

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

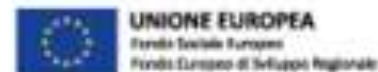
webinar sulla pericolosità sismica locale nella Regione Siciliana

27 novembre 2020

**Criticità relative al calcolo dell'amplificazione sismica**  
*Gaetano Falcone, Stefania Fabozzi*



in collaborazione con



**Tematiche tecniche curate da**

Fabozzi S., Falcone G. e Naso G.

**Con la collaborazione di**

Acunzo G., Mendicelli A., Mori F., Moscatelli M., Peronace E., Porchia A. e Romagnoli G.

27 novembre 2020, webinar organizzato in collaborazione con la Regione Siciliana

## Tematiche trattate e obiettivo della presentazione

1. Breve introduzione al calcolo numerico dell'amplificazione sismica
2. Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico
3. Effetto della modellazione stocastica degli spessori degli strati
4. Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ )
5. Effetto della presenza di inversioni nel profilo delle  $V_s$
6. Input sismico: accelerogramma (analisi *time-history*) vs spettro di risposta (analisi *Random Vibration Theory*, RVT)

**L'obiettivo della presentazione è quello di sollecitare l'attenzione di coloro che lavorano con strumenti di calcolo (in questo caso è stato scelto STRATA di Kottke et alii, 2013) 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.**

## Alcuni elementi utili per seguire il webinar

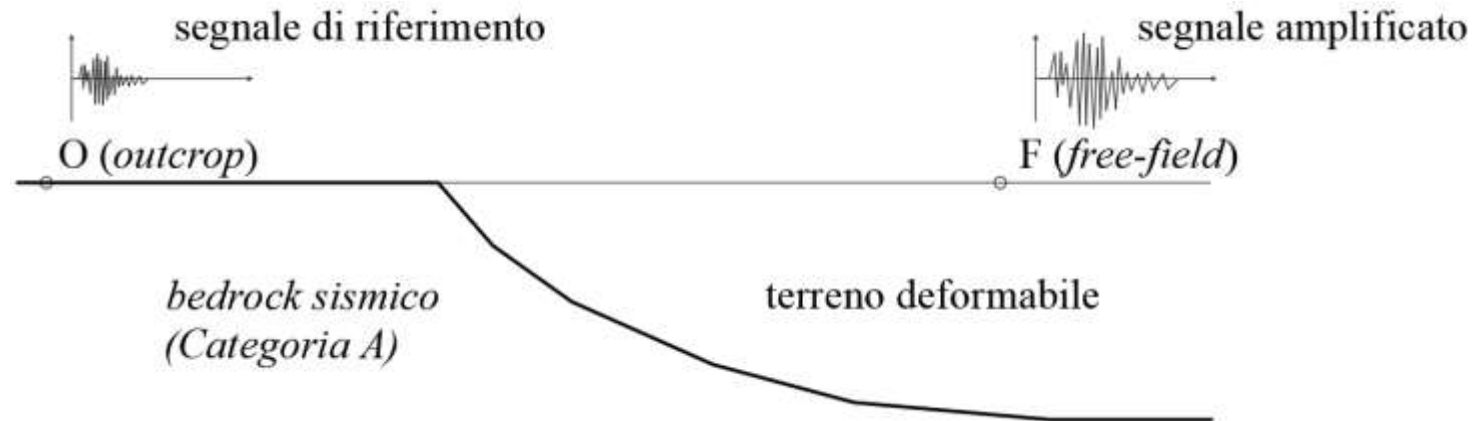
- Si utilizzerà il codice numerico STRATA (Kottke et alii, 2013 - Technical Manual for Strata)
- Alcune simulazioni saranno effettuate, utilizzando accelerogrammi selezionati da ITACA (D'Amico et al., 2020) in stazioni delle RAN poste su suolo rigido
- Le simulazioni sulla variabilità delle Vs sarà effettuata sul sito di San Fernando Valley of Southern California, chiamato Sylmar County Hospital (SCH) (Gibbs et al., 1999)
- Per il sito del Sud della California l'accelerogramma di input utilizzato è stato registrato il 17 gennaio del 1994 durante il Northridge earthquake alla Arleta Nordhoff fire station (Ancheta et al., 2012)
- Questo simbolo in alto a destra indicherà, nel corso della presentazione, che si sta cambiando tema



# Analisi numerica di Risposta Sismica Locale (RSL) e fattori di amplificazione

La **RSL** è una previsione quantitativa del moto sismico atteso in un sito in condizioni cosiddette di *free-field* (cioè in assenza di manufatti), a seguito di uno studio di sismicità regionale che definisca il terremoto di riferimento. (Lanzo & Silvestri, 1999).

Inoltre, al fine di quantificare gli effetti di sito, è possibile determinare il **fattore di amplificazione (AF)** espresso come rapporto tra gli integrali dello spettro di risposta del segnale *free-field* e quello di riferimento in un dato intervallo di periodi.



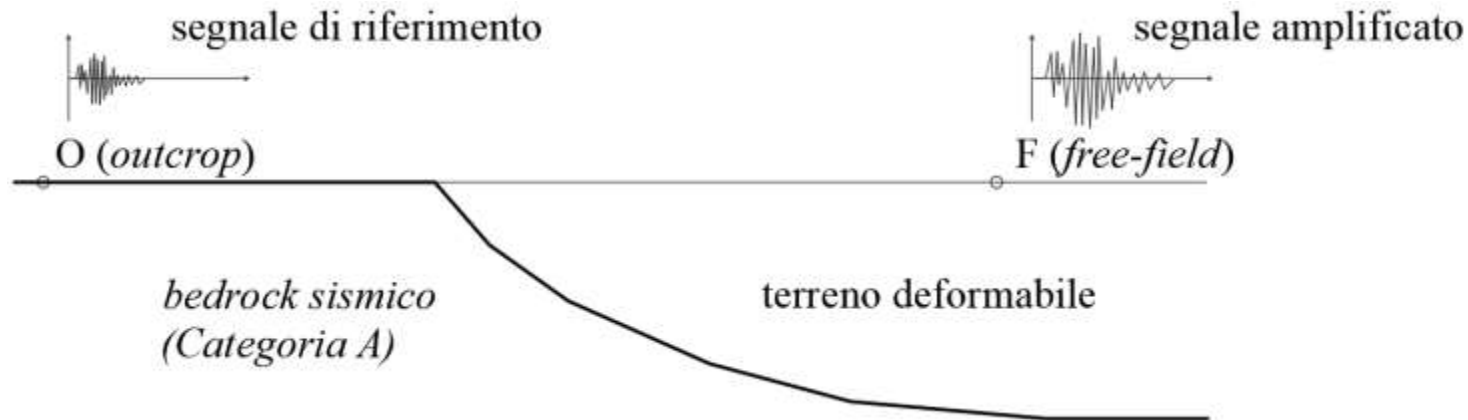
$$AF_{T1-T2} = \frac{\int_{T1}^{T2} Sa_{free-field} dT}{\int_{T1}^{T2} Sa_{riferimento} dT}$$

AF1	AF2	AF3
0.1-0.5 s	0.4-0.8 s	0.7-1.1 s

## Terremoto di riferimento e bedrock sismico

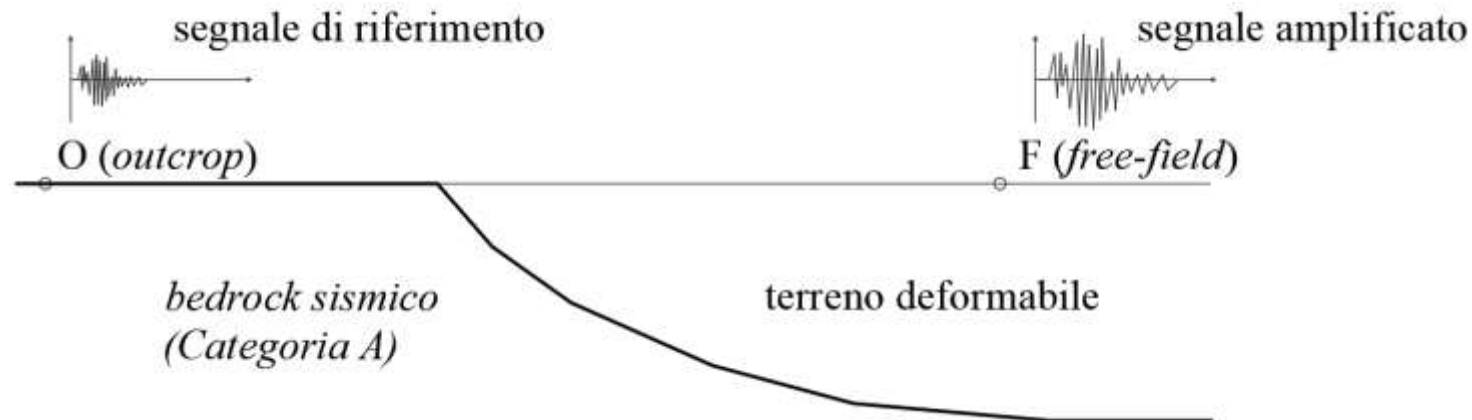
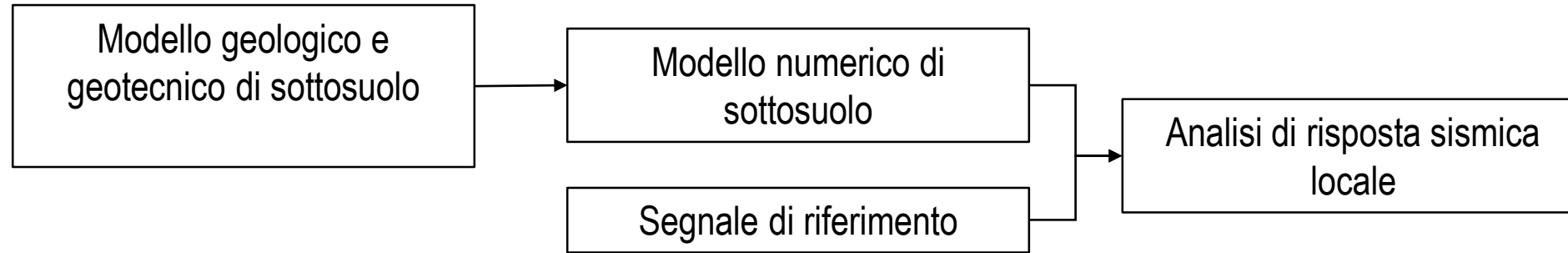
**Terremoto di riferimento (o segnale di riferimento):** registrazione accelerometrica eseguita o prevista (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>, NTC18) all'affioramento del *bedrock sismico* con piano campagna orizzontale.

**Bedrock sismico (Categoria A di sottosuolo, NTC18):** ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio uguali o superiori a **800 m/s**, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.



$$AF_{T1-T2} = \frac{\int_{T1}^{T2} Sa_{free-field} dT}{\int_{T1}^{T2} Sa_{riferimento} dT}$$

## Modellazione numerica della RSL

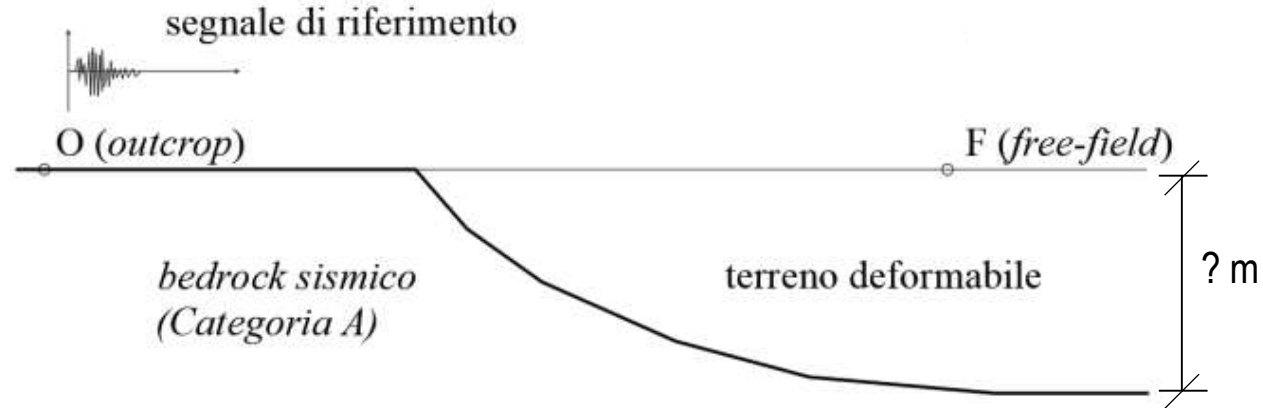


**Il modello numerico di sottosuolo** rappresenta la traduzione matematica delle condizioni geologiche, geotecniche e geofisiche del sito. In particolare, le condizioni di sito devono essere definite dal piano campagna sino al bedrock sismico.

# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio

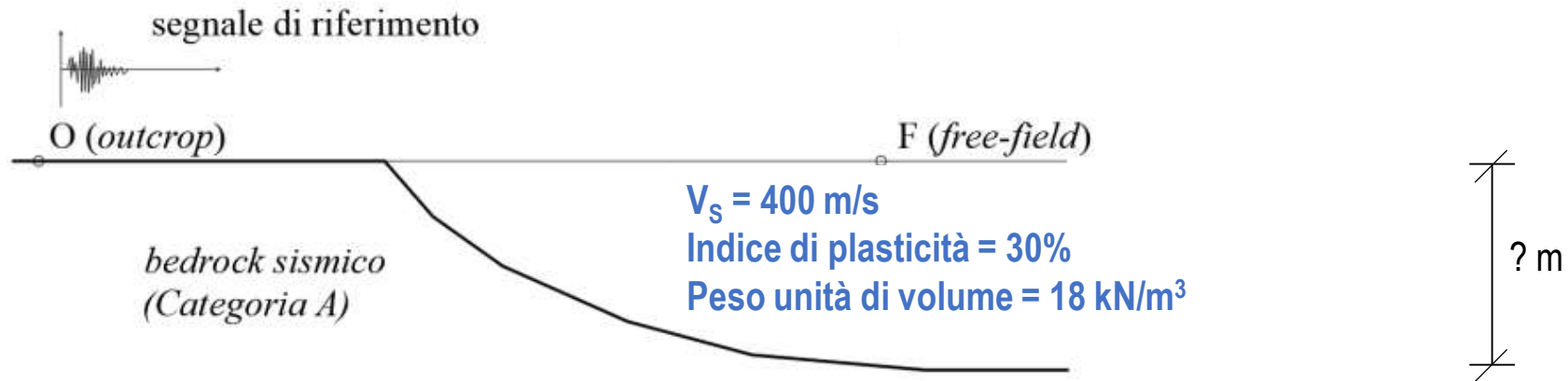
Modello numerico da implementare nel **codice di calcolo STRATA** (Kottke et al., 2013)





# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio



File Edit Tools Window Help

General Settings | Soil Types | Soil Profile | Motion(s) | Output Specification | Compute | Results

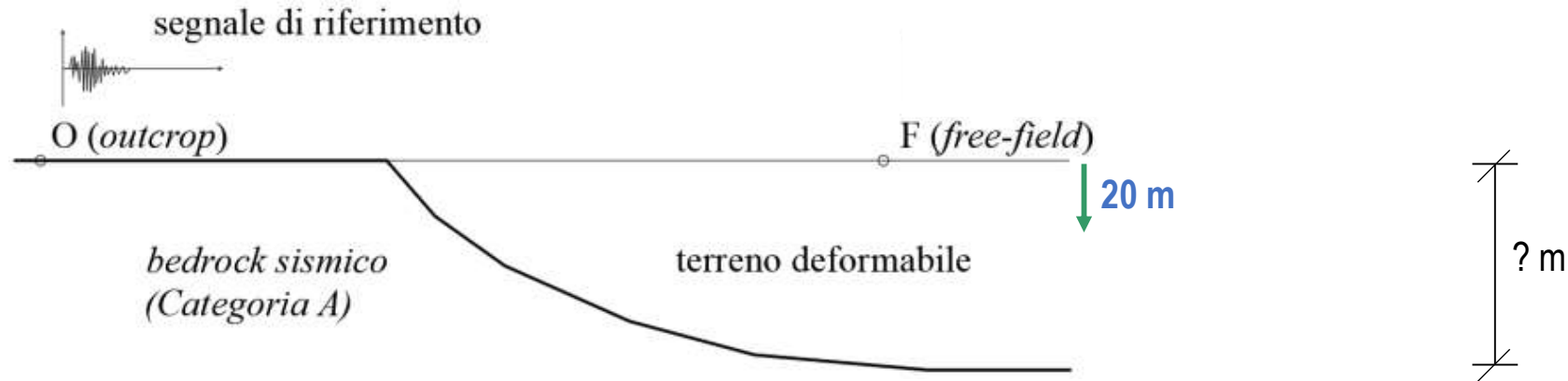
Soil Types

+ Add | Insert | - Remove

	Name	Unit Weight ( $\text{kN/m}^3$ )	G/G_max Model	Damping Model	Damp. Limit (%)	Notes
1	Terreno deformabile	18.00	Vucetic & Dobry, PI = 30	Vucetic & Dobry, PI = 30	0.5	

# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio

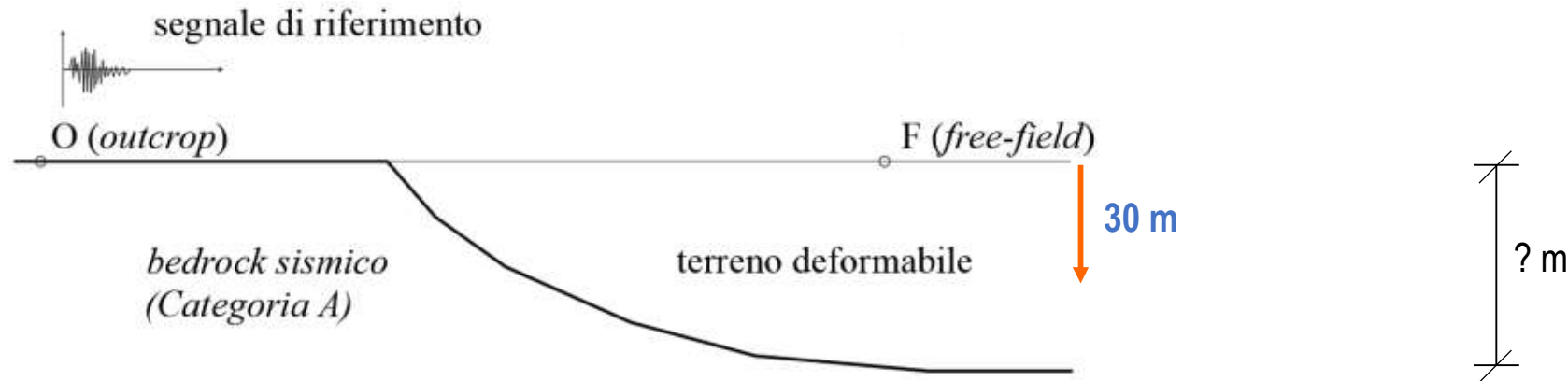


The screenshot shows a software interface with a 'Site Profile' section. The table below is a representation of the data shown in the interface.

