanici)
4. Inversioni multiple del profilo di velocità (tipiche di ambienti vulcanici)

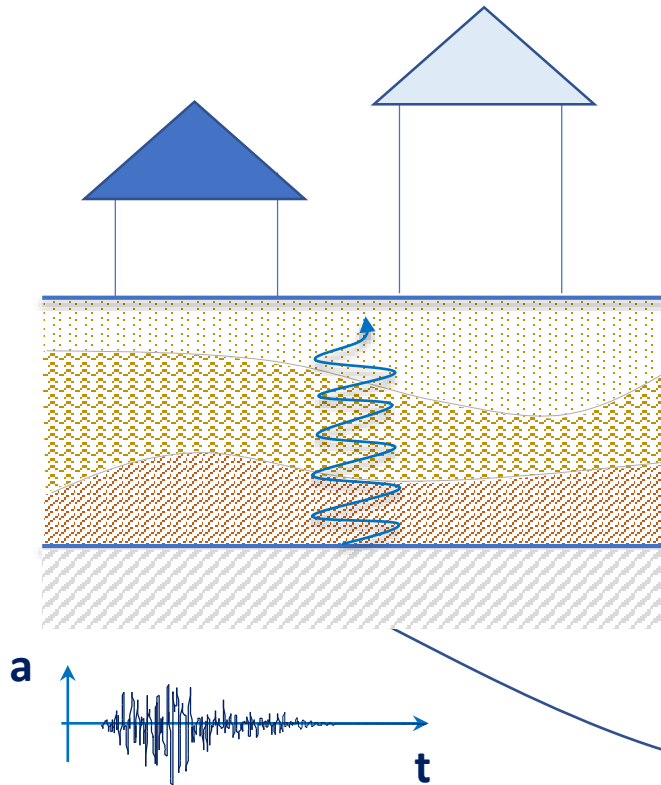
L'obiettivo della presentazione è quello di sollecitare l'attenzione di coloro che lavorano con strumenti di calcolo su alcune criticità delle scelte in fase di elaborazione dei dati e sul fatto che non esiste una «ricetta» giusta e adatta per tutti gli assetti geologici e geotecnici.

In pratica non si offrono soluzioni, ma piuttosto si presentano problemi su cui riflettere.

Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

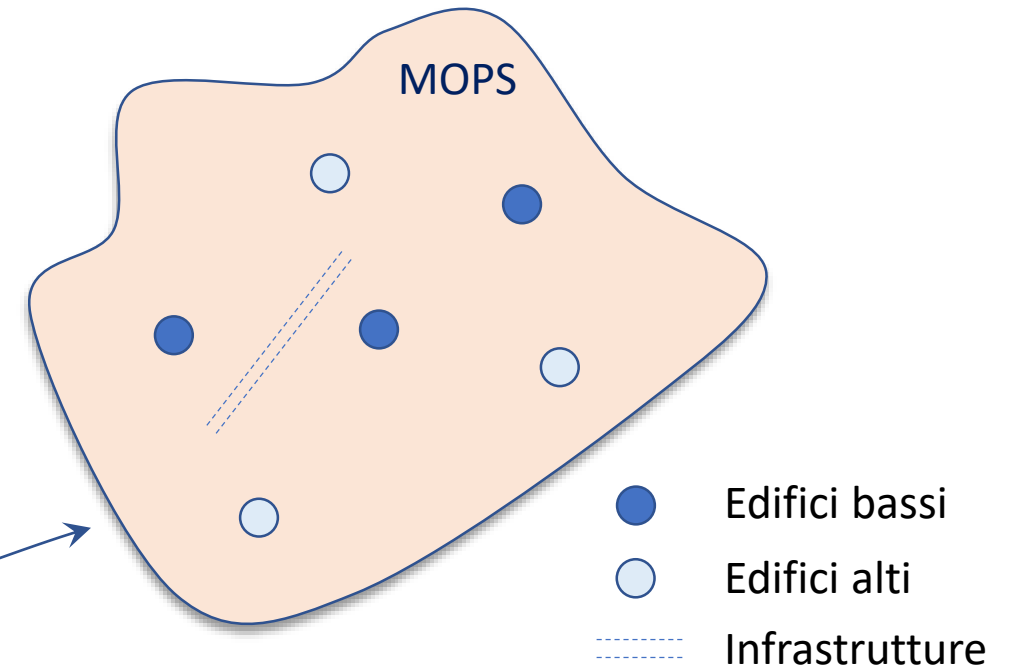
Risposta sismica locale

- Pericolosità sismica a scala locale
- Progettazione di nuove opere e verifica di quelle esistenti



Microzonazione sismica

- Pericolosità sismica a scala territoriale (urbana, sub-urbana)
- Pianificazione territoriale e dell'emergenza



Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

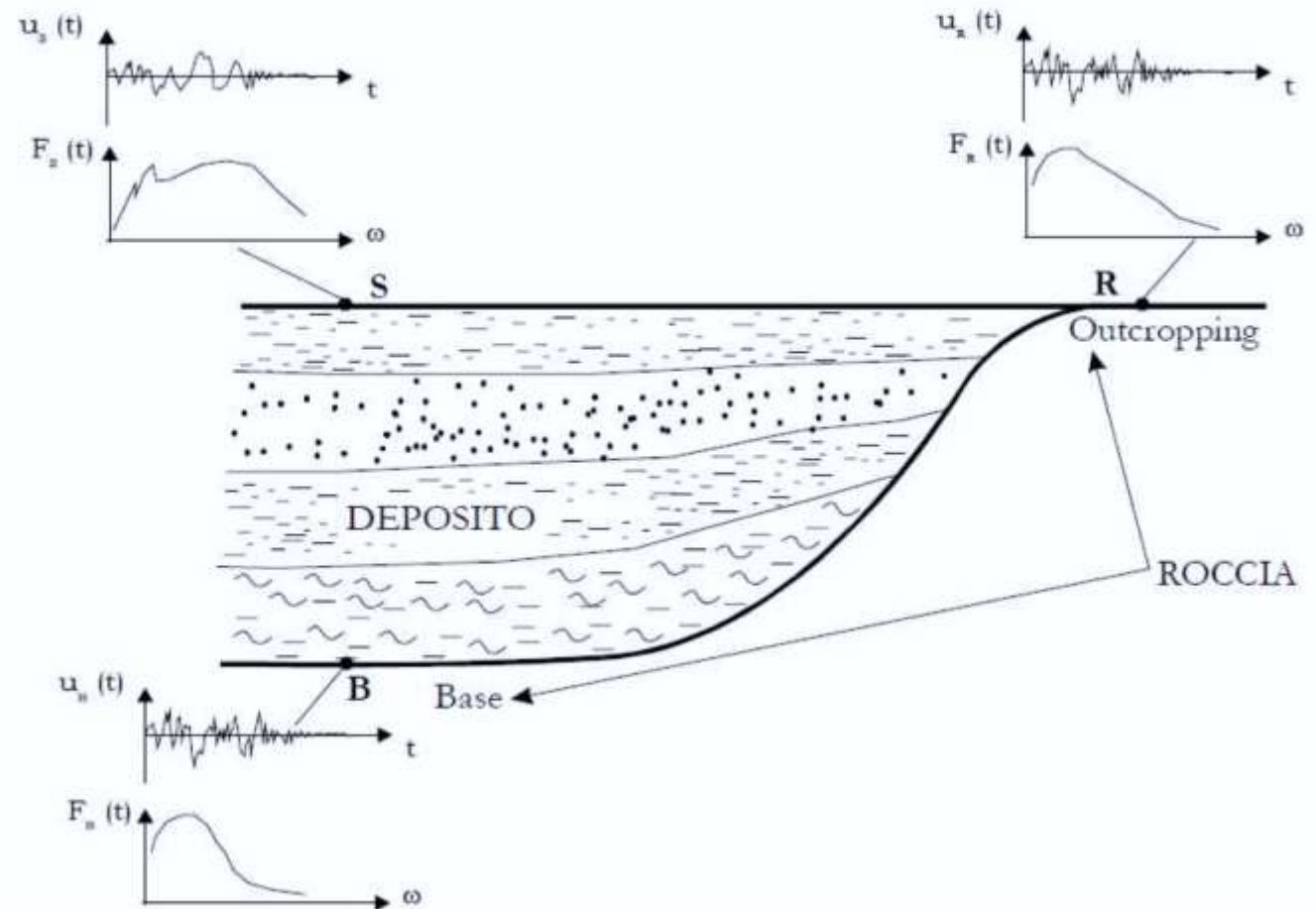
Come valutiamo gli effetti della risposta sismica locale? Formulazione analitica del problema

→ Nel dominio del tempo:

- durata del terremoto
- valore massimo di accelerazione
- valore massimo di velocità
- valore massimo di spostamento

→ Nel dominio delle frequenze:

- spettro di Fourier
- funzione di amplificazione
- spettro di risposta



Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

Come valutiamo gli effetti della risposta sismica locale? Formulazione analitica del problema

→ Nel dominio del tempo
attraverso il **fattore di amplificazione**

$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{B,max}}$$

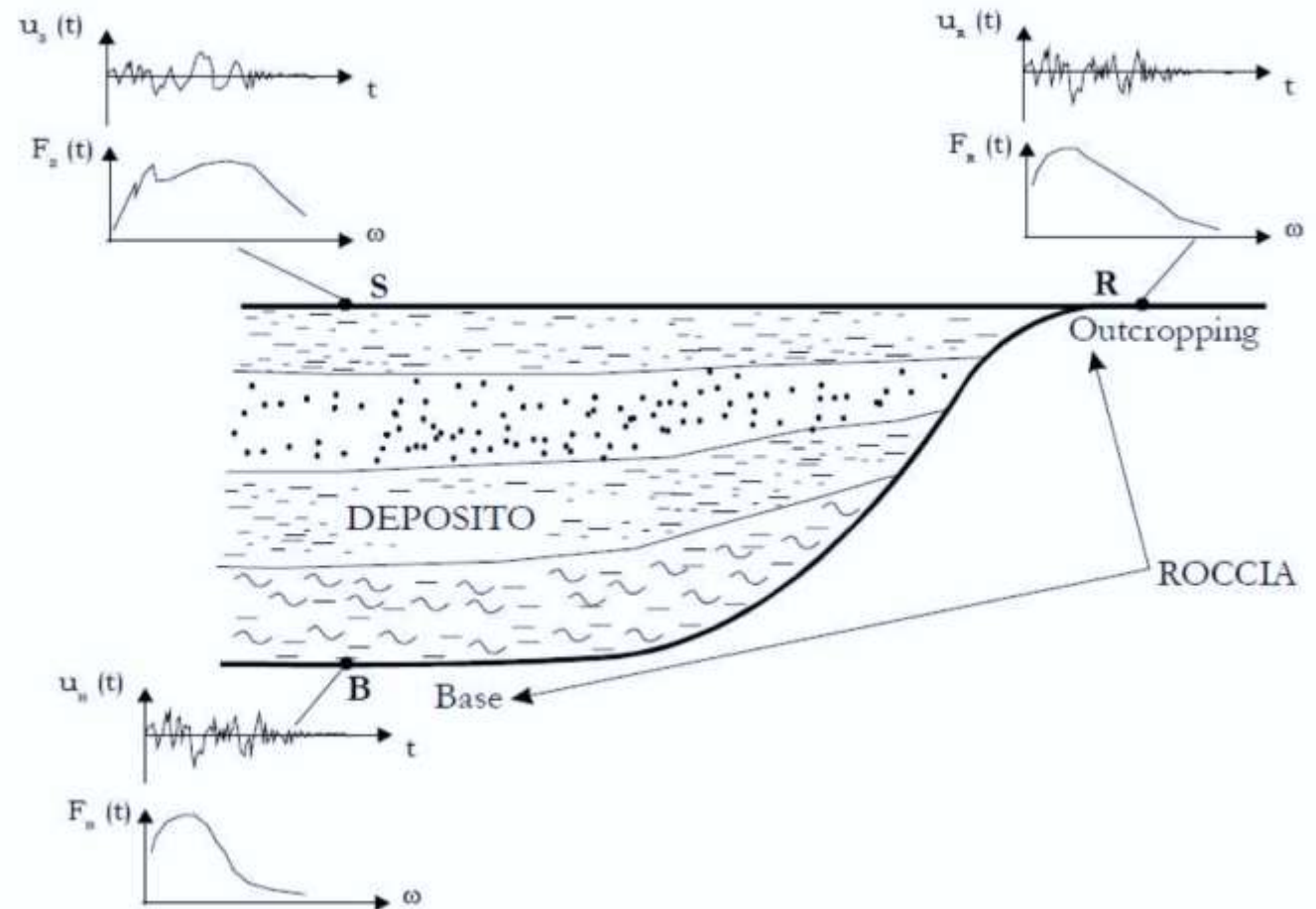
$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{R,max}}$$

→ Nel dominio delle frequenze
attraverso la **funzione di amplificazione**

$$A(f) = |H(f)|$$

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_B(f)}$$

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_R(f)}$$



Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

Come valutiamo gli effetti della risposta sismica locale? Formulazione analitica del problema

→ Nel dominio del tempo
attraverso il **fattore di amplificazione**

$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{B,max}}$$

$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{R,max}}$$

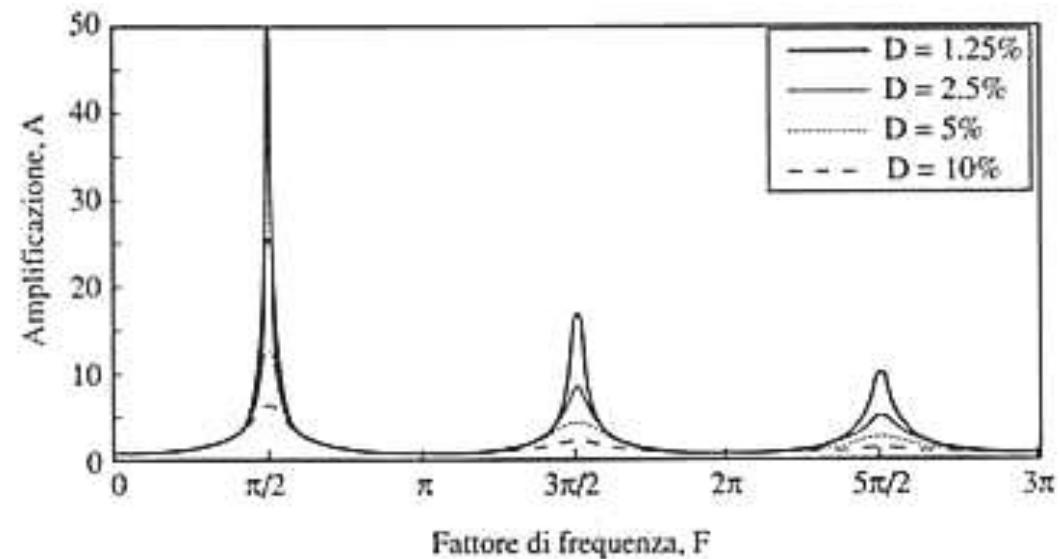
→ Nel dominio delle frequenze
attraverso la **funzione di amplificazione**

$$A(f) = |H(f)|$$

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_B(f)}$$

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_R(f)}$$

CASO: Strato visco-elastico su substrato deformabile



$$(A_d^*)_{max,n} \approx \frac{1}{\mu + (2n - 1) \frac{\pi}{2} D} \quad n = 1, \dots, \infty$$

$$I = \frac{1}{\mu} = \frac{\rho_r V_r}{\rho_s V_s} > 1$$

Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

Come valutiamo gli effetti della risposta sismica locale? Formulazione analitica del problema

→ Nel dominio del tempo
attraverso il **fattore di amplificazione**

$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{B,max}}$$

$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{R,max}}$$

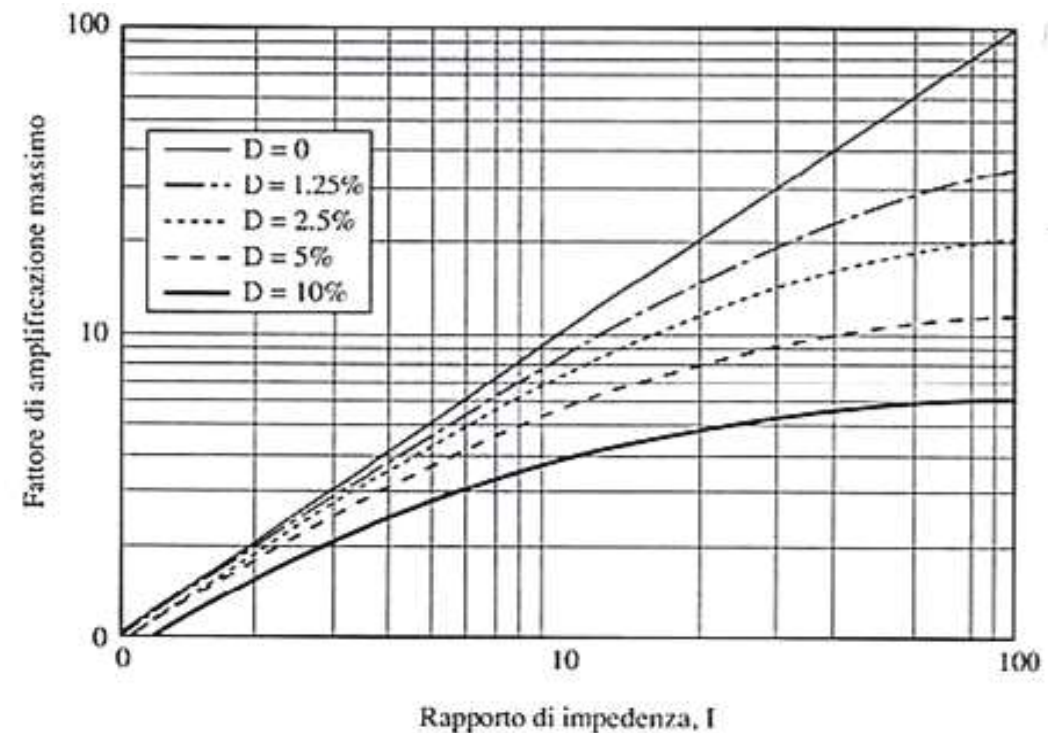
→ Nel dominio delle frequenze
attraverso la **funzione di amplificazione**

$$A(f) = |H(f)|$$

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_B(f)}$$

$$H(f) = \frac{F_s(f)}{F_R(f)}$$

CASO: Strato visco-elastico su substrato deformabile



$$n = 1 \Rightarrow (A_d^*)_{max,1} \approx \frac{1}{\mu + \frac{\pi}{2} D}$$

Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

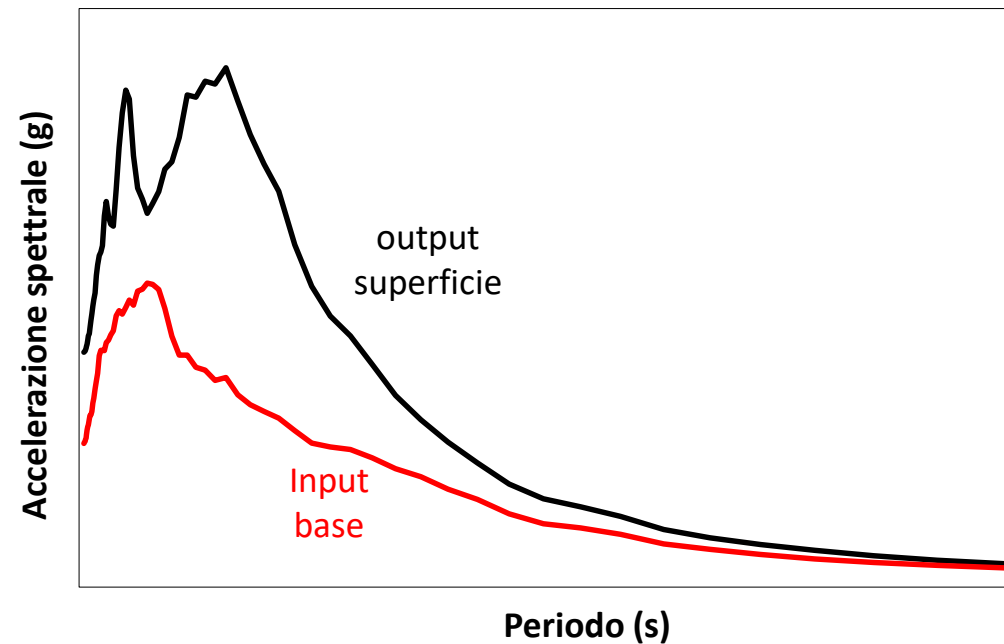
Come valutiamo gli effetti della risposta sismica locale? Formulazione analitica del problema

→ Nel dominio del tempo
attraverso il **fattore di amplificazione**

$$A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{B,max}} \quad A(t) = \frac{a_{s,max}}{a_{R,max}}$$

→ Nel dominio delle frequenze
attraverso lo **spettro di risposta**

lo Spettro di Risposta esprime, per ogni valore del periodo proprio, il massimo spostamento-velocità-accelerazione relativo relativo al suolo, atteso per in corrispondenza di un dato scuotimento

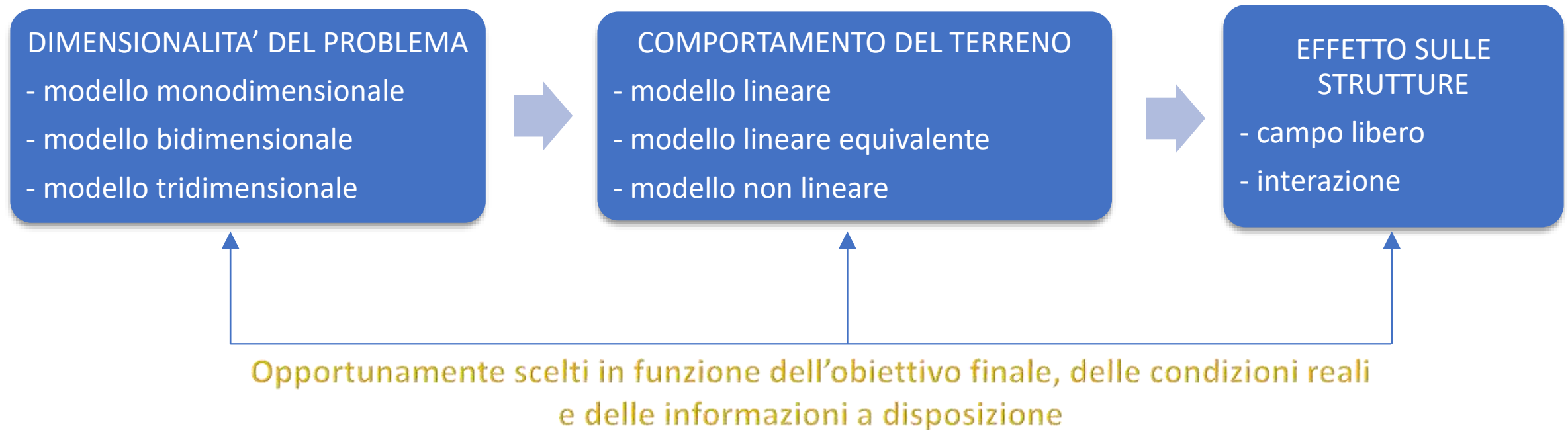


Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

Formulazione analitica del problema: il modello di sottosuolo

Il modello di sottosuolo deve essere il più possibile rappresentativo della realtà, non deve essere eccessivamente complesso ai fini della sua applicazione e del reperimento dei dati necessari, ma neanche troppo semplicistico.



Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

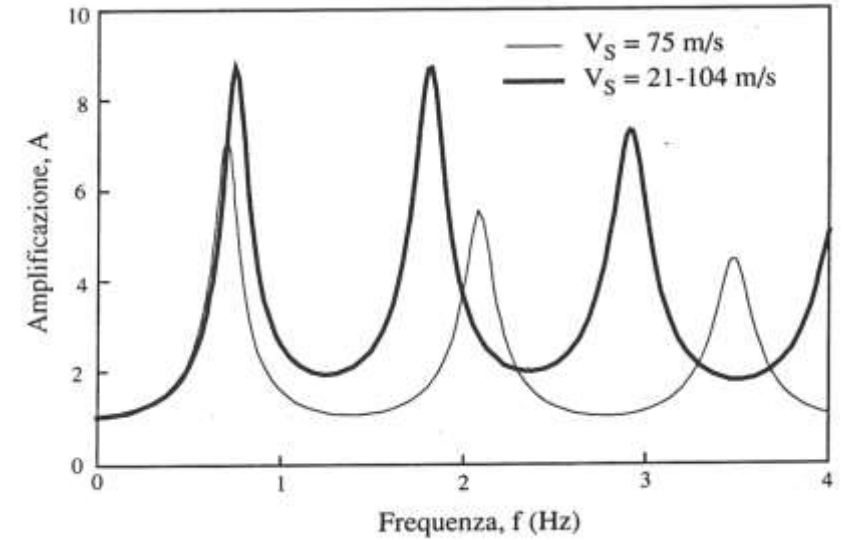
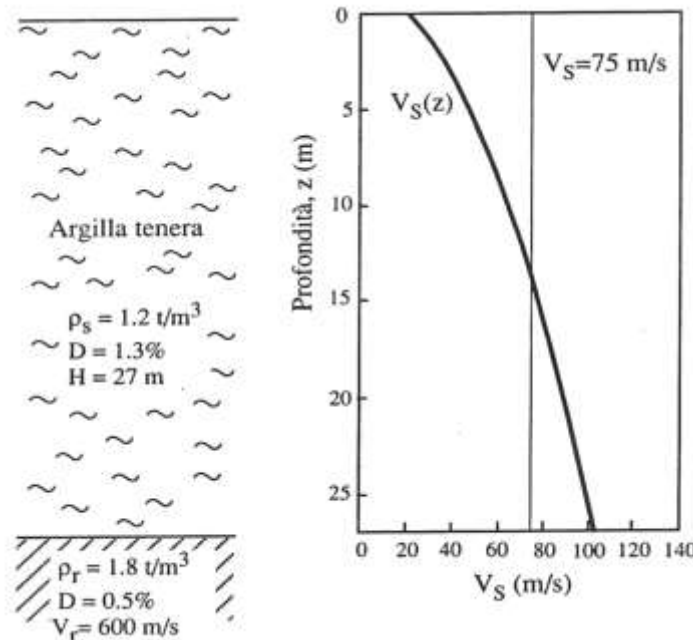
Modello di sottosuolo: i principali parametri che controllano la risposta sismica locale

In un modello di sottosuolo definito per la risposta sismica locale, le **eterogeneità verticali** (in termini di profilo di rigidezza a taglio, G , o della velocità delle onde S , V_S) e l'effetto della **non linearità** (in termini di rapporto di smorzamento, D) sono i fattori che influenzano maggiormente la risposta sismica locale.

eterogeneità verticali :

A parità di valori medi, una variazione continua di V_S con z comporta:

- avvicinamento delle frequenze naturali
- aumento delle ampiezze delle frequenze di picco

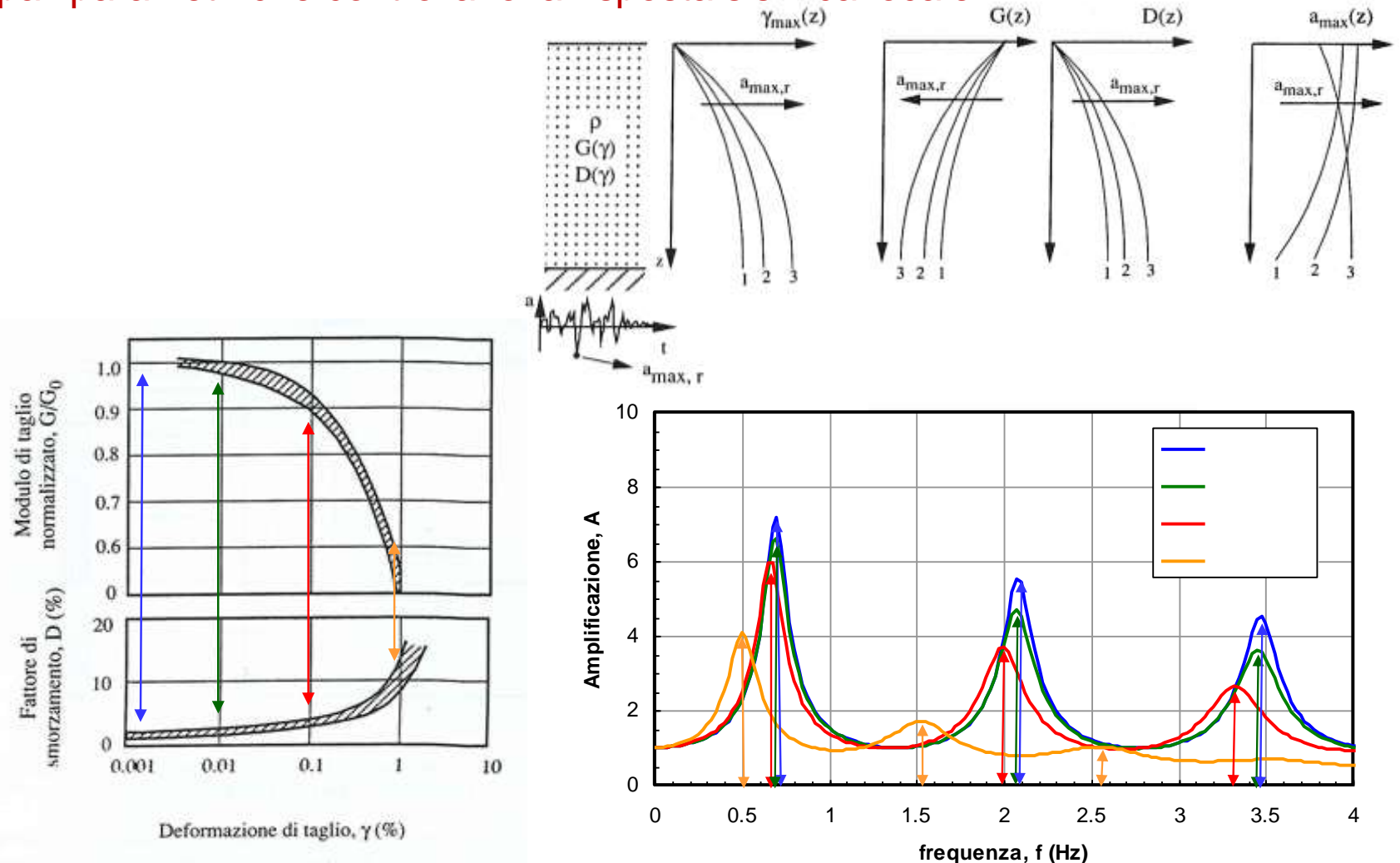
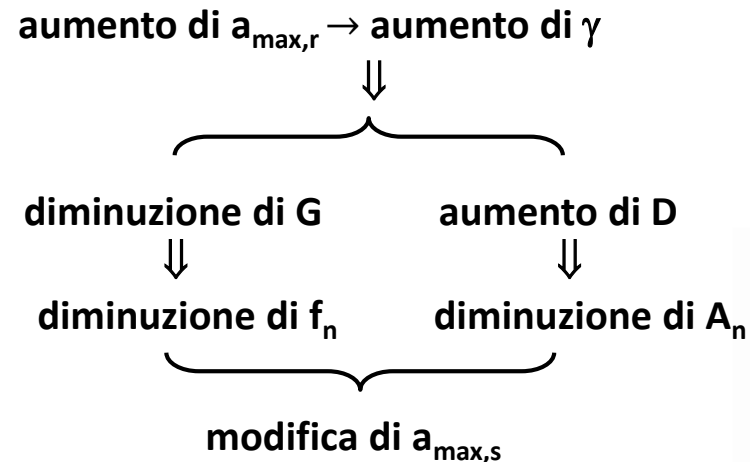


Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

Modello di sottosuolo: i principali parametri che controllano la risposta sismica locale

non linearità :