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	20	Terreno deformabile	400.00
2	20.00	Half-Space	Bedrock	800.00

# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio



File Edit Tools Window Help

General Settings | Soil Types | Soil Profile | Motion(s) | Output Specification | Compute | Results

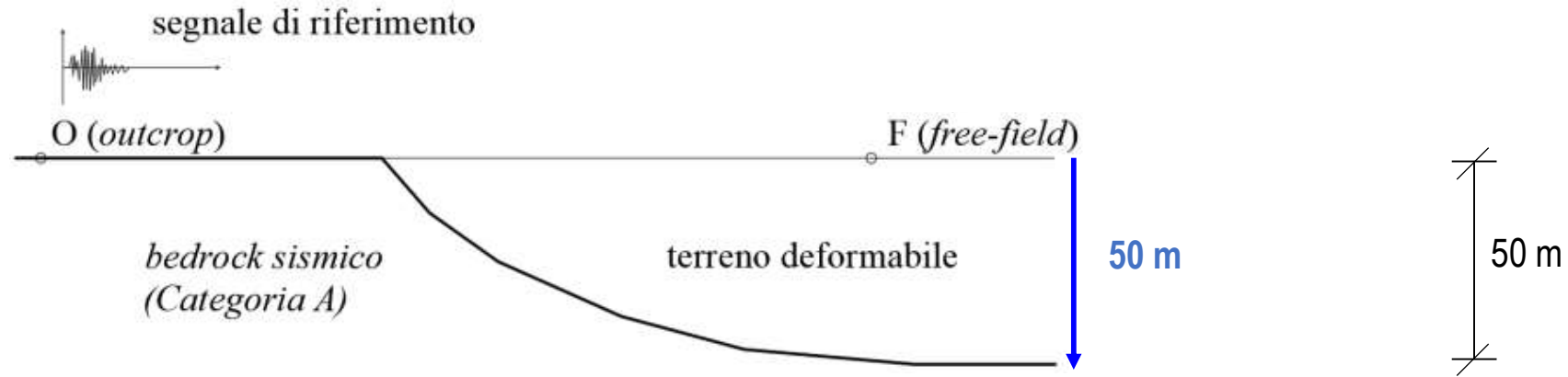
Site Profile

+ Add Insert - Remove

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	<b>30</b>	Terreno deformabile	400.00
2	20.00	Half-Space	Bedrock	800.00

# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio

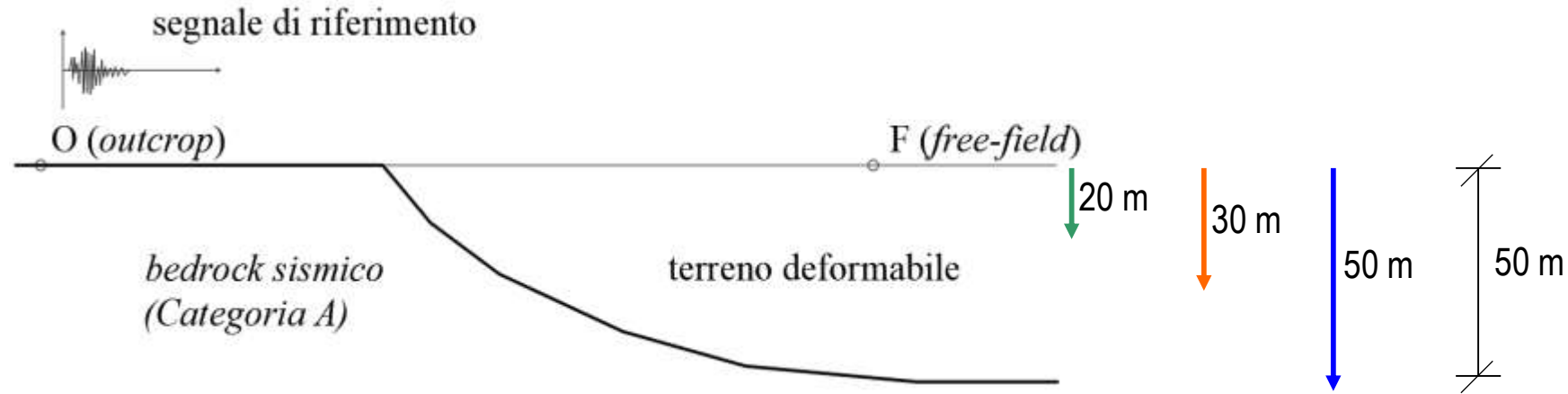


The screenshot shows a software interface with a menu bar (File, Edit, Tools, Window, Help) and a toolbar. Below the toolbar, there are tabs for "General Settings", "Soil Types", "Soil Profile", "Motion(s)", "Output Specification", "Compute", and "Results". The "Soil Profile" tab is active, showing a "Site Profile" section with buttons for "+ Add", "Insert", and "- Remove". Below these buttons is a table with the following data:

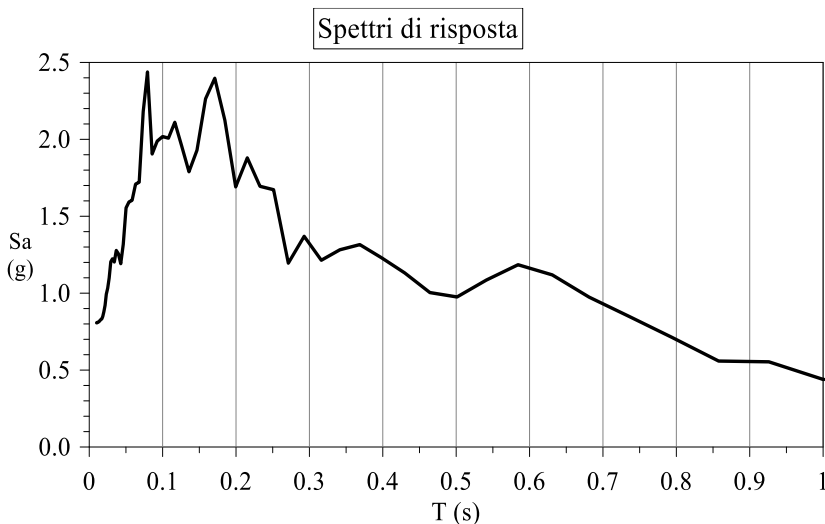
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	50	Terreno deformabile	400.00
2	20.00	Half-Space	Bedrock	800.00

# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio



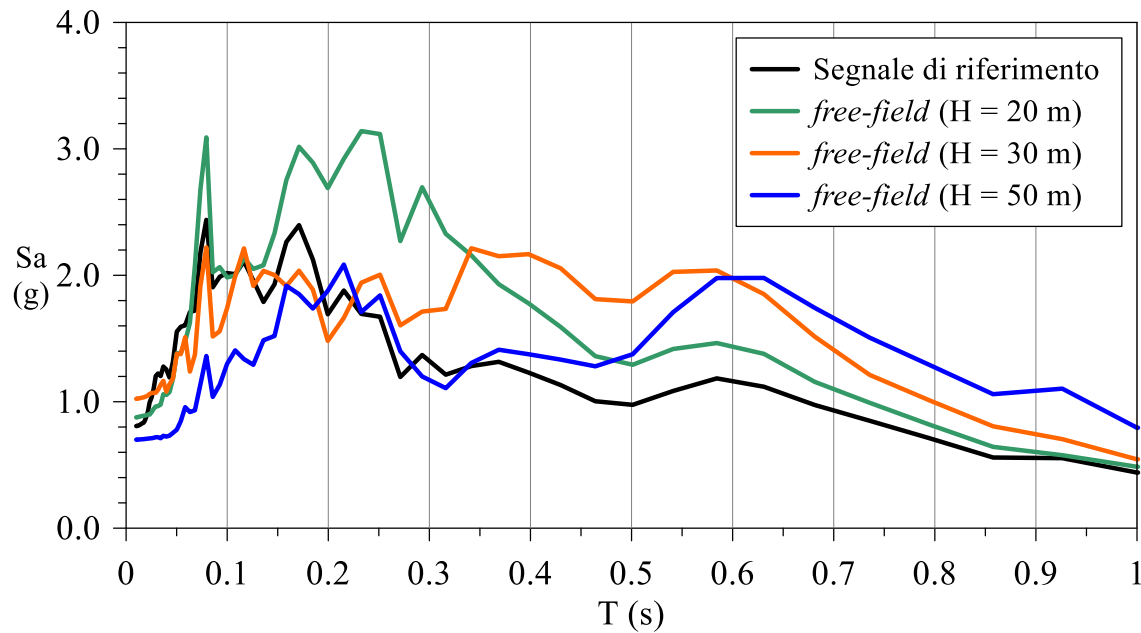
**Segnale di riferimento:** evento Italia Centrale del 30/10/2016; Stazione Savelli (Norcia, PG)



# Effetto della posizione del bedrock sismico nel modello numerico

quale è la previsione che si ottiene quando il modello numerico è basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica del sito oggetto di studio

Spettri di risposta al piano campagna con bedrock sismico alla profondità: **20 m**, **30 m** e **50 m**



Con riferimento a siti caratterizzati da profondità del bedrock sismico maggiore di 30 m, la conoscenza parziale delle reali condizioni di sito (il modello numerico è caratterizzato da una profondità minore rispetto alla reale posizione del bedrock sismico) può determinare la sovrastima dell'amplificazione sismica nell'intervallo di periodo 0.1-0.8 s e una significativa sottostima nell'intervallo di periodo 0.7-1.1 s.

Fattori di amplificazione da modelli numerici con bedrock sismico alla profondità:  
**20 m**, **30 m** e **50 m**

$$AF_{T1-T2} = \frac{\int_{T1}^{T2} Sa_{free-field} dT}{\int_{T1}^{T2} Sa_{riferimento} dT}$$

AF1	AF2	AF3
1.49	1.27	1.12
1.29	1.69	1.37
0.99	1.58	1.83

# Effetto della modellazione stocastica degli spessori degli strati quali sono i modelli numerici e i risultati generati utilizzando l'approccio stocastico



## Impostazioni disponibili nel codice STRATA

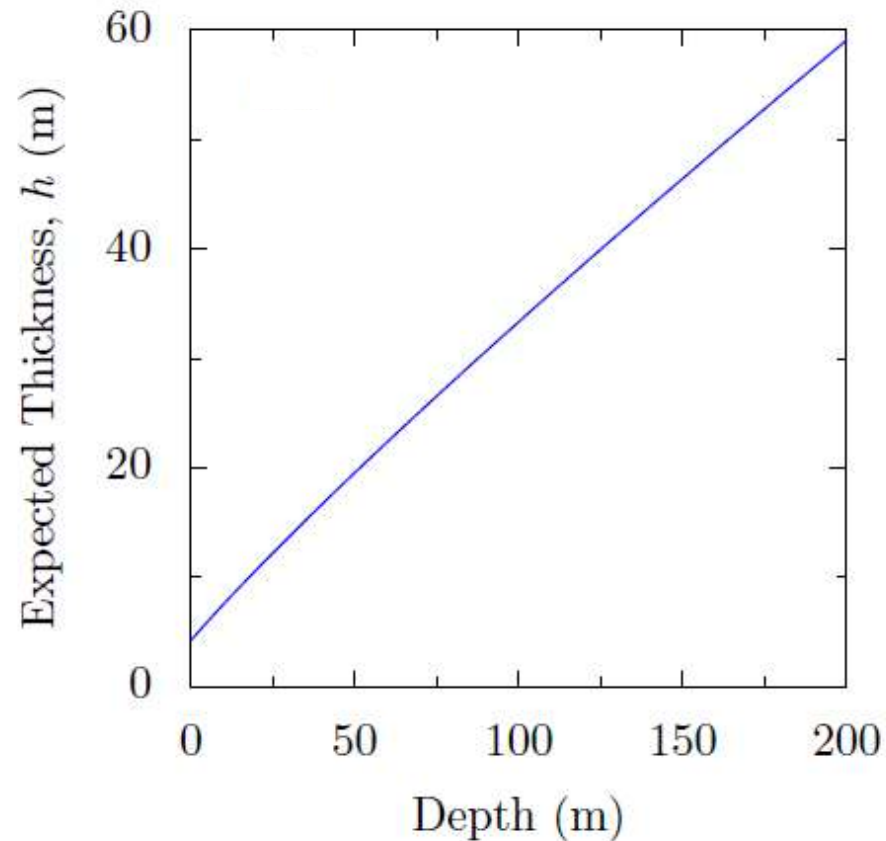
L'opzione **Vary the properties** permette di attivare la generazione stocastica di modelli numerici di sottosuolo secondo l'approccio di Toro (1995).

**Number of realizations** corrisponde al numero di modelli numerici stocastici di sottosuolo che si vuole generare secondo l'approccio di Toro (1995).

L'opzione **Vary the site profile** permette di generare profili di  $V_s$  con la profondità secondo l'approccio di Toro (1995) differenti per  $V_s$  e/o spessore di ogni strato e/o profondità del bedrock sismico.

# Effetto della modellazione stocastica degli spessori degli strati quali sono i modelli numerici e i risultati generati utilizzando l'approccio stocastico

Previsione, secondo l'approccio di [Toro \(1995\)](#), dello spessore dello strato in funzione della sua profondità. In particolare, l'approccio di [Toro \(1995\)](#) prevede che la profondità di ogni strato della successione stratigrafica in esame risulti crescente con la profondità.





# Effetto della modellazione stocastica degli spessori degli strati quali sono i modelli numerici e i risultati generati utilizzando l'approccio stocastico

Il codice STRATA permette di inserire, come dato di input, solo il valore medio atteso dello spessore di ogni strato del modello di sottosuolo. In questo caso, sono stato inseriti 3 strati, denominati Soil Type 1, 2 e 3, di spessore medio rispettivamente pari a 3 m, 5 m e 10 m. **Il codice non permette di inserire un possibile intervallo di variazione, Hmin-Hmax, dello spessore.**

The screenshot shows the STRATA software interface. The 'Soil Profile' tab is selected, displaying a table with the following data:

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	3.00	1	300.00
2	3.00	5.00	2	450.00
3	8.00	10.00	3	600.00
4	18.00	Half-Space	Bedrock	800.00

On the right side, the 'Variation of the Site Profile' panel is visible, showing the 'Toro (1992) Site Variation Model' settings:

- Vary the shear-wave velocity of the layers
- Vary the layer thickness
- Vary the depth to bedrock

Velocity Variation Parameters

Layer Thickness Variation Parameters

Parameters: Default (Toro 1995)

Layer rate model:  $\lambda(d) = a(d + b)^c$

Coefficient (**a**): 1.980

Initial (**b**): 10.860

Exponent (**c**): -0.890

Correlation applied in **meters**

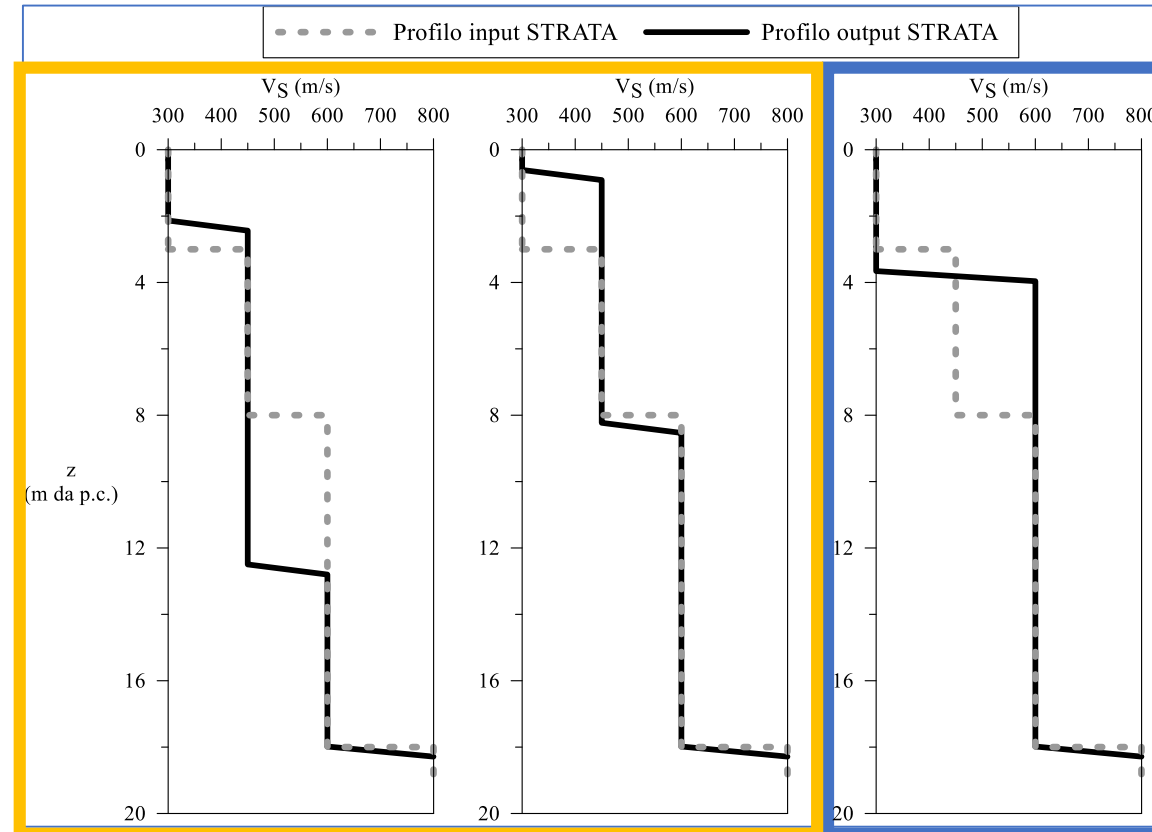
Bedrock Depth Variation Parameters

# Effetto della modellazione stocastica degli spessori degli strati quali sono i modelli numerici e i risultati generati utilizzando l'approccio stocastico

Modellazione stocastica: modelli numerici generati secondo [Toro \(1995\)](#)

Profilo di input implementato  
nel codice STRATA

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	V <sub>s</sub> (m/s)
1	0.00	3.00	1	300.00
2	3.00	5.00	2	450.00
3	8.00	10.00	3	600.00
4	18.00	Half-Space	Bedrock	800.00



Profili di output generati  
dal codice compatibili  
con il profilo di input.

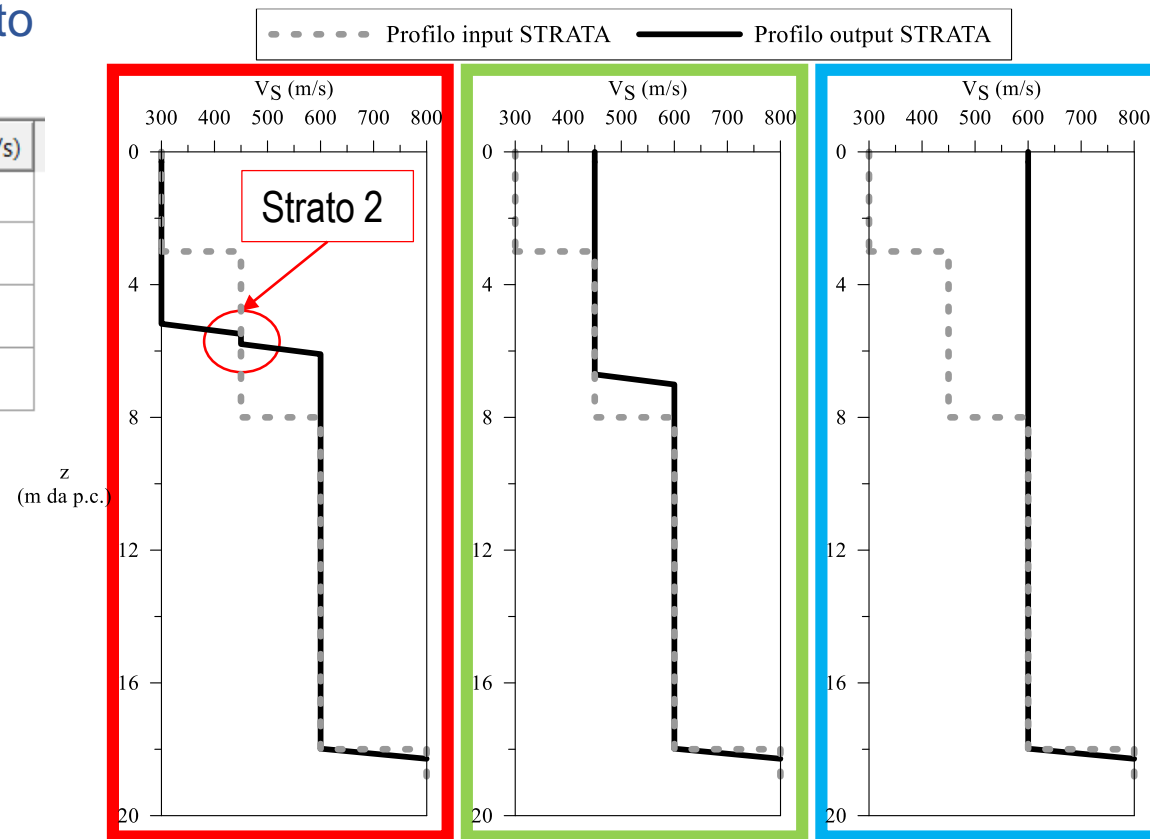
Profilo di output  
generato dal codice nel  
quale non è presente lo  
strato 2 ( $H_{\text{medio}} = 5 \text{ m}$ ,  
 $V_S = 450 \text{ m/s}$ ).