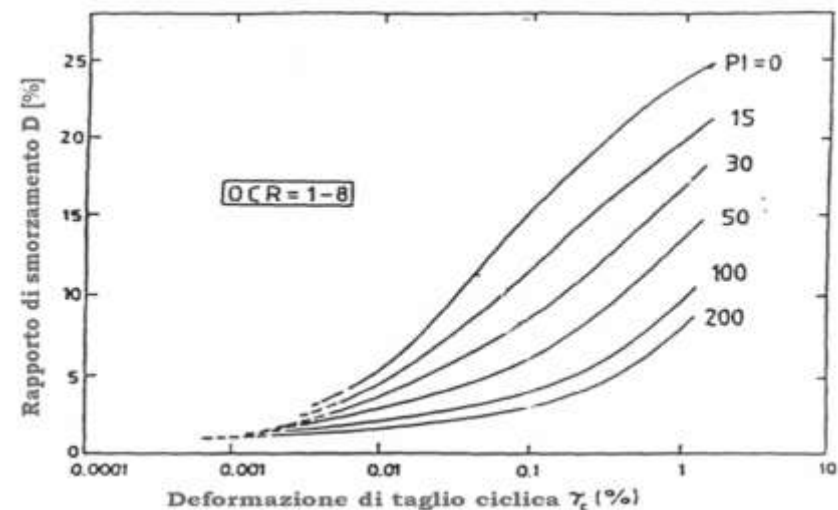
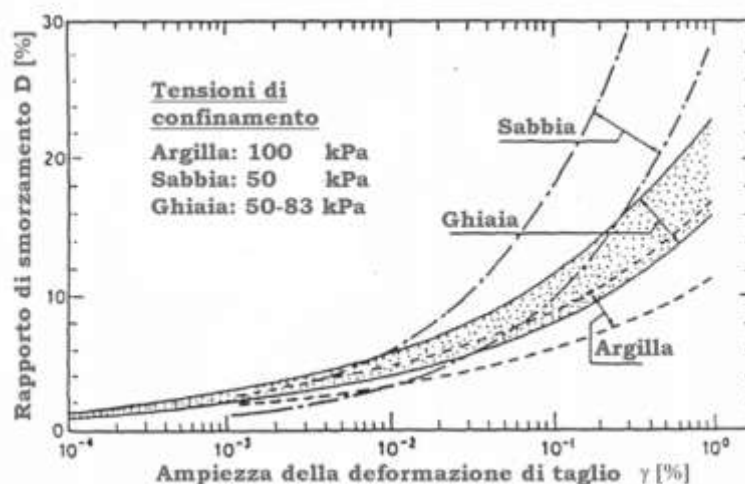
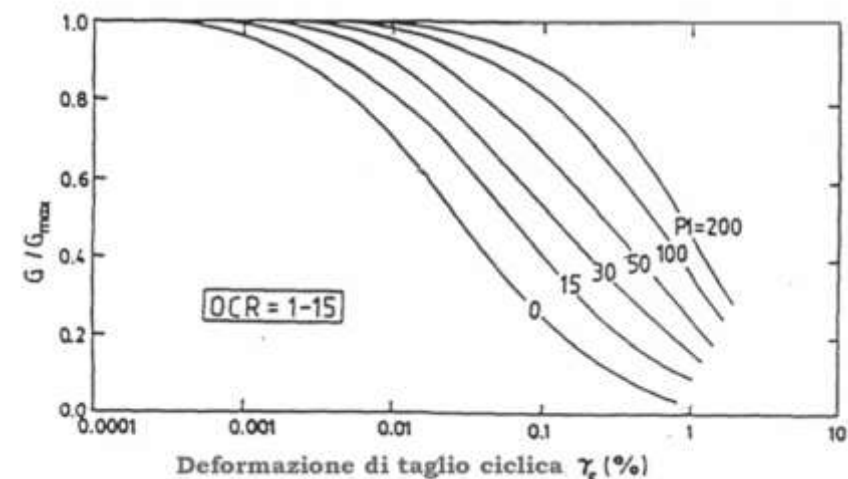
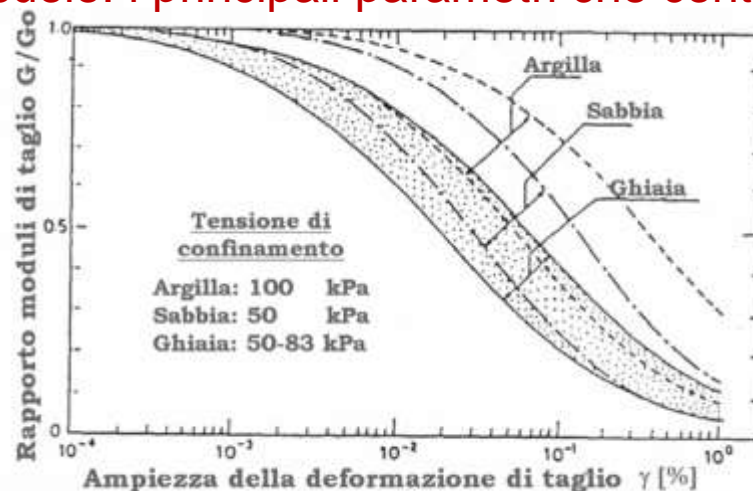


Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Risposta sismica locale

Modello di sottosuolo: i principali parametri che controllano la risposta sismica locale

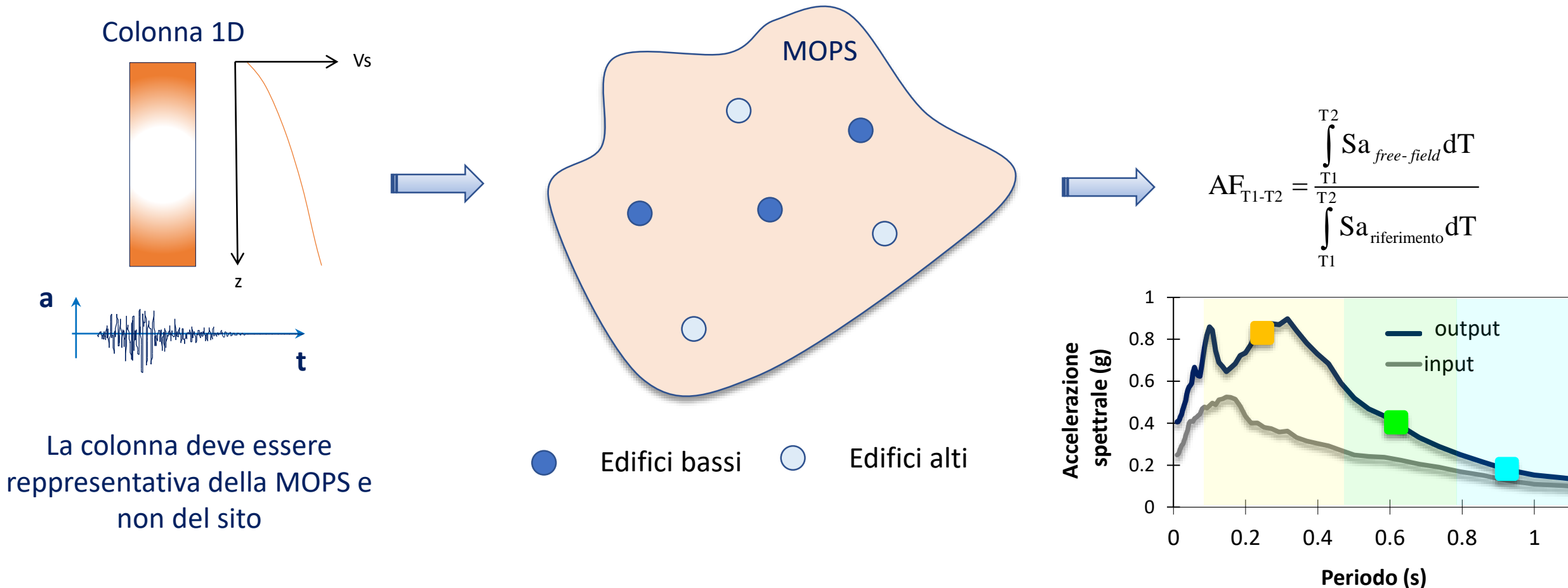
non linearità :



Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Microzonazione sismica

Quantificazione degli effetti locali a scala territoriale



Risposta Sismica Locale a supporto della microzonazione sismica

Microzonazione sismica

Quantificazione degli effetti locali a scala territoriale

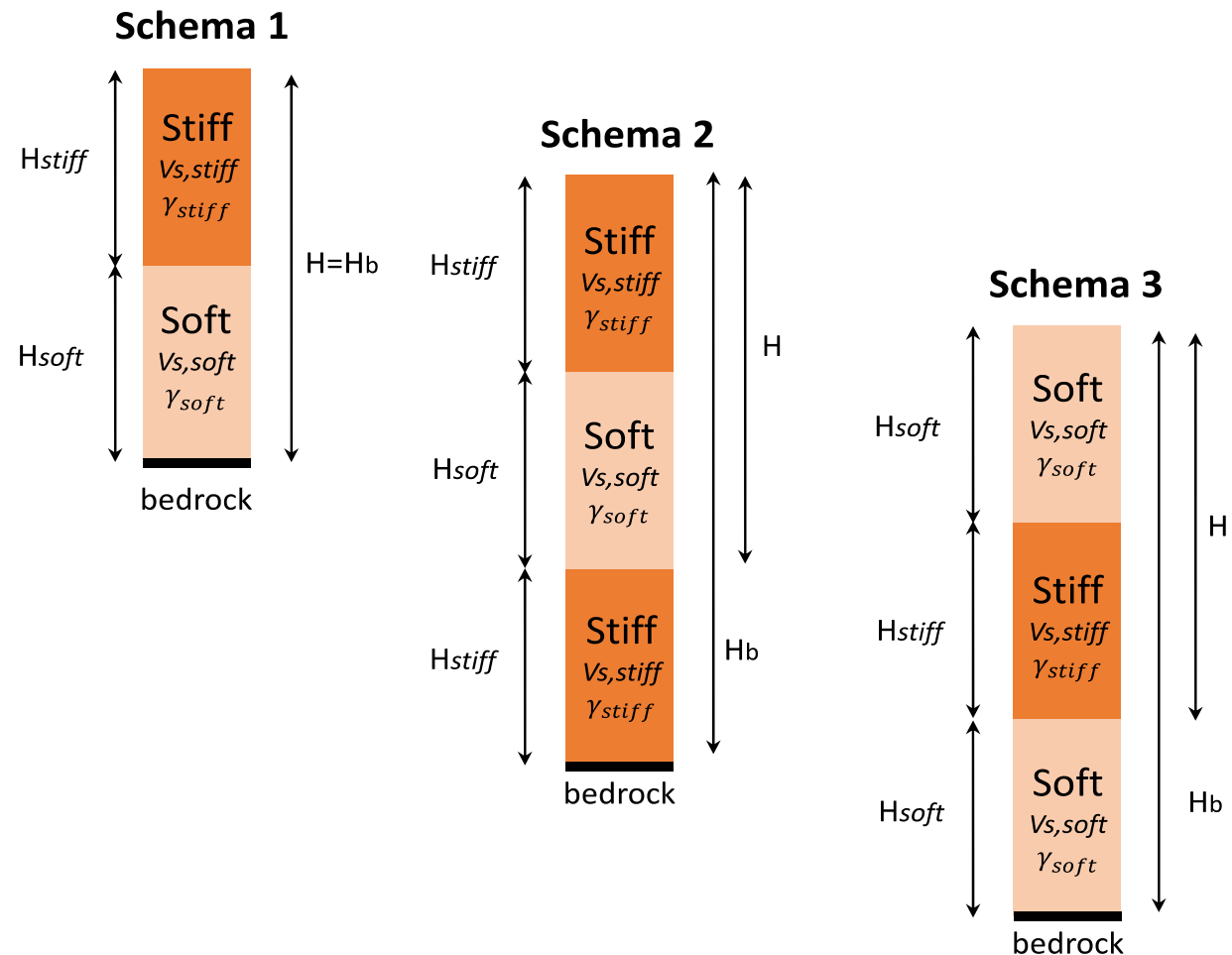
Al passaggio dalla scala locale alla scala territoriale, in cui la colonna 1D necessariamente verrà semplificata per renderla 'rappresentativa' della MOPS, come ci comportiamo in presenza di inversioni di velocità, ovvero quando strati più rigidi poggiano su strati più deformabili? Quali sono gli effetti se trascuriamo l'inversione di velocità?

Inversioni del profilo di velocità: definizione

Microzonazione sismica

Inversioni di velocità in prospettiva di microzonazione sismica

Per inversione di velocità in prospettiva sismica, si intendono alternanze di strati rigidi e soffici ($\Delta V_s = V_{s,stiff} - V_{s,soft} \geq 150 \text{ m/s}$) di materiali appartenenti a differenti litologie e che pertanto esibiscono diverso comportamento meccanico in condizioni sismiche, organizzati secondo i seguenti schemi ideali tipo (schema 1, schema 2 e schema 3) rappresentativi, ad esempio, di *i*) orizzonti rigidi clastici (*i.e.*, terrazzi marini, pianie alluvionali e costiere, bacini intermontani) e *ii*) orizzonti rigidi vulcanici (*i.e.*, rupi, espandimenti lavici, alternanze in ambienti vulcanici),



Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia

Microzonazione sismica

Inversioni di velocità in prospettiva di microzonazione sismica: **effetto di** $\frac{H_{stiff}}{H_{soft}}$ **e** $\frac{Vs_{stiff}}{Vs_{soft}}$

Con riferimento al caso ideale dello schema 1 e alle combinazioni di $\frac{H_{stiff}}{H_{soft}}$ e $\frac{Vs_{stiff}}{Vs_{soft}}$ riportate rispettivamente in Tabella 1 e 2, sono state effettuate analisi di RSL lineari equivalenti con il software STRATA.

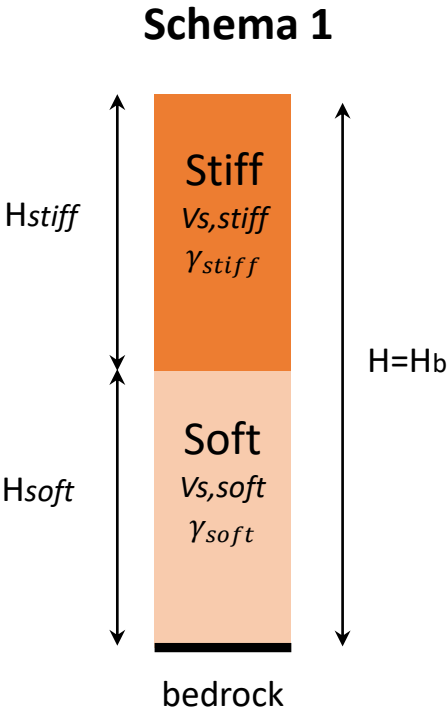


Tabella 1

H=H_b	30m - 50m - 70m - 100m
H_{soft}	0m - 0.25H - 0.50H - 0.75H - H

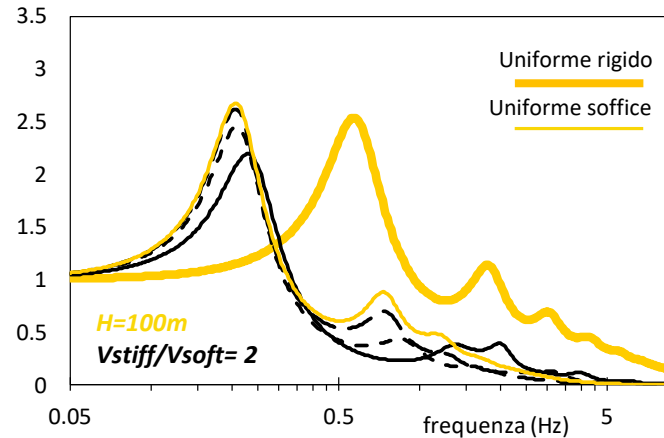
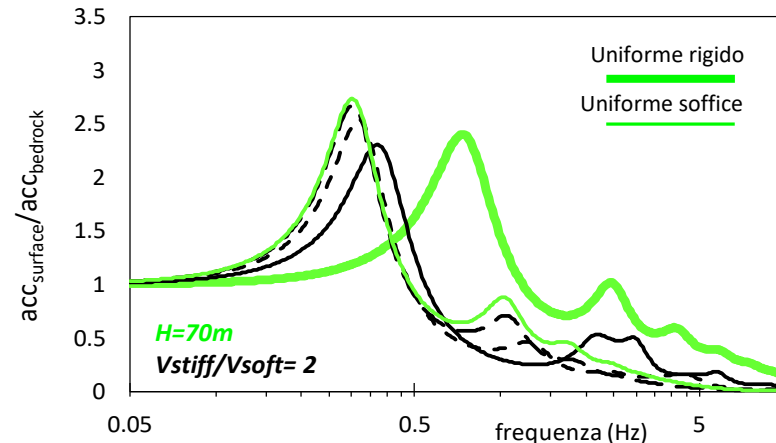
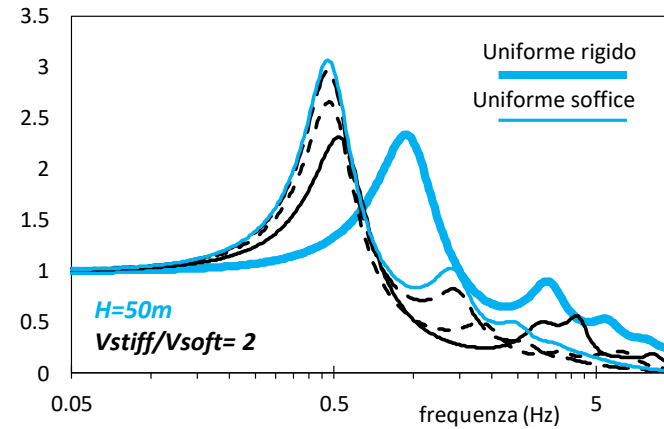
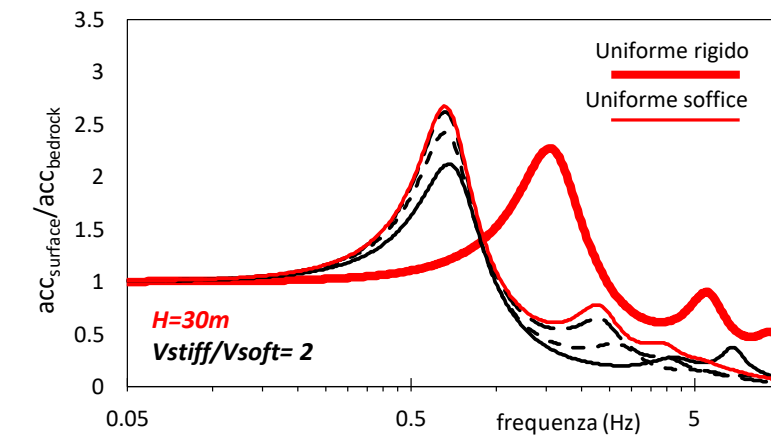
Tabella 2

-	V_{s,stiff}	V_{s,soft}	V_{s,stiff}/V_{s,soft}
1	360	180	2
2	360	100	3.6
3	580	180	3.2
4	580	100	5.8

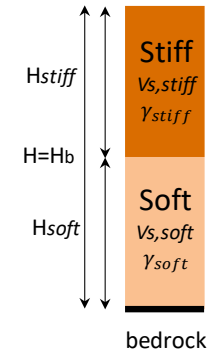
Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia


H = H_b = 30m 50m 70m 100m

Effetto rapporto dello spessore H_{stiff}/H_{soft} ($V_{stiff}=360m/s$, $V_{soft}=180m/s$, $I=2$)



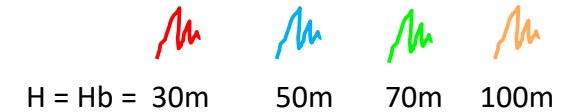
Schema 1



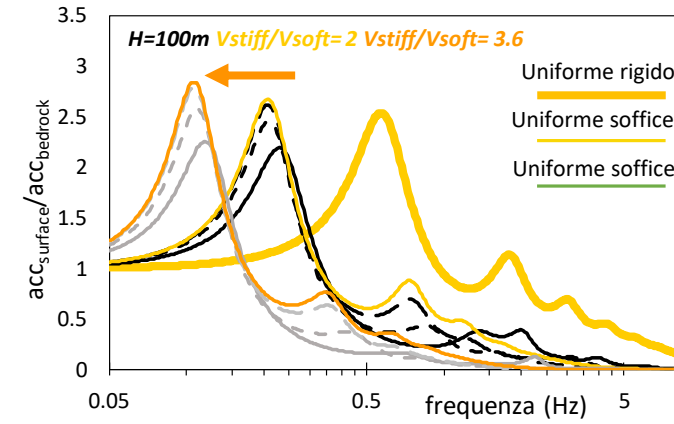
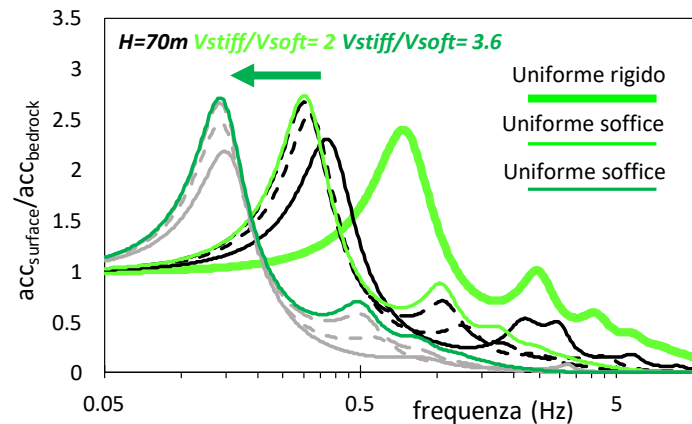
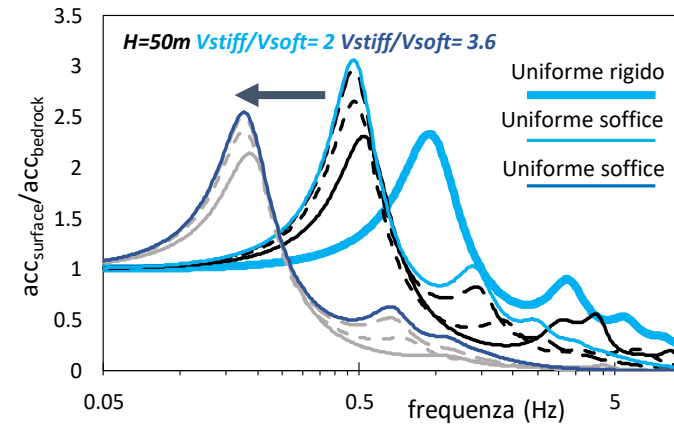
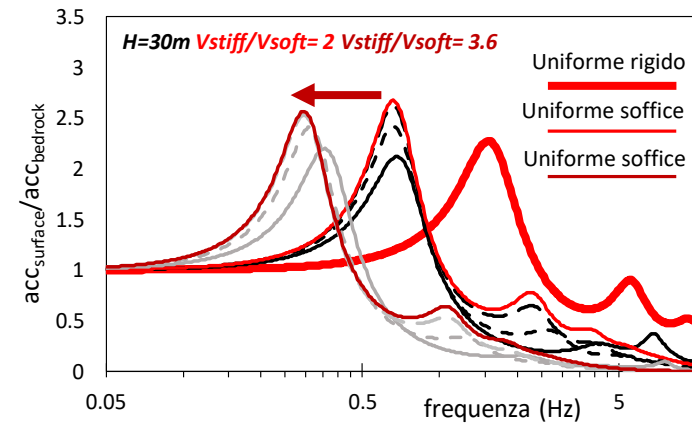
LEGENDA

- $H_{soft}=0.25H$
- - - $H_{soft}=0.5H$
- · - $H_{soft}=0.75H$

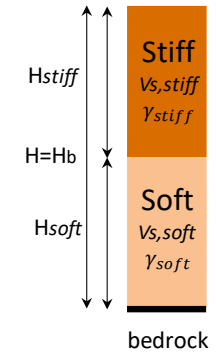
Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia



Effetto della velocità strato soffice ***V*_{soft}** (*V*_{stiff}=360m/s, *V*_{soft}=100m/s, *l*=3.6)



Schema 1



LEGENDA

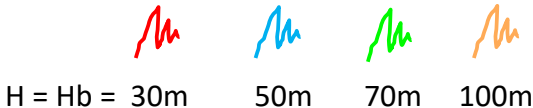
*V*_{stiff}/*V*_{soft}= 2

- H_{soft}=0.25H
- - - H_{soft}=0.5H
- · - · H_{soft}=0.75H

*V*_{stiff}/*V*_{soft}= 3.6

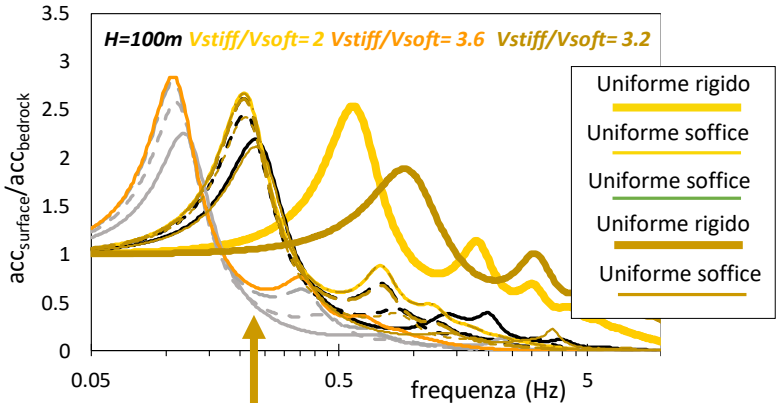
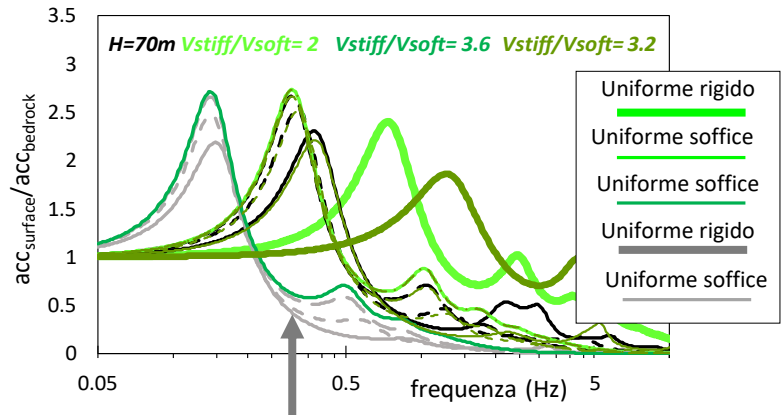
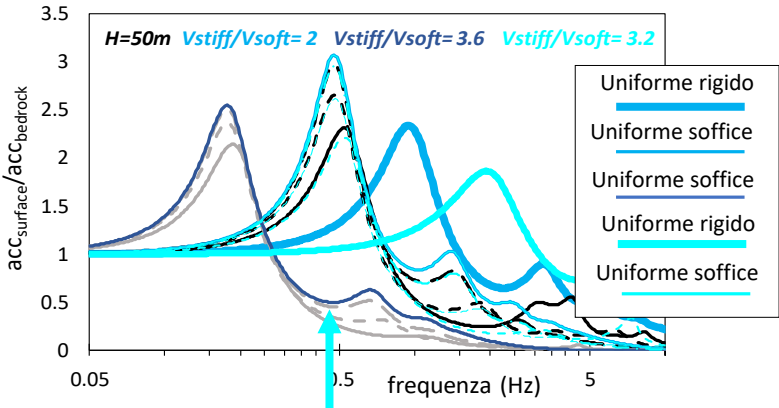
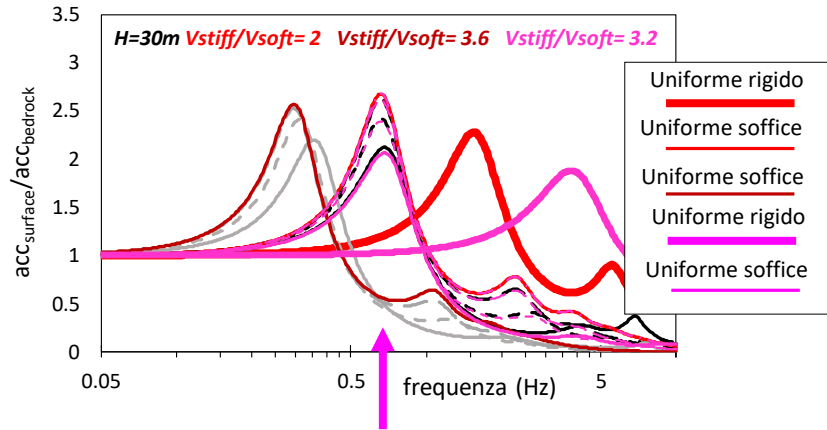
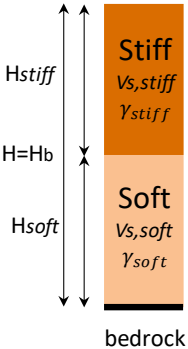
- H_{soft}=0.25H
- - - H_{soft}=0.5H
- · - · H_{soft}=0.75H

Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia



Effetto della velocità strato rigido V_{stiff} ($V_{stiff}=580\text{m/s}$, $V_{soft}=180\text{m/s}$, $I=3.2$)

Schema 1



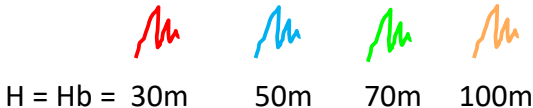
LEGENDA

Hsoft=0.25H

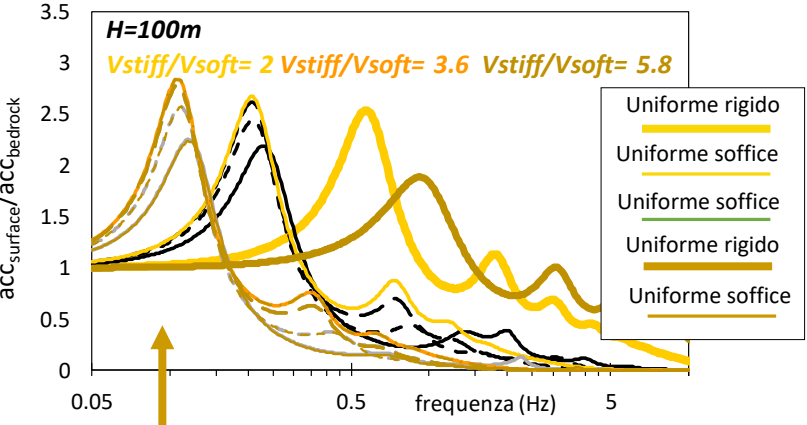
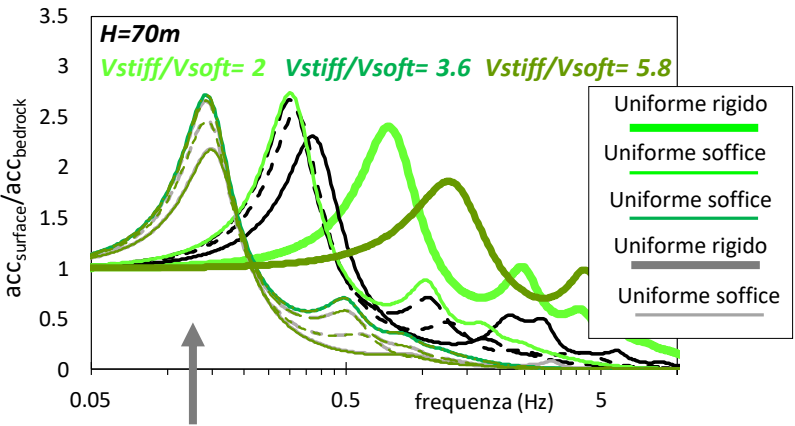
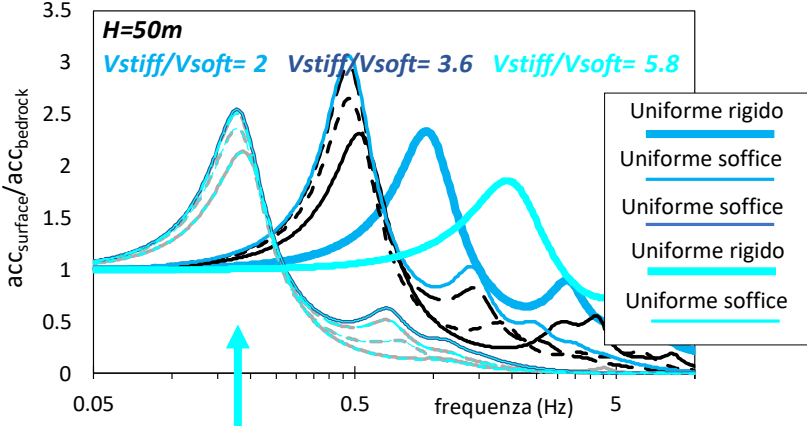
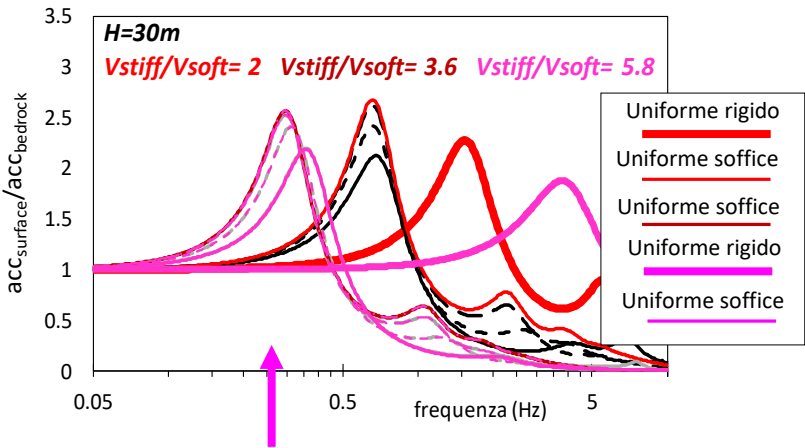
Hsoft=0.5H