# Effetto della modellazione stocastica degli spessori degli strati quali sono i modelli numerici e i risultati generati utilizzando l'approccio stocastico

Modellazione stocastica: modelli numerici generati secondo Toro (1995)

Profilo di input implementato  
nel codice STRATA

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	Vs (m/s)
1	0.00	3.00	1	300.00
2	3.00	5.00	2	450.00
3	8.00	10.00	3	600.00
4	18.00	Half-Space	Bedrock	800.00



Profilo di output generato dal codice STRATA in cui lo strato 2 ( $H_{\text{medio}} = 5$  m,  $V_S = 450$  m/s) è stato implementato per uno spessore pari a circa 1m.

Profilo di output generato dal codice STRATA in cui non è presente lo strato 1 ( $H_{\text{medio}} = 3$  m,  $V_S = 300$  m/s).

Profilo di output generato dal codice STRATA in cui non sono presenti lo strato 1 ( $H_{\text{medio}} = 3$  m,  $V_S = 300$  m/s) e lo strato 2 ( $H_{\text{medio}} = 5$  m,  $V_S = 450$  m/s).

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

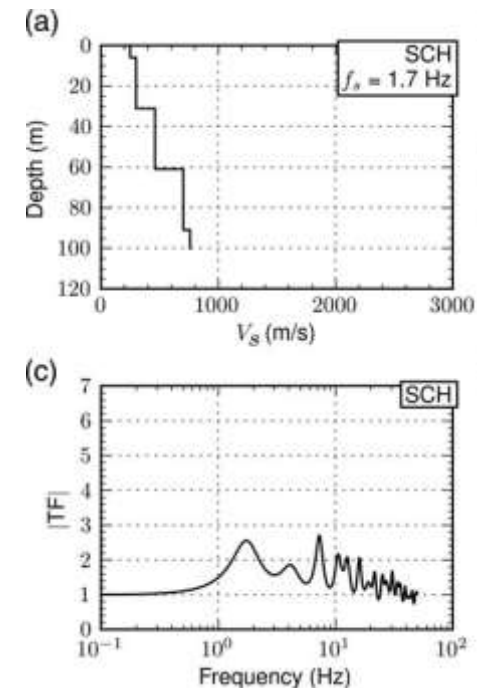
## Sito

Specific site located in the San Fernando Valley of Southern California, namely, **Sylmar County Hospital (SCH)** (Gibbs et al., 1999), is selected for site response analysis (Tab.1). Characteristic of southern California soil sites, **there is not a significant impedance contrast as the profile encounters a shear-wave velocity typical of soft rock ( $\sim 760$  m/s)** (Kottke and Rathje, 2013)

**Table 1.** Geotechnical properties of the site

Layer	Thickness (m)	$V_s$ (m/s)	Unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma'_0$ (atm <sup>a</sup> )	OCR	PI
Layer 1	6	250	18	0.36	1.0	10
Layer 2	25	300	18	2.2	1.0	10
Layer 3	30	460	19	5.6	1.0	10
Layer 4	30	700	22	7.7	1.0	10

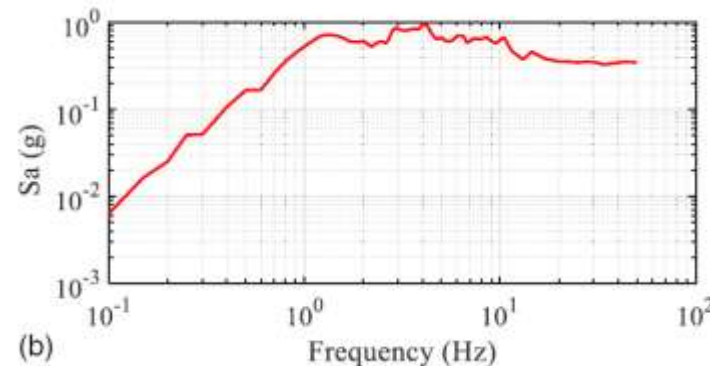
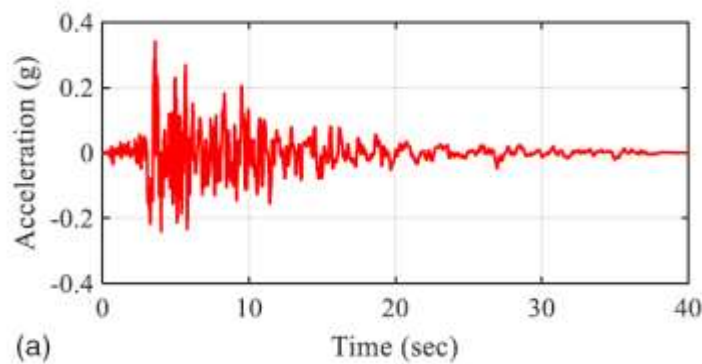
<sup>a</sup>atm = standard atmosphere pressure unit.



# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Input

The time history recorded on January 17th of 1994 during the Northridge earthquake at the Arleta Nordhoff fire station is used for performing the site response analysis. The signal is obtained from the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Ground Motion Database (Ancheta et al. 2012). **The PGA is 0.34 g** and it is applied at the bedrock of the numerical model. This seismic input is representative of strong motion registered for a station close to the seismic source (distance to the fault is 3.9 km), and it is commonly used in many studies (Gibbs et al. 1999; Hussan et al. 2018; Nguyen et al. 2014; Tran and Kim 2019).



Motion(s): Time History definita in tutte le simulazioni in «outcrop (2A)»

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Tabella sinottica dei modelli studiati

Bed=Bedrock sismico

Soil=Depositi deformabili sovrastanti il bedrock sismico

V= $V_s$  variabili senza range di limitazione (modello **BedV\_SoilV** con la più alta variabilità legata a una scarsa conoscenza del sito)

R= $V_s$  variabili in un range di +/- 50 m/s

F= $V_s$  fissate (**BedF\_SoilF** «modello deterministico», utilizzato anche come riferimento)

General Settings   Soil Types   Soil Profile   Motion(s)   Output Specification   Compute   Results							
Site Profile							
+ Add   Insert   - Remove							
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	$V_s$ (m/s)	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)	Varied
1	0.00	10.00	A	400.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
2	10.00	Half-Space	Bedrock	800.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/>

V

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Tabella sinottica dei modelli studiati

Bed=Bedrock sismico

Soil=Depositi deformabili sovrastanti il bedrock sismico

V= $V_s$  variabili senza range di limitazione (modello **BedV\_SoilV** con la più alta variabilità legata a una scarsa conoscenza del sito)

R= $V_s$  variabili in un range di +/- 50 m/s

F= $V_s$  fissate (**BedF\_SoilF** «modello deterministico», utilizzato anche come riferimento)

	General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Site Profile							
+ Add    Insert    - Remove							
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	$V_s$ (m/s)	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)	Varied
1	0.00	10.00	A	400.00	<input checked="" type="checkbox"/> 350.00	<input checked="" type="checkbox"/> 450.00	<input type="checkbox"/>
2	10.00	Half-Space	Bedrock	800.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/>

R

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Tabella sinottica dei modelli studiati

Bed=Bedrock sismico

Soil=Depositi deformabili sovrastanti il bedrock sismico

V= $V_s$  variabili senza range di limitazione (modello **BedV\_SoilV** con la più alta variabilità legata a una scarsa conoscenza del sito)

R= $V_s$  variabili in un range di +/- 50 m/s

F= $V_s$  fissate (**BedF\_SoilF** «modello deterministico», utilizzato anche come riferimento)

General Settings	Soil Types	Soil Profile	Motion(s)	Output Specification	Compute	Results
Site Profile						
+ Add    Insert    - Remove						
	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	$V_s$ (m/s)		
1	0.00	10.00	A	400.00		
2	10.00	Half-Space	Bedrock	800.00		

F



# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Tabella sinottica dei modelli studiati

Bed=Bedrock sismico

Soil=Depositi deformabili sovrastanti il bedrock sismico

V= $V_s$  variabili senza range di limitazione (modello **BedV\_SoilV** con la più alta variabilità legata a una scarsa conoscenza del sito)

R= $V_s$  variabili in un range di +/- 50 m/s

F= $V_s$  fissate (**BedF\_SoilF** «modello deterministico», utilizzato anche come riferimento)

		SOIL (Soil)		
		FIXED (F)	RANGE (R)	VARIABLE (V)
BEDROCK (Bed)	FIXED (F)	BedF_SoilF	BedF_SoilR	BedF_SoilV
	RANGE (R)	BedR_SoilF	BedR_SoilR	BedR_SoilV
	VARIABLE (V)	BedV_SoilF	BedV_SoilR	BedV_SoilV

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

Altre impostazioni dei modelli:

- unità di peso fissate
- spessori strati fissati
- curve di riduzione di  $G$  e di incremento di  $D$  variabili secondo l'approccio proposto da [Darendeli \(2001\)](#)

Type of Analysis

Method: Equivalent Linear (EOL)

Approach: Time Series

Vary the properties

Site Property Variation

Number of realizations: 100

Only use profiles that converge

Vary the nonlinear properties

- shear modulus reduction curve
- damping ratio curve
- damping of the bedrock

Vary the site profile

- shear-wave velocity
- layer thickness
- depth to bedrock

Specify seed number 12

Calculation Parameters

Error tolerance: 2.0 %

Maximum number of iterations: 10

Effective strain ratio: 0.65

Layer Discretization

Maximum frequency: 20 Hz

Wavelength fraction: 0.20

Disable auto-discretization

Variation of the Site Profile

**Toro (1992) Site Variation Model**

Vary the shear-wave velocity of the layers

Vary the layer thickness

Vary the depth to bedrock

Velocity Variation Parameters

Layer specific standard deviation

Distribution: Log Normal

Standard deviation: USGS C, 180 to 360 m/s

0.310

Correlation model: USGS C, 180 to 360 m/s

Correlation Parameters

Correl. coeff. at surface ( $\rho_0$ ): 0.990

Correl. coeff. at 200 m ( $\rho_{200}$ ): 0.980

Change in correl. with depth ( $\Delta$ ): 3.900

Depth intercept ( $d_0$ ): 0.00 m

Exponent ( $b$ ): 0.3440

Correlation applied in meters

Layer Thickness Variation Parameters

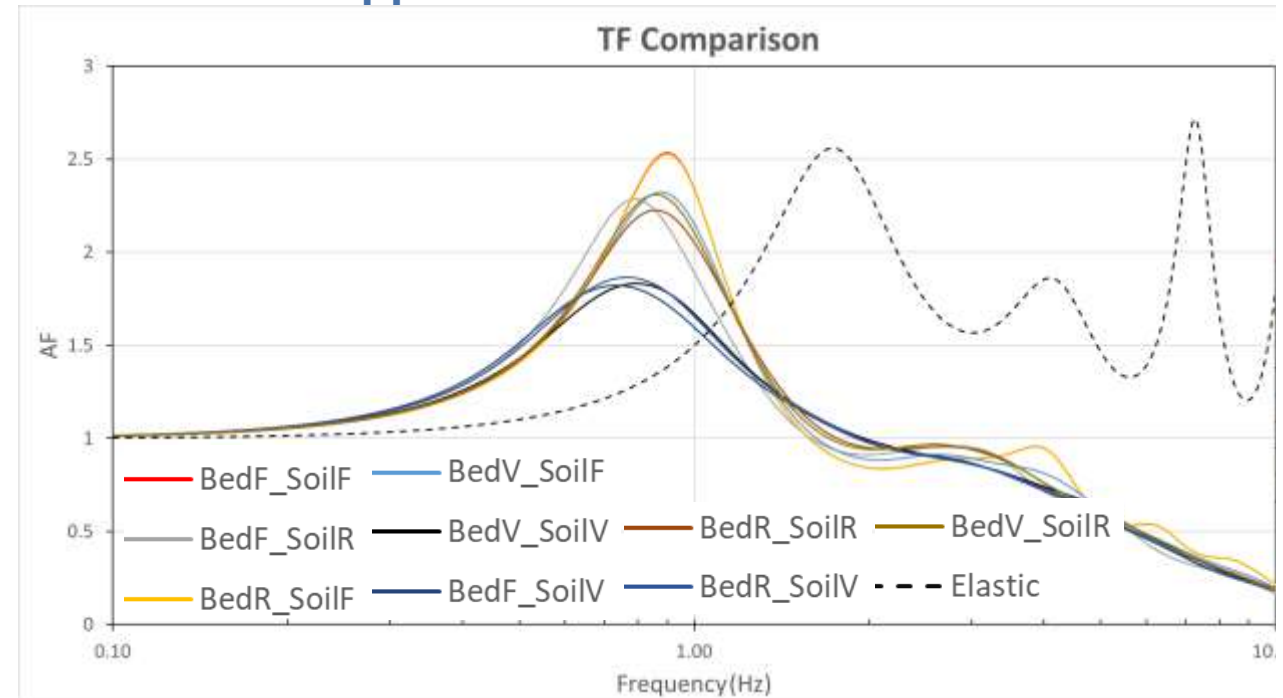
Bedrock Depth Variation Parameters

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ )

quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Funzioni di amplificazione medie (su 100 realizzazioni) free-field/outcrop\_(2A)

Tutti i casi studiati, mostrano una risposta confrontabile per valori di  $f > 2$  Hz ( $T < 0.5$  s) a causa della elevata profondità del bedrock sismico. In particolare, a causa della non linearità della risposta meccanica dei terreni, la frequenza fondamentale risulta inferiore rispetto al caso di comportamento lineare. Inoltre, i casi in cui i valori di  $V_s$  hanno maggiore variabilità (SoilV) sono quelli caratterizzati dal picco più basso della funzione di amplificazione.



AF											
Max_Fr (Hz)	BedF_SoilF	BedF_SoilR	BedR_SoilF	BedV_SoilF	BedV_SoilV	BedF_SoilV	BedR_SoilR	BedR_SoilV	BedV_SoilR	Elastic	T (s)
0.72						1.82					1.39
0.73											1.37
0.77									1.86		1.29
0.79		2.29									1.26
0.81					1.83						1.23
0.86							2.23		2.30		1.17
0.87											1.15
0.88				2.32							1.13
0.89	2.53		2.53								1.12
1.76										2.55	0.57

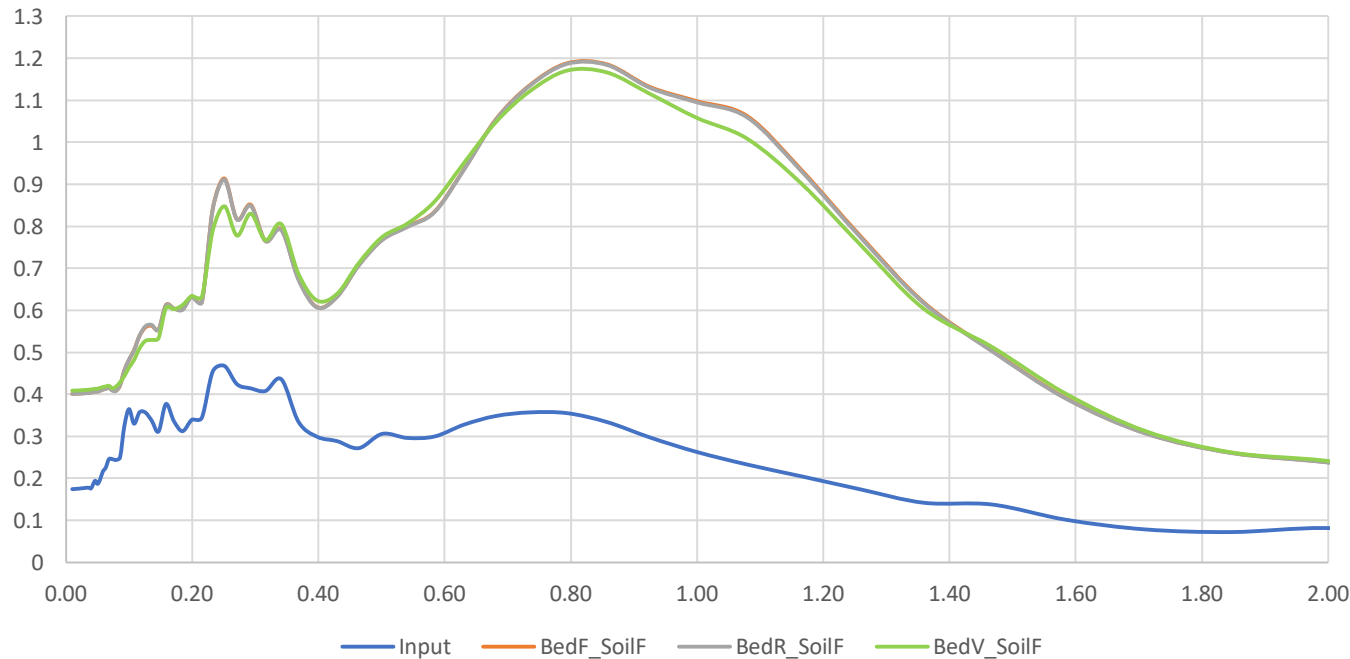
# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Realizzazioni variando solo le $V_s$ del bedrock

Si noti come BedR\_SoilF (bedrock con  $V_s=760$  m/s +/- 50) BedF\_SoilF sono praticamente indistinguibili

		SOIL (Soil)		
		FIXED (F)	RANGE (R)	VARIABLE (V)
BEDROCK (Bed)	FIXED (F)	BedF_SoilF	BedF_SoilR	BedF_SoilV
	RANGE (R)	BedR_SoilF	BedR_SoilR	BedR_SoilV
	VARIABLE (V)	BedV_SoilF	BedV_SoilR	BedV_SoilV

Bedrock Comparison



	BedF_SoilF	BedV_SoilF	BedR_SoilF
Profondità	92.35 m	92.35 m	92.35 m
$V_s$ max	-	1533.235	810
$V_s$ min	-	700	710
$V_s$ median	760 m/s	802 m/s	758 m/s

	AF1	AF2	AF3	AF_PGA
BedV_SoilF	1.83	2.77	3.59	2.35
BedR_SoilF	1.86	2.75	3.67	2.30
BedF_SoilF	1.86	2.75	3.68	2.30

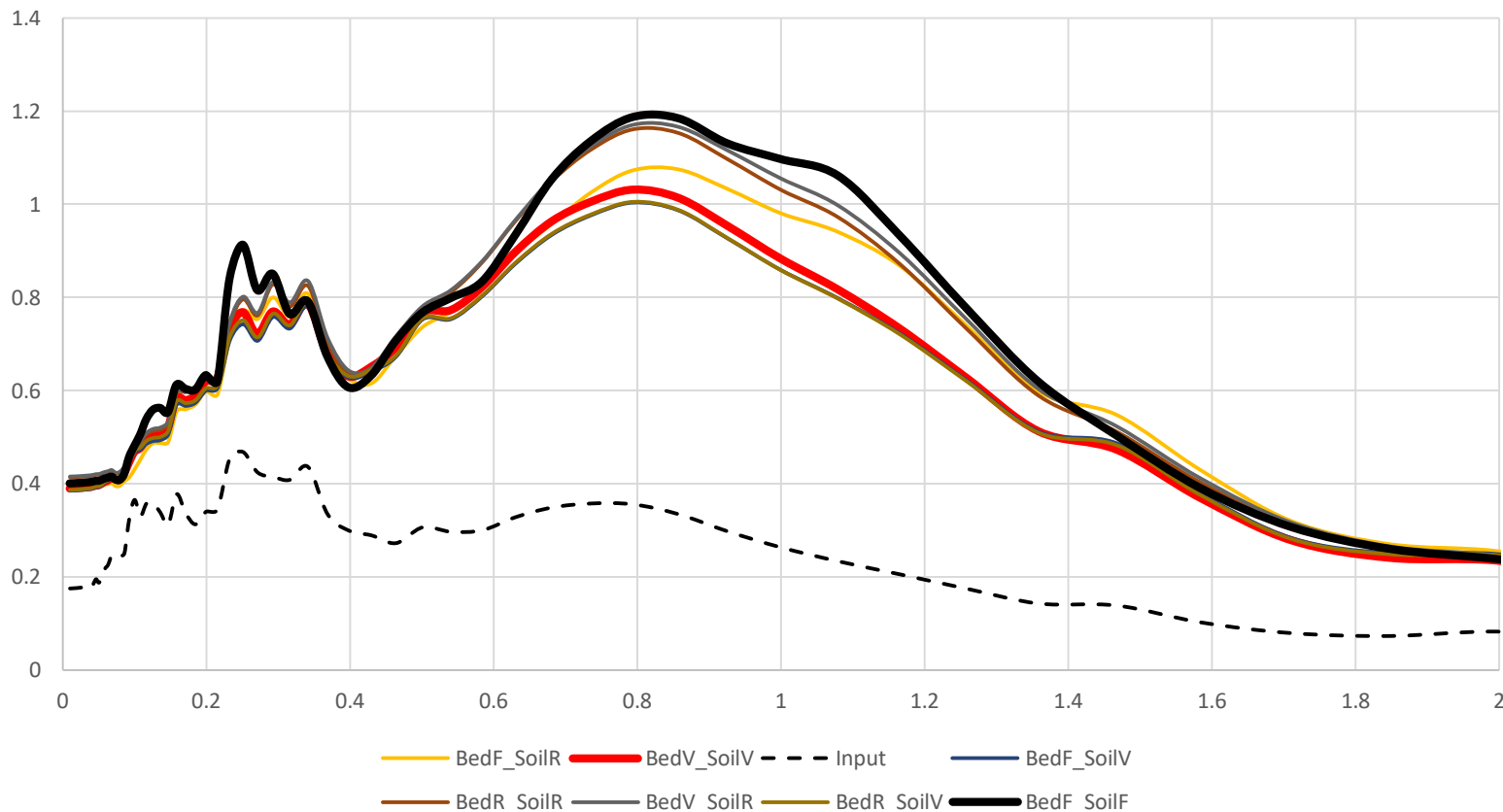
# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

Tutti gli altri casi della tabella

		SOIL (Soil)		
		FIXED (F)	RANGE (R)	VARIABLE (V)
BEDROCK (Bed)	FIXED (F)	BedF_SoilF	BedF_SoilR	BedF_SoilV
	RANGE (R)	BedR_SoilF	BedR_SoilR	BedR_SoilV
	VARIABLE (V)	BedV_SoilF	BedV_SoilR	BedV_SoilV

Response Spectrum

BedF\_SoilF  
deterministico  
(nessuna variabilità  
delle  $V_s$ , spettro di  
risposta nero)  
BedV\_SoilV  
massima variabilità  
(spettro di risposta  
rosso)



# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio (Vs) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## AF di tutti i modelli

		SOIL (Soil)		
		FIXED (F)	RANGE (R)	VARIABLE (V)
BEDROCK (Bed)	FIXED (F)	BedF_SoilF	BedF_SoilR	BedF_SoilV
	RANGE (R)	BedR_SoilF	BedR_SoilR	BedR_SoilV
	VARIABLE (V)	BedV_SoilF	BedV_SoilR	BedV_SoilV

Model	PGA
BedF_SoilF	0.39
BedF_SoilR	0.39
BedV_SoilV	0.41
BedV_SoilF	0.40
BedR_SoilF	0.39
BedF_SoilV	0.41
BedR_SoilR	0.42
BedV_SoilR	0.39
BedR_SoilV	0.40
Input	0.17

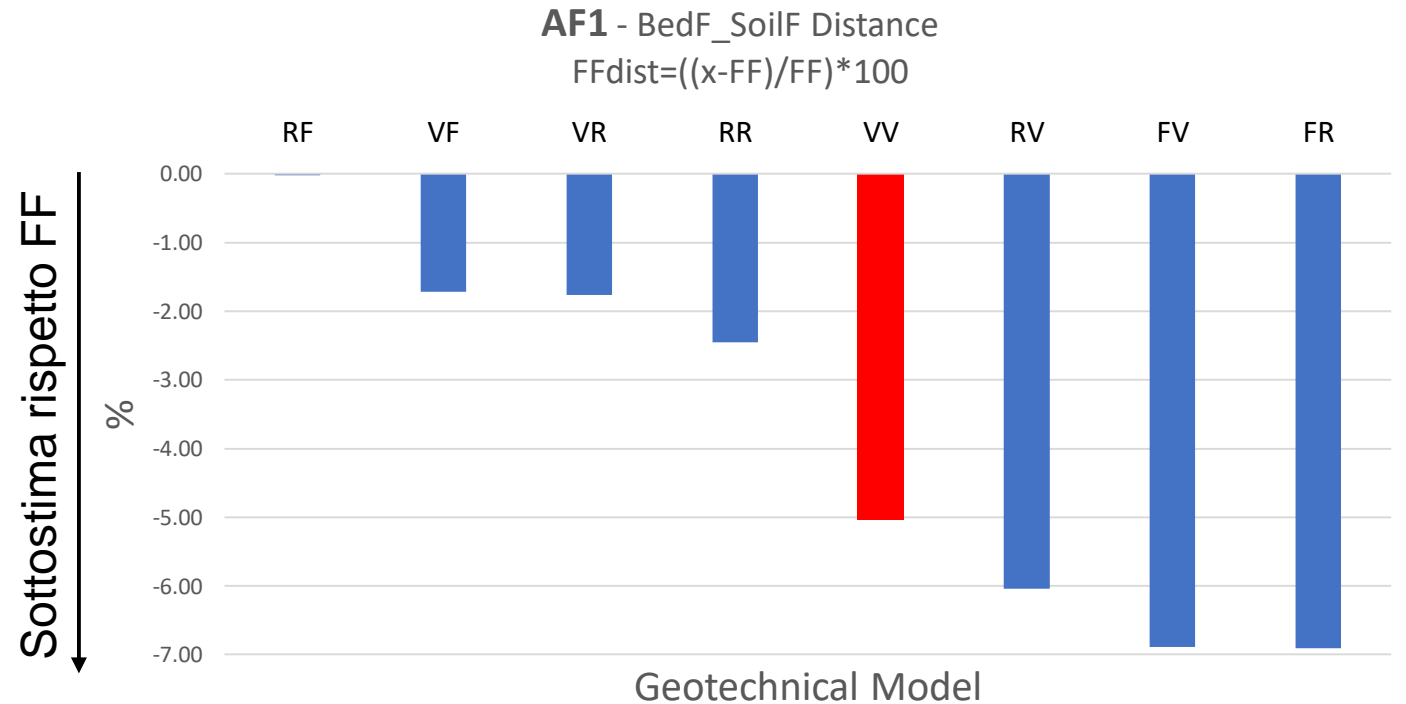
	AF1	AF2	AF3	AF_PGA
BedF_SoilR	1.73	2.61	3.33	2.23
BedV_SoilV	1.77	2.62	3.09	2.24
BedV_SoilF	1.83	2.77	3.59	2.35
BedR_SoilF	1.86	2.75	3.67	2.30
BedF_SoilV	1.73	2.55	3.02	2.21
BedR_SoilR	1.82	2.78	3.53	2.37
BedV_SoilR	1.83	2.73	3.59	2.38
BedR_SoilV	1.75	2.56	3.02	2.22
BedF_SoilF	1.86	2.75	3.68	2.30

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

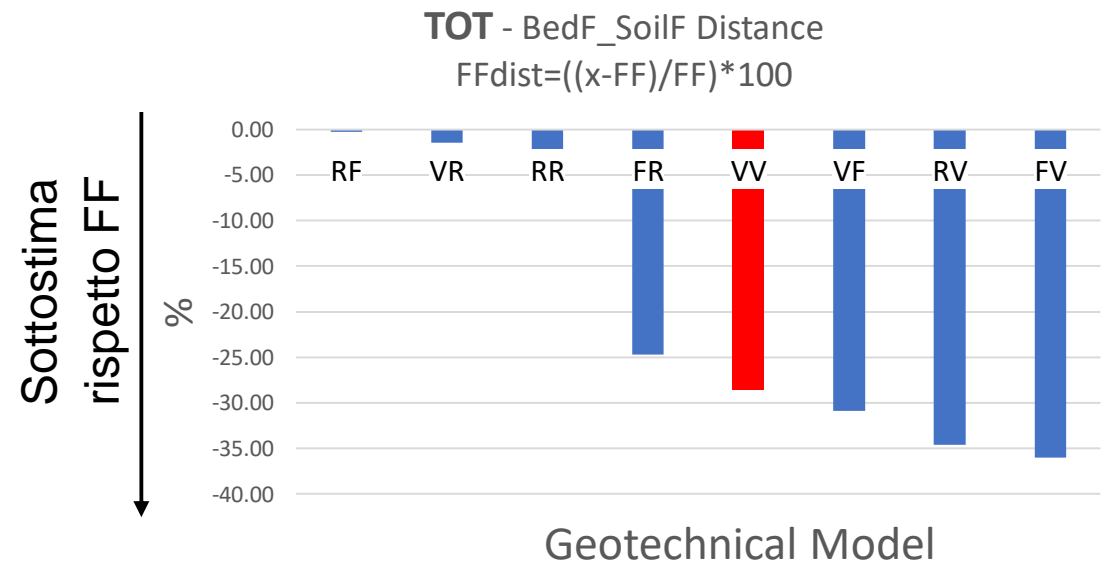
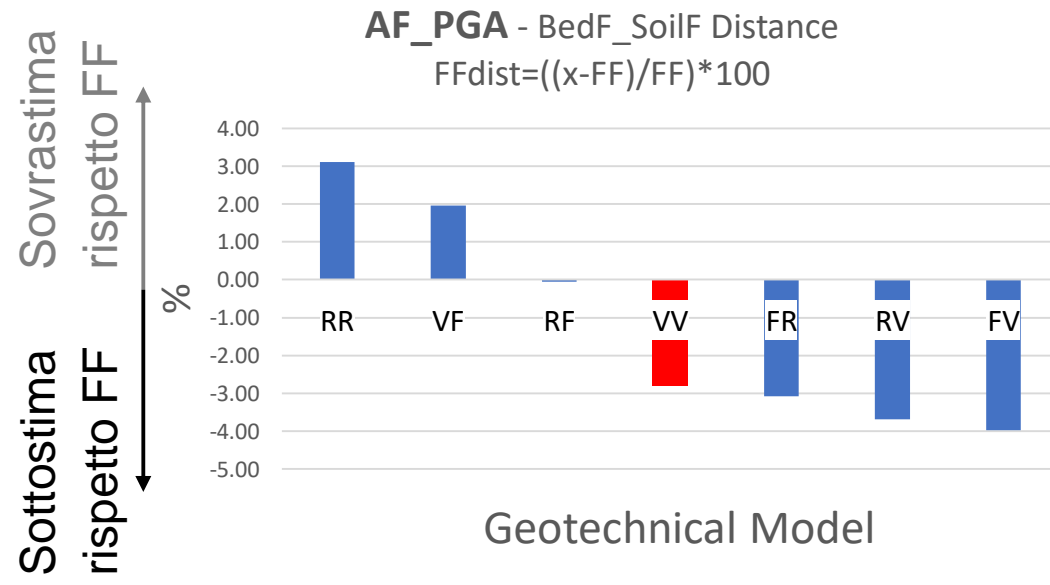
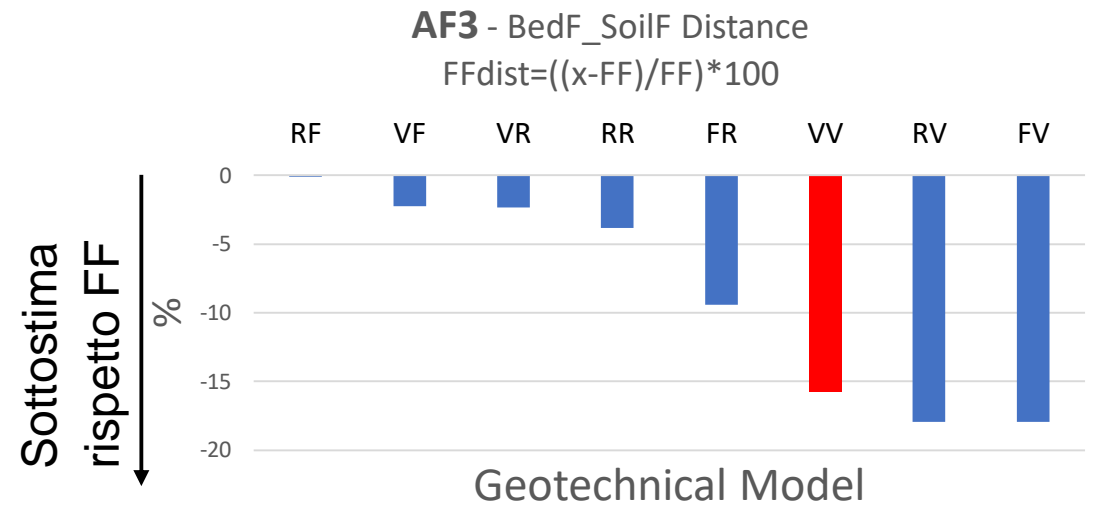
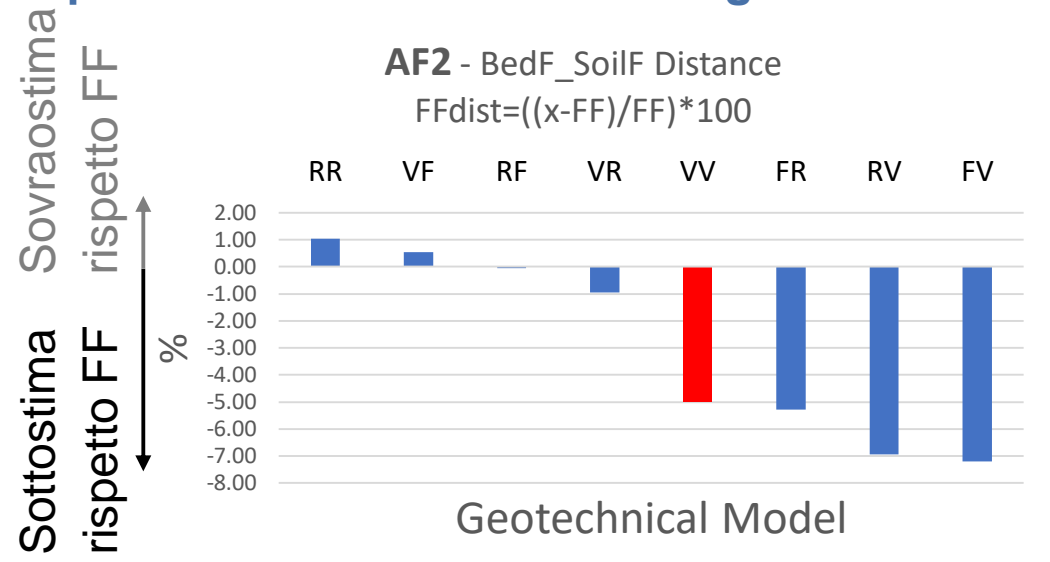
Distanza tra il modello BedF\_SoilF e gli altri modelli  
(calcolata con gli AF)

$$Dist (AF) = ( (MODEL\_X - BedF\_SoilF) / BedF\_SoilF ) * 100$$

Il modello FV è quasi sempre il più distante  
dal modello deterministico FF



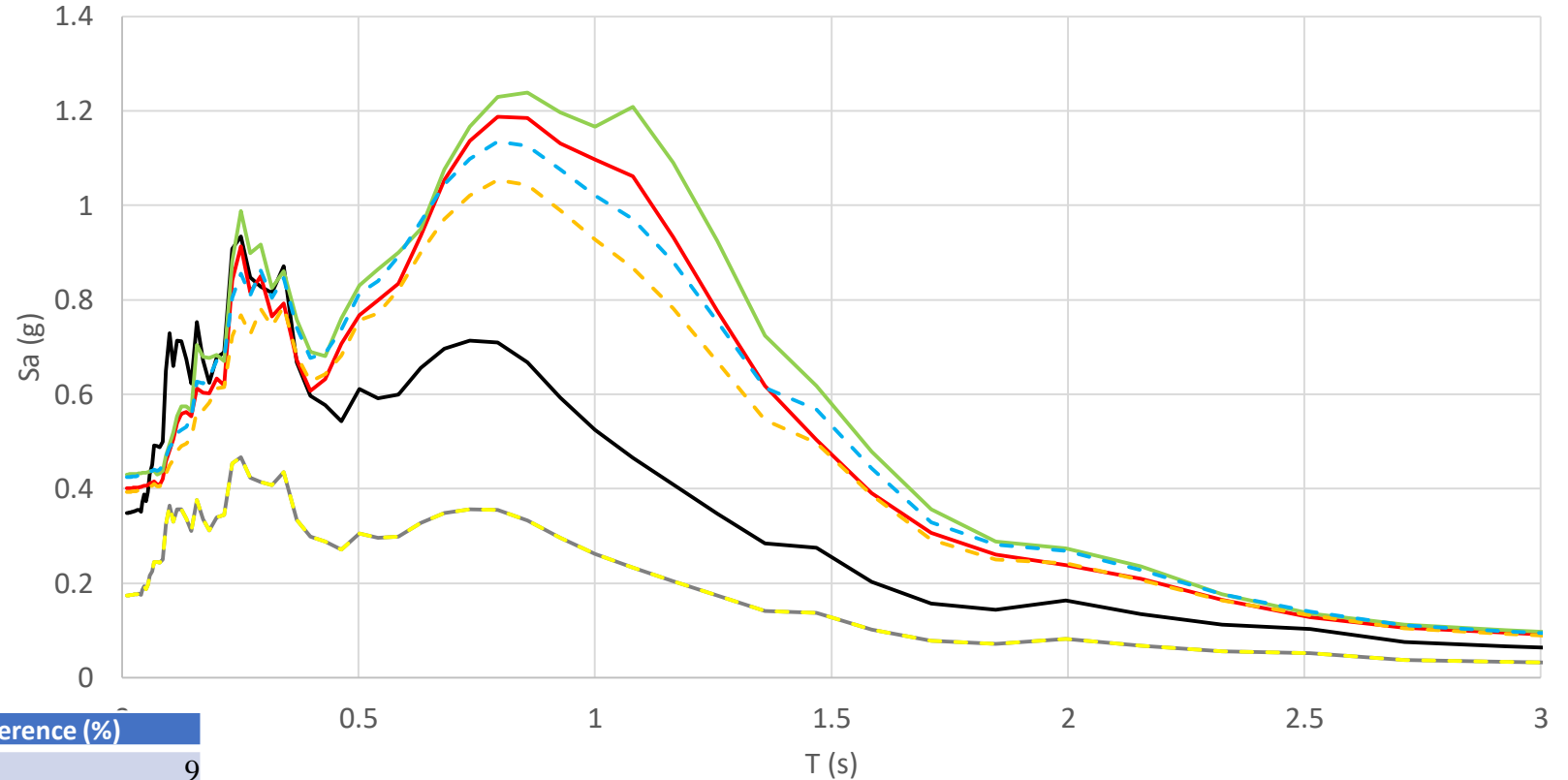
# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico





# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

**Confronto  $V_{S\_bedrock}$  760 m/s  
versus 1200 m/s.** In questo caso,  
fissando il profilo di  $V_s$  del terreno  
deformabile, gli spettri in free-field  
dipendono dal valore medio di  
 $V_{S\_bedrock}$ .