Hsoft=0.75H

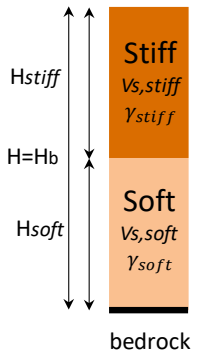
Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia



Effetto della velocità strato rigido V_{stiff} ($V_{stiff}=580\text{m/s}$, $V_{soft}=100\text{m/s}$, $I=5.8$)



Schema 1

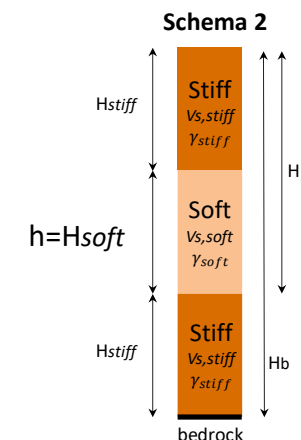
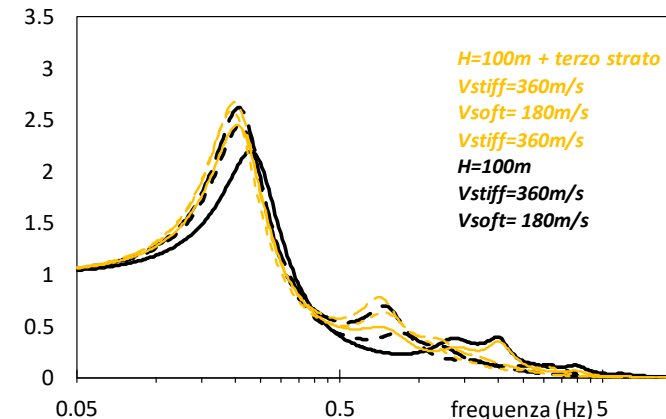
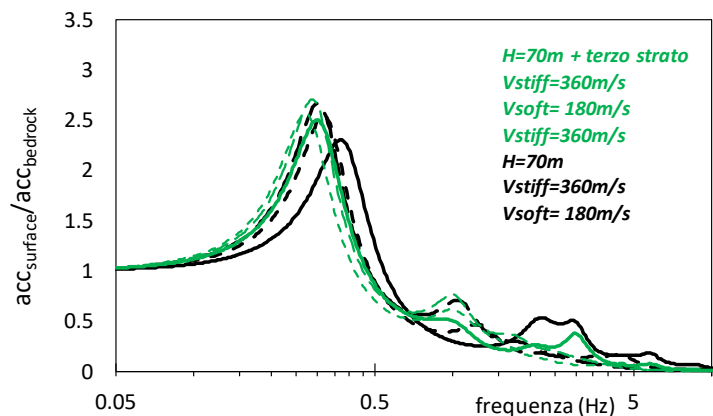
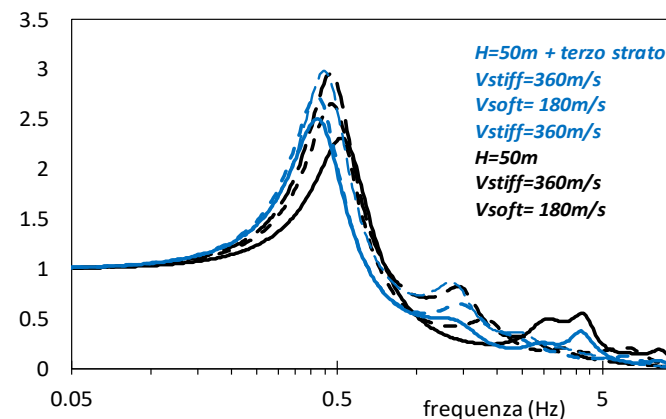
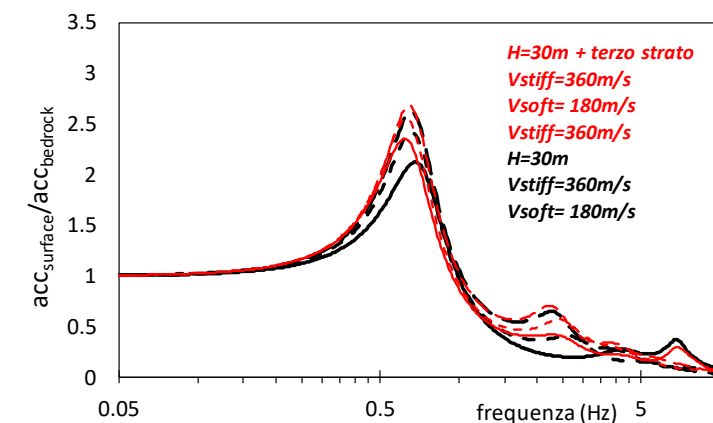


LEGENDA

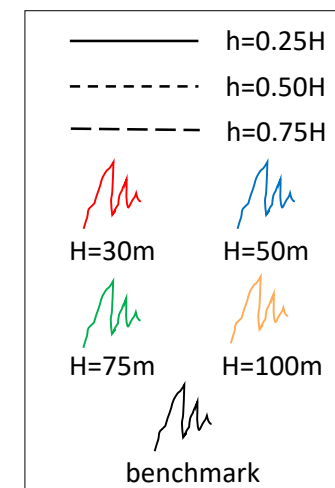
$H_{soft}=0.25H$
 $H_{soft}=0.5H$
 $H_{soft}=0.75H$

Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia

Effetto della presenza terzo strato ($V_{stiff1}=360\text{m/s}$, $V_{soft2}=180\text{m/s}$, $V_{stiff3}=360\text{m/s}$)

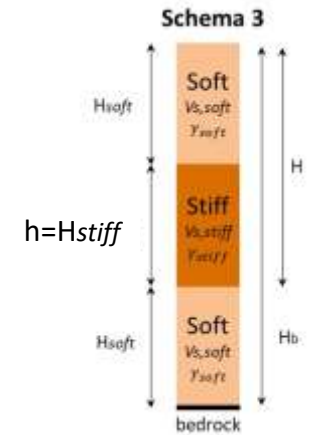
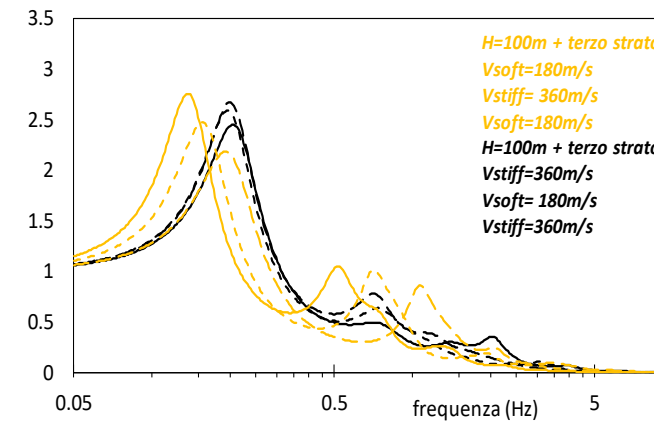
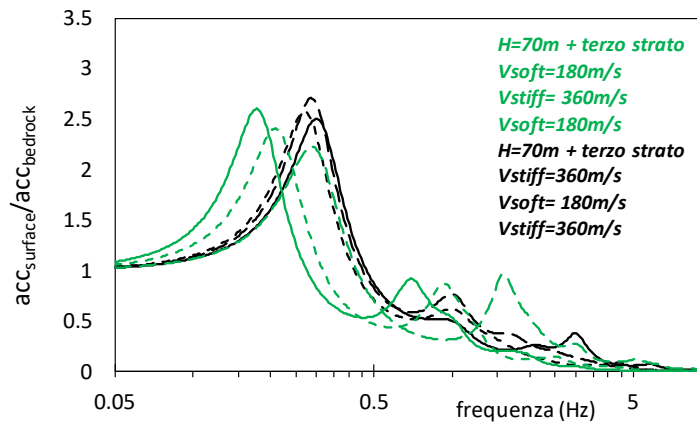
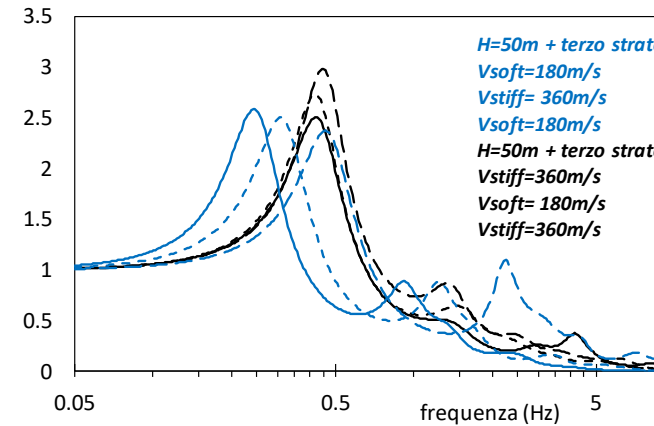
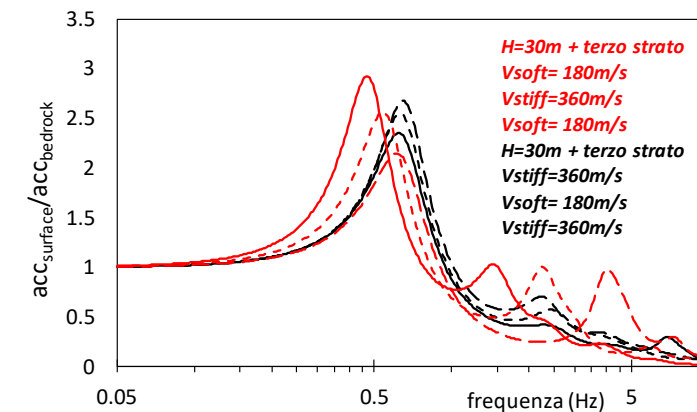
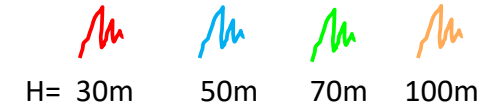


LEGENDA

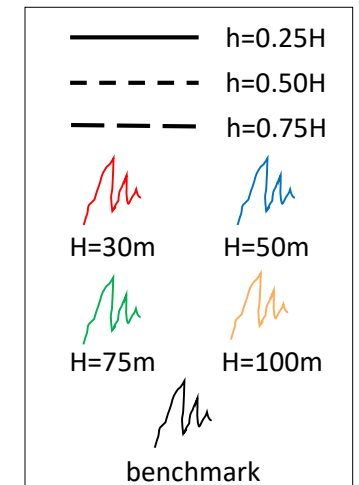


Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia

Strato rigido incluso tra due strati soft ($V_{soft1}=180\text{m/s}$, $V_{stiff2}=360\text{m/s}$, $V_{soft3}=180\text{m/s}$,)

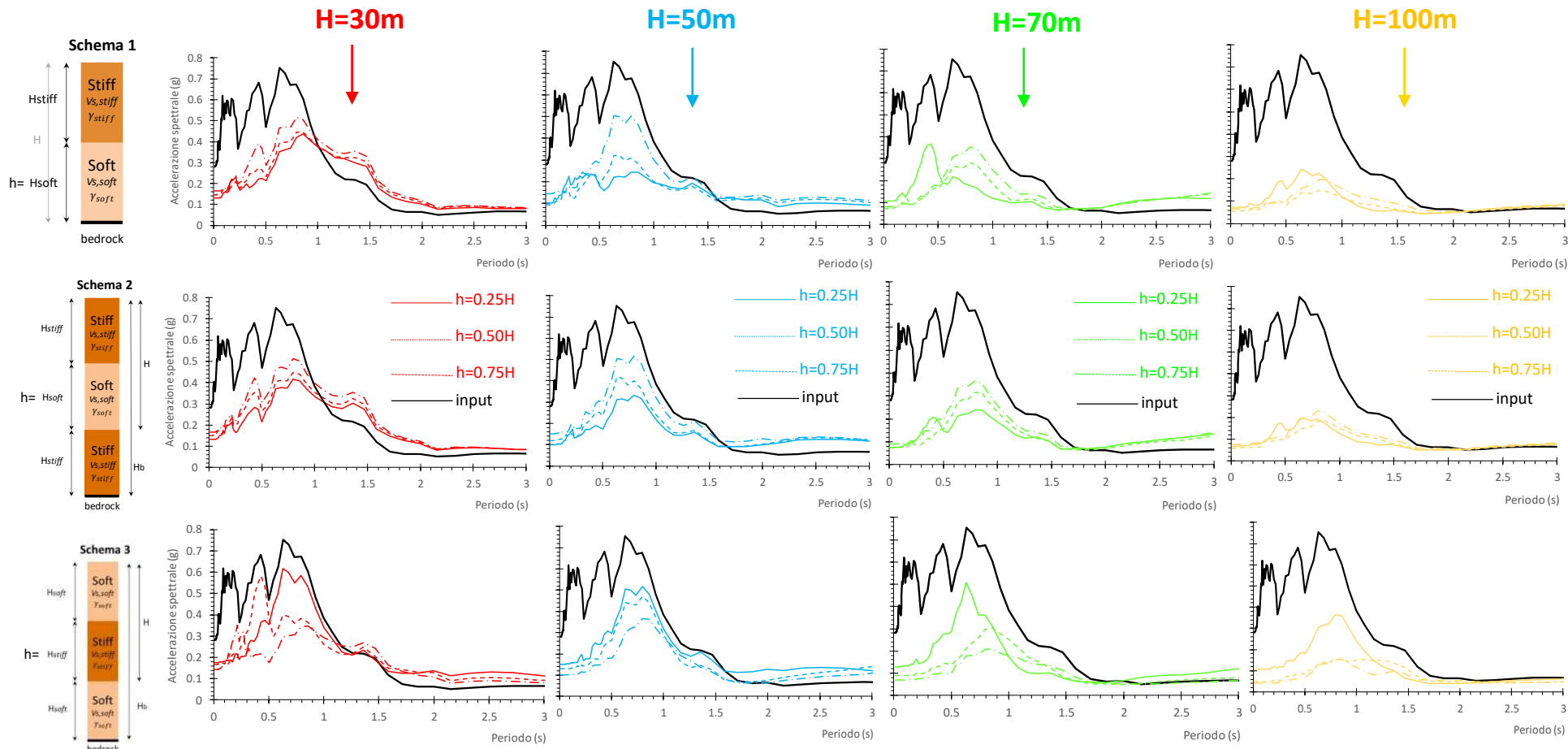


LEGENDA



Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia

Inversioni di velocità: fenomenologia → confronto tra schema 1, 2 e 3 in termini di spettri di risposta



$V_{s,\text{stiff}1-2}=360\text{m/s}$

$V_{s,\text{soft}1-2}=180\text{m/s}$

Inversioni del profilo di velocità: fenomenologia

Conclusioni preliminari

1. I fattori che controllano gli effetti locali di amplificazione/deamplificazione in presenza di un'inversione di velocità sono :
 - ☐ rapporto di spessore tra lo strato rigido e soffice;
 - ☐ velocità delle onde di taglio dello strato soffice;
2. Gli effetti della variazione dei fattori che controllano il fenomeno in presenza di inversione di velocità sono direttamente correlati a:
 - ☐ Variazione della frequenza principale del banco;
 - ☐ Amplificazione o deamplificazione massima attesa in funzione del periodo.

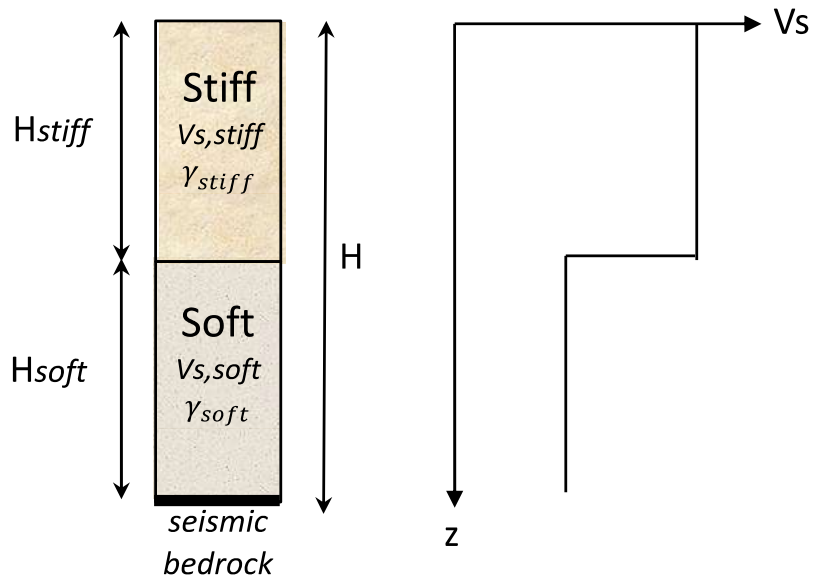
Effetto della presenza di inversioni SINGOLE nel profilo Vs tipiche di ORIZZONTI RIGIDI CLASTICI e VULCANICI

Fabozzi S., Catalano S., Falcone G., Pagliaroli A., Peronace E., Porchia A., Romagnoli G., Moscatelli M. (2020)
Stochastic approach to study the site response in presence of shear wave velocity inversion: application to seismic microzonation studies in Italy. Engineering Geology <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105914>.

Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: input

Studio parametrico di analisi di RSL 1D con approccio stocastico nei contesti geologici Italiani dove ricorrono situazioni simili:



1) ORIZZONTI RIGIDI CLASTICI

- terrazzi marini
- piane alluvionali e costiere
- bacini intermontani

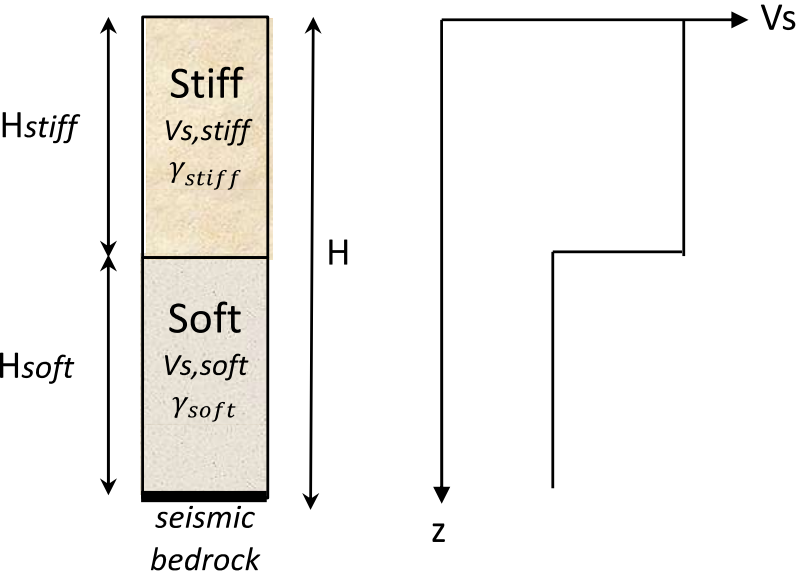
2) ORIZZONTI RIGIDI VULCANICI

- rupi
- espandimenti lavici

Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: input

Lo studio parametrico include anche la variabilità statistica dello spessore, della rigidezza e del decadimento dei singoli strati:

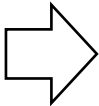


CONTESTO GEOLOGICO	PROPRIETA' DEGLI STRATI	STRATO RIGIDO	STRATO SOFFICE
<u>Orizzonti rigidi clastici</u>	$H_{min}-H_{max}$ (m)	5-20	10-30
	$V_{s_{min}}-V_{s_{max}}$ (m/s)	320-530	200-460
	γ_{soil} (kN/m ³)	21	19
	curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$	Rollins et al., 1998 upper-medium-lower bound	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30
<u>Orizzonti rigidi vulcanici</u>	$H_{min}-H_{max}$ (m)	15-50	10-30
	$V_{s_{min}}-V_{s_{max}}$ (m/s)	600-1000	200-460
	γ_{soil} (kN/m ³)	15	19
	curve $G/G_0-\gamma$ e $D-\gamma$	Pagliaroli et al., 2014 a,b (tufo)	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30

Inversioni singole del profilo di velocità

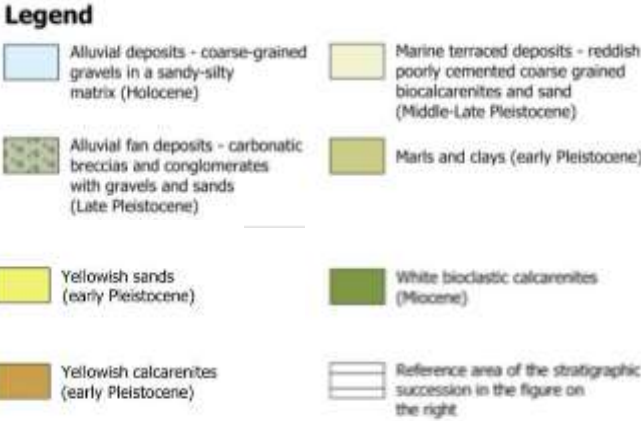
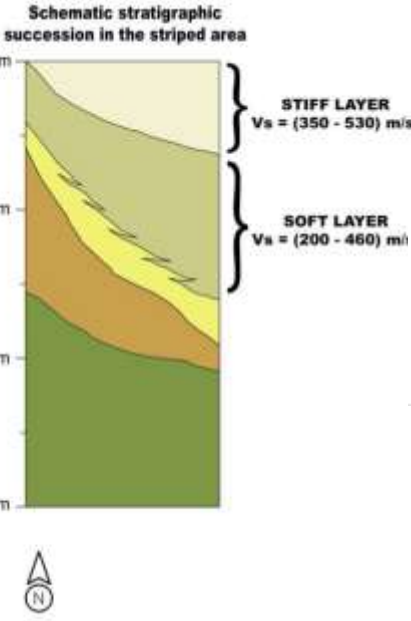
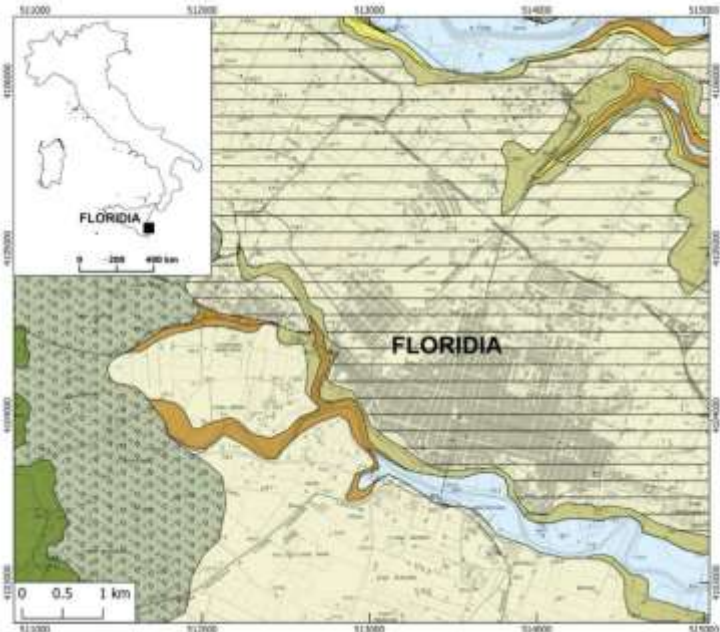
Analisi Monte Carlo: input

CONTESTO GEOLOGICO	PROPRIETA' DEGLI STRATI	STRATO RIGIDO	STRATO SOFFICE
<u>Orizzonti rigidi clastici</u>	$H_{min}-H_{max}$ (m)	5-20	10-30
	$V_{s_{min}}-V_{s_{max}}$ (m/s)	320-530	200-460
	ρ_{soil} (kN/m ³)	21	19
	G/G ₀ -g and D-g curves	Rollins et al., 1998 upper-medium-lower bound	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30
<u>Orizzonti rigidi vulcanici</u>	$H_{min}-H_{max}$ (m)	15-50	10-30
	$V_{s_{min}}-V_{s_{max}}$ (m/s)	600-1000	200-460
	ρ_{soil} (kN/m ³)	15	19
	G/G ₀ -g and D-g curves	Pagliaroli et al., 2014 a,b tuff decay curves	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30



È stato condotto uno screening geologico preliminare del territorio italiano al fine di identificare aree caratterizzate da inversioni di Vs. In corrispondenza di queste aree, le proprietà del sottosuolo rilevanti per le analisi di risposta sismica del sito sono state estratte dal database italiano degli studi di microzonazione sismica (DB-SMs in DPC, 2018), che è disponibile su www.webms.it ed è sviluppato e mantenuto da CNR IGAG

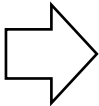
Esempio di orizzonte rigido clastico (terrazzo marino):



Inversioni singole del profilo di velocità

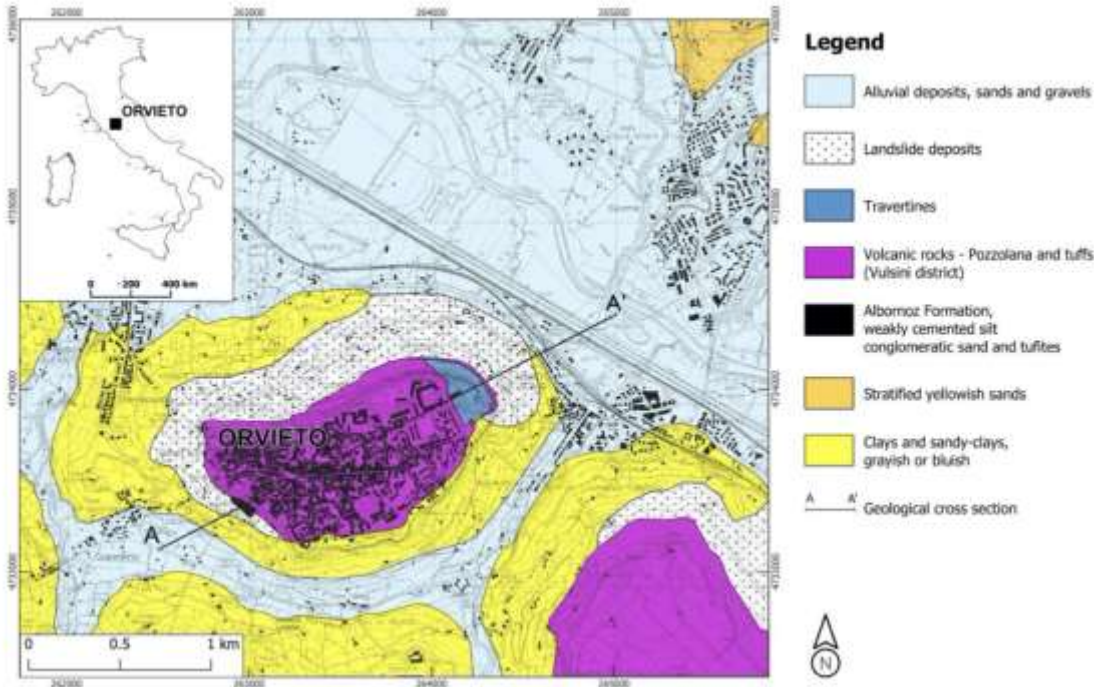
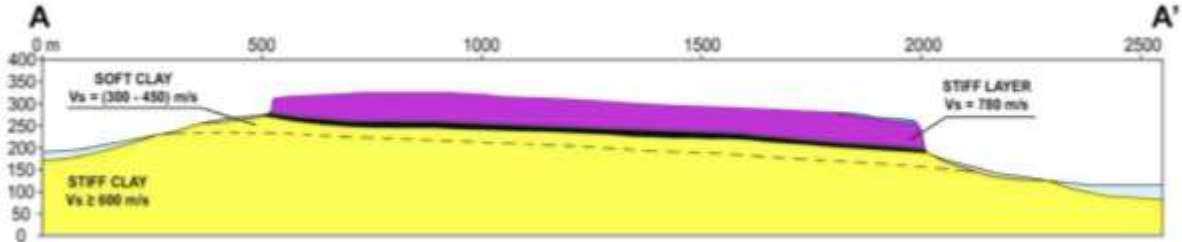
Analisi Monte Carlo: input

CONTESTO GEOLOGICO	PROPRIETA' DEGLI STRATI	STRATO RIGIDO	STRATO SOFFICE
<u>Orizzonti rigidi clastici</u>	$H_{min}-H_{max}$ (m)	5-20	10-30
	$V_{Smin}-V_{Smax}$ (m/s)	320-530	200-460
	ρ_{soil} (kN/m ³)	21	19
	G/G ₀ -g and D-g curves	Rollins et al., 1998 upper-medium-lower bound	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30
<u>Orizzonti rigidi vulcanici</u>	$H_{min}-H_{max}$ (m)	15-50	10-30
	$V_{Smin}-V_{Smax}$ (m/s)	600-1000	200-460
	ρ_{soil} (kN/m ³)	15	19
	G/G ₀ -g and D-g curves	Pagliaroli et al., 2014 a,b tuff decay curves	Vucetic & Dobry, 1991 PI 0-15-30



È stato condotto uno screening geologico preliminare del territorio italiano al fine di identificare aree caratterizzate da inversioni di Vs. In corrispondenza di queste aree, le proprietà del sottosuolo rilevanti per le analisi di risposta sismica del sito sono state estratte dal database italiano degli studi di microzonazione sismica (DB-SMs in DPC, 2018), che è disponibile su www.webms.it ed è sviluppato e mantenuto da CNR IGAG

Esempio di orizzonte rigido vulcanico (rupe vulcanica):



Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: input

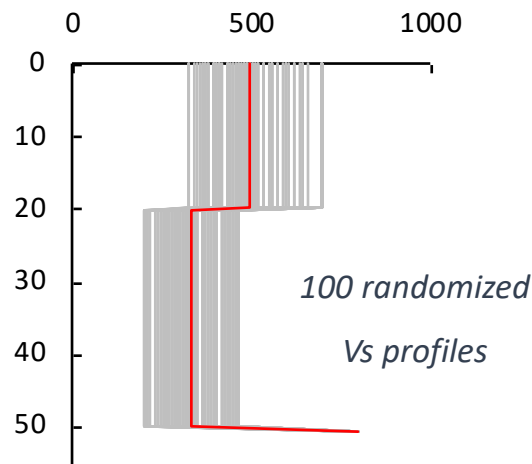
La caratterizzazione del sottosuolo proposta è stata adottata per eseguire una serie di analisi stocastiche di risposta del sito con approccio lineare equivalente eseguite con il codice STRATA (Kottke et al., 2013) tramite simulazioni Monte Carlo includendo le seguenti incertezze:

- ☐ Variabilità intrinseca del modello delle velocità
- ☐ Variabilità intrinseca delle proprietà non lineari del terreno
- ☐ Variabilità dell'intensità dell'azione sismica

Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: input

→ Modello statistico di Toro 1995



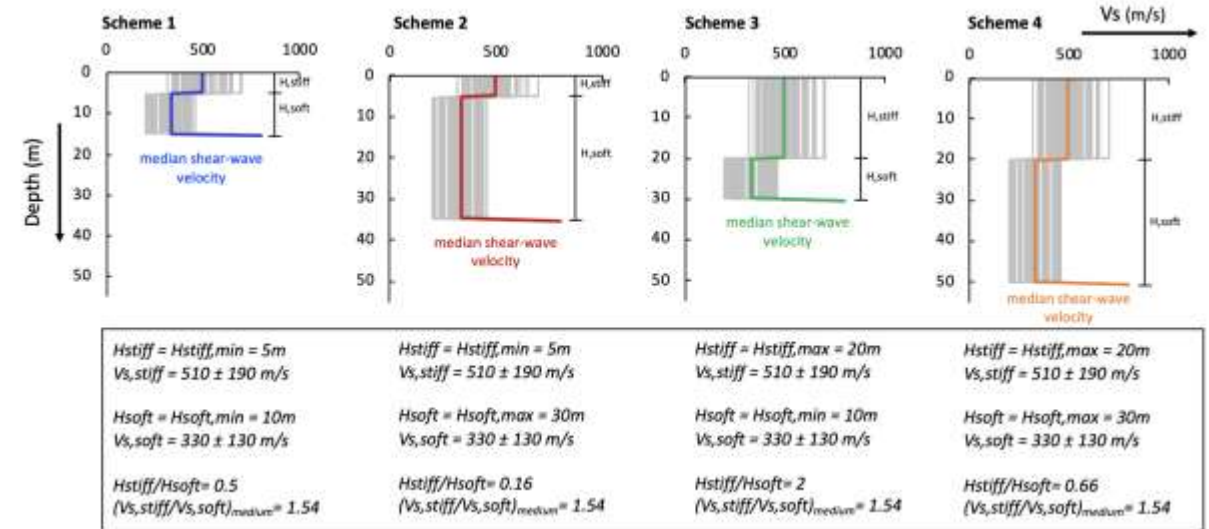
Shear wave velocity of i^{th} layer:

$$V_i = \exp\{\sigma_{\ln V_s} Z_i + \ln[V_{median}(d_i)]\}$$

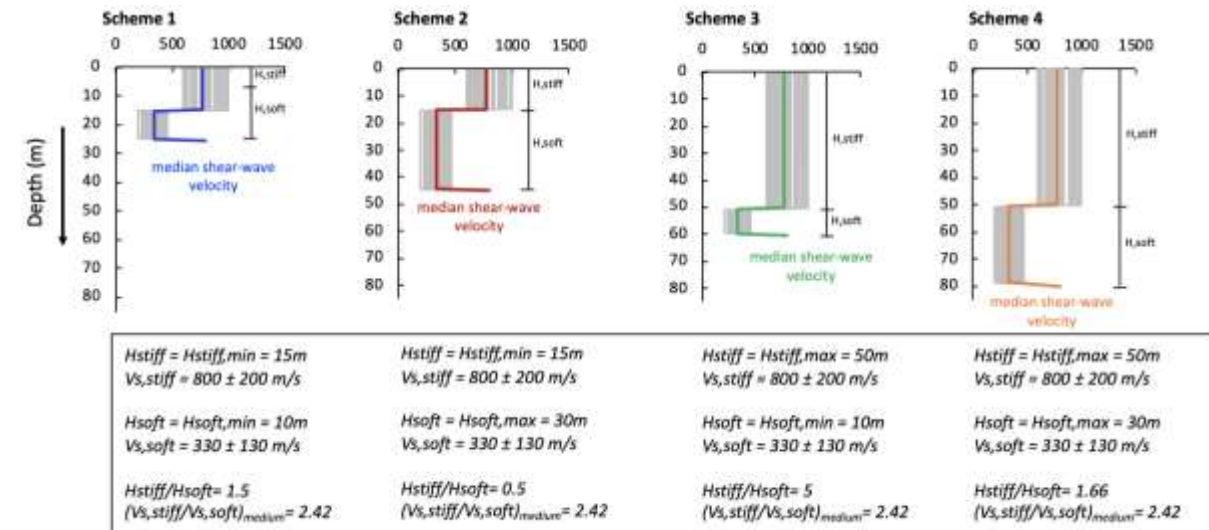
Standard normal variable :

$$Z_i = \frac{\ln V_i - \ln[V_{median}(d_i)]}{\sigma_{\ln V_s}}$$

Orizzonti rigidi elastici



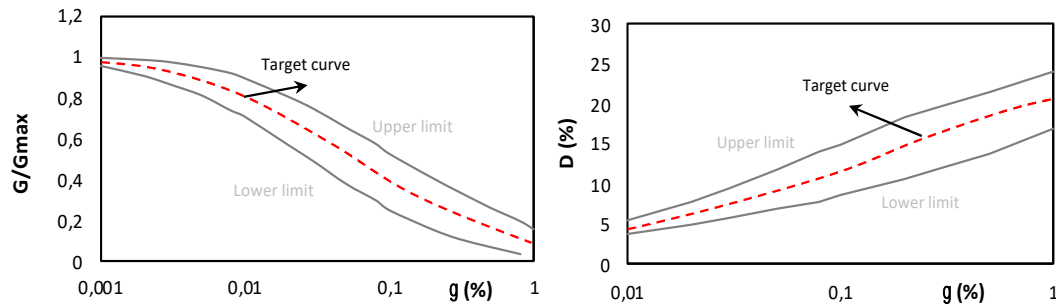
Orizzonti rigidi vulcanici



Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: input

→ Modello statistico di Darendeli 2001



$$G/G_{max}(\gamma) = \boxed{[G/G_{max}(\gamma)]_{mean}} + \varepsilon_1 \sigma_{NG}$$

Target curve

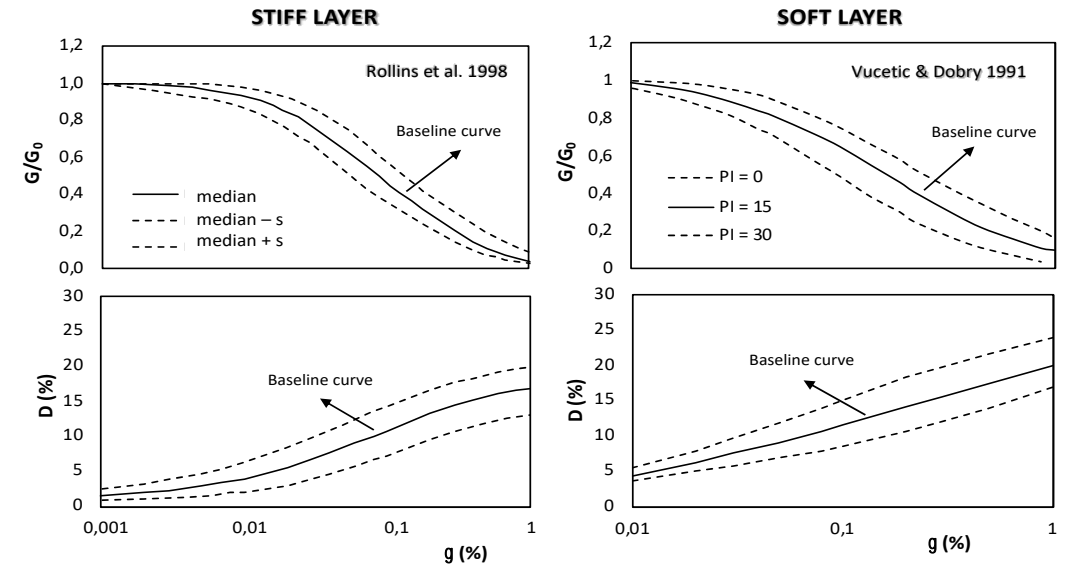
$$D(\gamma) = \boxed{[D(\gamma)]_{mean}} + \rho \sigma_D \varepsilon_1 + \sigma_D \sqrt{1 - \rho^2} \varepsilon_2$$

Target curve

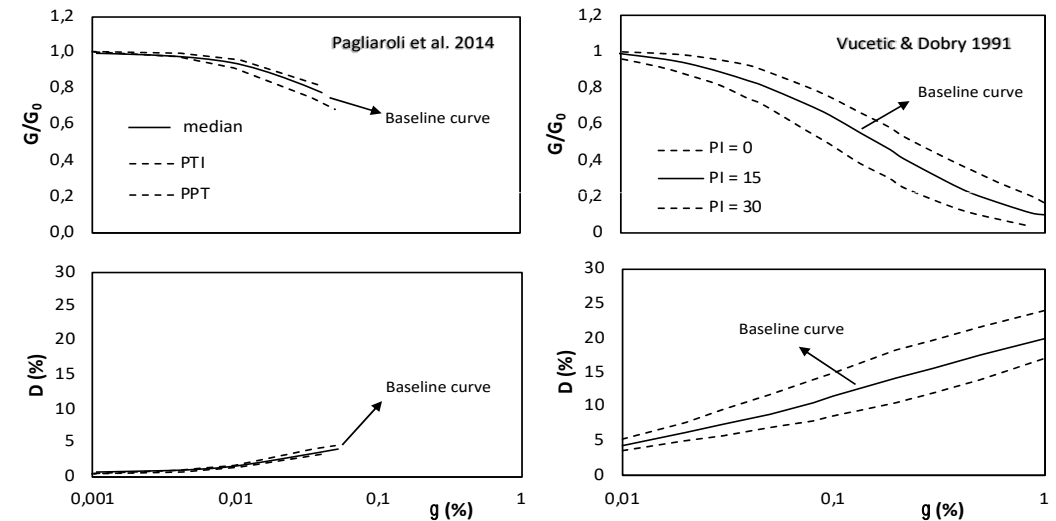
$$\sigma_{NG} = 0.015 + 0.16 \sqrt{0.25 - (G/G_{max} - 0.5)^2}$$

$$\sigma_D = 0.0067 + 0.78 \sqrt{D(\%)}$$

Orizzonti rigidi elastici



Orizzonti rigidi vulcanici



Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: input

→ Modello deterministico per l'input

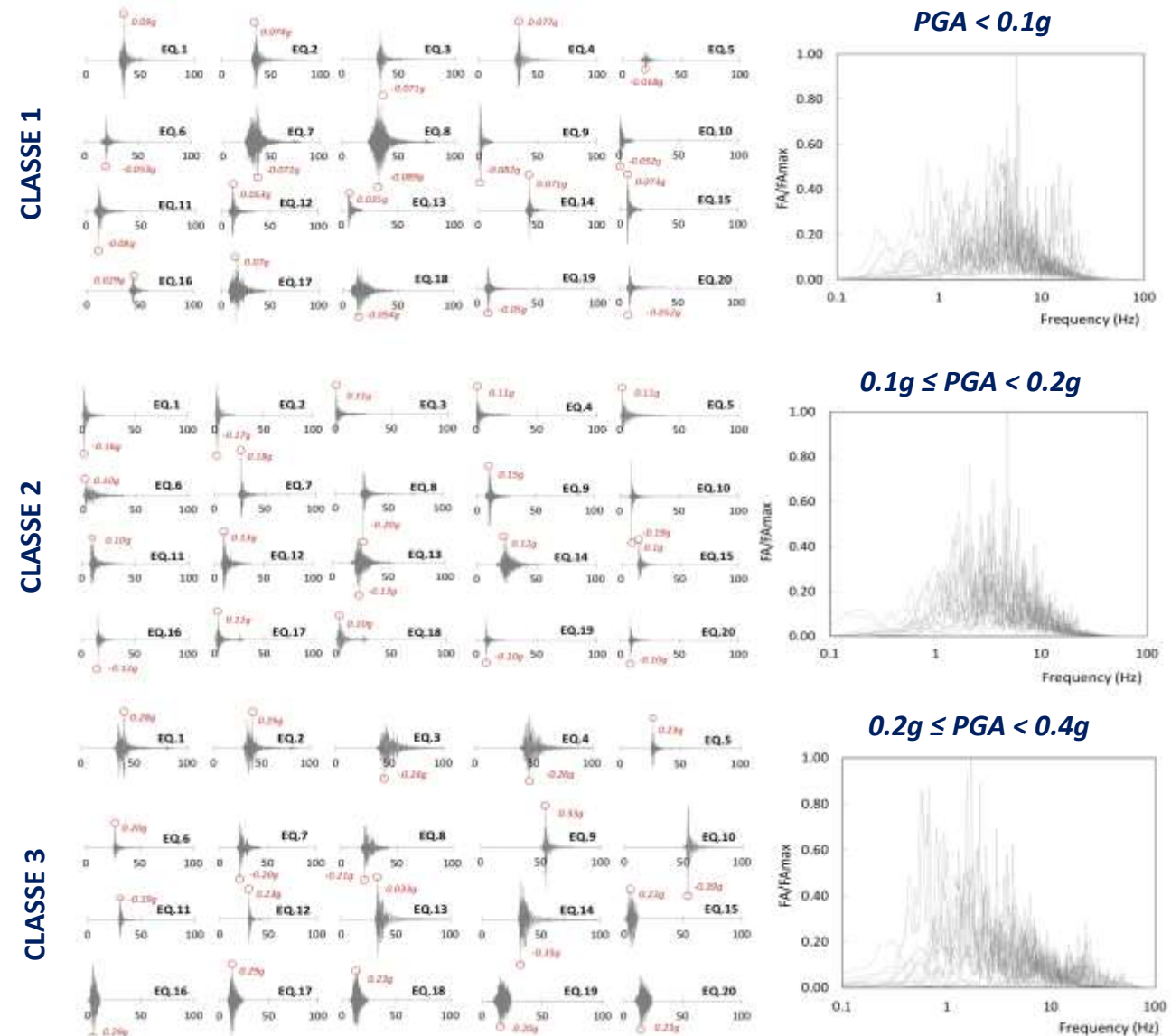
Tre gruppi di 20 segnali accelerometri reali non scalati, registrati su sottosuolo di tipo A, sono stati selezionati e raggruppati in tre diverse classi di PGA:

□ Classe 1 (PGA<0.1g)

□ Classe 2 (0.1g≤PGA<0.2g)

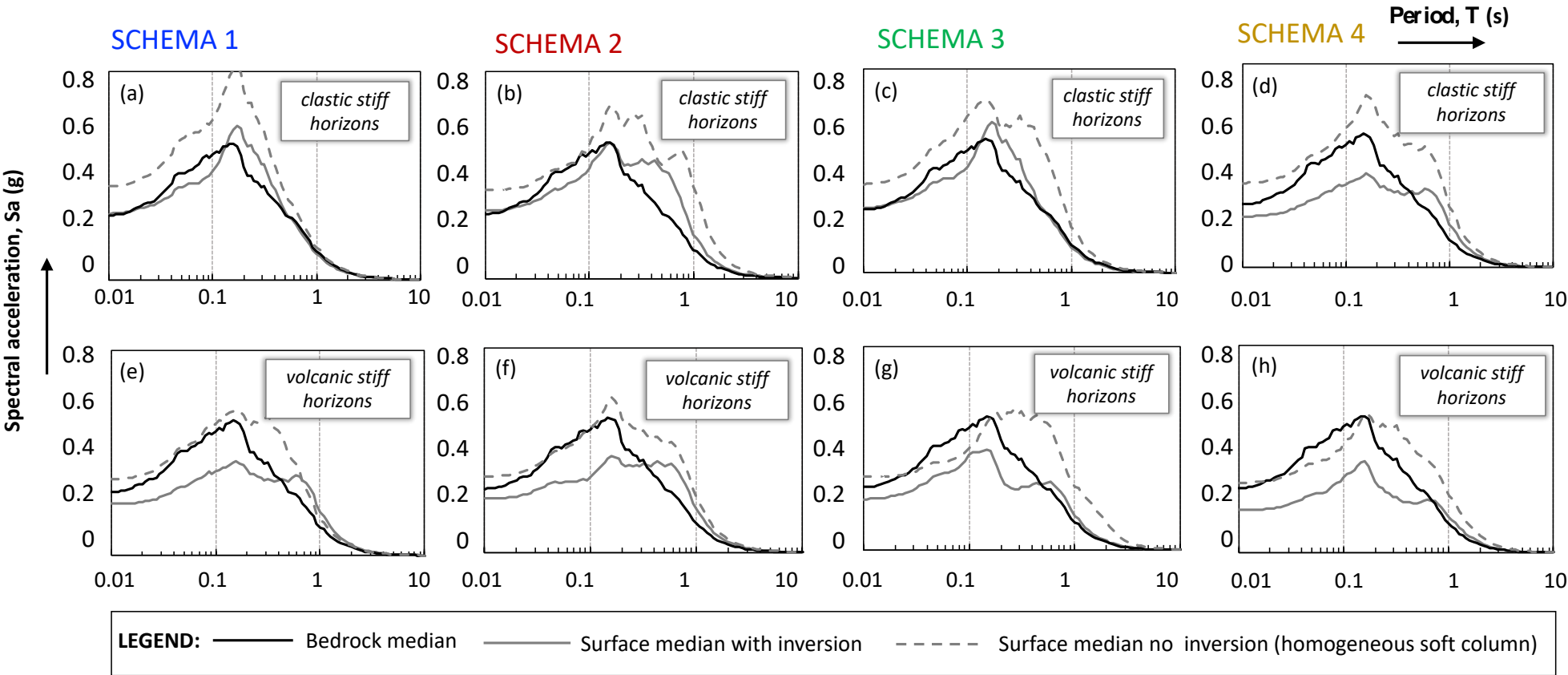
□ Classe 3 (0.2g≤PGA<0.4g)

<http://itaca.mi.ingv.it/>
<https://ngawest2.berkeley.edu/>



Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: output classe 3 di PGA



ORIZZONTI RIGIDI CLASTICI

Hstiff = 5 m - Hsoft = 10m
Hstiff = 5 m - Hsoft = 30m
Hstiff = 20 m - Hsoft = 10m
Hstiff = 20 m - Hsoft = 30m

Vs,stiff = 510±190 m/s
Vs,soft = 330±130 m/s

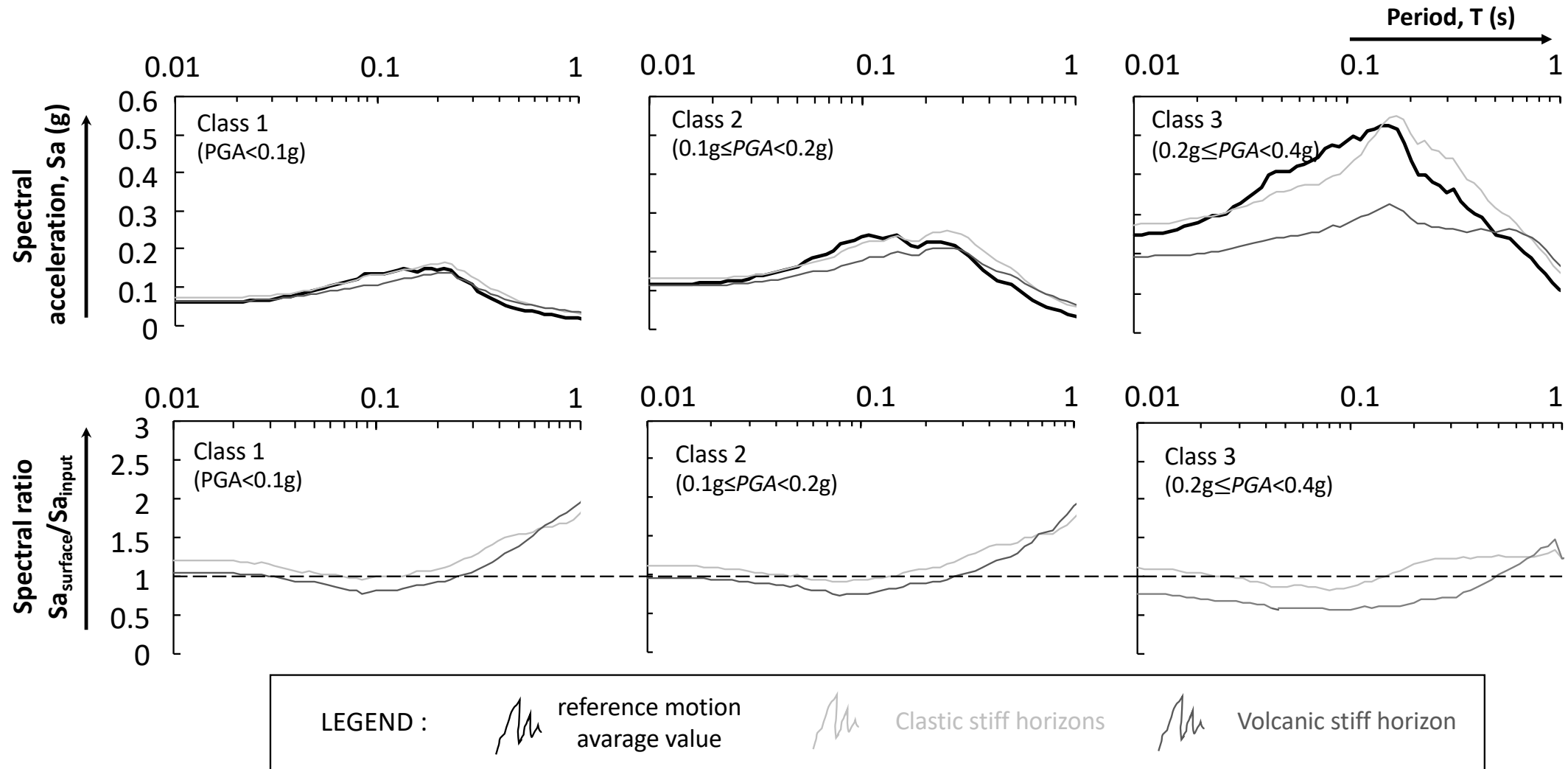
ORIZZONTI RIGIDI CLASTICI

Hstiff = 15 m - Hsoft = 10m
Hstiff = 15 m - Hsoft = 30m
Hstiff = 50 m - Hsoft = 10m
Hstiff = 50 m - Hsoft = 30m

Vs,stiff = 800±200 m/s
Vs,soft = 330±130 m/s

Inversioni singole del profilo di velocità

Analisi Monte Carlo: output classe 1, 2 e 3 di PGA

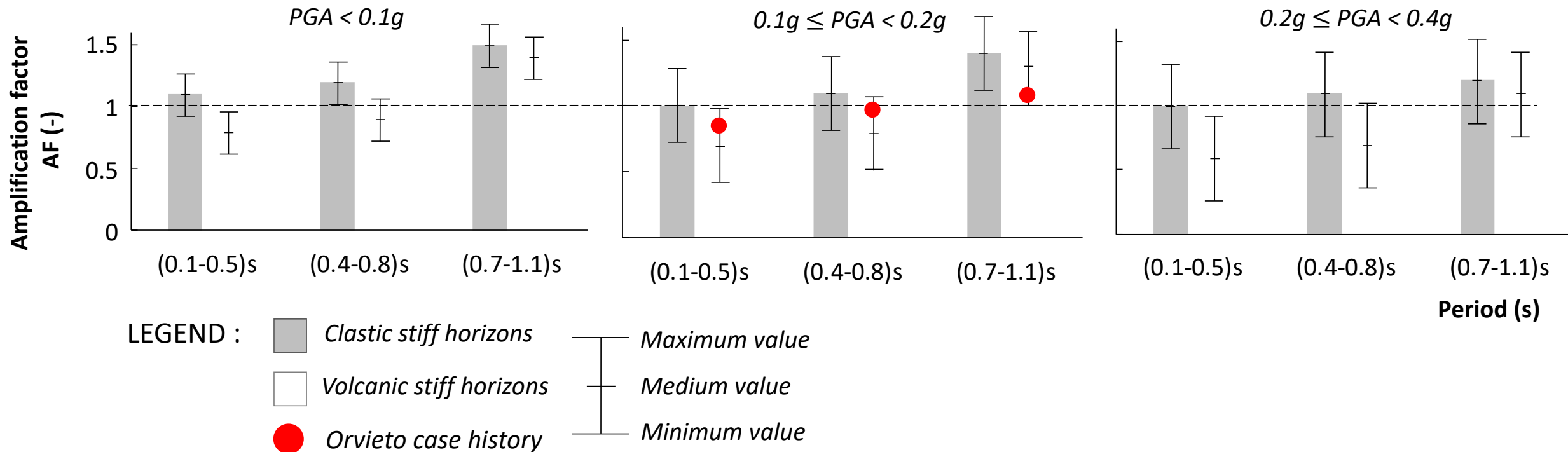


Inversioni singole del profilo di velocità

Fattori di amplificazione per MS : validazione caso Orvieto



$$AF_{0.1-0.5} = \frac{\int_{0.1}^{0.5} Sa_o dT}{\int_{0.1}^{0.5} Sa_i dT} ; AF_{0.4-0.8} = \frac{\int_{0.4}^{0.8} Sa_o dT}{\int_{0.4}^{0.8} Sa_i dT} ; AF_{0.7-1.1} = \frac{\int_{0.7}^{1.1} Sa_o dT}{\int_{0.7}^{1.1} Sa_i dT}$$



Inversioni singole del profilo di velocità

Conclusioni

In generale, lo strato rigido esercita un'azione di confinamento sullo strato soffice che raggiunge un livello deformazione più elevato; lo strato soffice rappresenta quindi l'elemento di controllo della colonna 1D in queste complesse condizioni geologiche attraverso la variazione di $V_{s_{\text{soft}}}$ e H_{soft}

Inversioni singole del profilo di velocità

Conclusioni

In generale, lo strato rigido esercita un'azione di confinamento sullo strato soffice che raggiunge un livello deformazione più elevato; lo strato soffice rappresenta quindi l'elemento di controllo della colonna 1D in queste complesse condizioni geologiche attraverso la variazione di $V_{s,soft}$ e H_{soft}

- ❑ c'è un **effetto di attenuazione** del moto sismico a periodi bassi e un effetto di amplificazione a periodi più alti;
- ❑ questo effetto di attenuazione del moto in superficie tende ad essere maggiormente enfatizzato quando $H_{soft} > H_{stiff}$ e con l'aumentare di H_{soft} ;
- ❑ questa tendenza evidenzia l'influenza del contrasto di rigidezza dovuto all'inversione del profilo V_s ($V_{s,stiff}/V_{s,soft}$) sul comportamento sismico 1D della colonna;
- ❑ nel **caso di orizzonti rigidi vulcanici, l'effetto dell'inversione del profilo V_s è più evidente** rispetto rispettivamente al caso di orizzonti rigidi clastici, per il fatto che valori più alti del contrasto di impedenza e di H_{soft} sono attesi nel caso di orizzonti rigidi vulcanici;
- ❑ c'è anche un **effetto di non linearità** dovuto all'intensità del segnale in ingresso che controlla il livello di deformazione raggiunto nello strato più soffice.

Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare



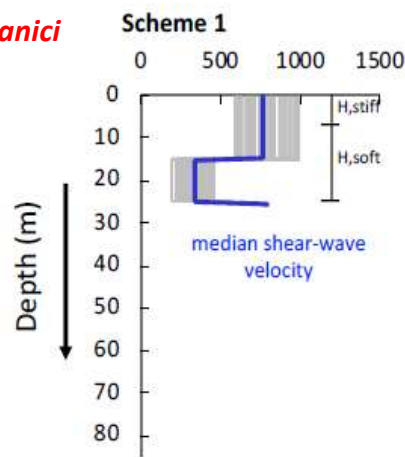
Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare

Cosa accade se ho indagato la mia colonna fino ad una profondità che intercetta solo il primo strato rigido?



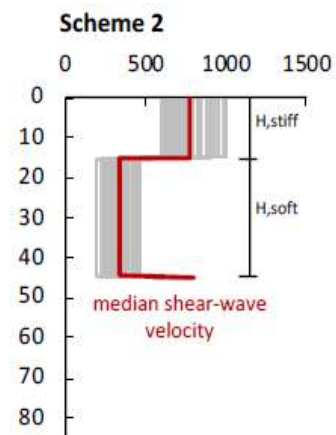
Orizzonti rigidi vulcanici



$H_{stiff} = H_{stiff,min} = 15m$
 $V_{s,stiff} = 800 \pm 200 \text{ m/s}$

$H_{soft} = H_{soft,min} = 10m$
 $V_{s,soft} = 330 \pm 130 \text{ m/s}$

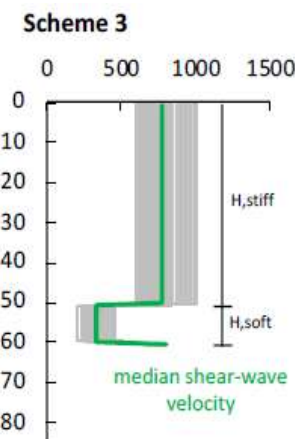
$H_{stiff}/H_{soft} = 1.5$
 $(V_{s,stiff}/V_{s,soft})_{medium} = 2.42$



$H_{stiff} = H_{stiff,min} = 15m$
 $V_{s,stiff} = 800 \pm 200 \text{ m/s}$

$H_{soft} = H_{soft,max} = 30m$
 $V_{s,soft} = 330 \pm 130 \text{ m/s}$

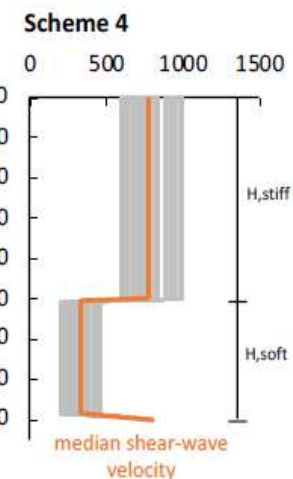
$H_{stiff}/H_{soft} = 0.5$
 $(V_{s,stiff}/V_{s,soft})_{medium} = 2.42$



$H_{stiff} = H_{stiff,max} = 50m$
 $V_{s,stiff} = 800 \pm 200 \text{ m/s}$

$H_{soft} = H_{soft,min} = 10m$
 $V_{s,soft} = 330 \pm 130 \text{ m/s}$

$H_{stiff}/H_{soft} = 5$
 $(V_{s,stiff}/V_{s,soft})_{medium} = 2.42$



$H_{stiff} = H_{stiff,max} = 50m$
 $V_{s,stiff} = 800 \pm 200 \text{ m/s}$

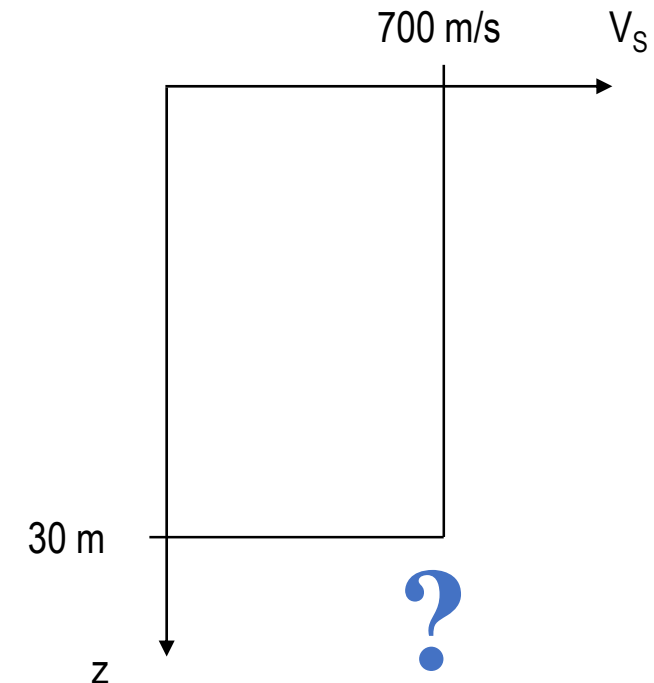
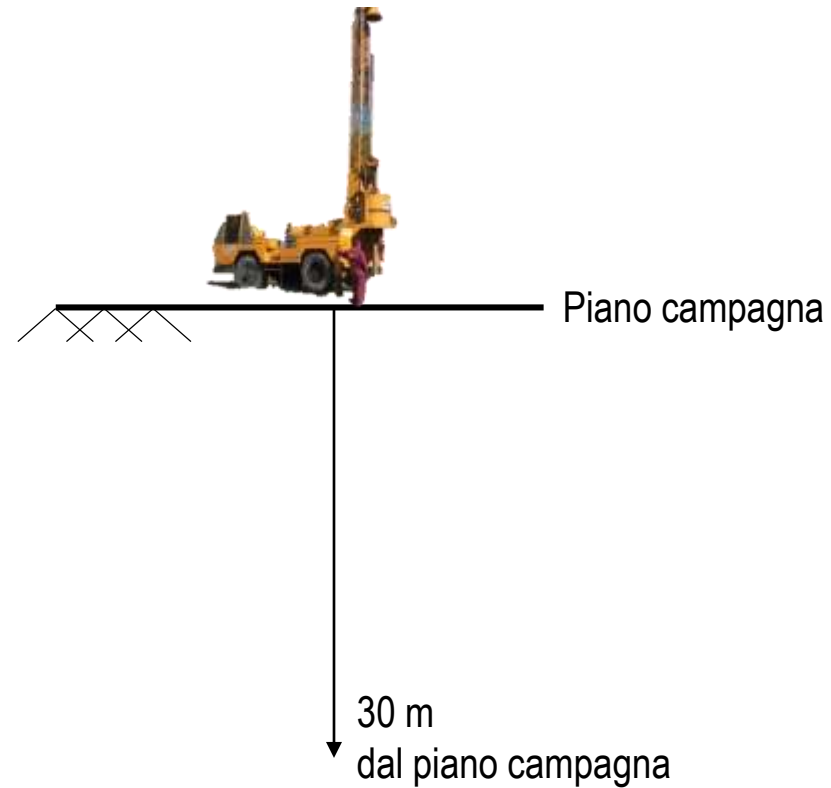
$H_{soft} = H_{soft,max} = 30m$
 $V_{s,soft} = 330 \pm 130 \text{ m/s}$

$H_{stiff}/H_{soft} = 1.66$
 $(V_{s,stiff}/V_{s,soft})_{medium} = 2.42$

Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

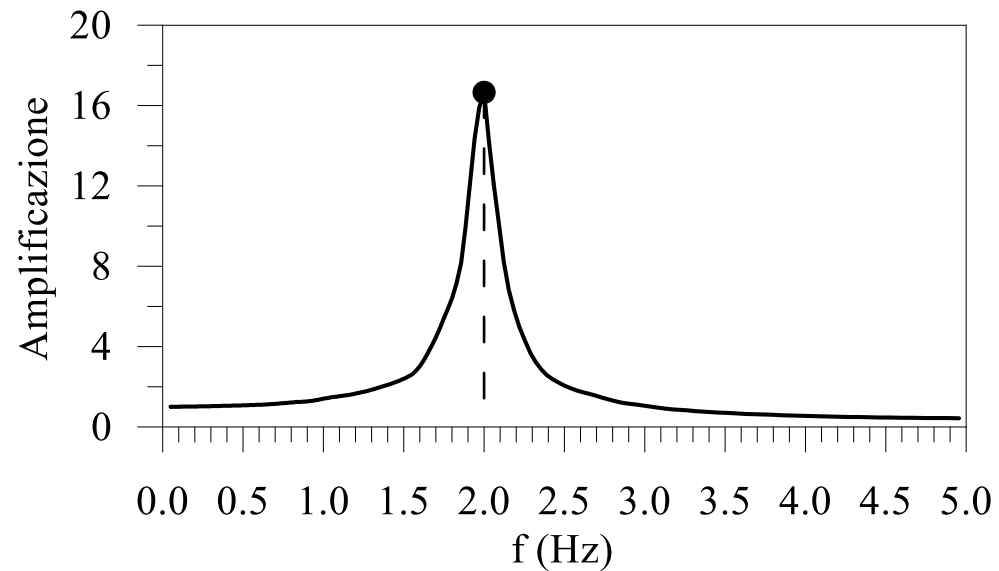
Con riferimento allo schema 1C, si considera dapprima il caso in cui si esegue una prova *Down-hole* sino a 30 m di profondità, intercettando solamente lo strato rigido.



Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

Individuazione bedrock sismico

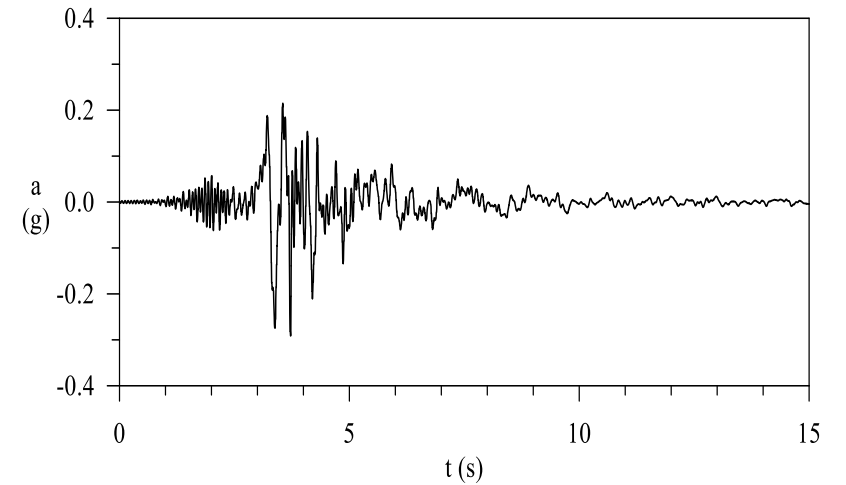
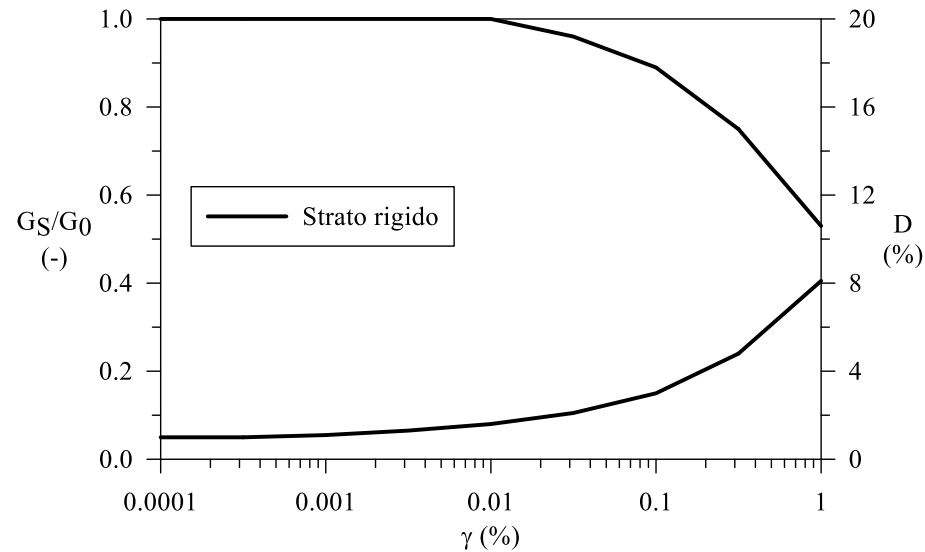
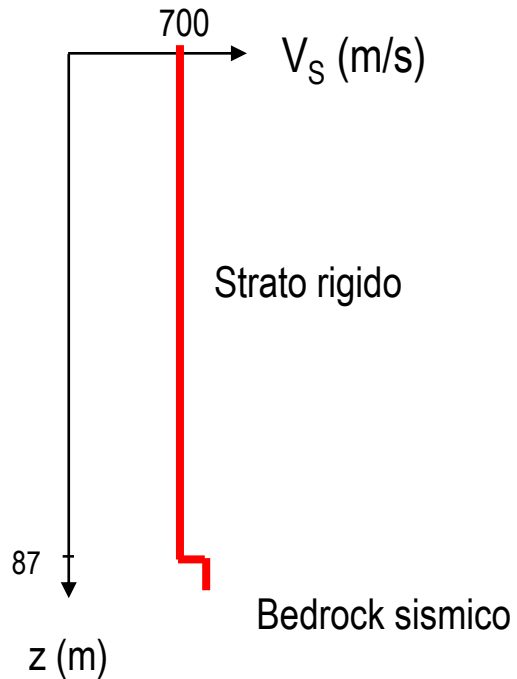


$$\left\{ \begin{array}{l} f_0 \text{ da misura HVSR} = 2.0 \text{ Hz} \\ H_{800} = \frac{V_s}{4 \cdot f_0} \end{array} \right. \longrightarrow H_{800} = \frac{700 \text{ m/s}}{4 \cdot 2.0 \text{ Hz}} = 87 \text{ m}$$

Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

Modello numerico senza inversione



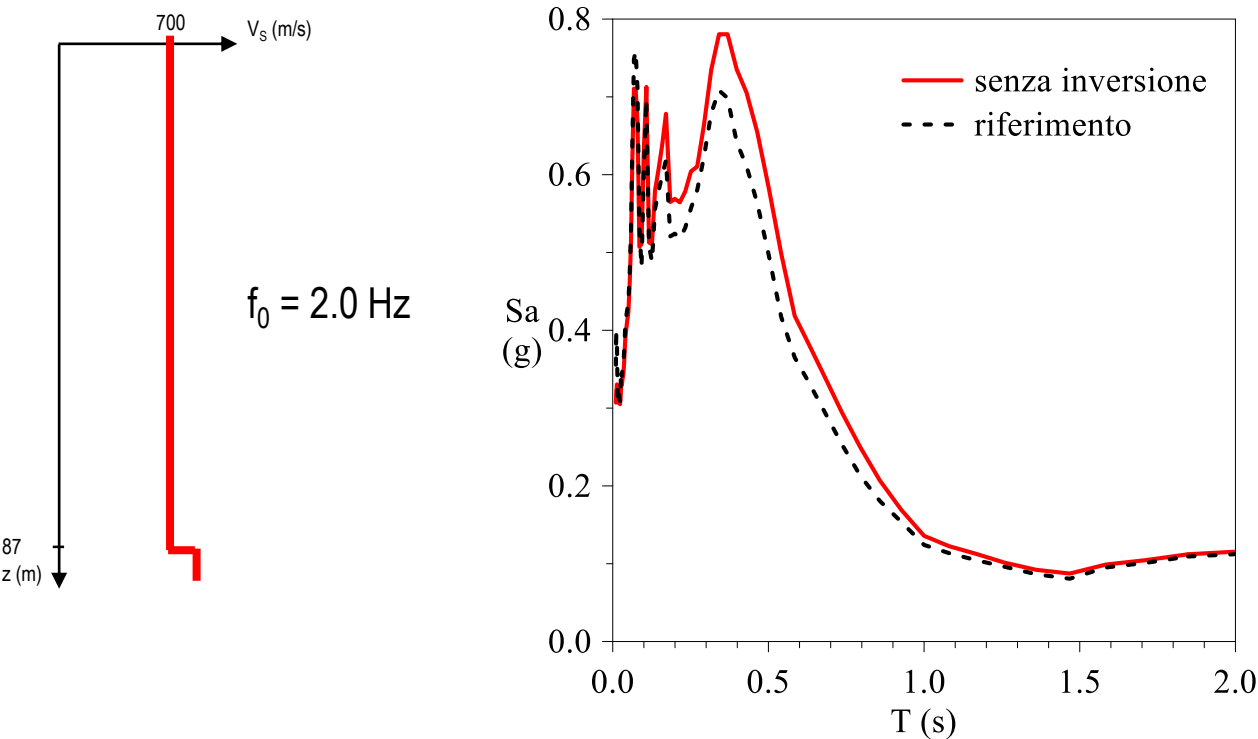
Segnale di riferimento:

evento SICILY_ITALY del 26/12/2018; Stazione Santa Venerina (Santa Venerina, Catania)

Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

Spettri di risposta al piano campagna (*free-field*) e AF da modelli numerici
Senza considerare l' inversione nel profilo delle Vs

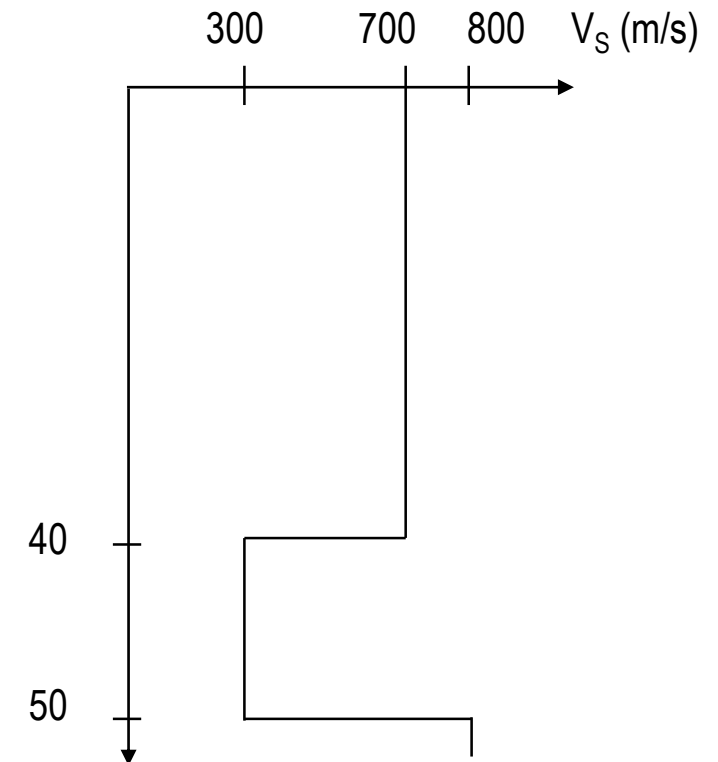
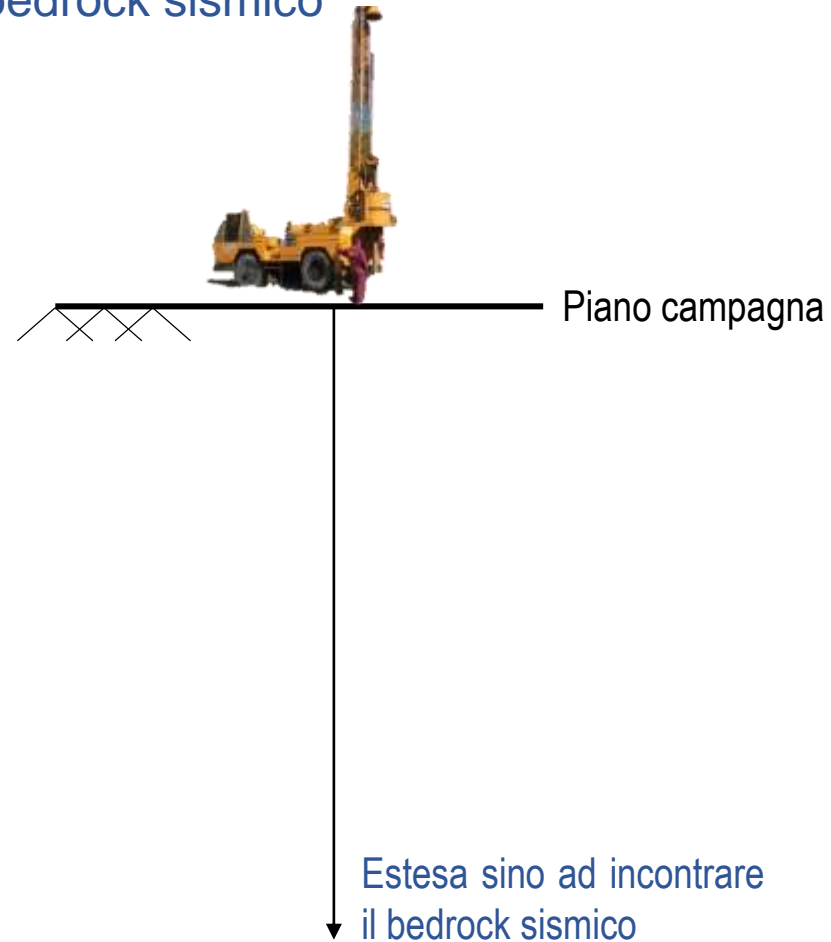


	AF1	AF2	AF3
Senza inversione	1.09	1.16	1.14
Con inversione	?	?	?

Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

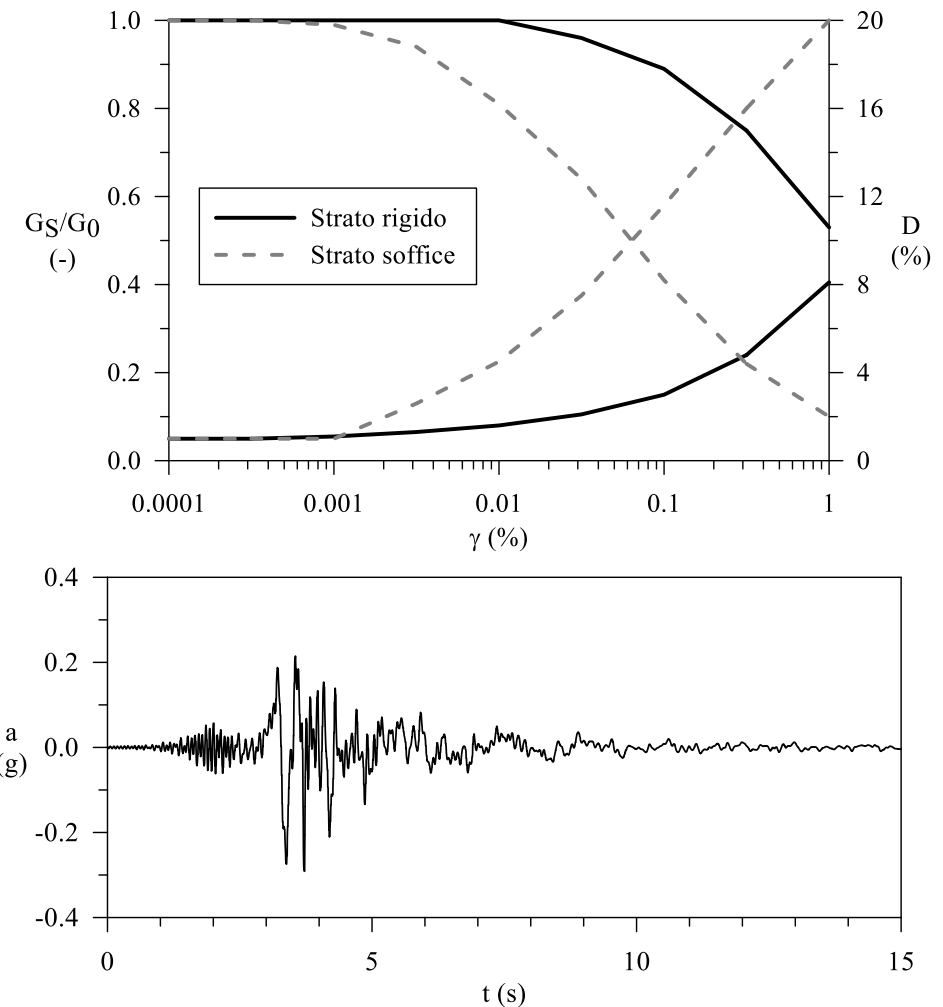
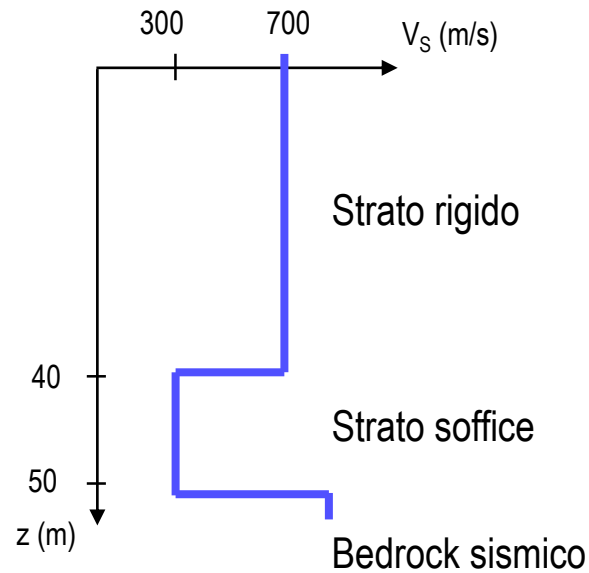
Prova *Down-hole* sino al bedrock sismico



Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

Modello numerico con inversione

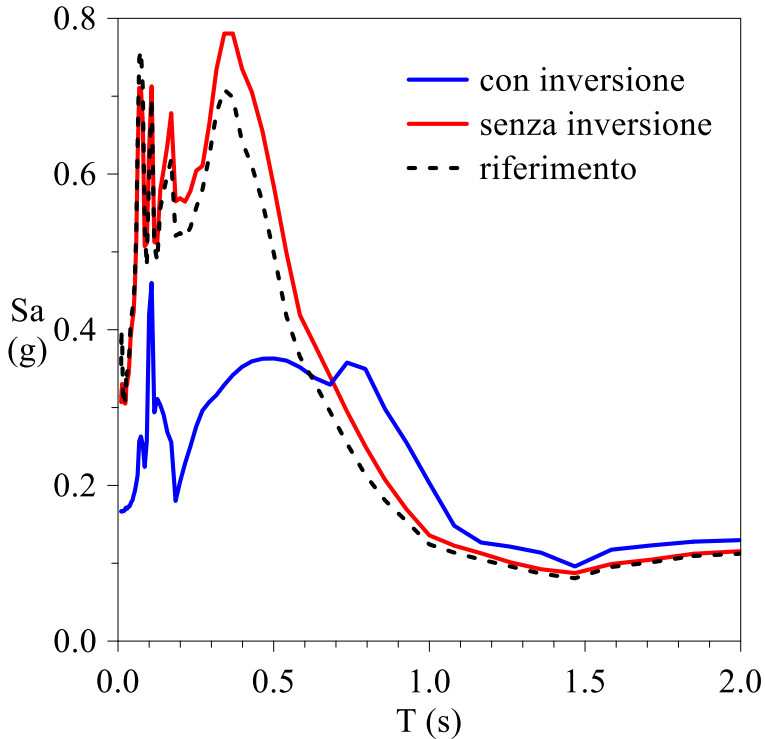
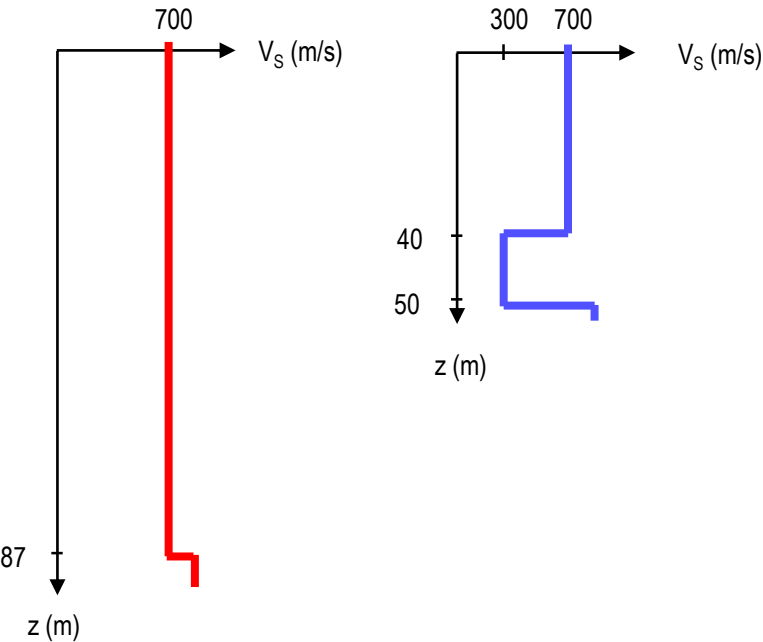


*Segnale di riferimento: evento SICILY_ITALY del 26/12/2018;
Stazione Santa Venerina (Santa Venerina, Catania)*

Inversioni singole del profilo di velocità

Condizione particolare: caso studio

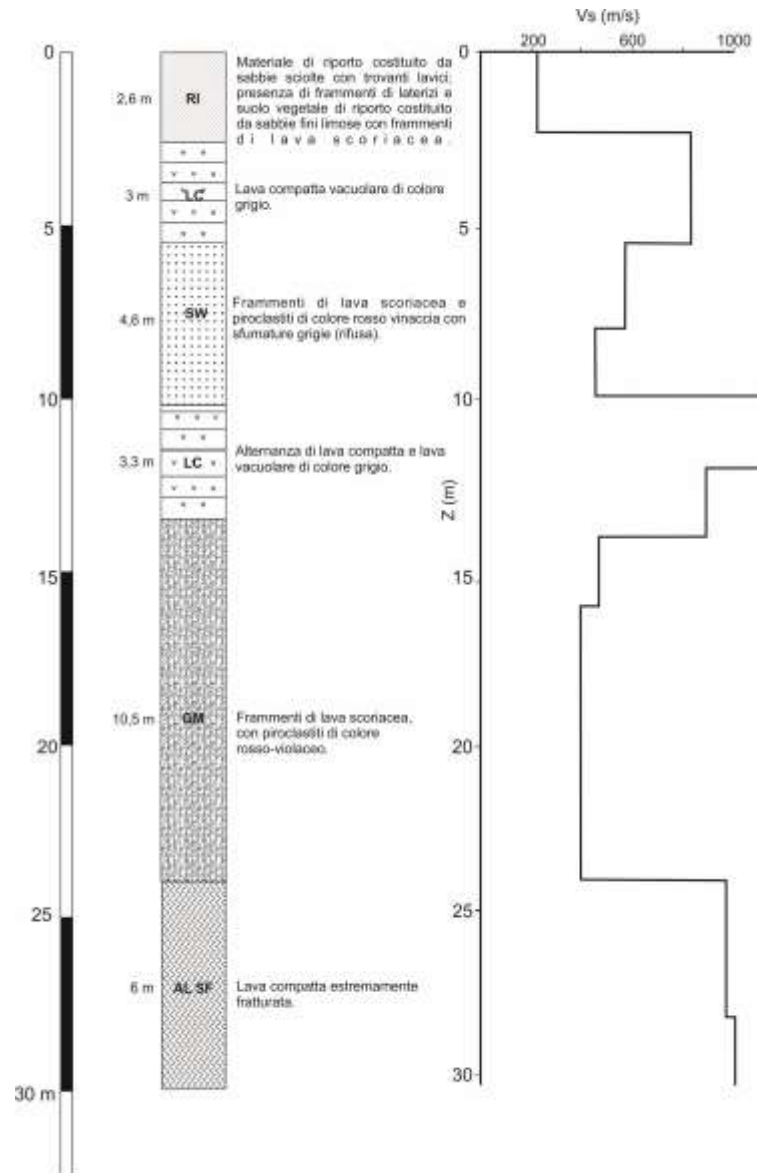
La conoscenza parziale delle reali condizioni di sito (modello numerico senza inversione) determina, in termini di spettro di risposta, la sovrastima dello scuotimento in superficie per $T < 0.6$ s e la sottostima per periodi maggiori di 0.6 s.



	AF1	AF2	AF3
Senza inversione	1.09	1.16	1.14
Con inversione	0.51	0.90	1.52

**Effetto della presenza di inversioni MULTIPLE nel profilo Vs
tipiche di AMBIENTI VULCANICI**

Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

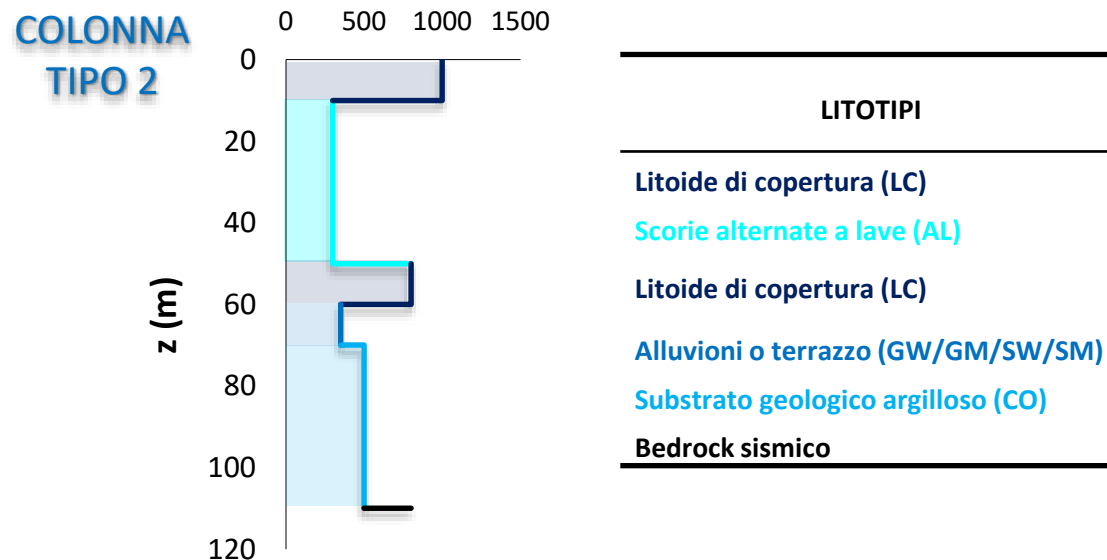
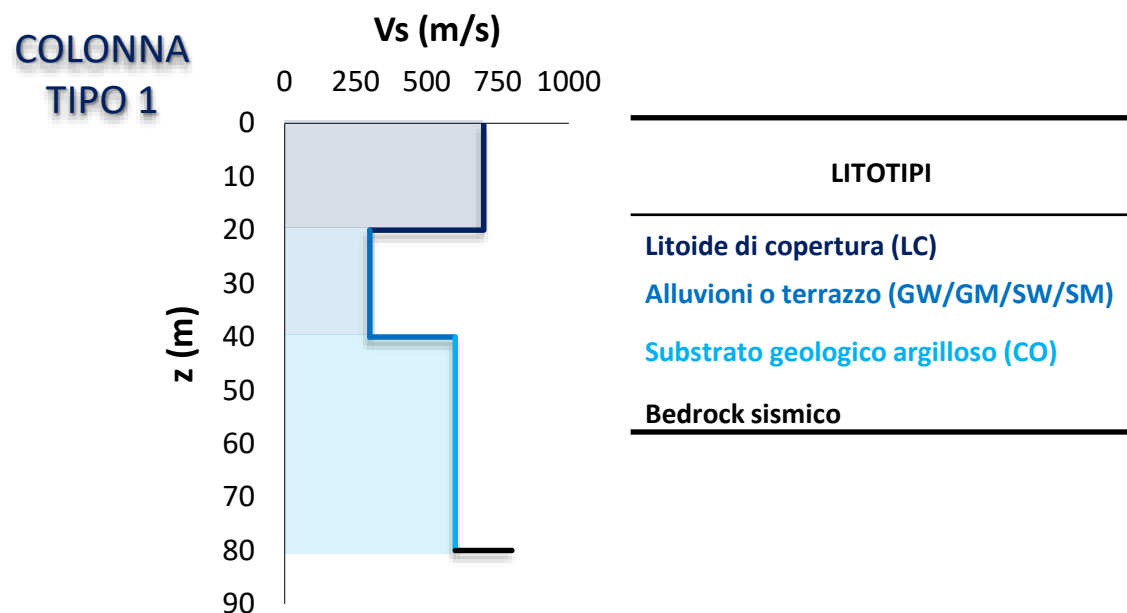


Esempio di sequenza stratigrafica (Catania)

I risultati degli studi di MS1 effettuati nelle aree vulcaniche etnee hanno evidenziato alcune problematiche strettamente connesse alle peculiarità dei prodotti vulcanici, caratterizzati da successioni con repentine variazioni verticali delle litofacies. In tali aree esistono improvvise discontinuità dei livelli stratigrafici che ne influenzano anche le loro caratteristiche litologiche e meccaniche.

In tali contesti si ha spesso la sovrapposizione di colate laviche su orizzonti sabbioso-ghiaiosi che possono rappresentare depositi marini terrazzati (es. Aci Castello), depositi alluvionali di piana costiera sepolti (es. Catania), o depositi marini e/o alluvionali di riempimento di paleovalli dove si ha la sovrapposizione di più colate di riempimento di paleovalli.

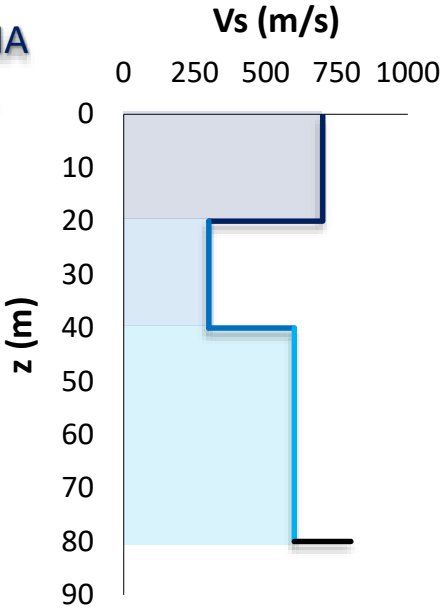
Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI



Sulla base dei dati a disposizione da studi di MS1, sono state schematizzate e modellate colonne monodimensionali tipo, considerate condizioni geologiche comuni in ambiente peri-vulcanico. Nel dettaglio le due colonne stratigrafiche COLONNA TIPO 1 e COLONNA TIPO 2) di riferimento per tali condizioni, sono state ricostruite considerando le sigle delle unità geologico-tecniche utilizzate negli studi di MS.