— riferimento  
 — inside\_760  
 — FF free-field\_760  
 — VV free-field\_1200  
 — inside\_1200  
 — FF free-field\_1200  
 — VV free-field\_760

	1200 Model	760 Model	Difference (%)
AF1_FF	1.04	0.95	9
AF2_FF	1.42	1.35	5
AF3_FF	1.80	1.71	5
AFPGA_FF	1.24	1.15	7
AF1_VV	0.99	0.91	9
AF2_VV	1.38	1.28	8
AF3_VV	1.63	1.50	9
AFPGA_VV	1.22	1.13	8

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Influenza della SD sulle $V_s$

The screenshot displays the 'Site Profile' configuration window. The main table lists five soil layers with their respective properties:

	Depth (m)	Thickness (m)	Soil Type	$V_s$ (m/s)	Minimum (m/s)	Maximum (m/s)	Varied
1	0.00	6.00	L1	250.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
2	6.00	25.00	L2	300.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
3	31.00	30.00	L3	460.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
4	61.00	30.00	L4	700.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input checked="" type="checkbox"/>
5	91.00	Half-Space	Bedrock	760.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/> 0.00	<input type="checkbox"/>

The right-hand panel is titled 'Variation of the Site Profile' and includes the 'Toro (1992) Site Variation Model' section. The 'Layer specific standard deviation' section is highlighted with a blue box and contains the following settings:

- Layer specific standard deviation
- Distribution: Log Normal
- Standard deviation: Custom
- Standard deviation value: 0.200
- Correlation model: Custom

The 'Correlation Parameters' section includes the following settings:

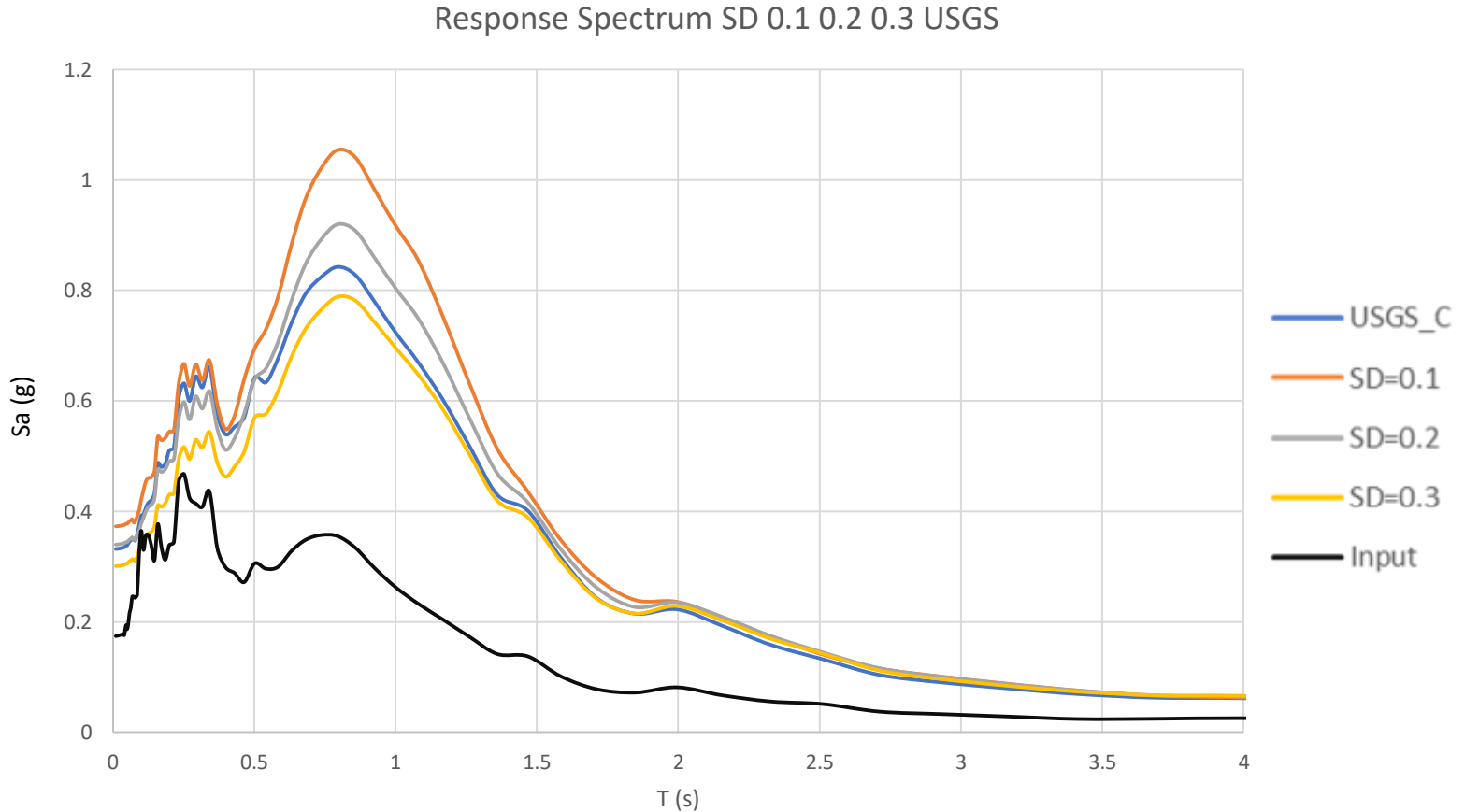
- Correl. coeff. at surface ( $\rho_0$ ): 0.990
- Correl. coeff. at 200 m ( $\rho_{200}$ ): 0.980
- Change in correl. with depth (A): 3.900
- Depth intercept ( $d_0$ ): 0.00 m
- Exponent (b): 0.3440
- Correlation applied in meters

I calcoli sono stati impostati con 4 SD  
a distribuzione log Normale  
0.1, 0.2., 0.3, USGS\_C

# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Influenza della SD sulle $V_s$

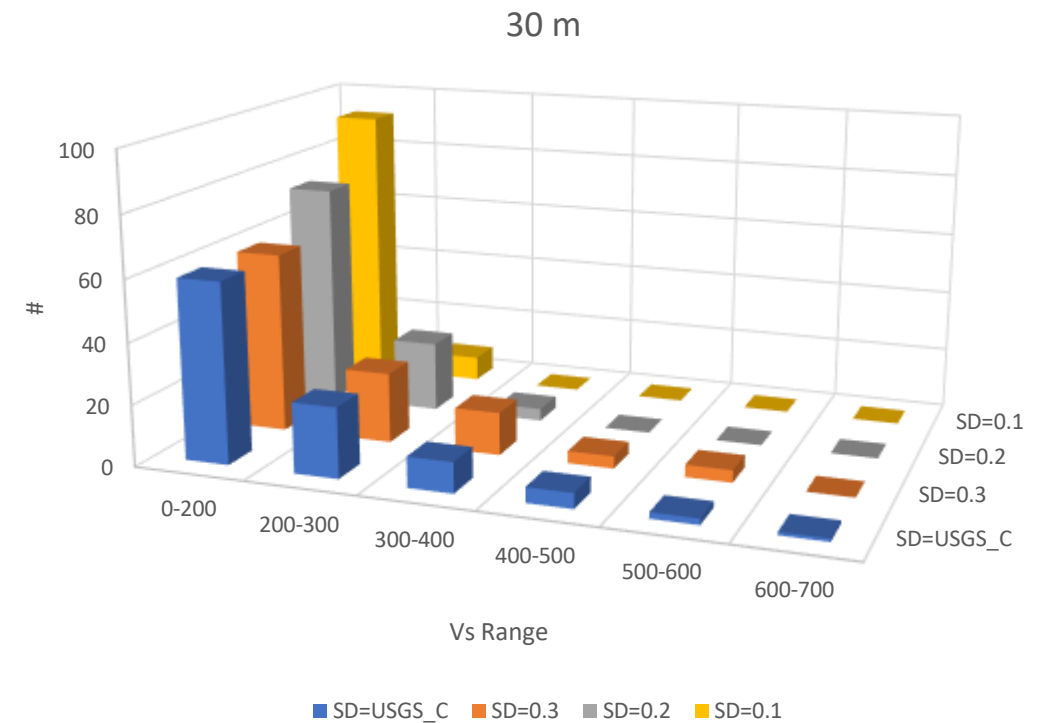
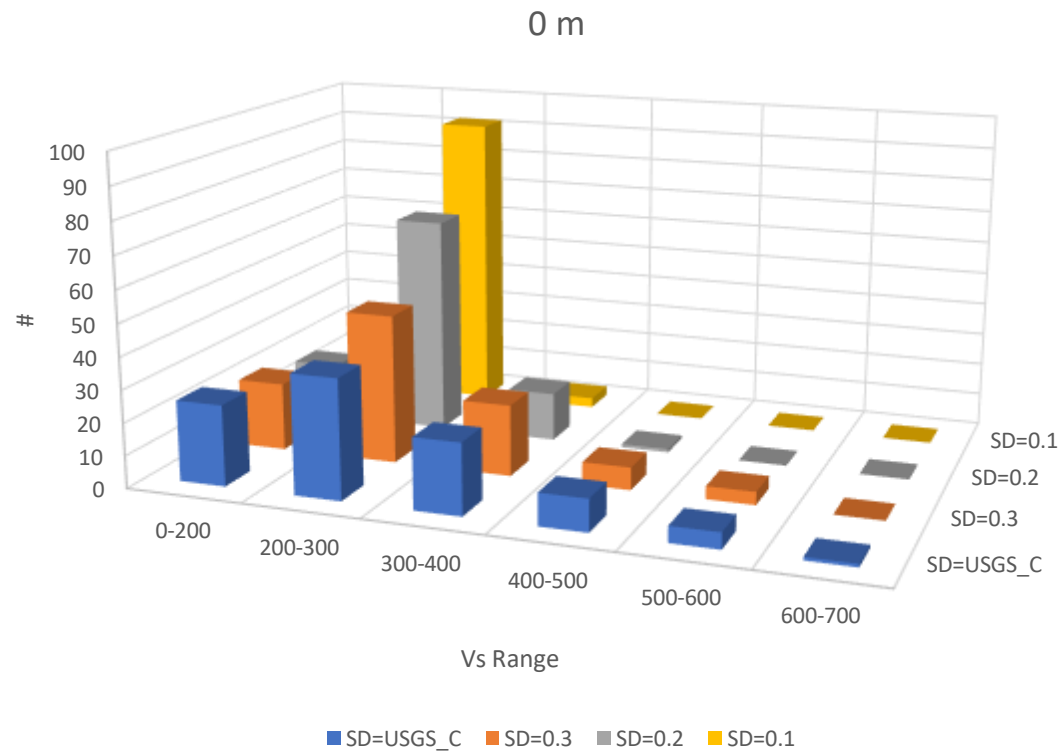
Maggiore è la SD maggiore è la dispersione dei valori di  $V_s$  intorno al valore medio. Quindi, aumentano i casi generati dal codice STRATA in cui si ha un minore contrasto di rigidità (minore amplificazione) oppure un maggiore contrasto di impedenza (maggiore dissipazione dovuta alla elevata intensità del segnale di input). Tale condizione fa sì che lo spettro medio definito per  $SD = 0.3$  sia caratterizzato da valori di picco inferiori rispetto ai casi caratterizzati da  $SD < 0.3$ .



# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Influenza della SD sulle $V_s$

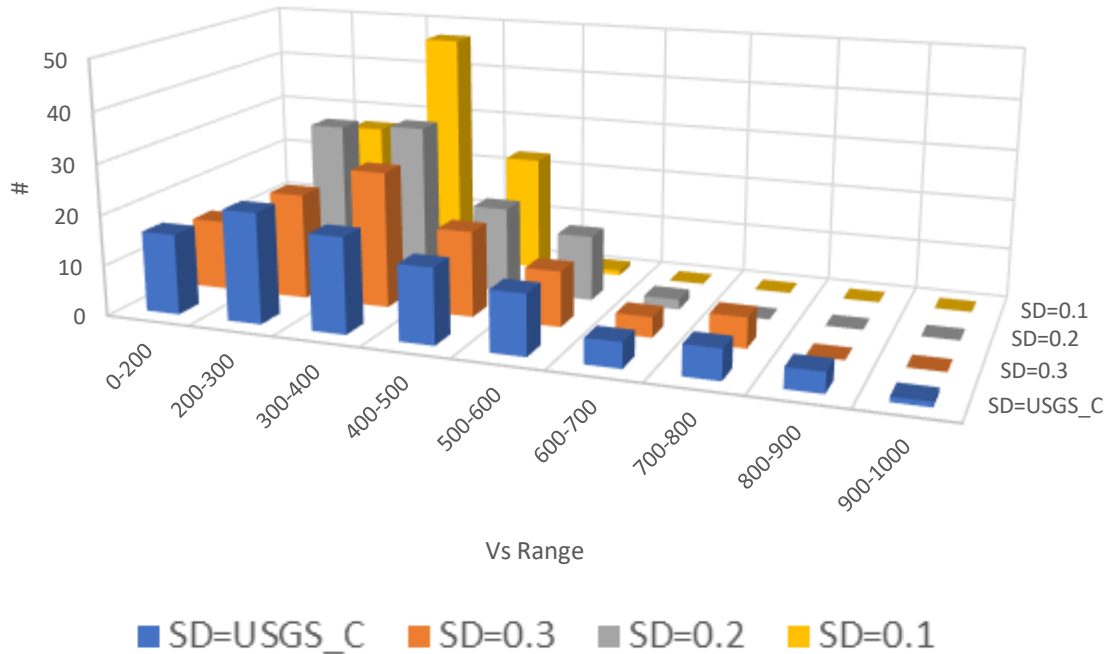
A varie profondità (0 m, 30 m, 60 m, 90 m), si mostra per ogni SD il numero di valori di  $V_s$  (per categorie) utilizzati nelle realizzazioni. È interessante osservare che maggiore è il valore di SD maggiore è la dispersione della distribuzione di  $V_s$  intorno al valore medio.



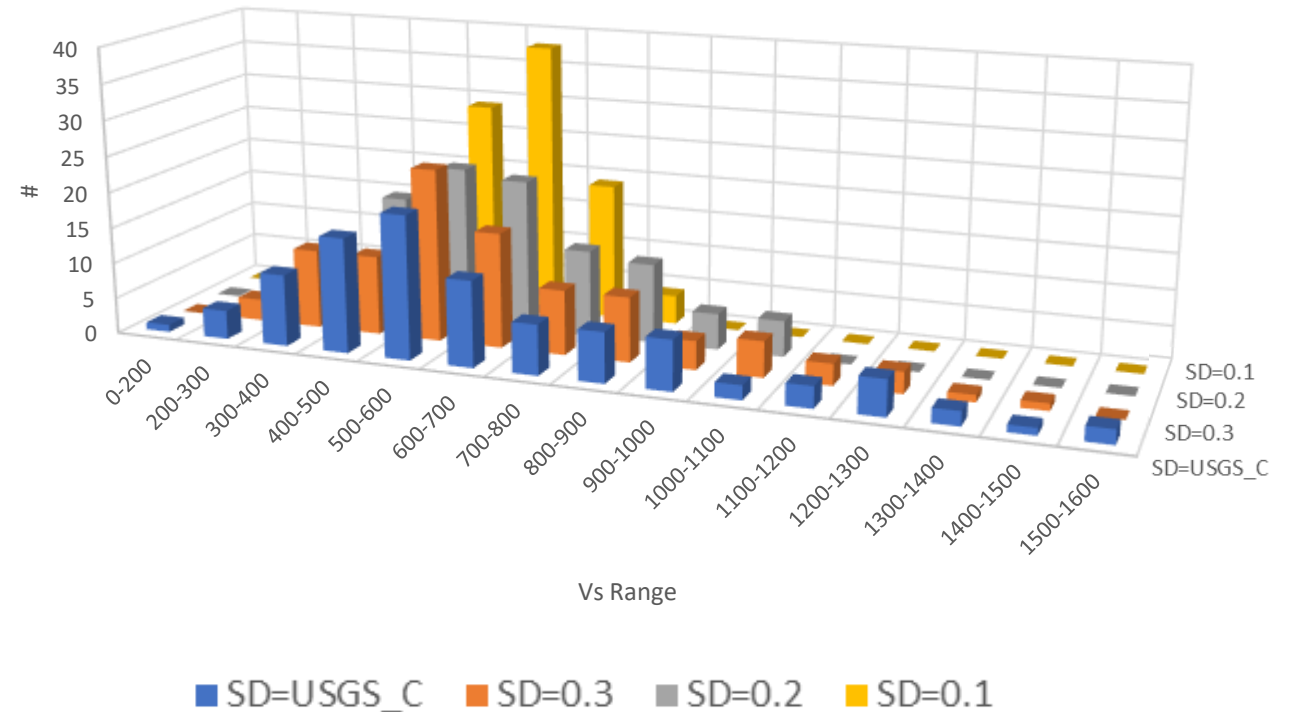
# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

## Influenza della SD sulle $V_s$

60 m



90 m



# Effetto della variabilità del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ )

quali sono i modelli numerici generati e i risultati utilizzando l'approccio stocastico

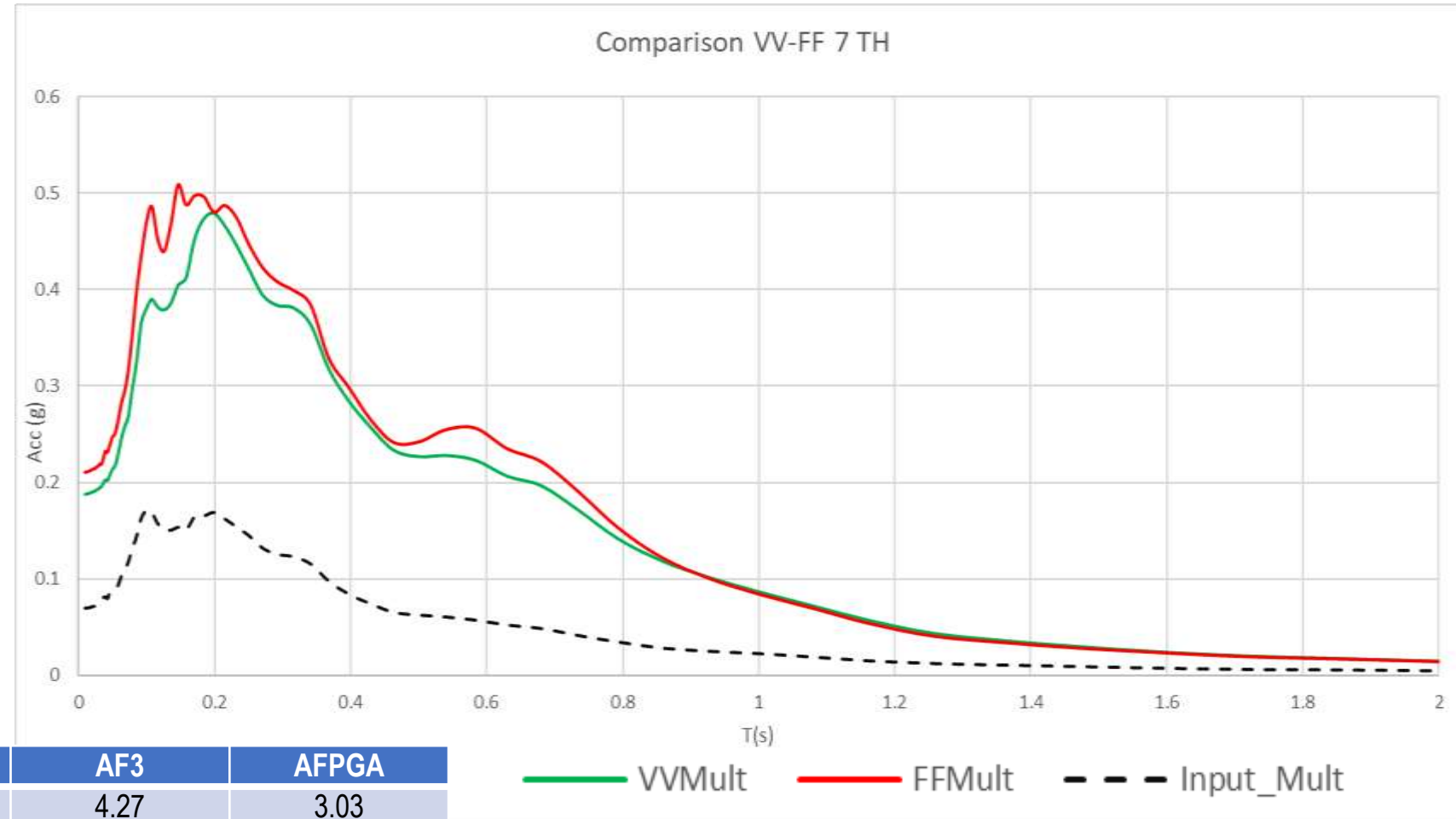
Confronto tra il modello BedF-SoilF il modello BedV\_SoilV utilizzando 7 accelerogrammi selezionati da ITACA in stazioni RAN di Categoria di sottosuolo A

Il numero di realizzazione è

BedF\_SoilF = 7

BedV\_SoilV= 700

L'utilizzo di 7 segnali permette di ridurre le differenze tra i diversi approcci utilizzati per la generazione dei modelli numerici di sottosuolo (deterministico BedF\_SoilF e stocastico-BedV\_SoilV). Infatti, gli spettri medi in superficie risultano confrontabili tra di loro.



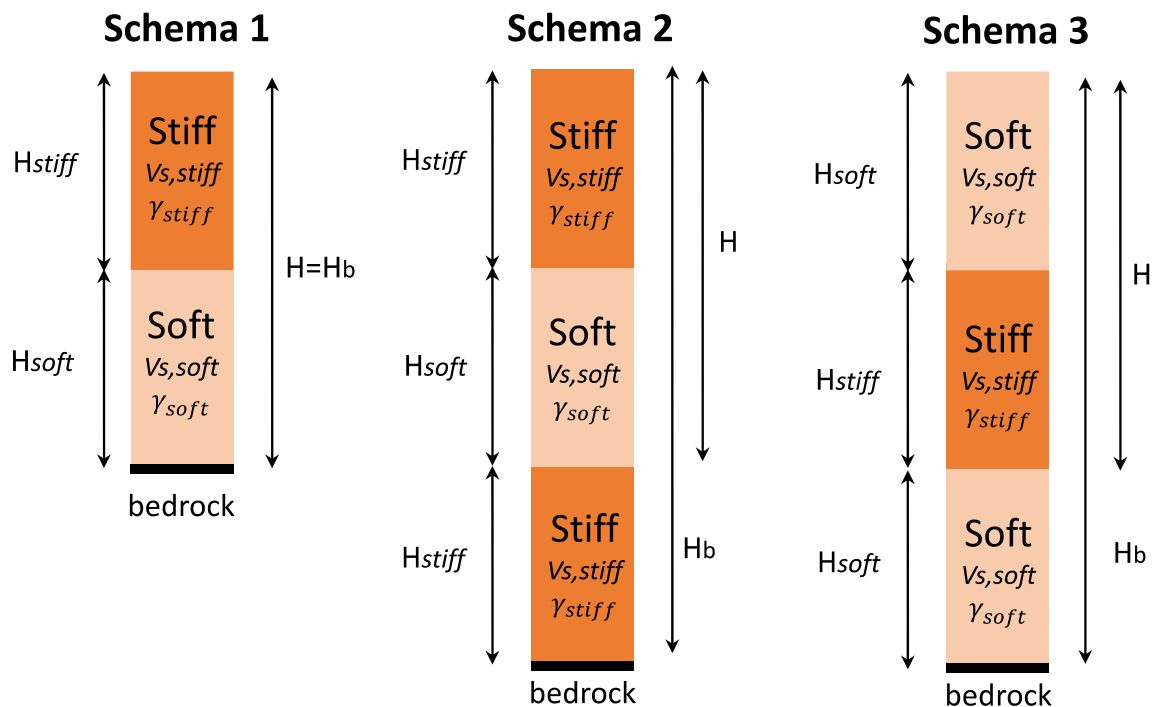
	AF1	AF2	AF3	AFPGA
BedF_SoilF_Mult	3.12	4.07	4.27	3.03
BedV_SoilV_Mult	2.83	3.74	4.06	2.70

# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Inversioni di velocità: definizione

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, pianure alluvionali e costiere, bacini intermontani) e *ii*) orizzonti rigidi vulcanici (*i.e.*, rupi, espandimenti lavici, alternanze in ambienti vulcanici):



I principali **fattori** che controllano gli effetti locali in presenza di un'inversione di velocità sono :

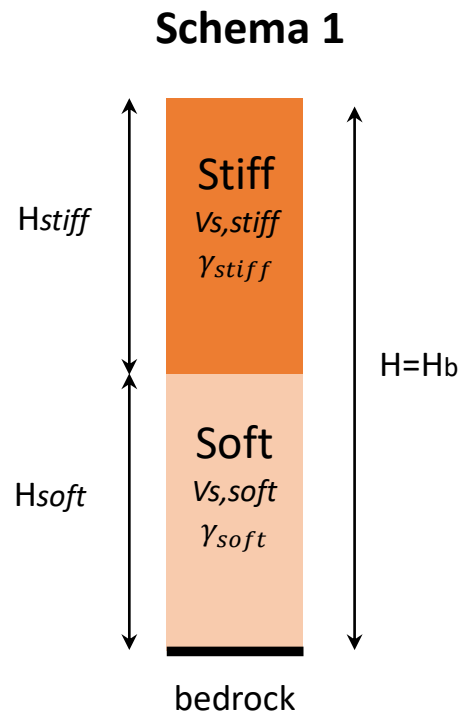
- rapporto  $H_{stiff}/H_{soft}$  tra gli strati rigido e soffice;
- rapporto di  $V_{s\_stiff}/V_{s\_soft}$  tra gli strati rigido e soffice;
- PGA di input.

# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

Inversioni di velocità: fenomenologia → 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**

<b>H=Hb</b>	30m - 50m - 70m - 100m
<b>Hsoft</b>	0m - 0.25H - 0.50H - 0.75H - H

**Tabella 2**

-	<b>Vs,stiff</b>	<b>Vs,soft</b>	<b>Vs,stiff/Vs,soft</b>
<b>1</b>	360	180	2
<b>2</b>	360	100	3.6
<b>3</b>	580	180	3.2
<b>4</b>	580	100	5.8



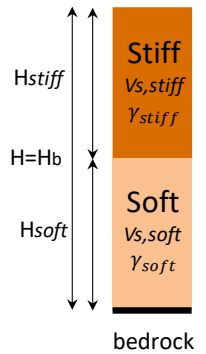
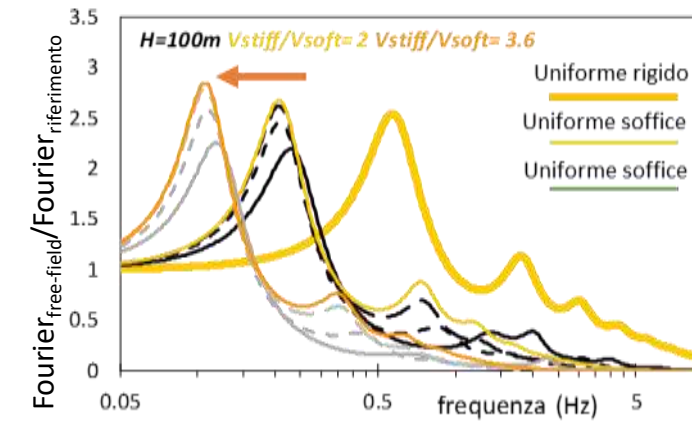
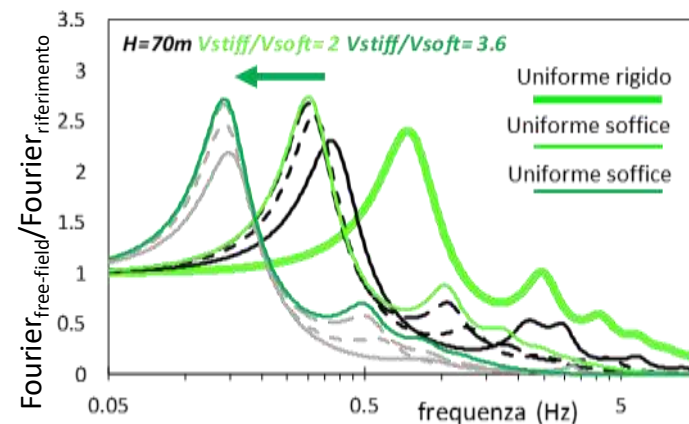
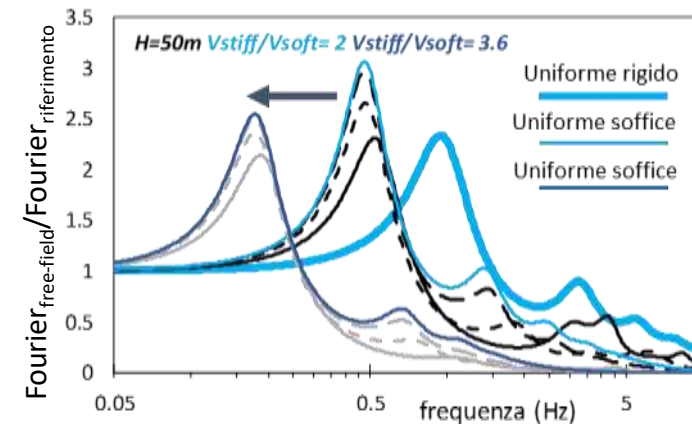
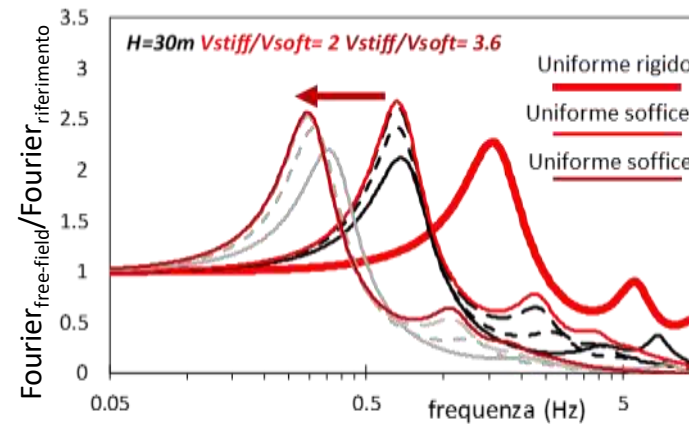
# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

Inversioni di velocità: fenomenologia → effetto di  $\frac{H_{stiff}}{H_{soft}}$  e  $\frac{V_{S_{stiff}}}{V_{S_{soft}}}$  in termini di funzione di amplificazione

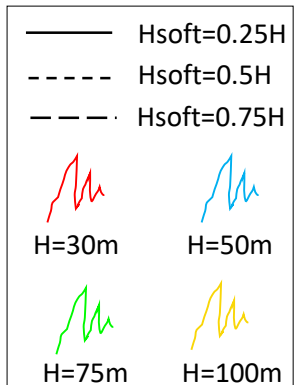
A parità di geometria ( $H_{stiff}/H_{soft}$ ), maggiore è il valore di  $V_{S_{stiff}}/V_{S_{soft}}$  minore è il valore della frequenza fondamentale.

Inoltre, a parità di proprietà meccaniche dei terreni ( $V_{S_{stiff}}/V_{S_{soft}}$ ), minore è il valore  $H_{stiff}/H_{soft}$  maggiore è il valore di picco della funzione di amplificazione.



**$V_{stiff}=360\text{m/s}$   
 $V_{soft}=180\text{m/s}$   
 $I=2$**

## LEGENDA

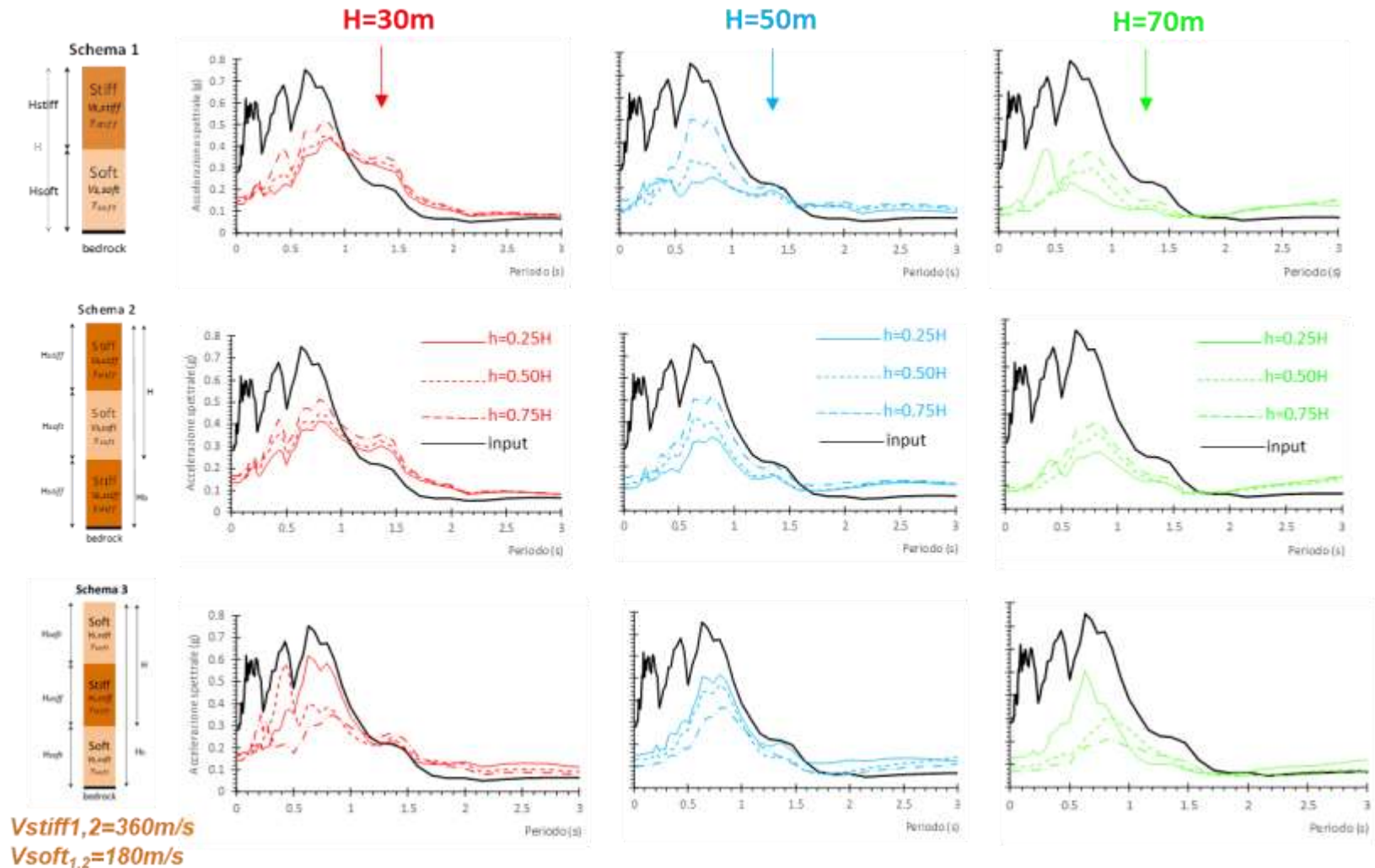


# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

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

Per i casi oggetto di studio, il segnale in free-field risulta deamplificato rispetto al segnale di riferimento per periodi minori di 1 s nel caso di deposito di spessore pari a 30 m, per periodi minori di circa 1.5-2 s nel caso di deposito di spessore maggiore di 30 m. Inoltre, a differenza degli schemi 1 (Stiff-Soft) e 2 (Stiff-Soft-Stiff), nel caso dello schema 3 (Soft-Stiff-Soft) è interessante osservare che maggiore è il valore  $H_{stiff}/H_{soft}$  maggiore è il valore di picco dello spettro di risposta.

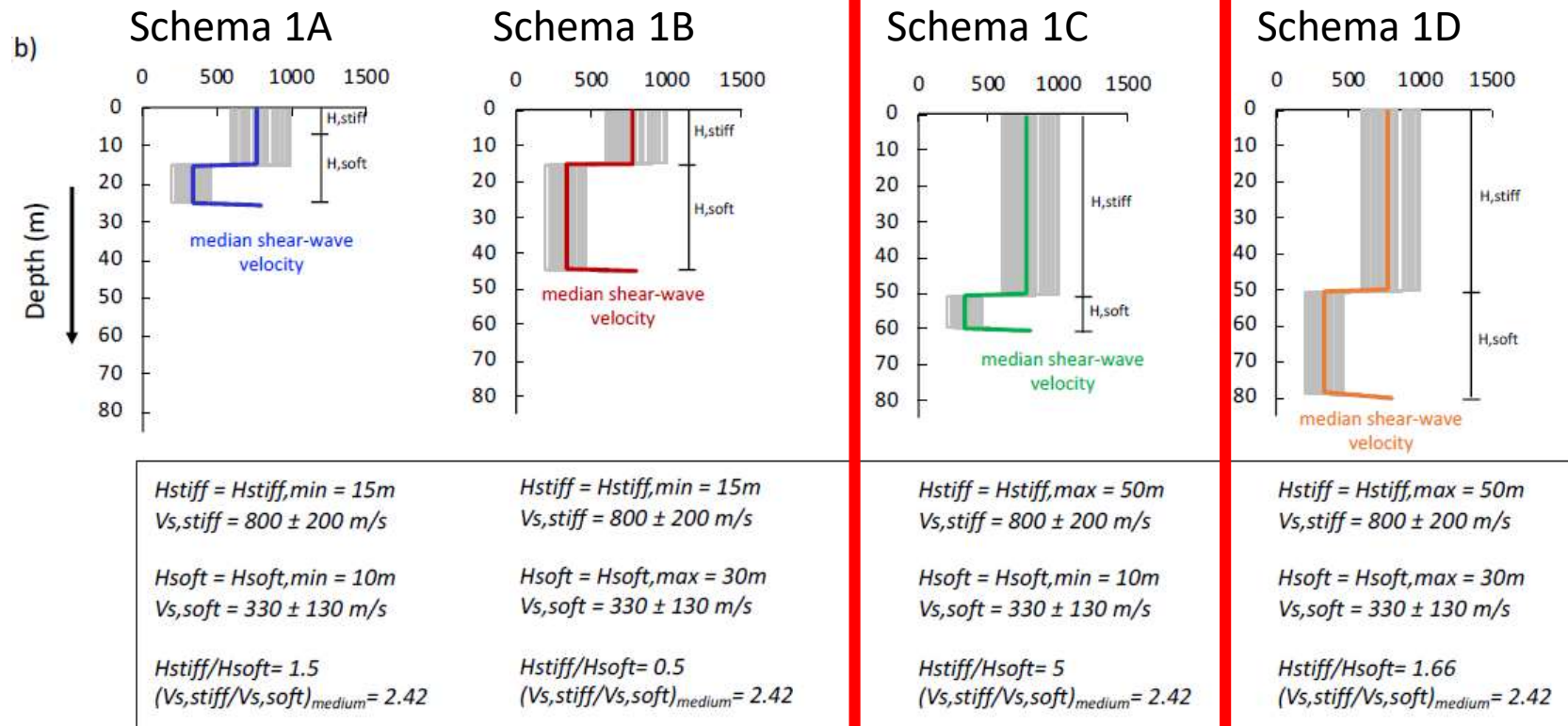


# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Inversioni di velocità: approfondimento di letteratura

Nel lavoro di [Fabozzi et al. 2020](#), viene effettuato un esteso studio parametrico in particolari contesti geologici (*i.e.*, orizzonti rigidi clastici ed orizzonti rigidi vulcanici) in presenza di inversioni di velocità. In tali contesti, sono state effettuate analisi stocastiche di RSL 1D.