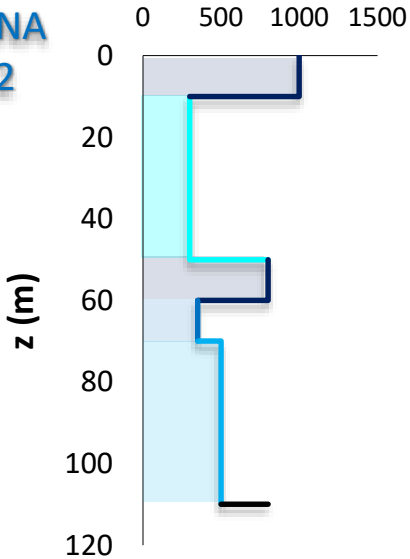
Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA
TIPO 1



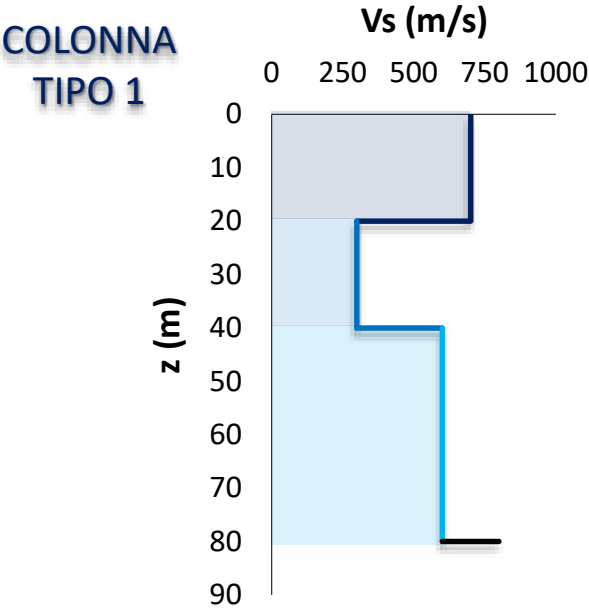
LITOTIPI	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

COLONNA
TIPO 2



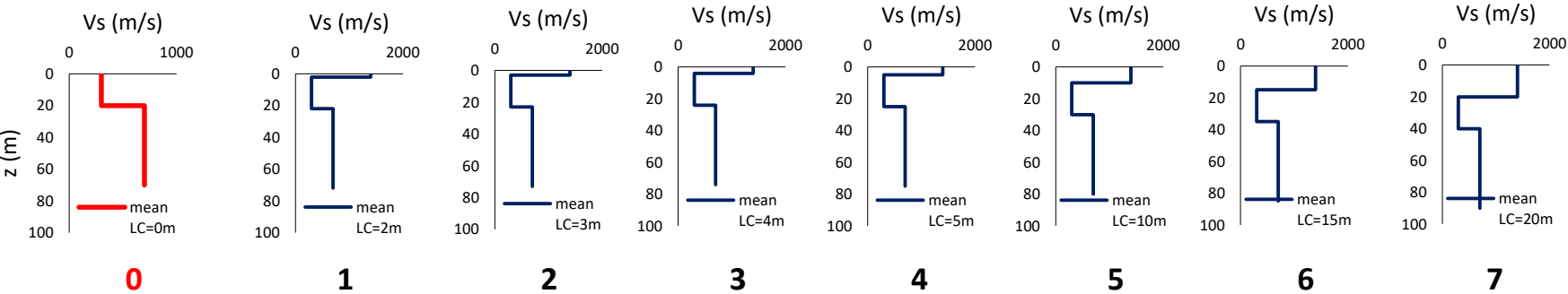
LITOTIPI	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Scorie alternate a lave (AL)	17	300-650	2-50	-	Rollins et al., 1998
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-10	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI



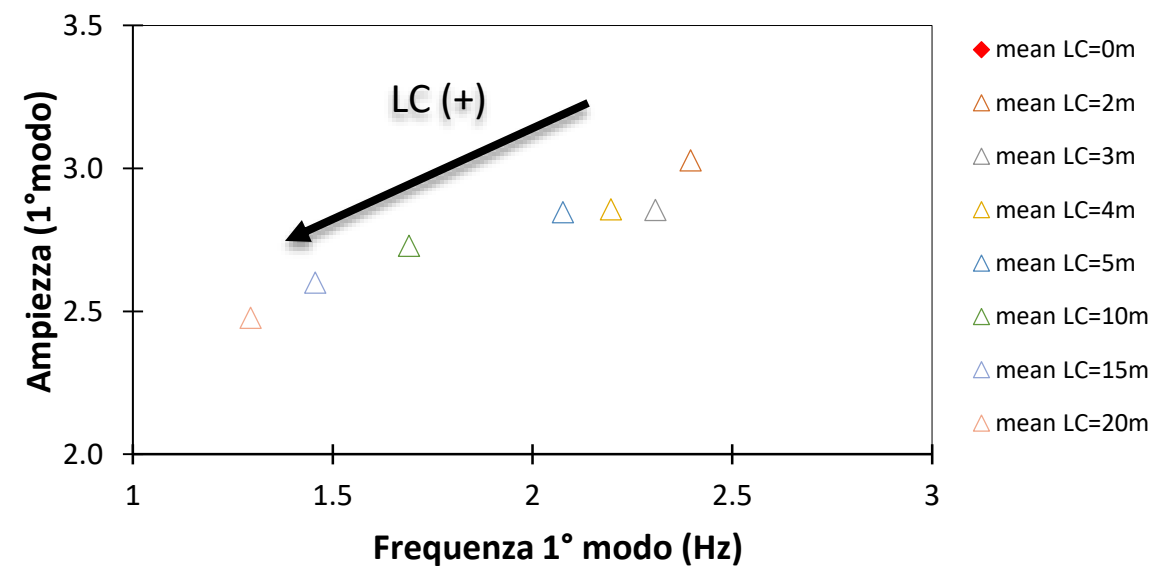
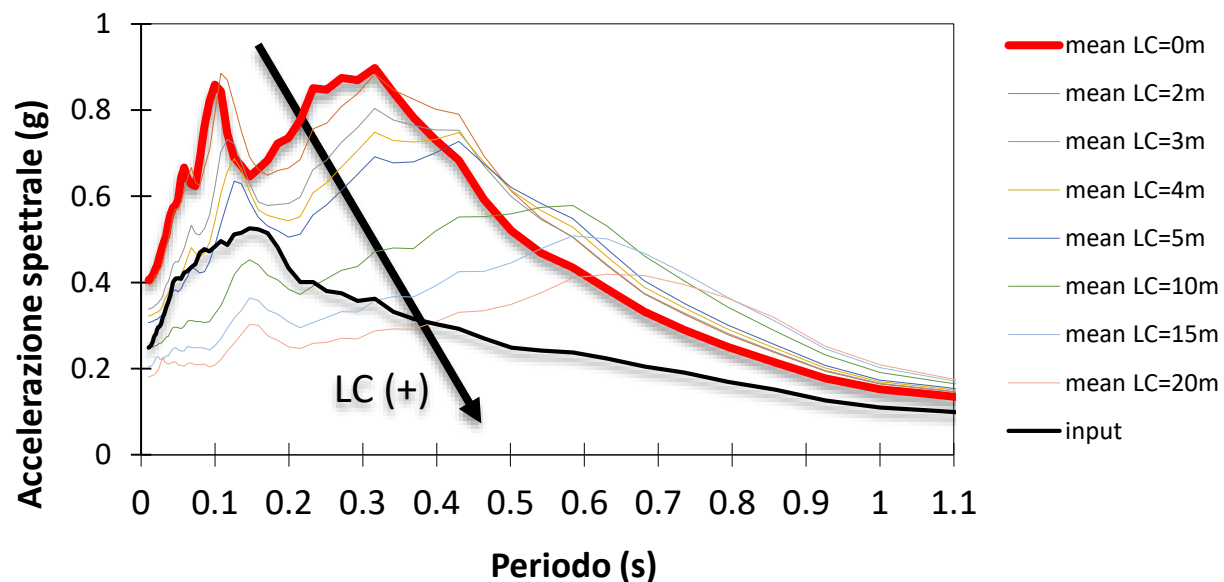
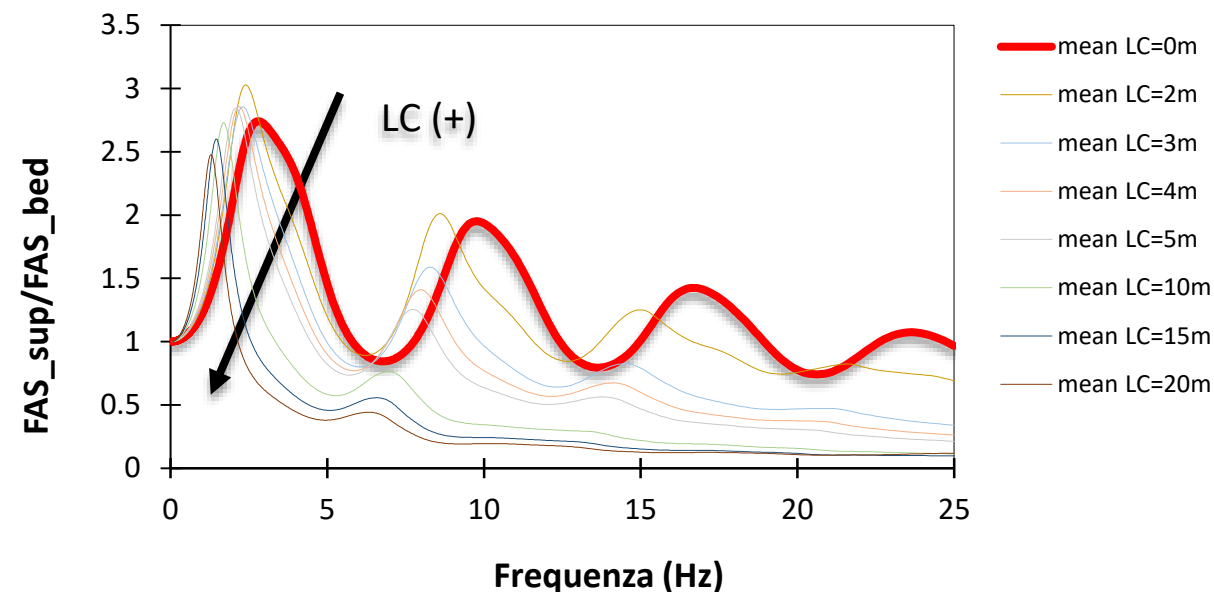
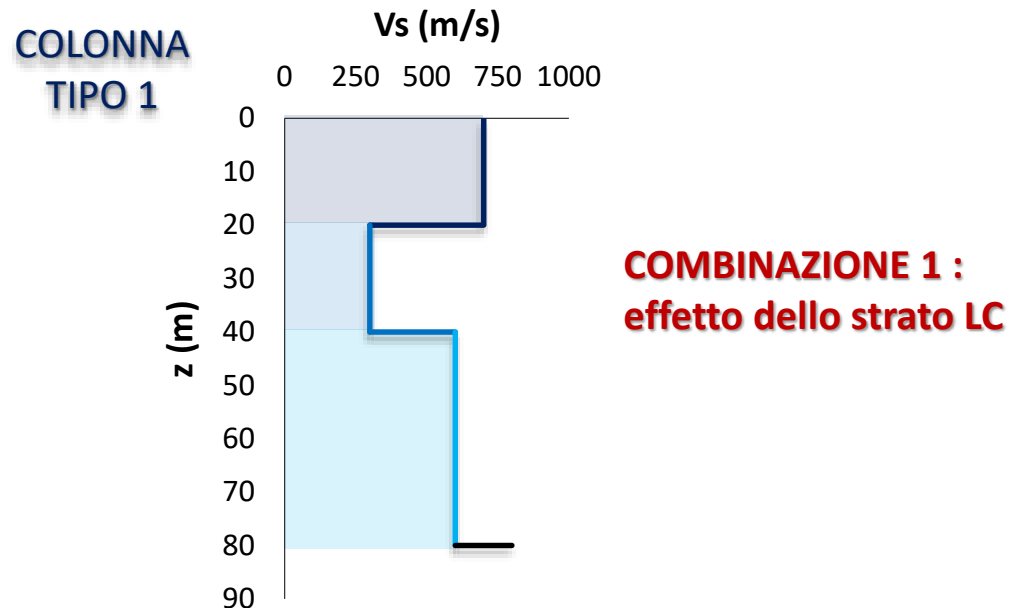
COMBINAZIONE 1 : effetto dello strato LC

LITOTIPI	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	0-2-3-4-5-10-15-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-



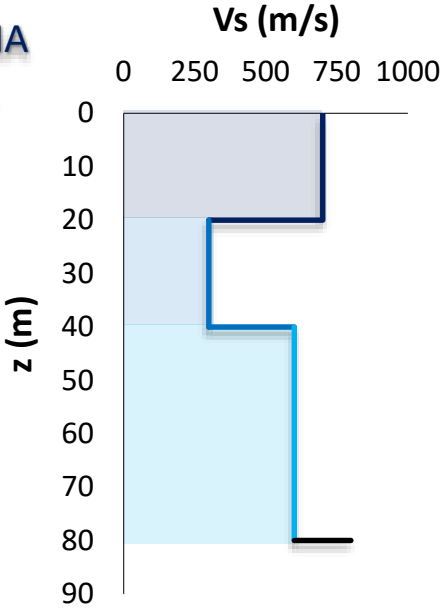
- ❑ Vengono effettuate analisi di RSL 1D dei sette schemi (da 1 a 7) della combinazione 1 colonna tipo 1 che tengono conto della variazione di spessore dello strato LC e confrontati con lo schema 0 in cui non viene modellato lo strato LC;
- ❑ Le analisi sono state effettuate con il codice di calcolo STRATA, con approccio deterministico e considerando la variabilità dell'intensità del segnale utilizzando un set di 20 segnali reali con PGA crescente tra (0.1-0.2)g.

Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI



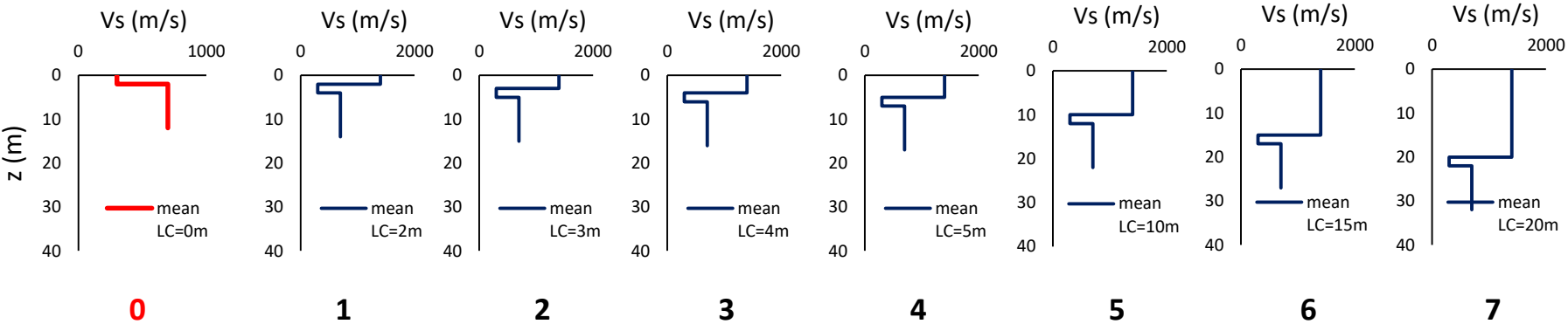
Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA
TIPO 1

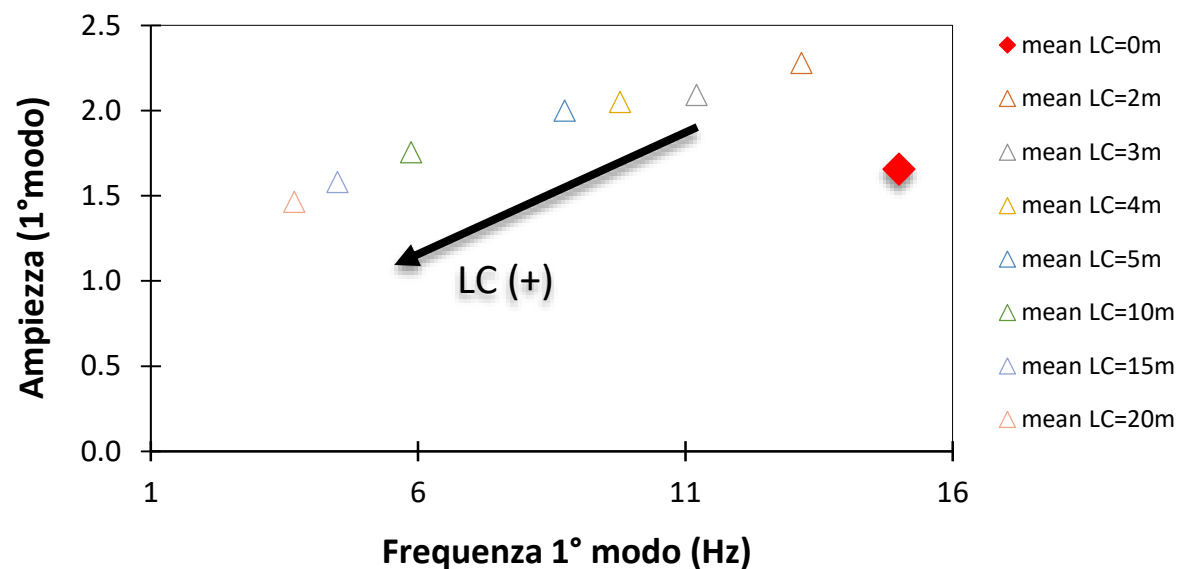
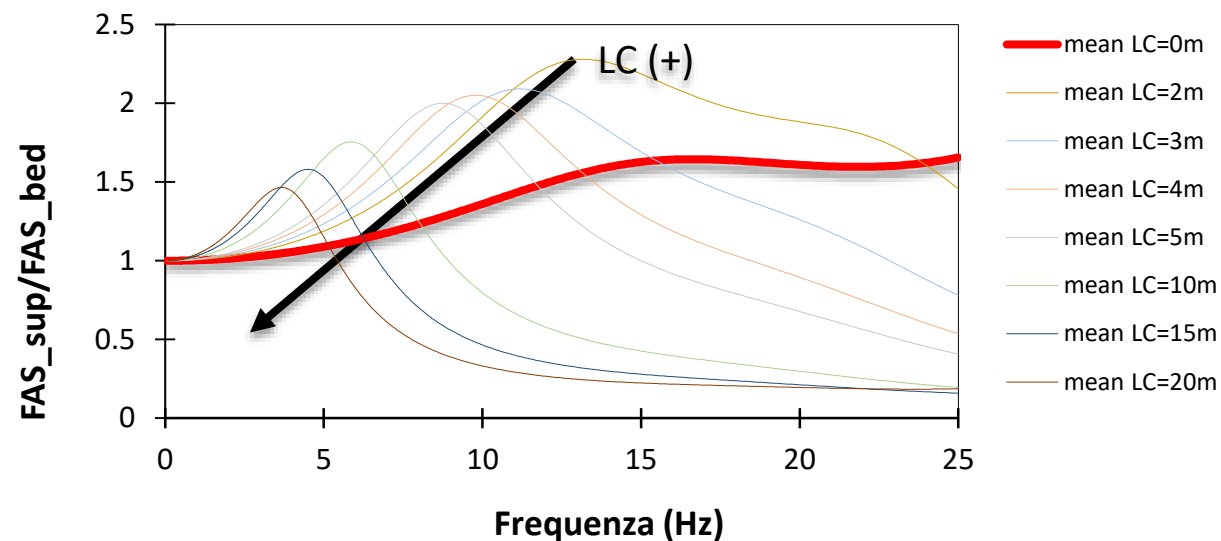
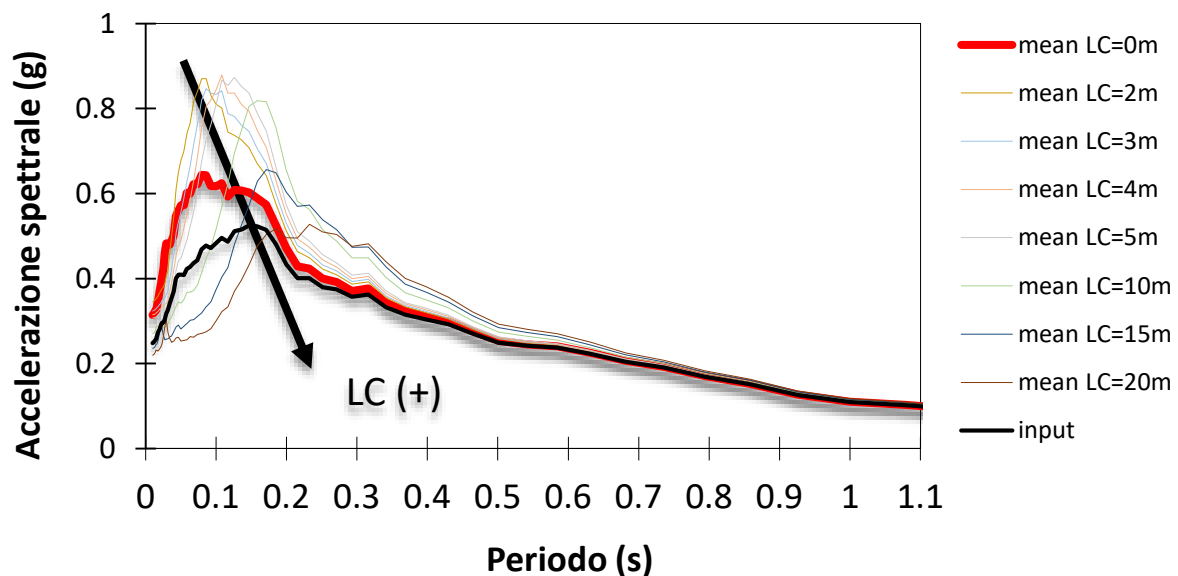
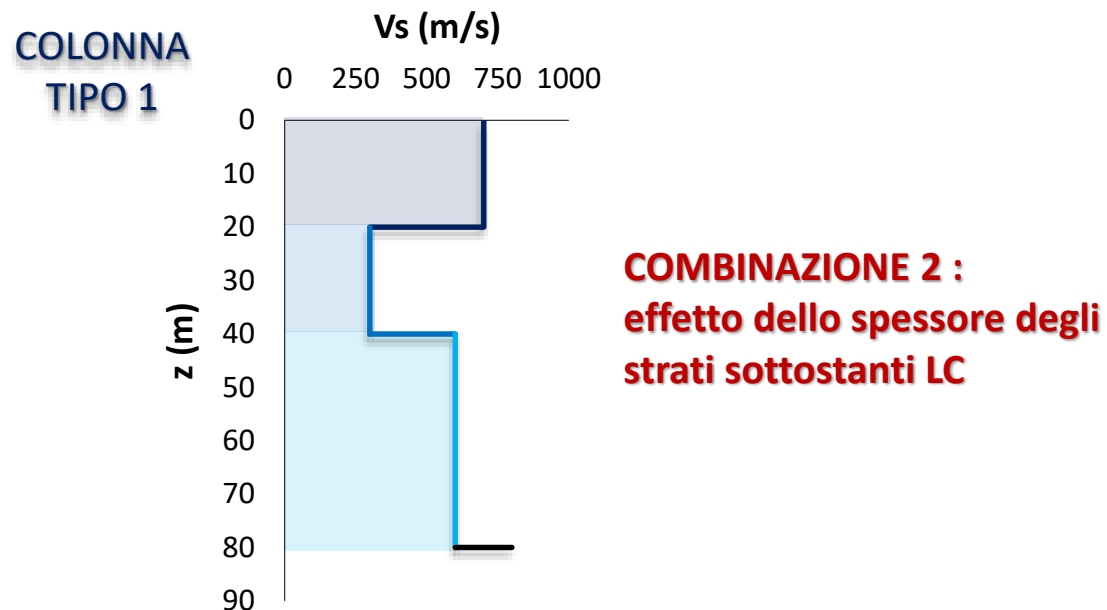


COMBINAZIONE 2 : effetto dello spessore degli strati sottostanti LC

LITOTIPI	γ (kN/m^3)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	0-2-3-4-5-10-15-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

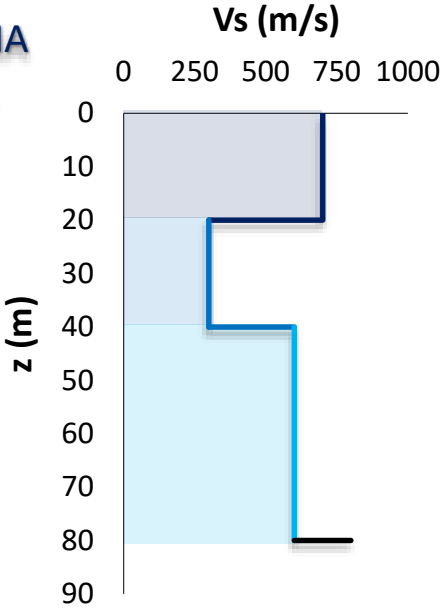


Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI



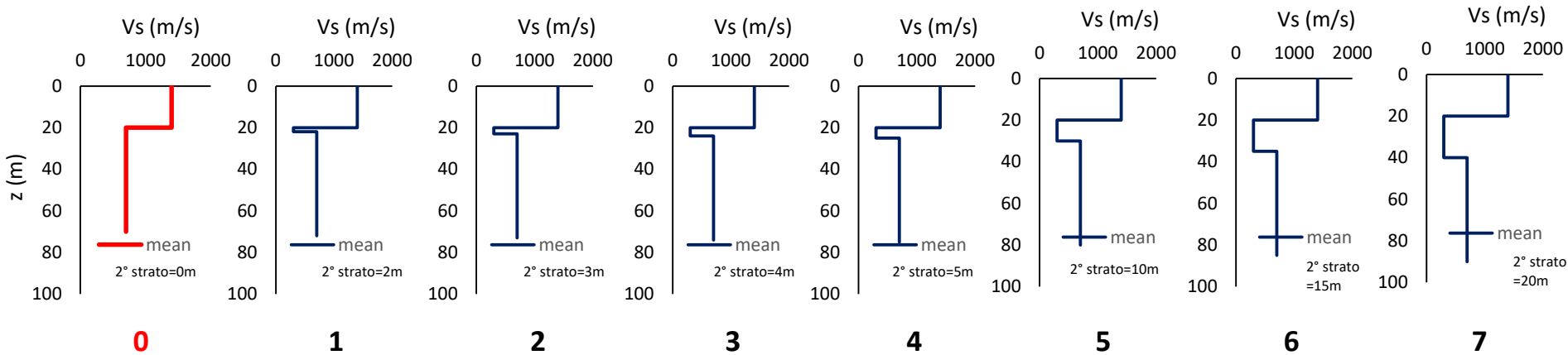
Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA
TIPO 1



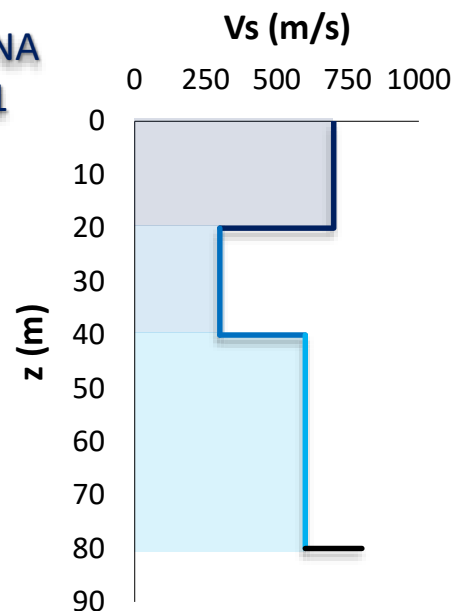
COMBINAZIONE 3 : effetto spessore strato soffice

LITOTIPI	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-20	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	0-2-3-4-5-10-15-20	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

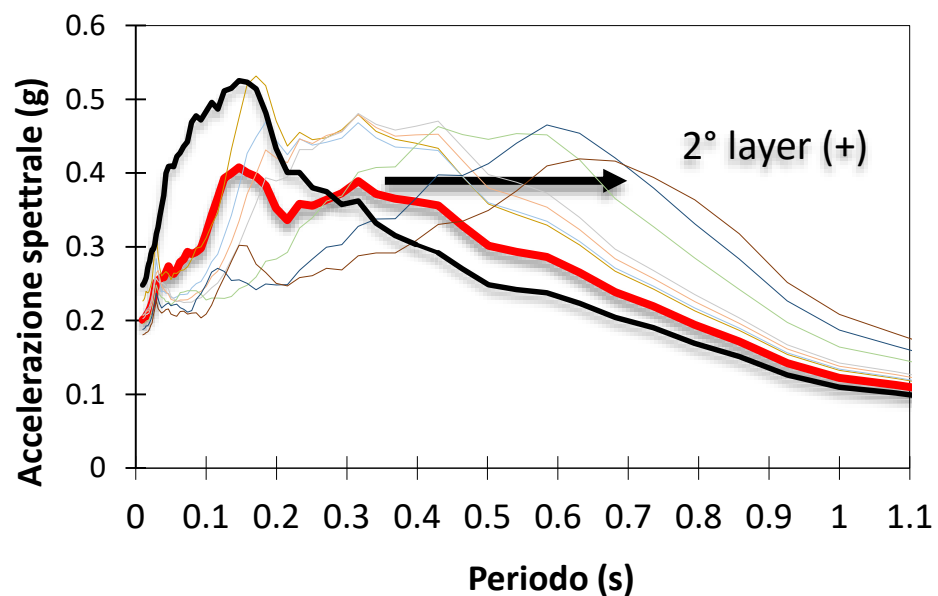


Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA
TIPO 1

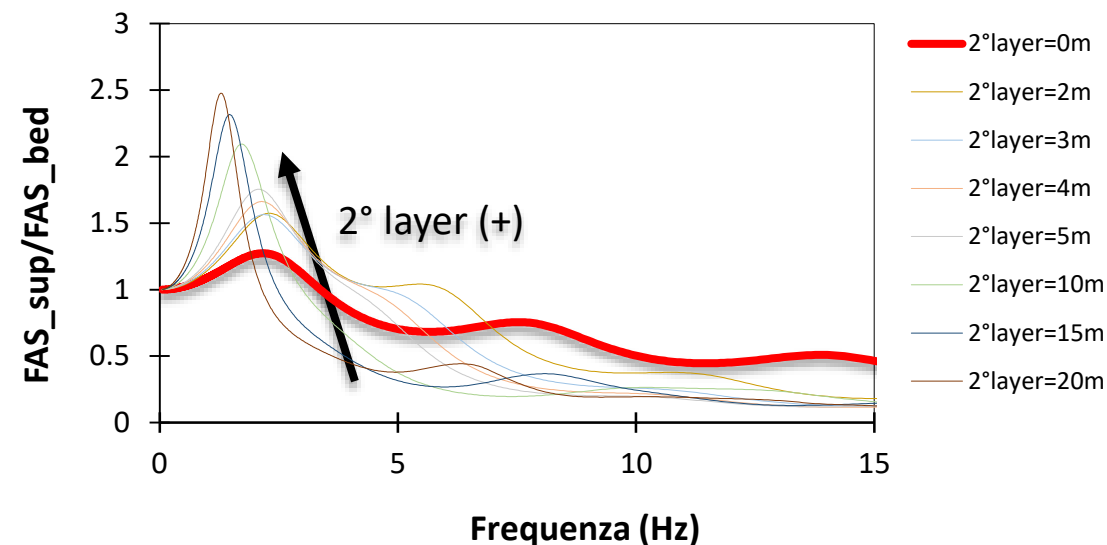


COMBINAZIONE 3 :
effetto spessore strato soffice



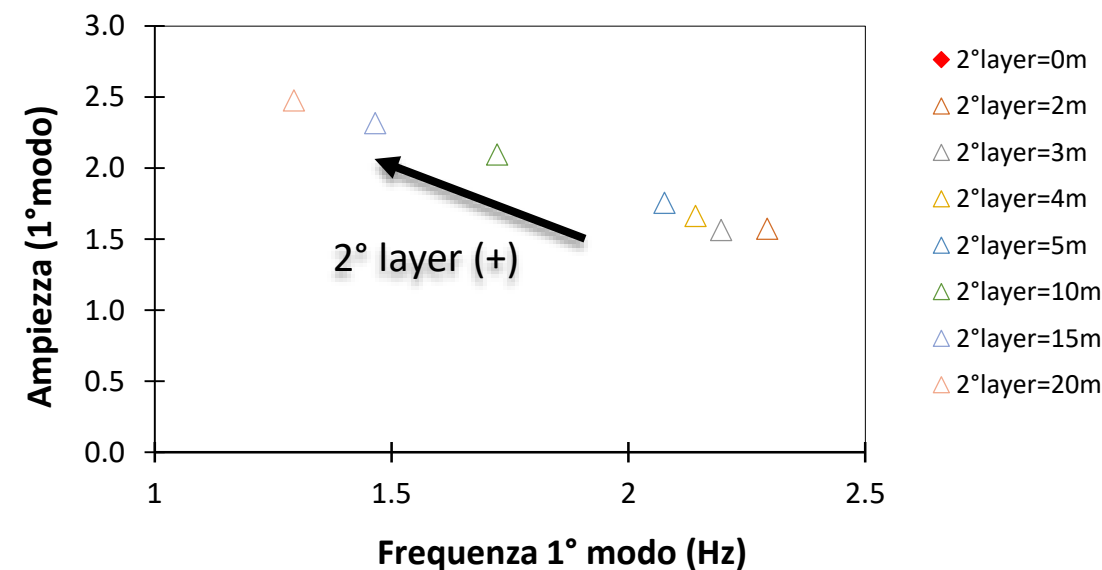
2° layer=0m
2° layer=2m
2° layer=3m
2° layer=4m
2° layer=5m
2° layer=10m
2° layer=15m
2° layer=20m
input

2° layer (+)



2° layer=0m
2° layer=2m
2° layer=3m
2° layer=4m
2° layer=5m
2° layer=10m
2° layer=15m
2° layer=20m

2° layer (+)



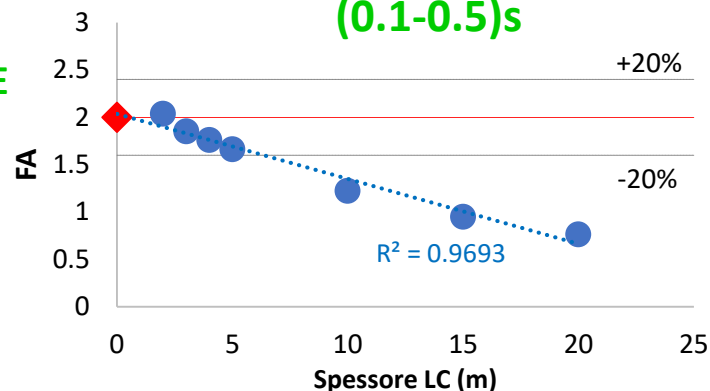
2° layer=0m
2° layer=2m
2° layer=3m
2° layer=4m
2° layer=5m
2° layer=10m
2° layer=15m
2° layer=20m

2° layer (+)

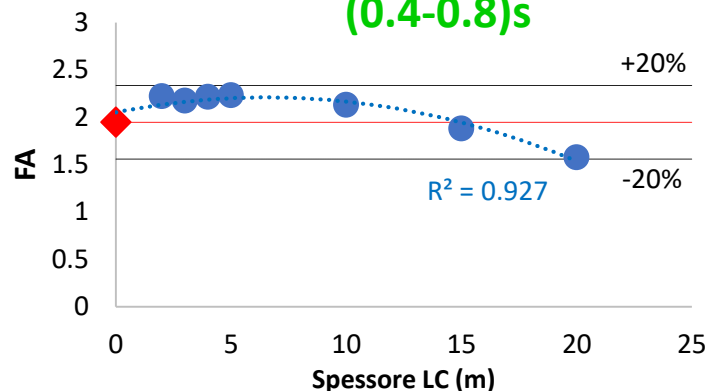
Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