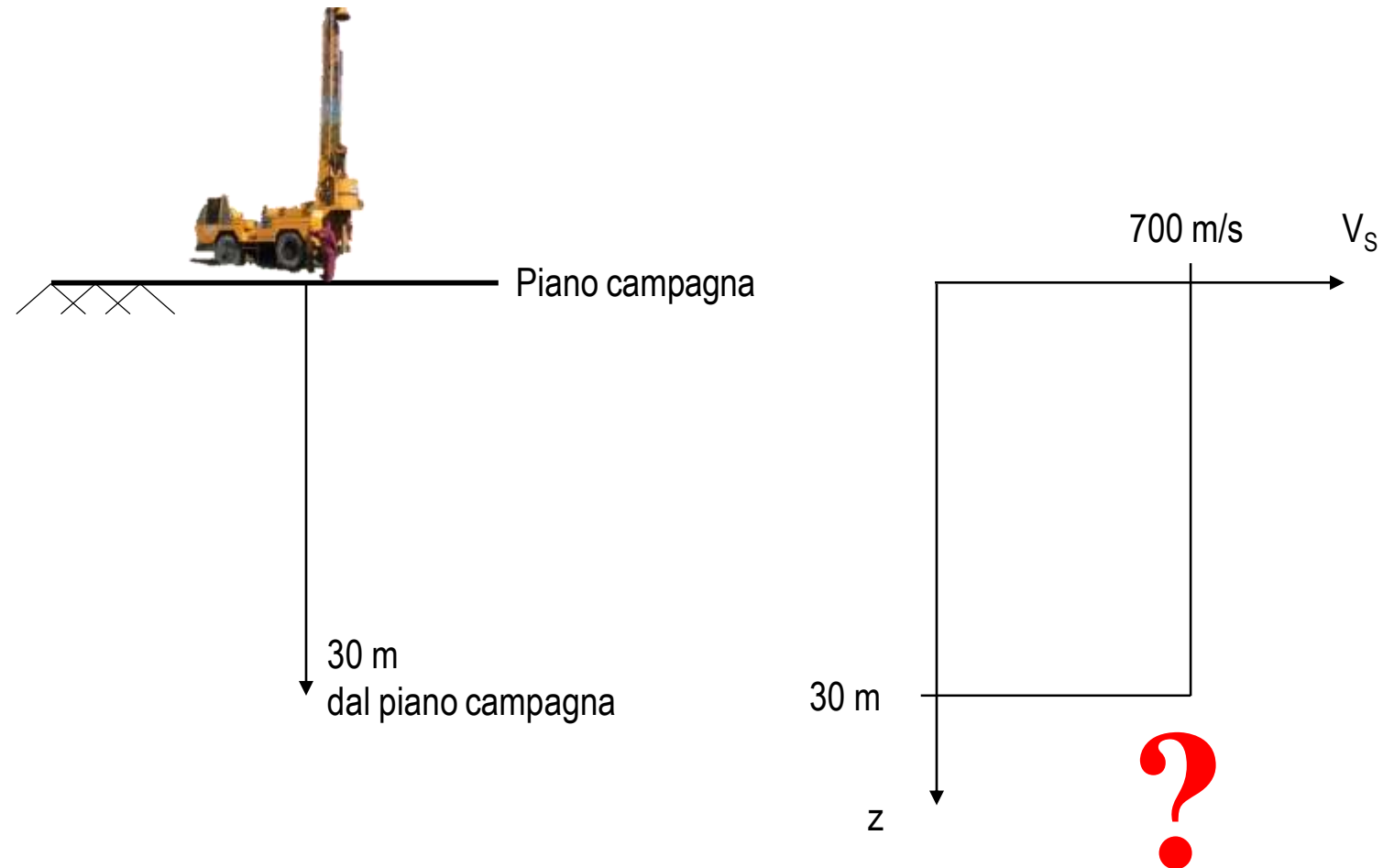


# Effetto della presenza di inversioni nel profilo $V_s$

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Caso di studio:

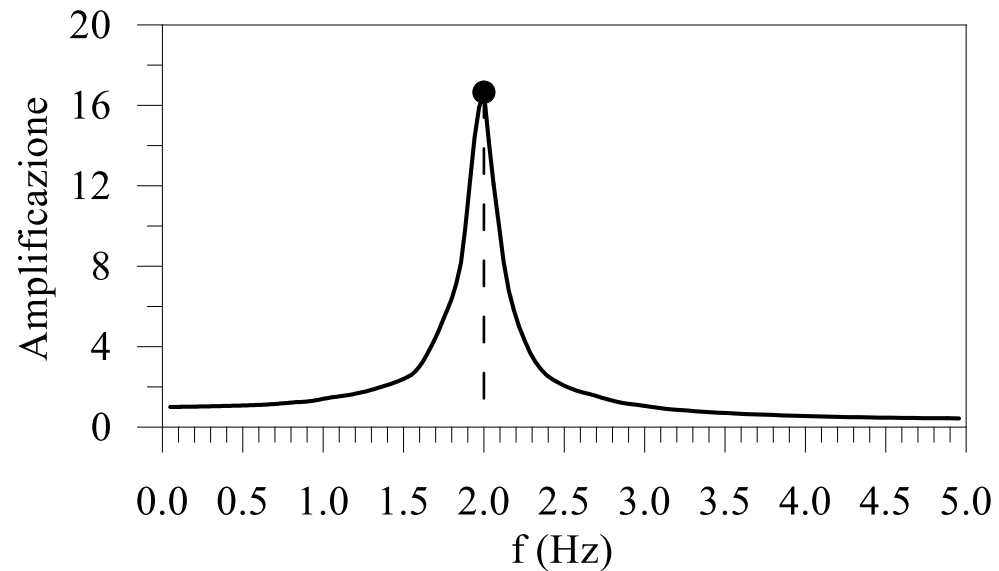
Con riferimento allo schema 1C, si considera dapprima il caso in cui si esegue una prova *Down-hole* sino a 30 m di profondità, intercettando solamente lo strato rigido.



# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Individuazione bedrock sismico

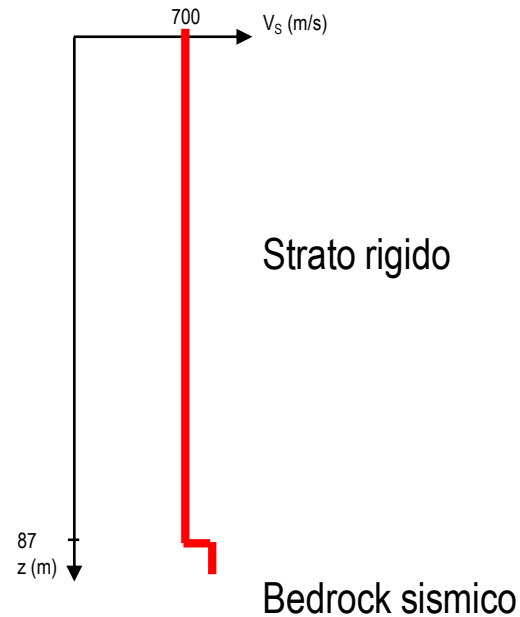


$$\left\{ \begin{array}{l} f_0 \text{ da misura HVSR} = 2.0 \text{ Hz} \\ H_{800} = \frac{V_s}{4 \cdot f_0} \end{array} \right. \longrightarrow H_{800} = \frac{700 \text{ m/s}}{4 \cdot 2.0 \text{ Hz}} = 87 \text{ m}$$

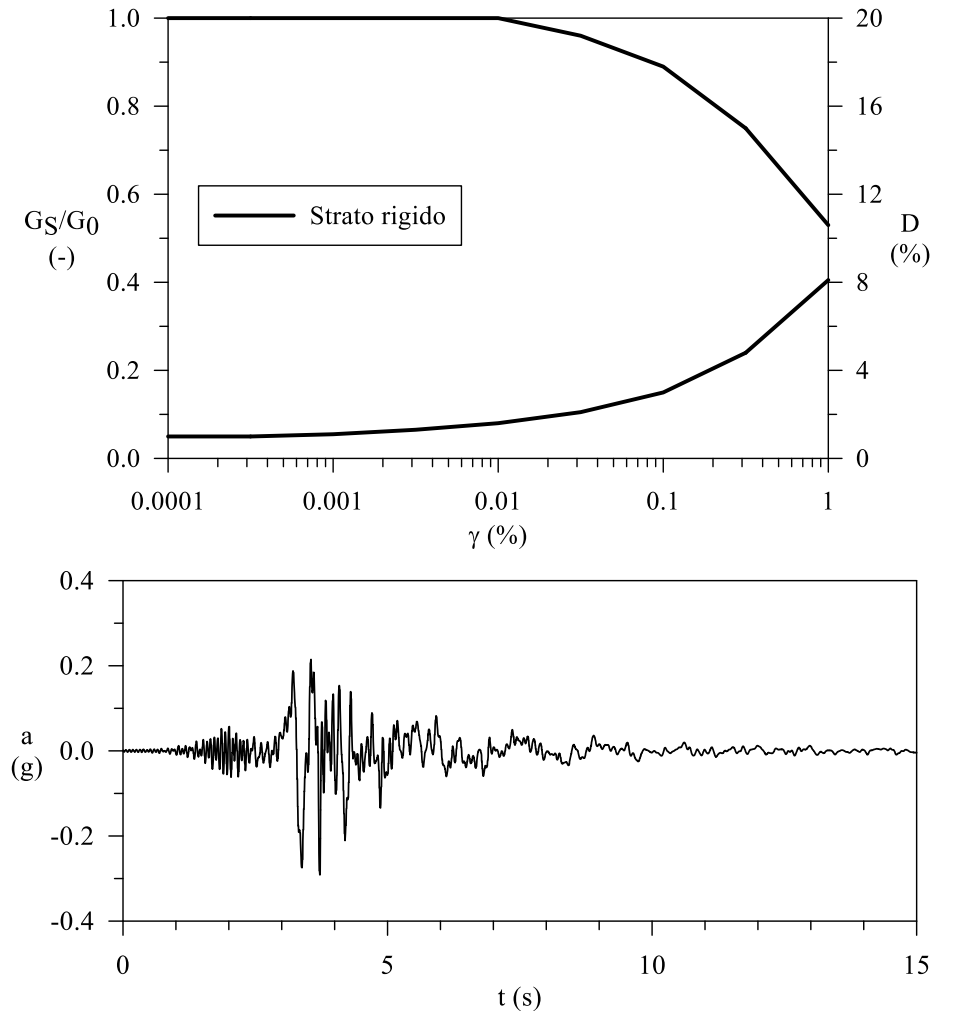
# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Modello numerico senza inversione



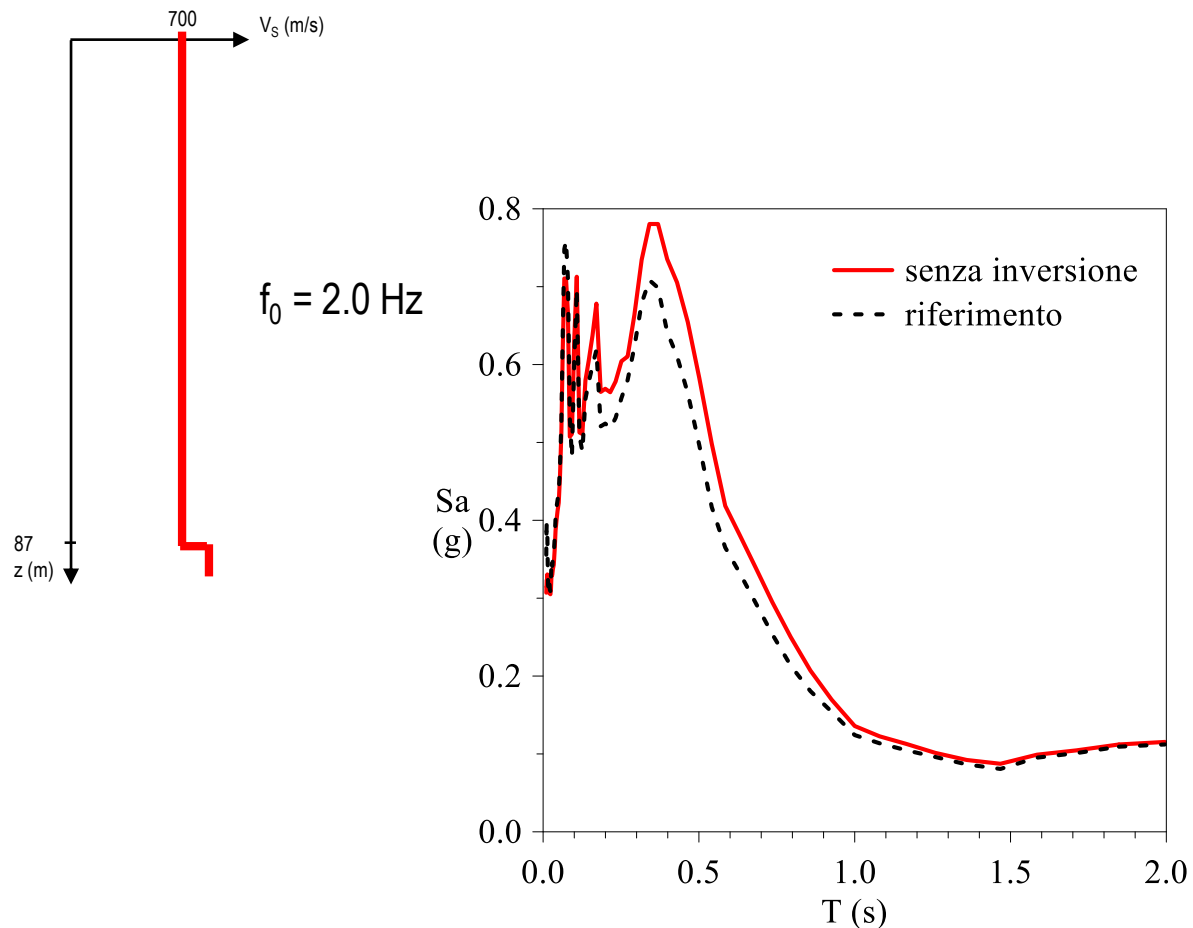
**Segnale di riferimento:** evento SICILY\_ITALY del 26/12/2018; Stazione Santa Venerina (Santa Venerina, Catania)



# Effetto della presenza di inversioni nel profilo $V_s$

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

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



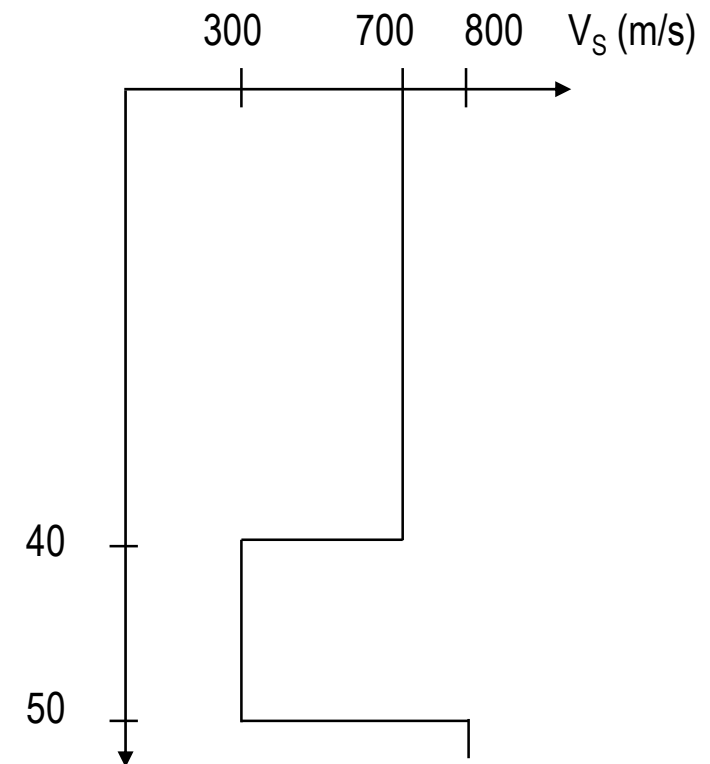
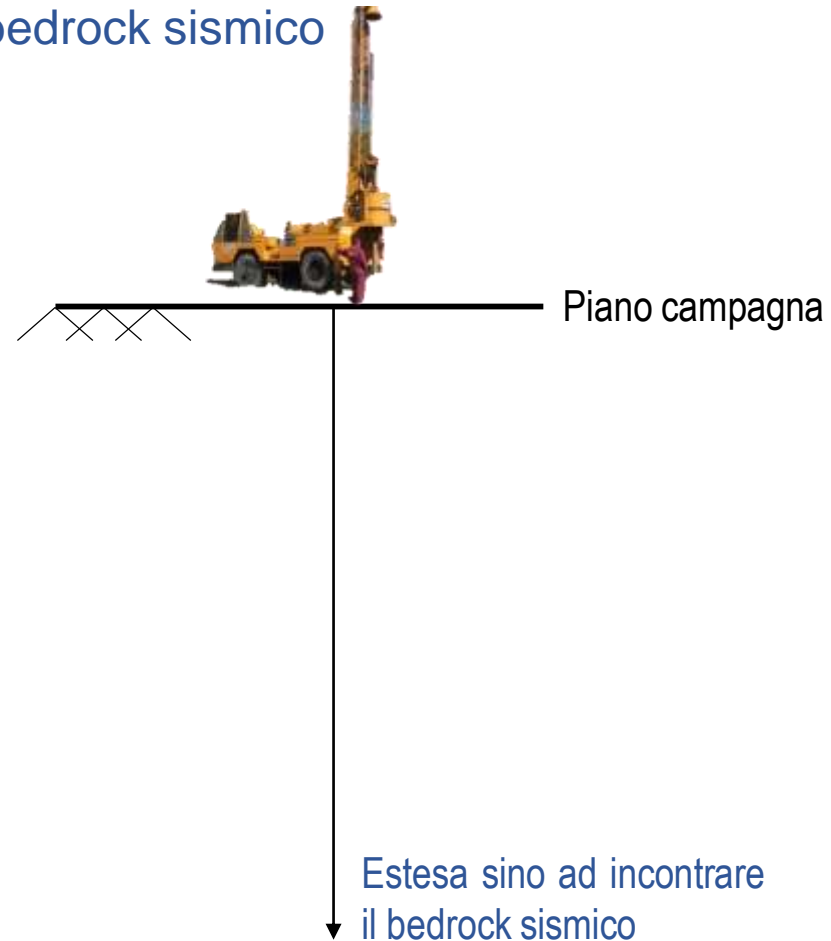
	AF1	AF2	AF3
Senza inversione	1.09	1.16	1.14
Con inversione	?	?	?

# Effetto della presenza di inversioni nel profilo $V_s$

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Caso di studio

Prova *Down-hole* sino al bedrock sismico

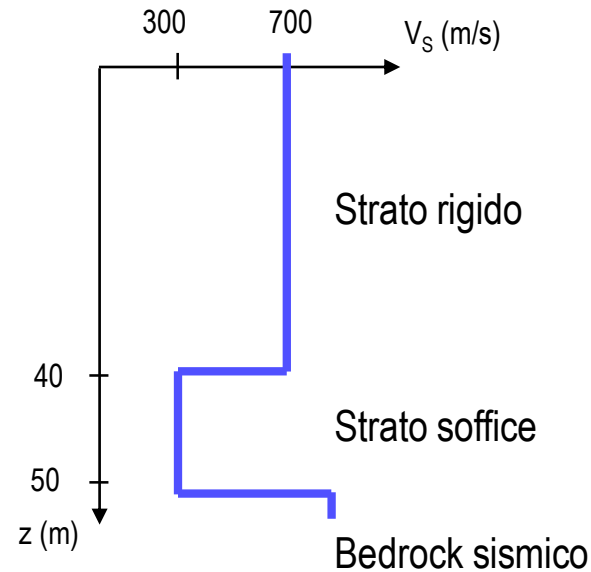




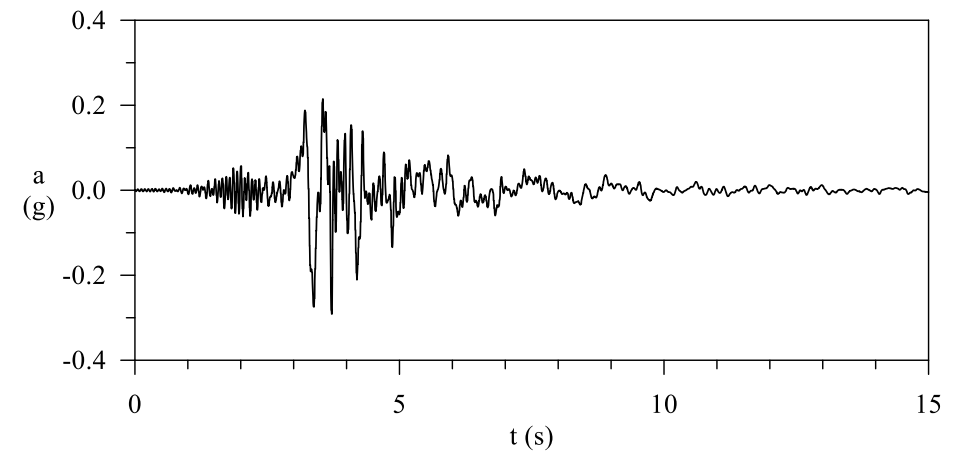
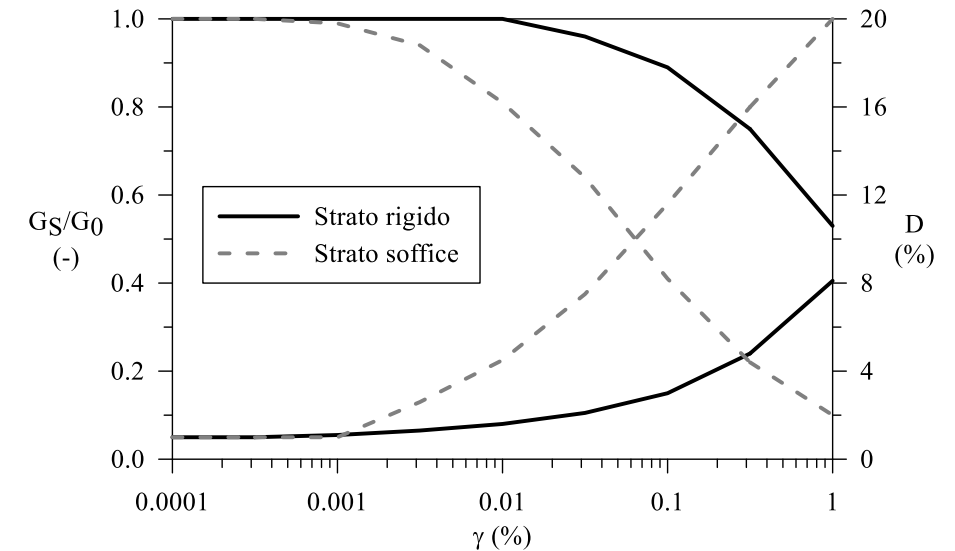
# Effetto della presenza di inversioni nel profilo $V_s$