FATTORI DI
AMPLIFICAZIONE

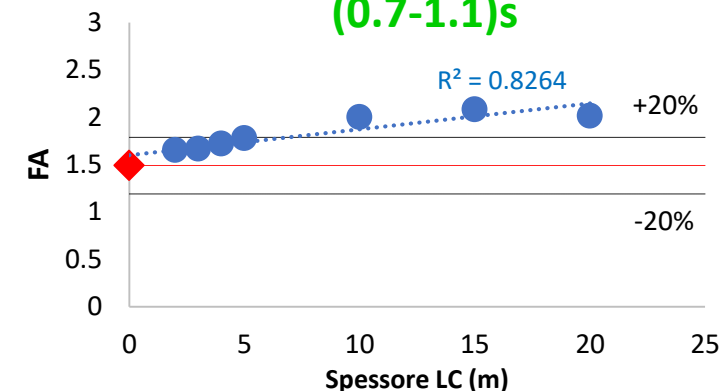
(0.1-0.5)s



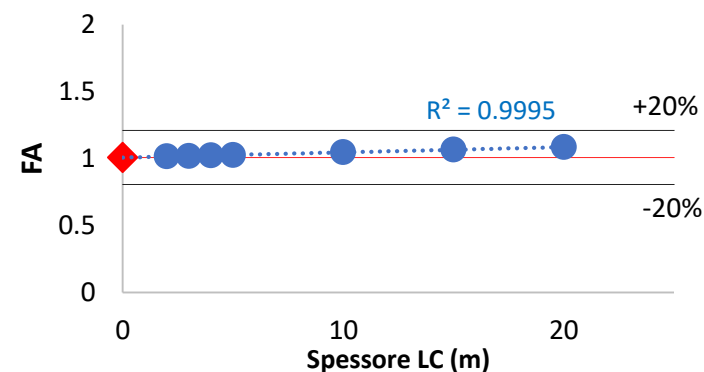
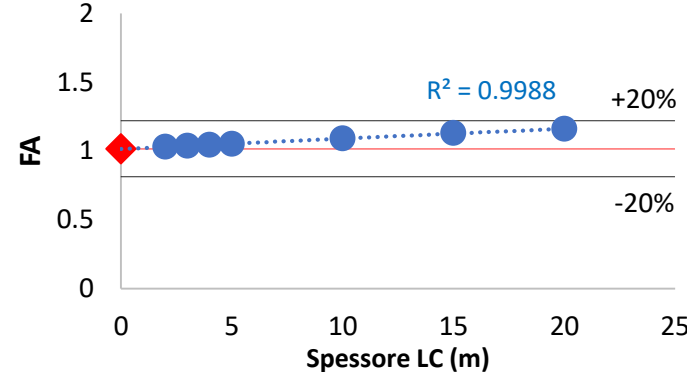
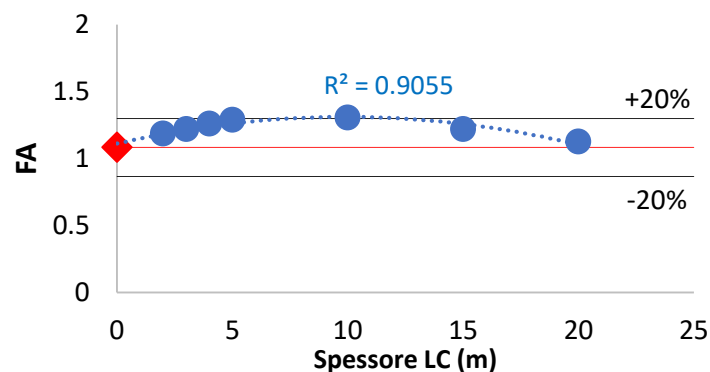
(0.4-0.8)s



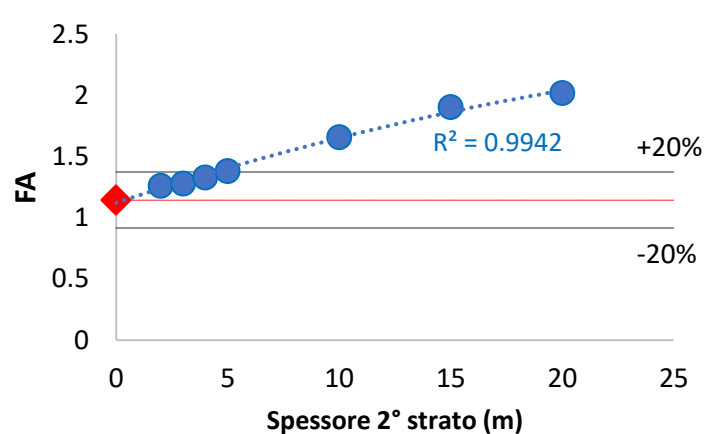
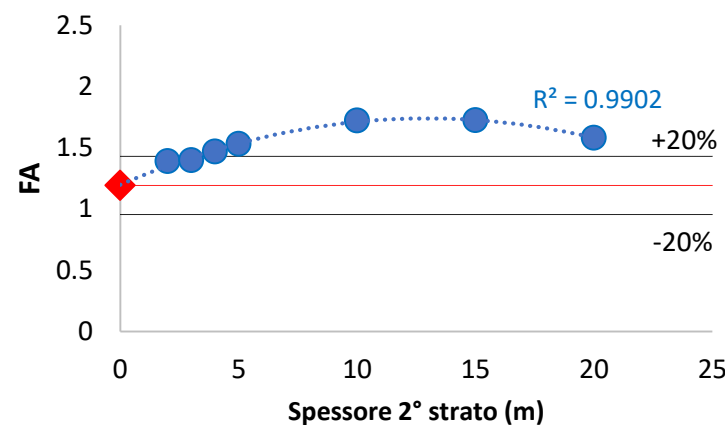
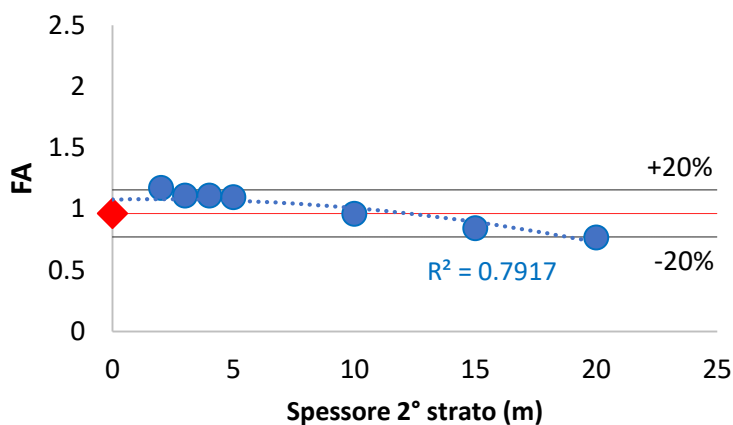
(0.7-1.1)s



COMBINAZIONE 2

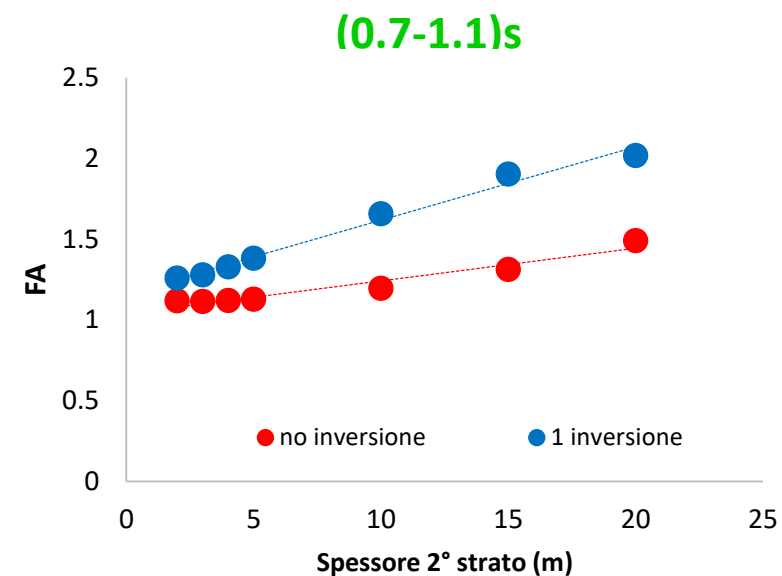
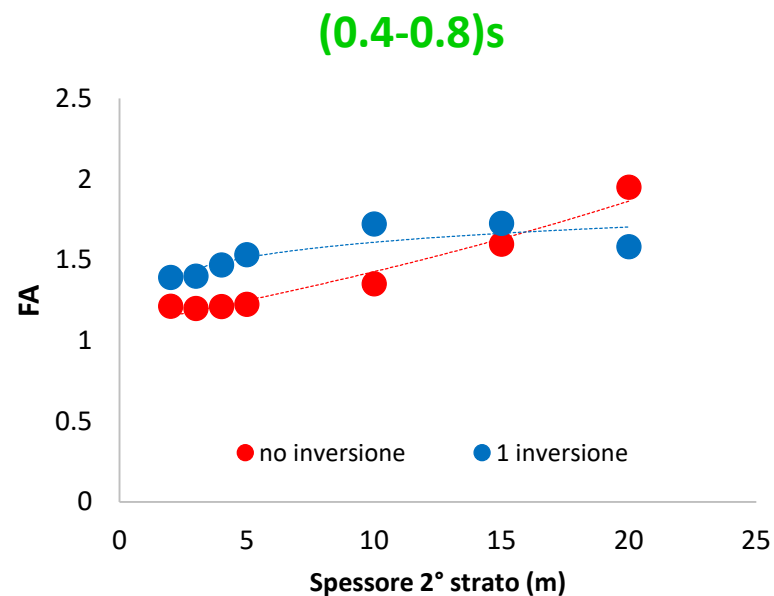
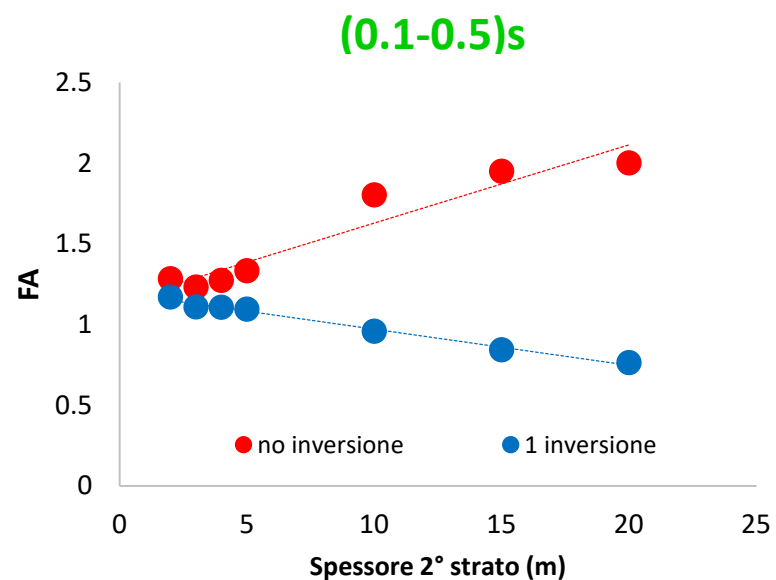


COMBINAZIONE 3



Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

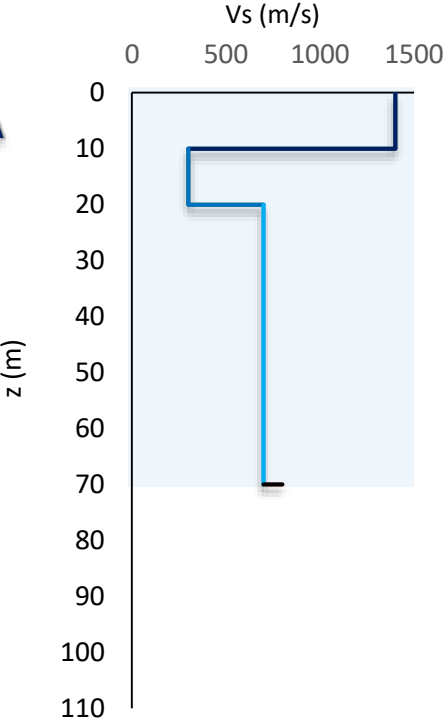
COMBINAZIONE 3 (1 inversione) vs COMBINAZIONE 3 SENZA LC (no inversione)



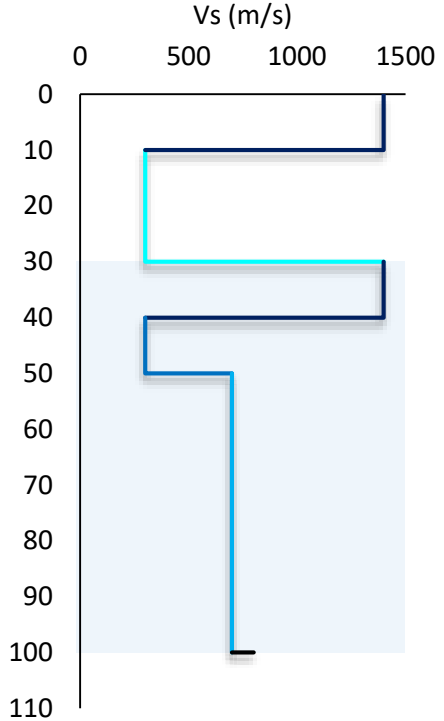
Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

colonna tipo 1 **VS** colonna tipo 2

COLONNA
TIPO 1

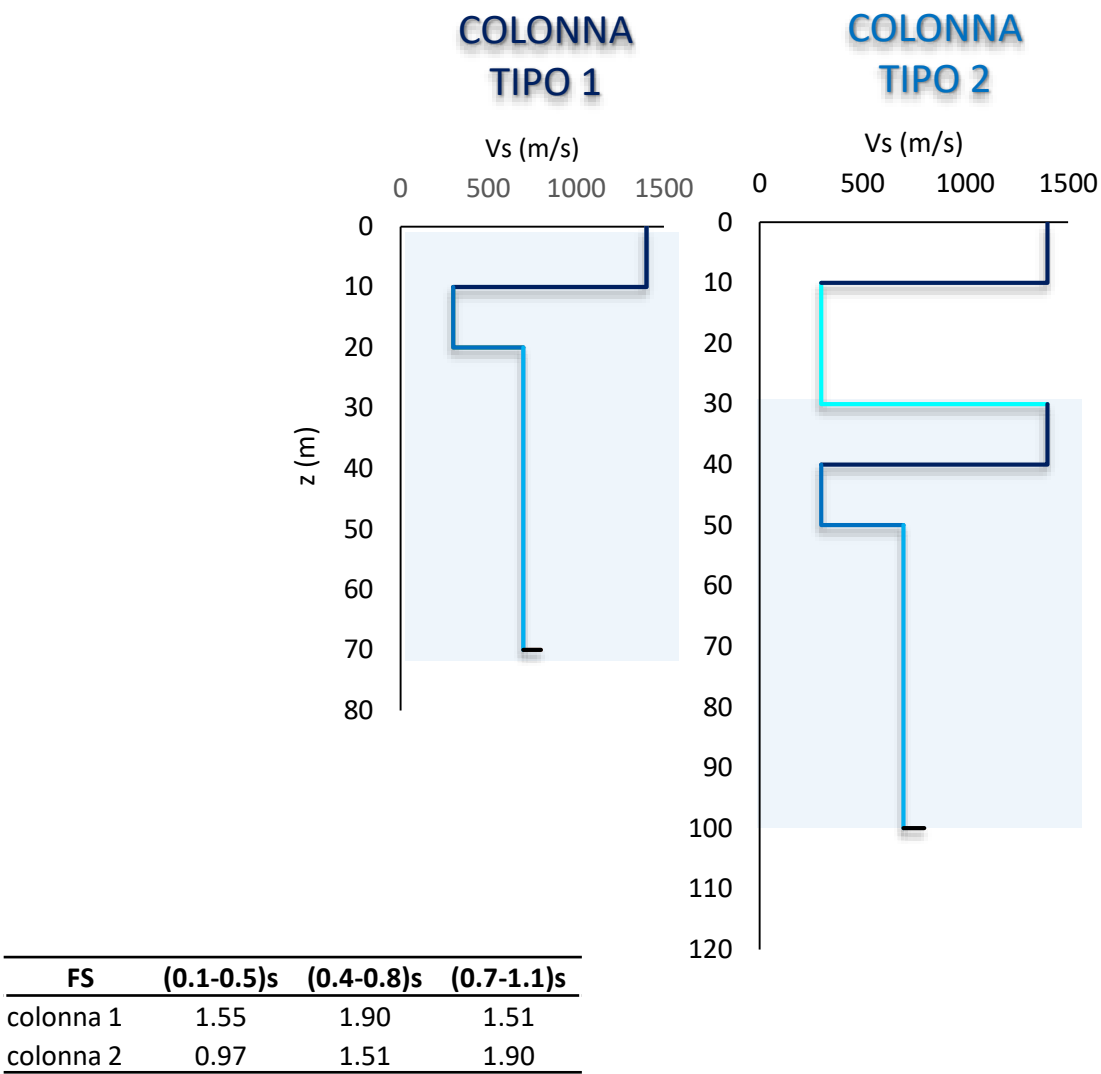
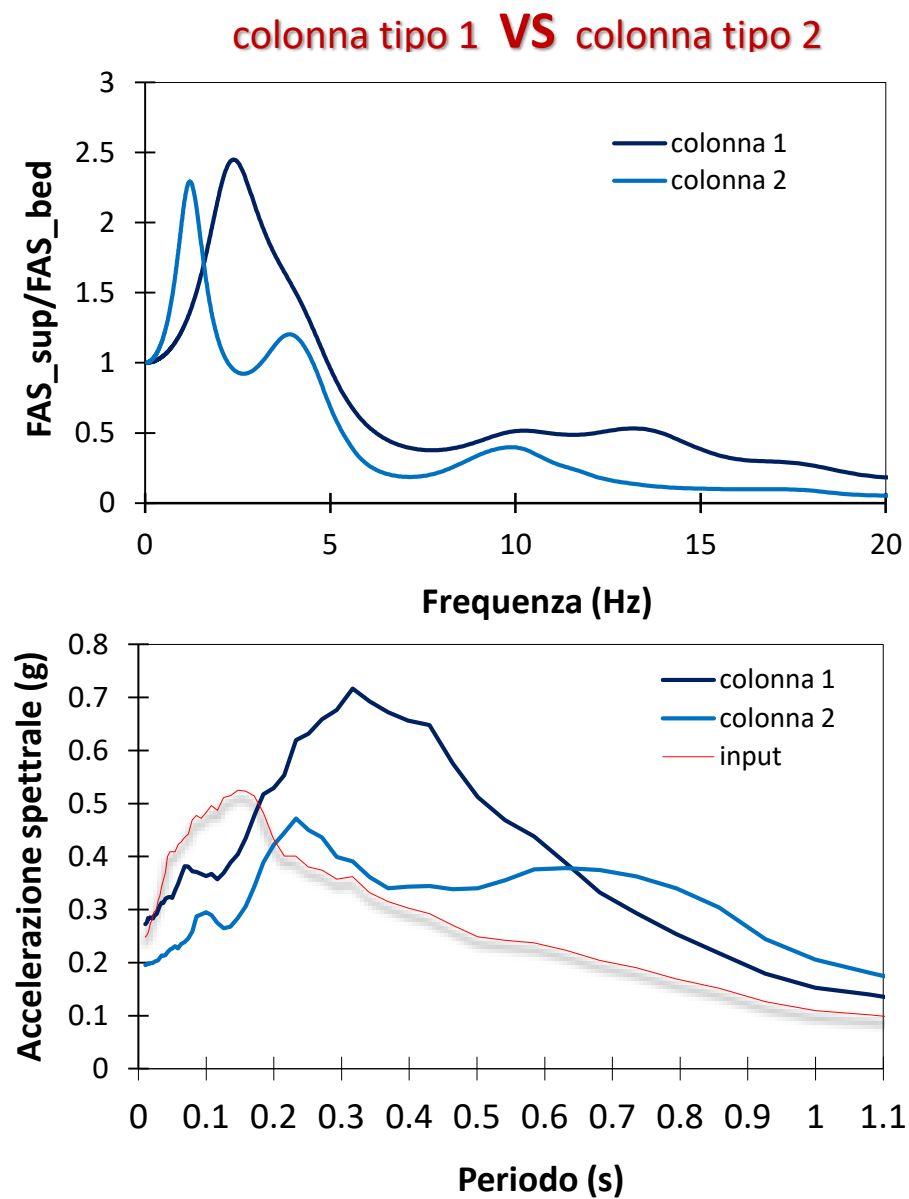


COLONNA
TIPO 2



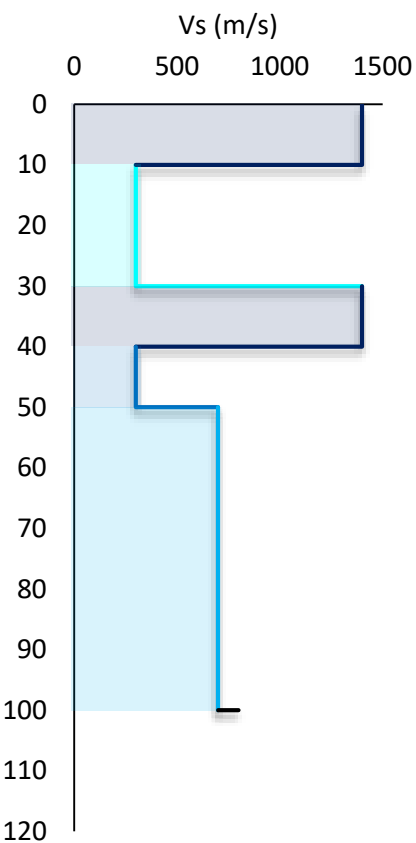
LITOTIPI	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Scorie alternate a lave (AL)	17	300-400-650	2-20-50	-	Rollins et al. 1998
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-10	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI



Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA TIPO 2



COMBINAZIONE 1 : effetto spessore AL

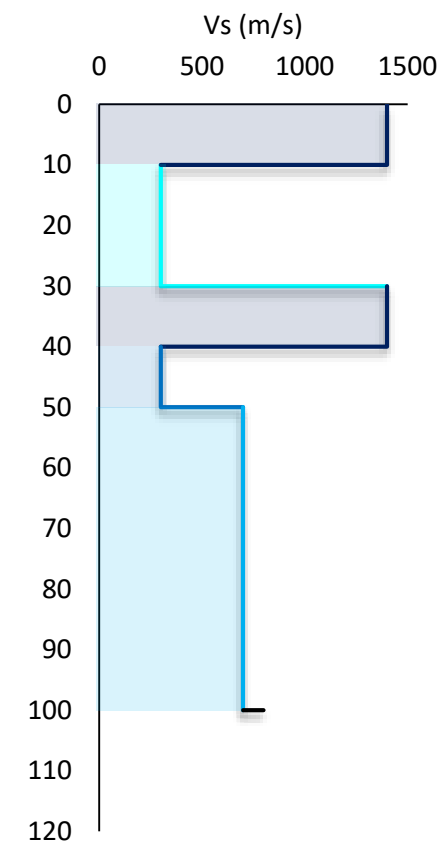
#	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Scorie alternate a lave (AL)	17	300-400-650	0-2-3-4-5-10-15-20-25-50	-	Rollins et al., 1998
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-10	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

COMBINAZIONE 1 : effetto spessore LC

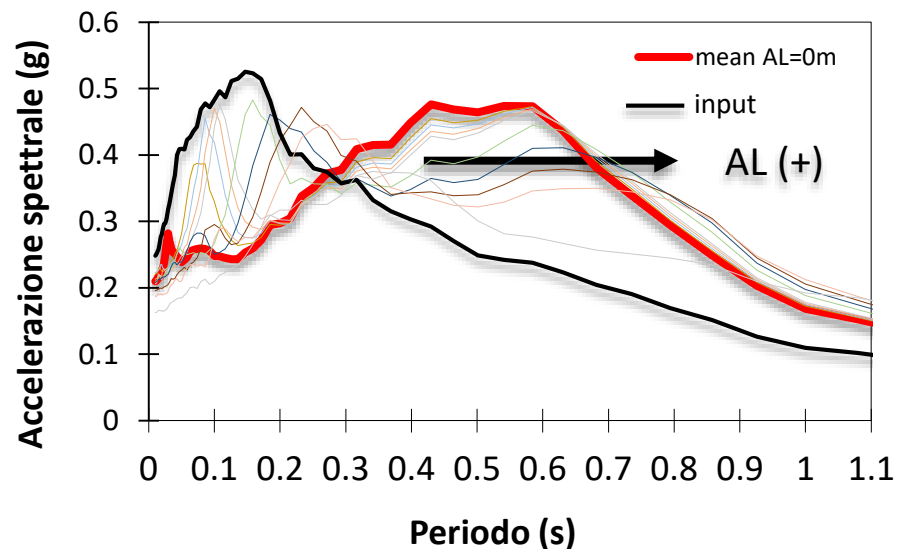
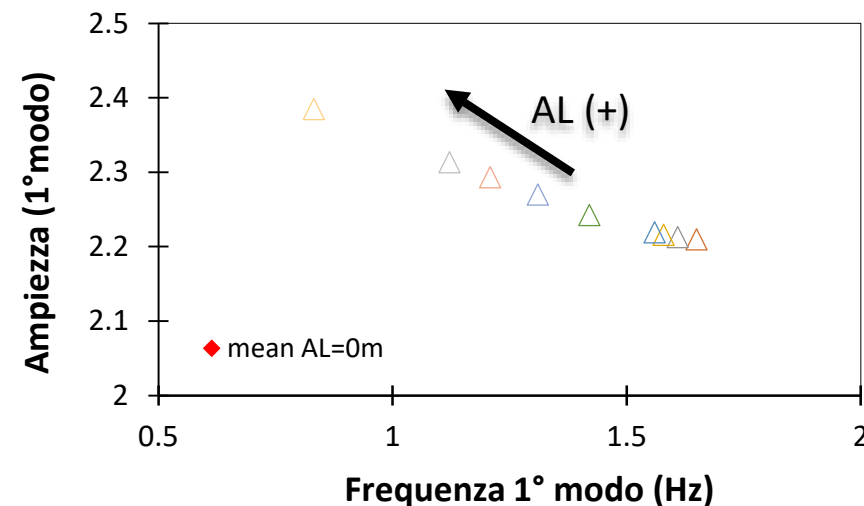
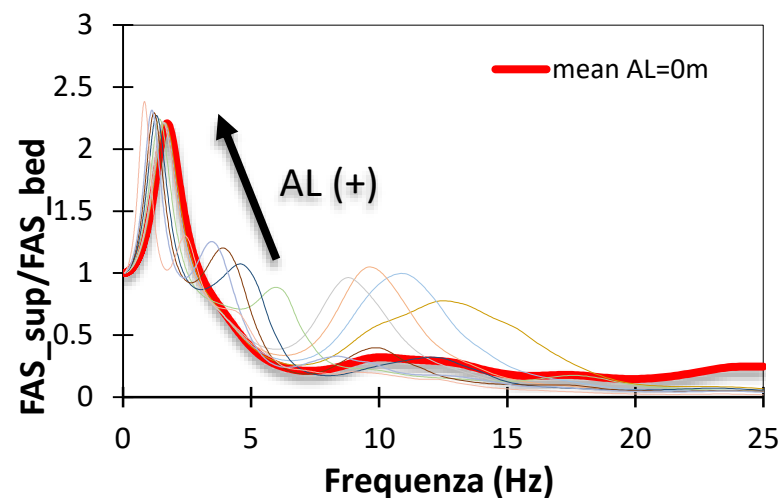
#	γ (kN/m ³)	Variazioni di velocità (m/s)	Variazioni di spessore (m)	Smorzamento (%)	Curve di decadimento
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	0-2-3-4-5-6-7-8-9-10	0.5	-
Scorie alternate a lave (AL)	17	300-400-650	2-20-50	-	Rollins et al., 1998
Litoide di copertura (LC)	20	700-1400	2-10	0.5	-
Alluvioni o terrazzo (GW/GM/SW/SM)	15	300-650	2-10	-	Cavallaro et al. 2001
Substrato geologico argilloso (CO)	18	400-700	10-50	-	Cavallaro et al. 2017
Bedrock sismico	23	800	-	0.5	-

Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA
TIPO 2

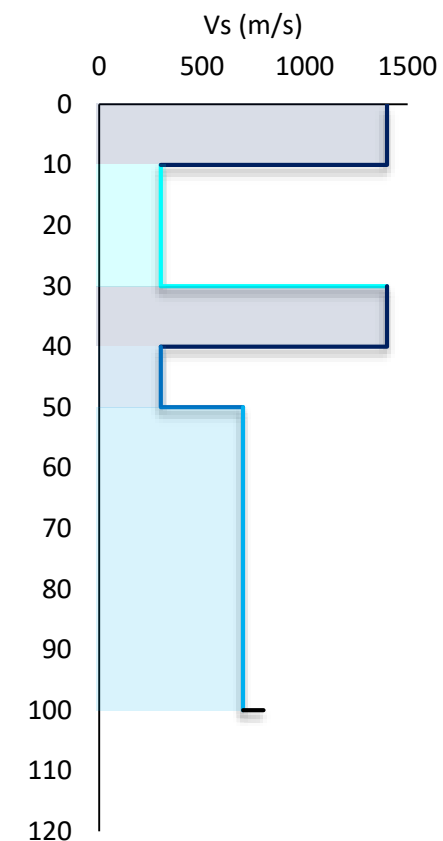


COMBINAZIONE 1 : effetto spessore AL

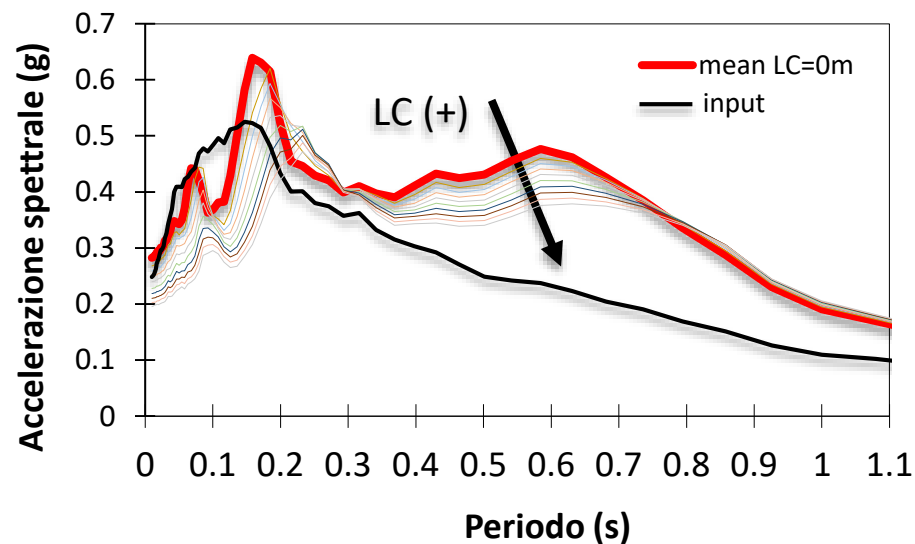
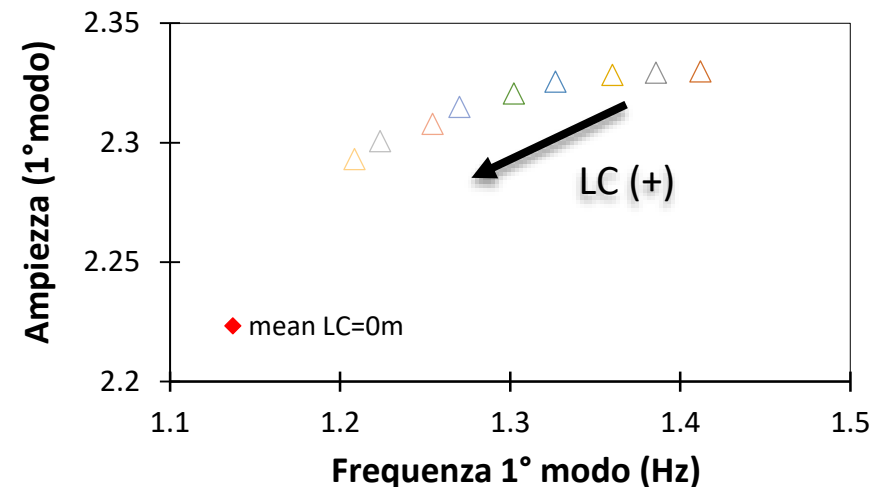
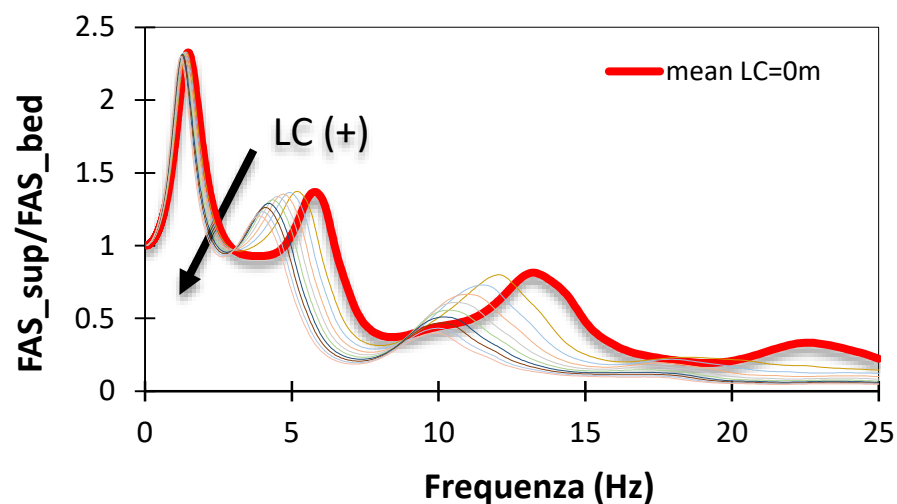


Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

COLONNA
TIPO 2



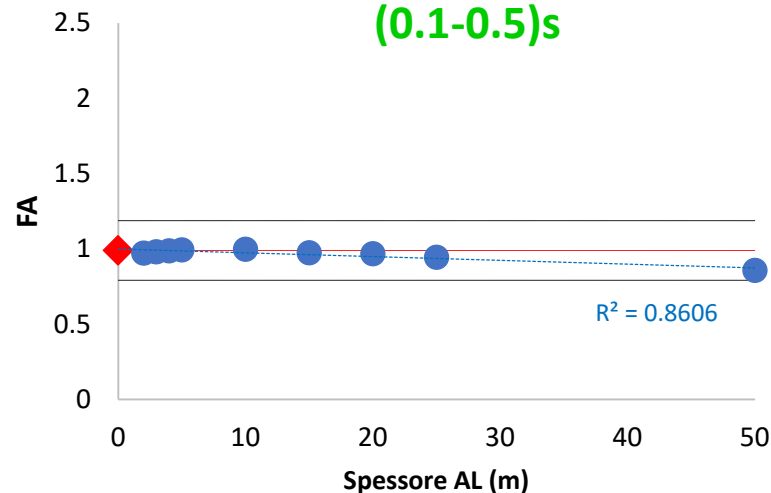
COMBINAZIONE 2: effetto spessore LC



Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

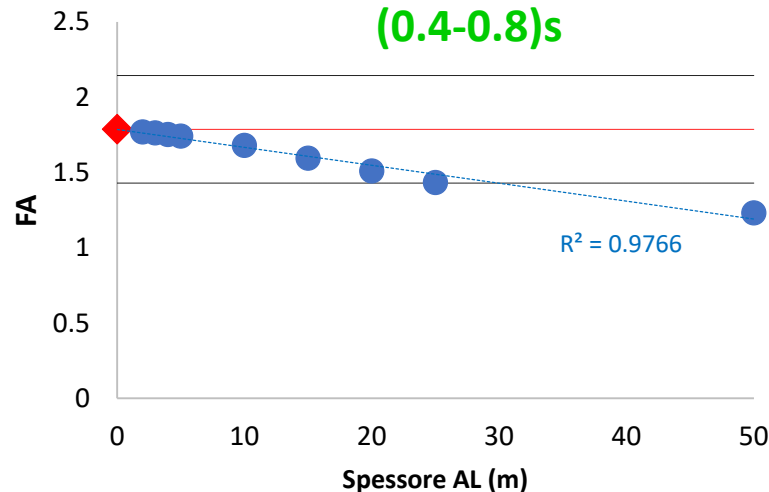
COLONNA TIPO 2 ● ◆

(0.1-0.5)s

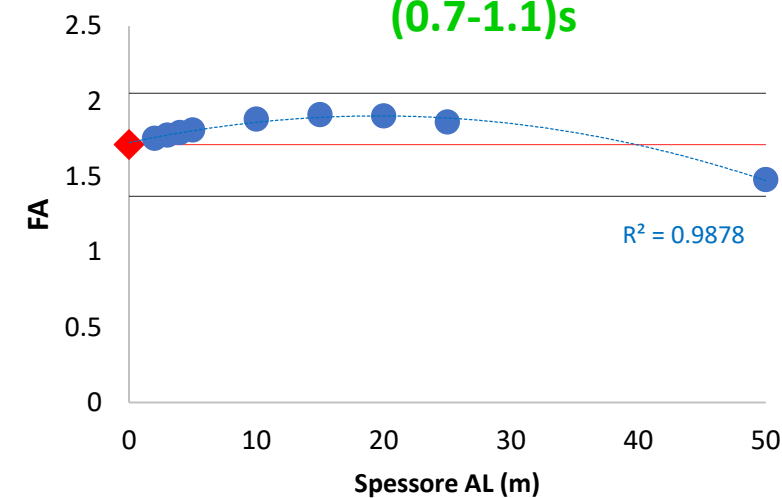


COMBINAZIONE 1: effetto spessore AL

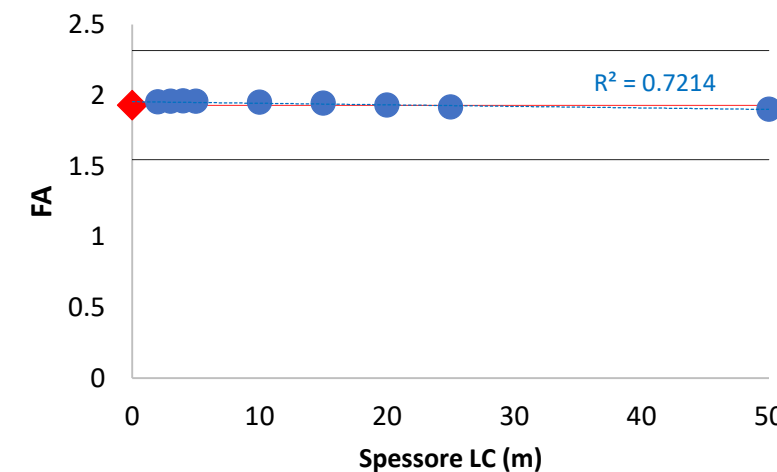
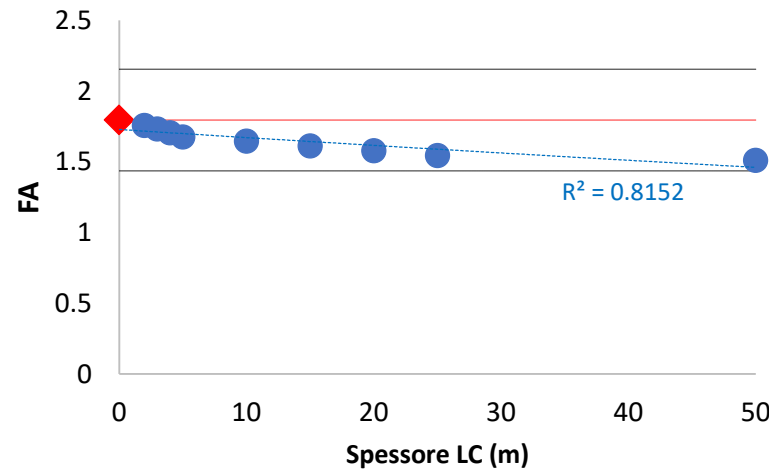
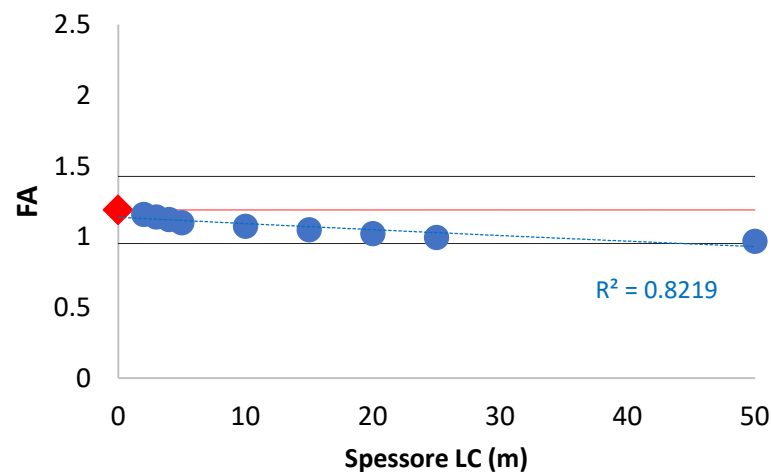
(0.4-0.8)s



(0.7-1.1)s

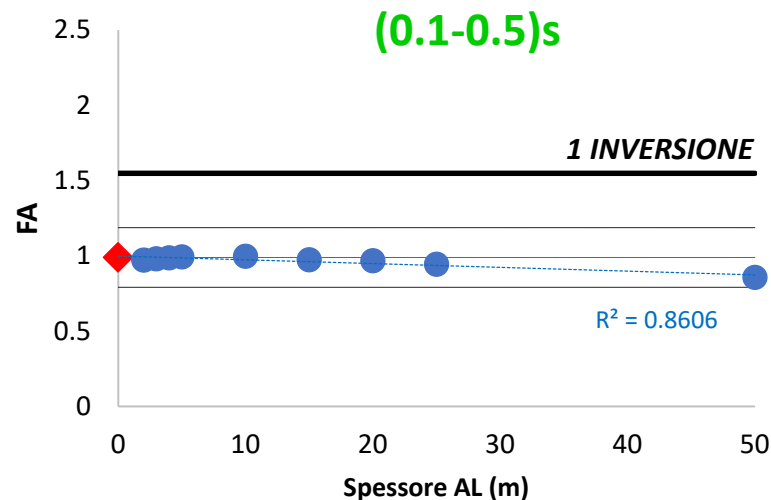


COMBINAZIONE 2: effetto spessore LC

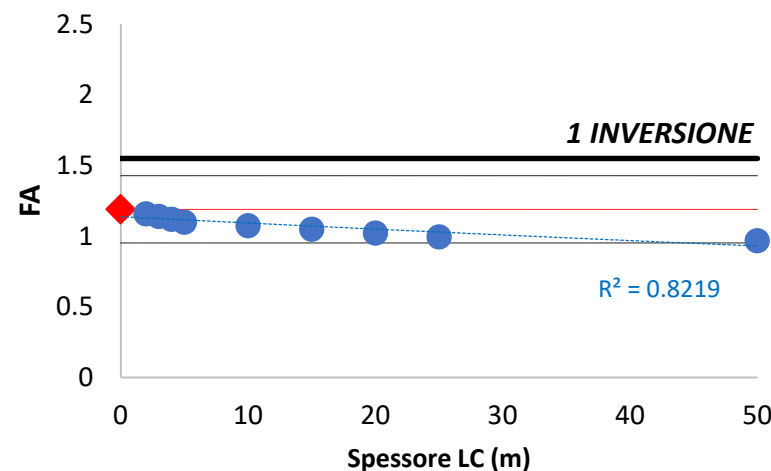
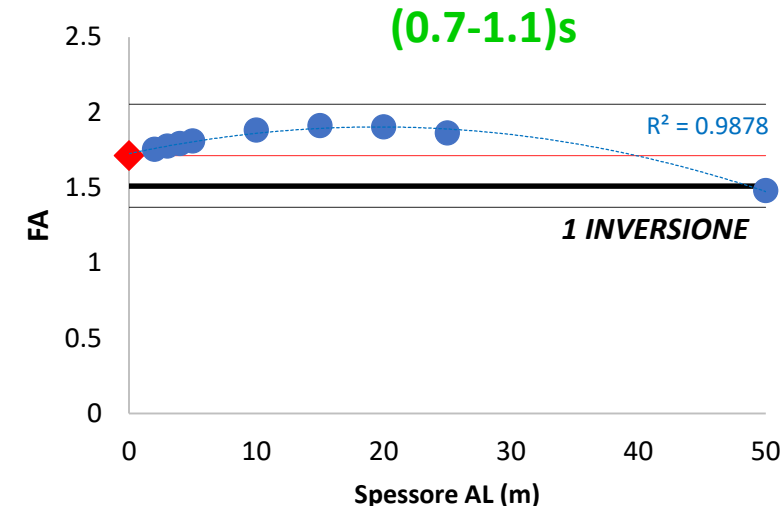
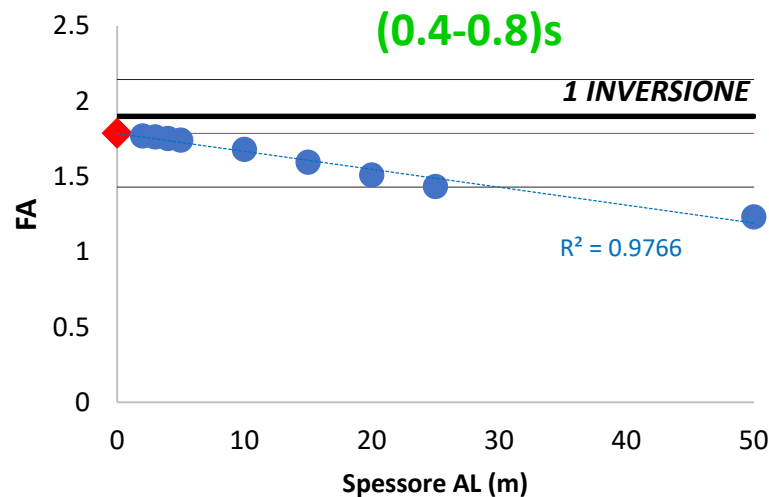


Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

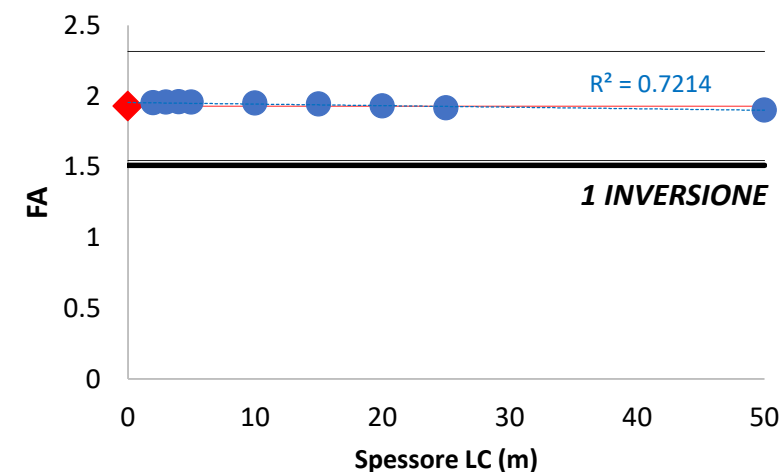
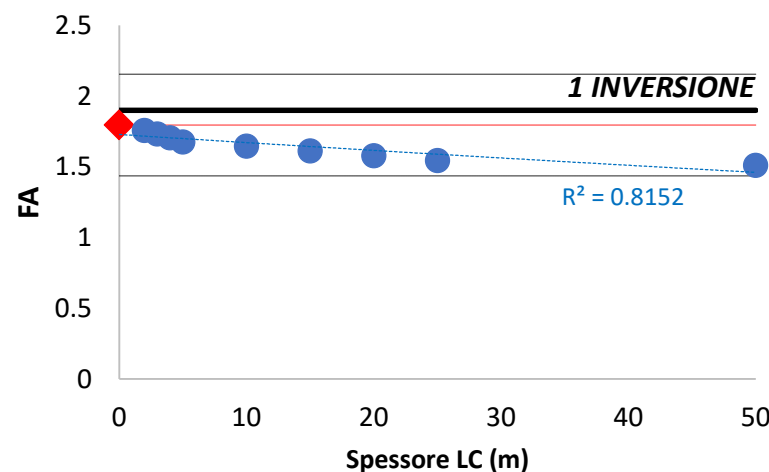
COLONNA TIPO 2 ● ◆



COMBINAZIONE 1: effetto spessore AL

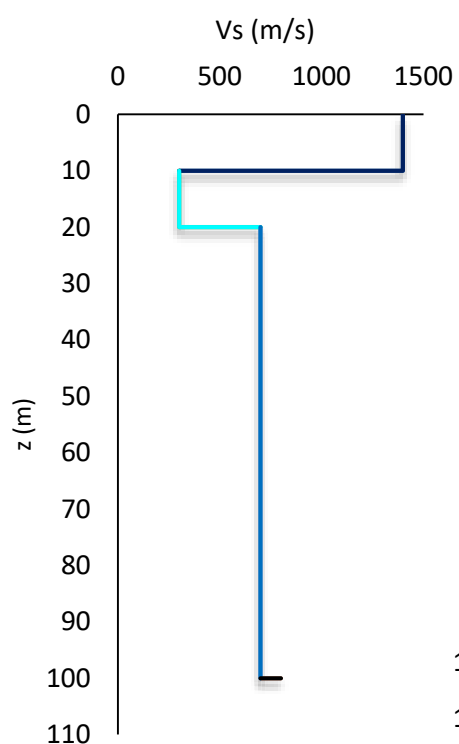


COMBINAZIONE 2: effetto spessore LC

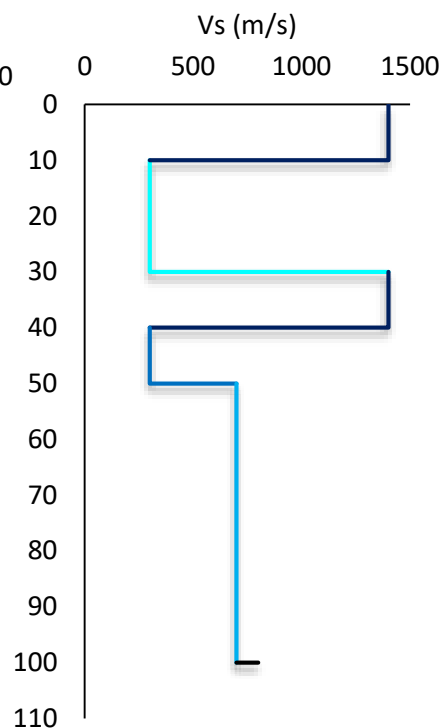


Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI

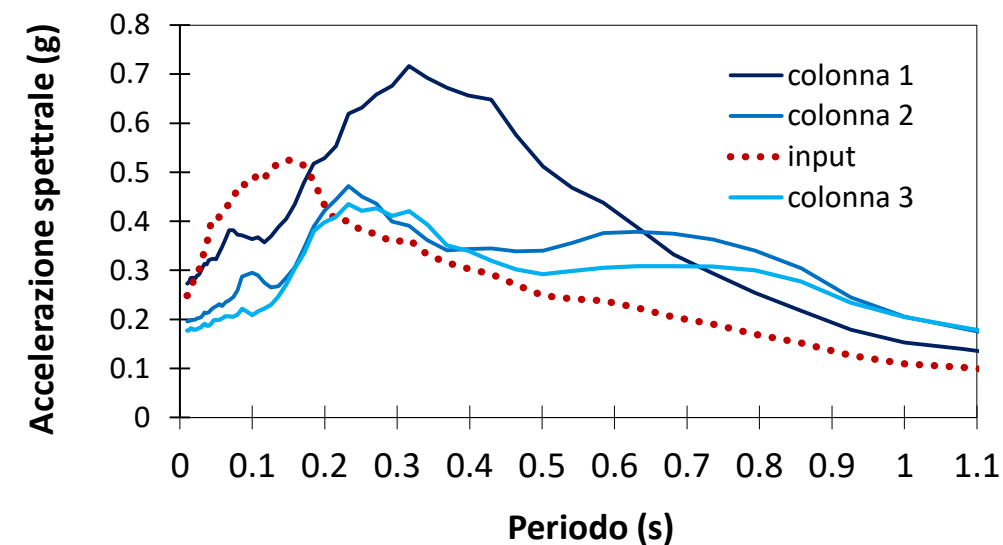
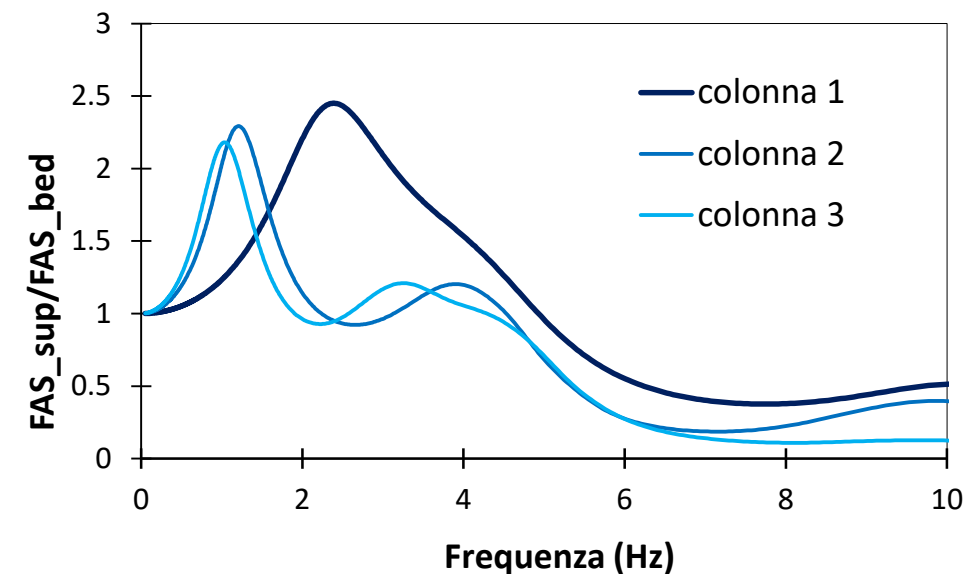
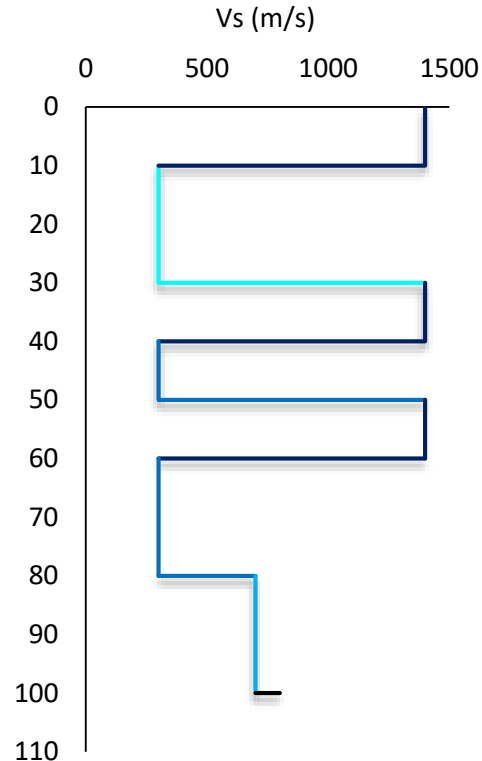
COLONNA
TIPO 1



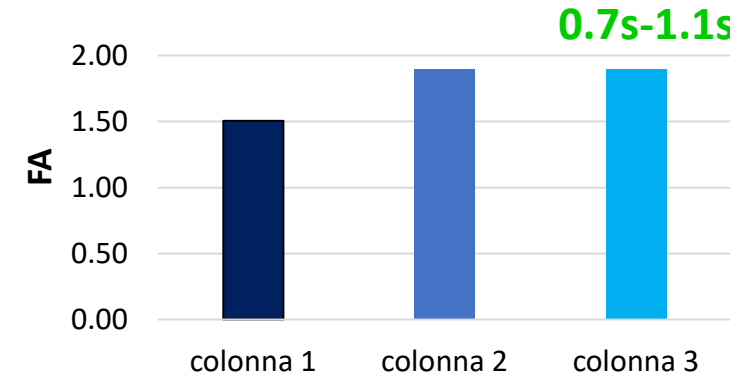
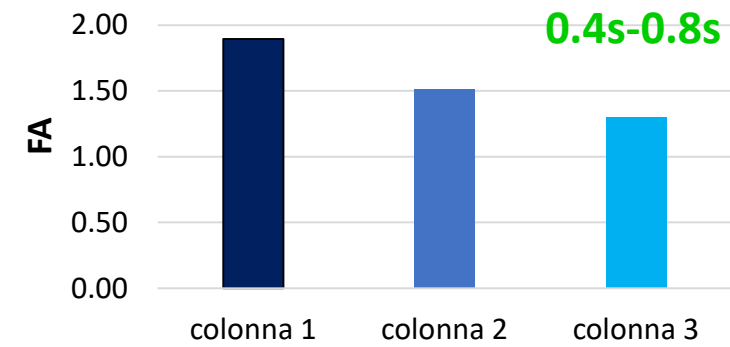
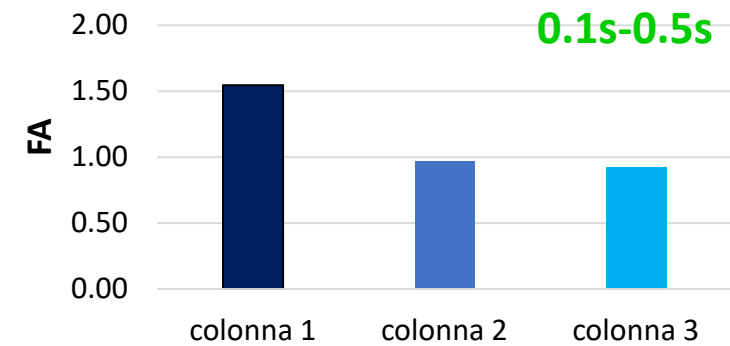
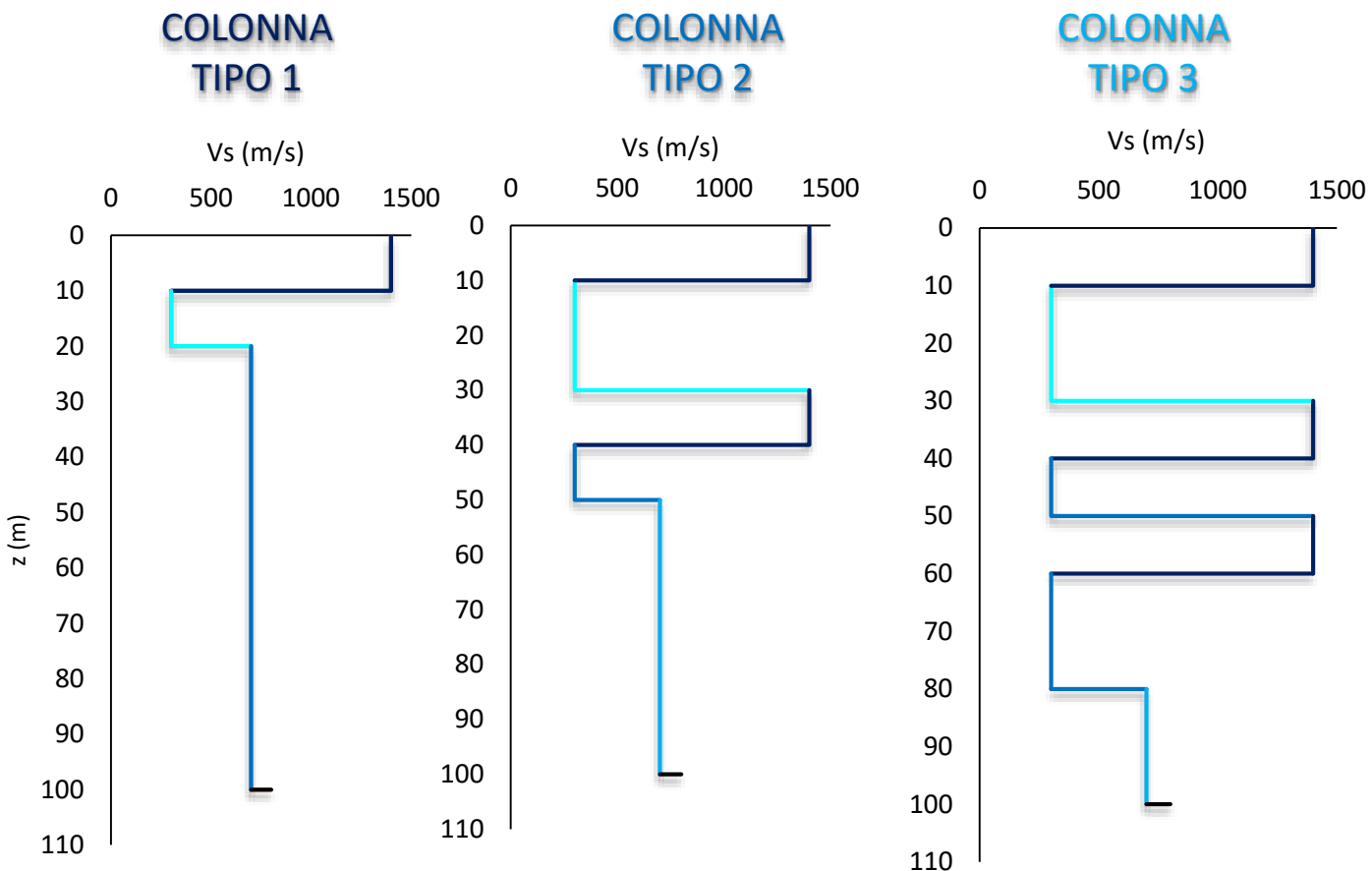
COLONNA
TIPO 2



COLONNA
TIPO 3



Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs in AMBIENTI VULCANICI



Conclusioni Generali

INVERSIONI DI VELOCITA'

Progettazione di nuove opere e verifica di quelle esistenti

Pianificazione territoriale e dell'emergenza



NTC 2018
approccio avanzato
no approcci semplificati



ICMS 2008
approccio avanzato
no approcci semplificati

Possiamo trattare le inversioni di Vs anche nel livello 2 semplificato attraverso abachi *ad hoc*?



I risultati fin qui ottenuti sembrerebbero incoraggiare l'utilizzo di abachi semplificati, almeno limitatamente al caso 1D

Gli effetti di condizioni 2D e 3D potrebbero superare gli effetti stratigrafici (rif. ambienti vulcanici)



Riferimenti bibliografici

1. Commissione tecnica per la microzonazione sismica. Standard di rappresentazione e archiviazione informatica. Dipartimento della protezione civile. Versione 4.2beta. - Roma: [s.n.], 2020. - Vol. (In fase di approvazione).
2. Crespellani T., Martelli L., 2008. *Microzonazione sismica e Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008)*. In 'Dibattito', Ingegneria sismica, 2, 51-54.
3. Fabozzi S., Catalano S., Falcone G., Naso G., Pagliaroli A., Peronace E., Porchia A., Romagnoli G., Moscatelli M. (2020) Stochastic approach to study the site response in presence of shear wave velocity inversion: Application to seismic microzonation studies in Italy, Engineering Geology (2020), <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105914>.
4. Gruppo di Lavoro MS, 2008. *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province Autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e Cd-rom.
5. ISSMGE (1999). Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. The Japanese Geotechnical Society, Tokyo.
6. Kottke, A.R., Wang, X., Rathje, E.M., 2013. Technical Manual for Strata. Geotechnical Engineering Center Department of Civil, Architectural, and Environmental Engineering, University of Texas, pp. 89
7. Kramer S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall, NJ, 653 pp.
8. Lanzo G., Silvestri F. (1999). Risposta sismica locale. Teoria ed Esperienze. Hevelius Edizioni.
9. Rathje, E. M., A. R. Kottke, and W. L. Trent. 2010. "Influence of input motion and site property variabilities on seismic site response analysis." J. Geotech. Geoenviron. Eng. 136 (4): 607–619. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000255).
10. Silvestri F., d'Onofrio A. (2014) Risposta sismica e stabilità di centri abitati e infrastrutture. Relazione Generale di Sessione, Atti XXV Convegno Nazionale di Geotecnica, Baveno. AGI, Roma (in Italian), 2014.
11. Toro, G.R. (1995). Probabilistic models of site velocity profiles for generic and site-specific ground-motion amplification studies. Technical Report. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York.

Criticità relative al calcolo dell'amplificazione sismica: le inversioni di velocità

Tematiche tecniche curate da

Stefania Fabozzi ¹, Gaetano Falcone ¹, Giuseppe Naso ²

Con la collaborazione di

Stefano Catalano ³, Massimiliano Moscatelli ¹, Alessandro Pagliaroli ⁴, Edoardo Peronace ¹,
Attilio Porchia ¹, Gino Romagnoli ¹

¹ *Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (CNR IGAG)*

([stefania.fabozzi](mailto:stefania.fabozzi@igag.cnr.it); [gaetano.falcone](mailto:gaetano.falcone@igag.cnr.it); [massimiliano.moscatelli](mailto:massimiliano.moscatelli@igag.cnr.it); [edoardo.peronace](mailto:edoardo.peronace@igag.cnr.it); [attilio.porchia](mailto:attilio.porchia@igag.cnr.it); [gino.romagnoli](mailto:gino.romagnoli@igag.cnr.it))@igag.cnr.it

² *Dipartimento di protezione Civile (DPC) - giuseppe.naso@protezionecivile.it*

³ *Università di Catania (UNICT) - catalano@unict.it*

⁴ *Università di Chieti Pescara (UNICH) - alessandro.pagliaroli@unich.it*

Grazie per l'attenzione!