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

## Modello numerico con inversione



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

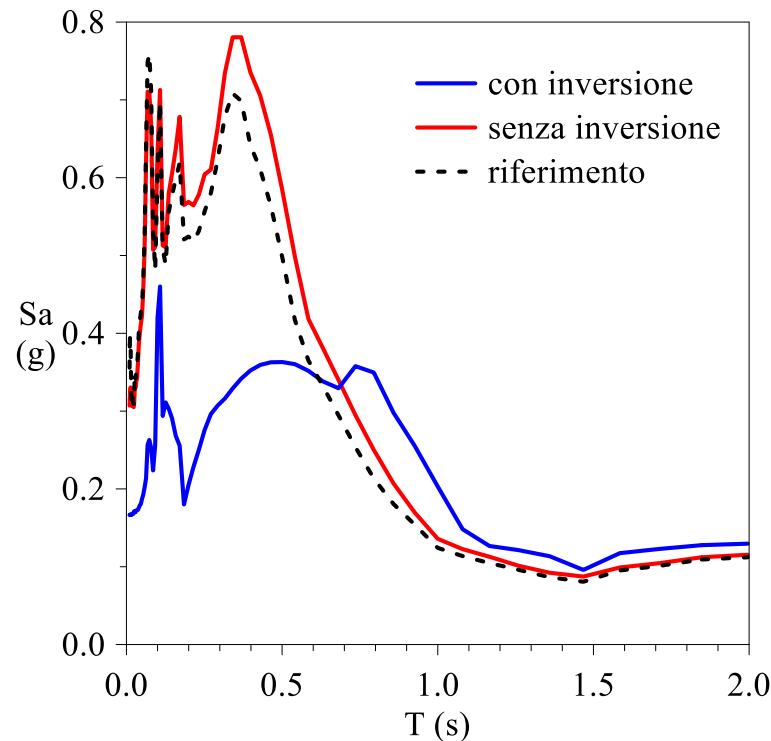
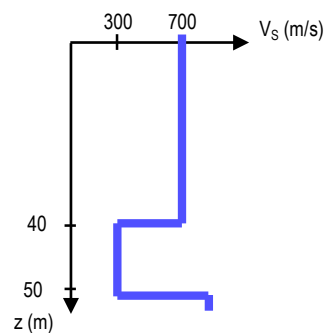
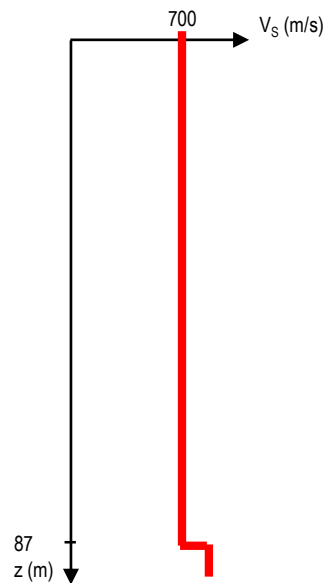


# Effetto della presenza di inversioni nel profilo Vs

quale è la previsione che si ottiene quando nel modello numerico non è stata implementata l'inversione di velocità

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

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

Distanza tra il modello con inversioni e quello senza  
(calcolata con gli AF)

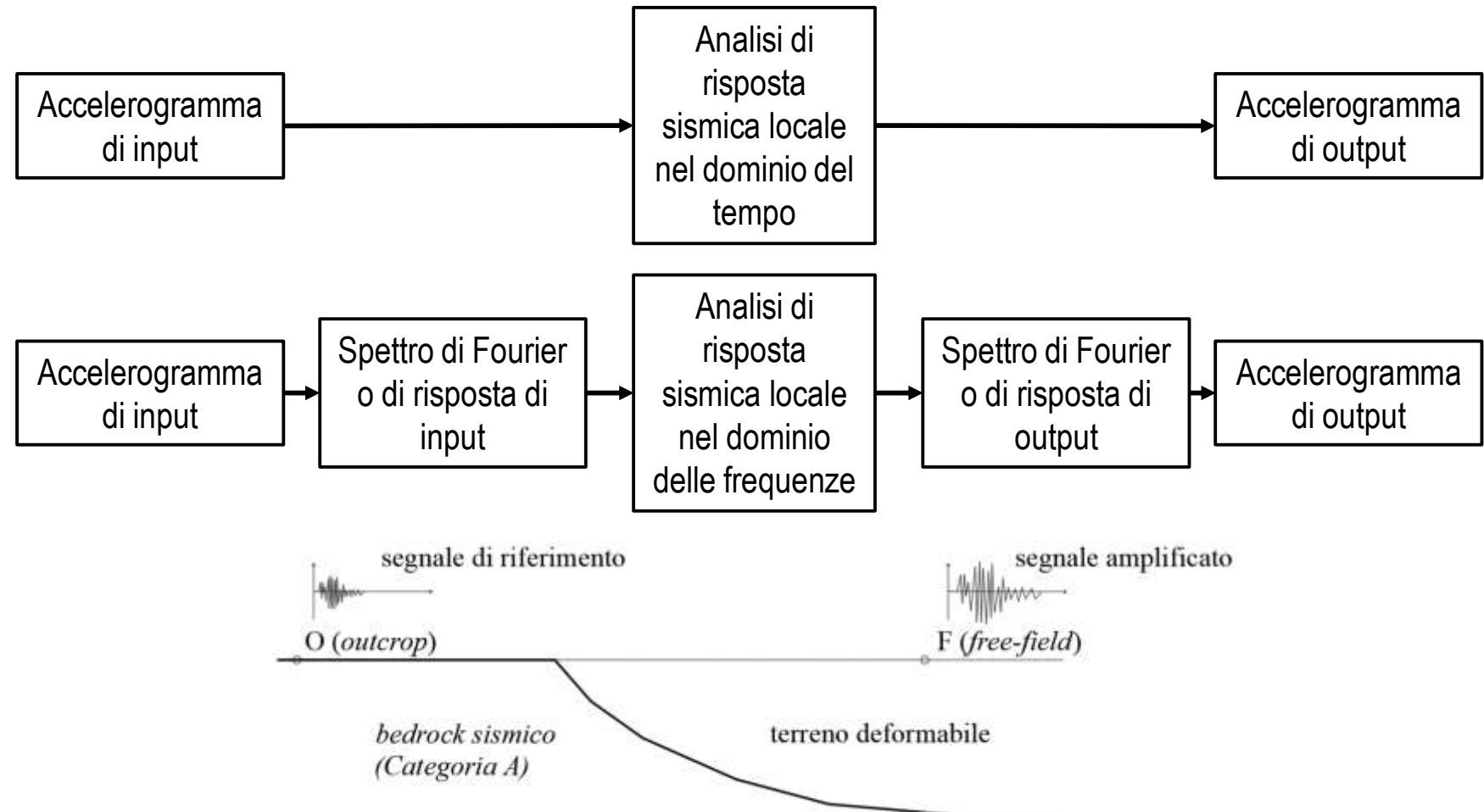
$$Dist (AF) = (SenzaInv - ConInv) / ConInv * 100$$

DIST_Inv	DIST_Inv-AF1	DIST_Inv-AF2	DIST_Inv-AF3
	113%	28%	-25%

# Input sismico: accelerogramma (Time-History, TH) vs spettro di risposta (Random Vibration Theory, RVT)

quali sono le potenzialità e i limiti dei due approcci

Analisi della risposta sismica locale: dominio del tempo o dominio delle frequenze

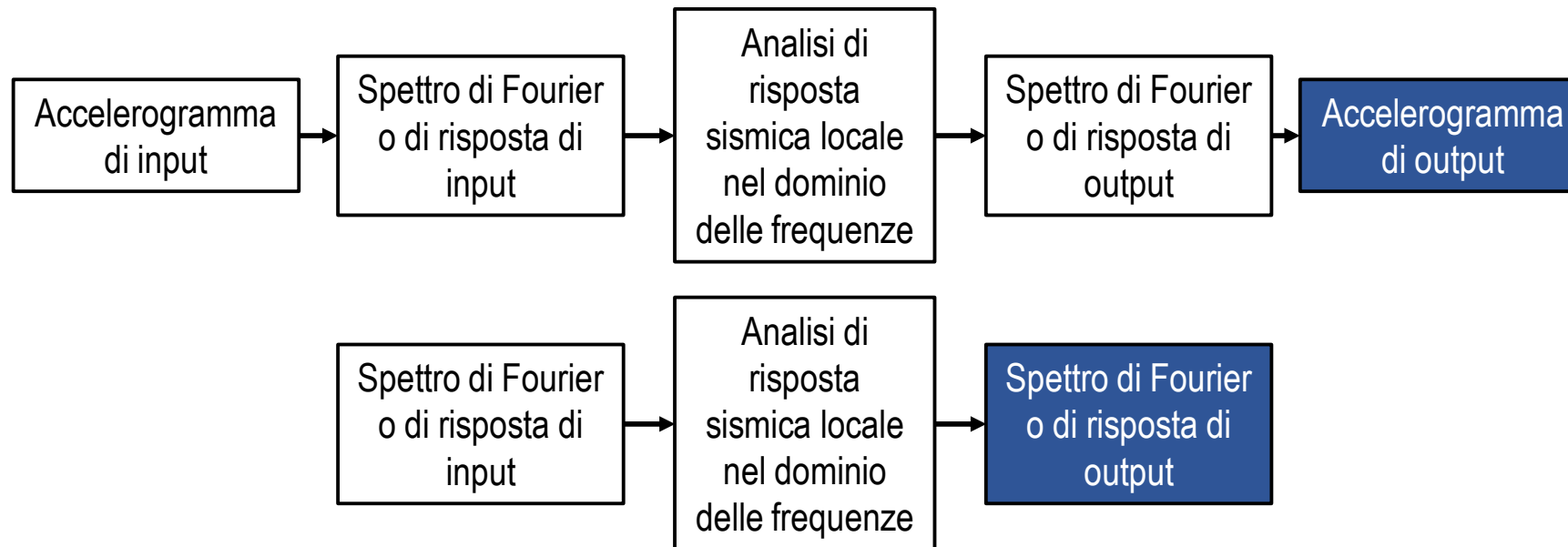


# Input sismico: accelerogramma (Time-History, TH) vs spettro di risposta (Random Vibration Theory, RVT)

quali sono le potenzialità e i limiti dei due approcci

## Analisi della risposta sismica locale: dominio del tempo o dominio delle frequenze

Il codice STRATA permette di eseguire analisi RSL utilizzando l'approccio *Time History* (il segnale di input è un accelerogramma) oppure l'approccio *RVT* (il segnale di input è uno spettro di risposta). Nel caso di una analisi di RSL con approccio RVT non è possibile ottenere come output la variazione temporale di una qualsiasi grandezza (ad esempio accelerazioni, velocità, ecc.).



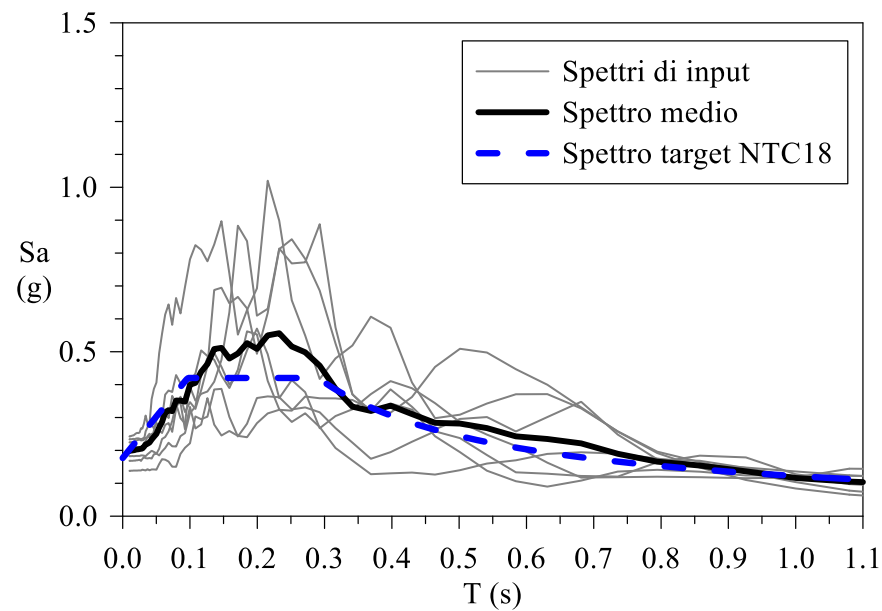
# Input sismico: accelerogramma (Time-History, TH) vs spettro di risposta (Random Vibration Theory, RVT)

quali sono le potenzialità e i limiti dei due approcci

## Analisi della risposta sismica locale: dominio del tempo o dominio delle frequenze

È raccomandato effettuare analisi di RSL nel dominio del tempo o delle frequenze utilizzando un numero adeguato di segnali (almeno 7 segnali spettro-compatibili con lo spettro target, come richiamato nella CIRCOLARE 21 gennaio 2019 , n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018).

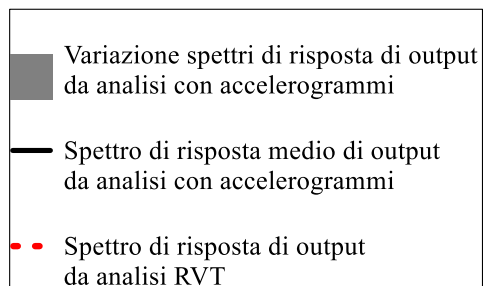
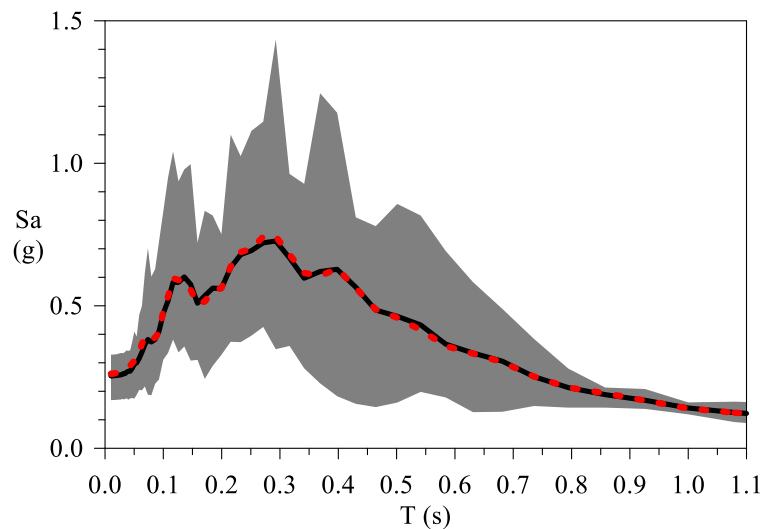
L'approccio RVT permette, invece, di effettuare analisi di RSL nel dominio delle frequenze utilizzando un unico spettro di risposta.



# Input sismico: accelerogramma (Time-History, TH) vs spettro di risposta (Random Vibration Theory, RVT)

quali sono le potenzialità e i limiti dei due approcci

Un'unica analisi di RSL utilizzando l'approccio *RVT* (il segnale di input è uno spettro di risposta) permette di ottenere come output un risultato confrontabile con quello che si otterrebbe eseguendo 7 analisi di RSL utilizzando l'opzione *Time History* (il segnale di input è un accelerogramma) sia in termini di spettro di risposta sia in termini di AF.

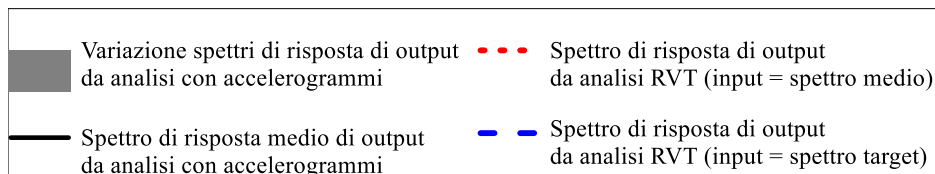
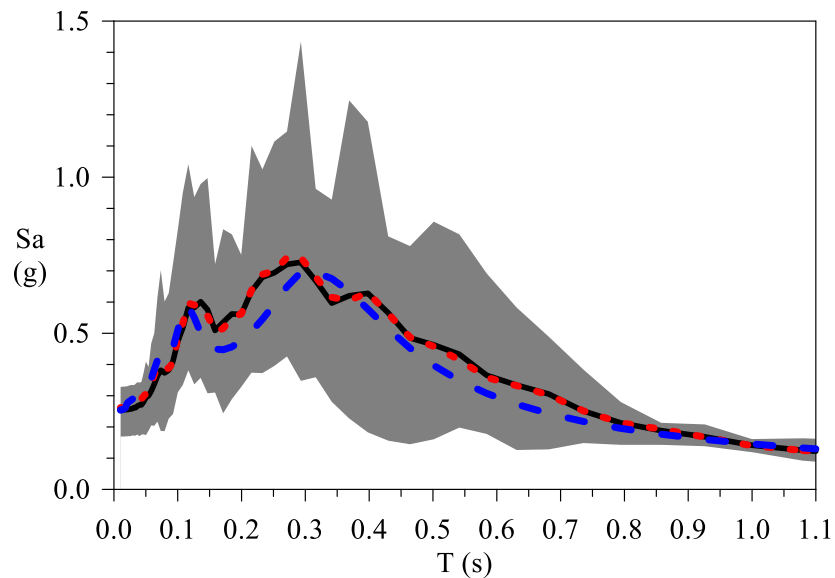


	AF1	AF2	AF3
TH	1.46	1.62	1.27
RVT_A	1.46	1.60	1.27

# Input sismico: accelerogramma (Time-History, TH) vs spettro di risposta (Random Vibration Theory, RVT)

quali sono le potenzialità e i limiti dei due approcci

L'analisi della RSL con approccio RVT può essere eseguita utilizzando come input lo spettro target definito secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni. In questo caso, lo spettro di risposta previsto in *free-field* è qualitativamente confrontabile con la previsione eseguita con analisi TH e con analisi RVT utilizzando lo spettro medio di input. Invece, si osserva una sottostima degli effetti di sito in termini di AF.



Spettri di risposta al piano campagna da modelli numerici:  
**TH vs RVT\_A (input = spettro medio, rosso) vs RVT\_B (input = spettro target, blu )**

	AF1	AF2	AF3
TH	1.46	1.62	1.27
RVT_A	1.46	1.60	1.27
RVT_B	1.35	1.39	1.18

# Input sismico: accelerogramma (Time-History, TH) vs spettro di risposta (Random Vibration Theory, RVT)

quali sono le potenzialità e i limiti dei due approcci

I limiti dell'approccio RVT sono documentati nel lavoro di Kottke & Rathje (2013).

In particolare:

- si può avere una sovrastima degli effetti di sito rispetto alla previsione con approccio TH di circa il 10% nel caso di depositi naturali con frequenza fondamentale di circa 1 Hz poggianti su bedrock sismico con  $V_S$  circa pari a 1000 m/s;
- si può avere una sovrastima degli effetti di sito rispetto alla previsione con approccio TH di circa il 50% nel caso di depositi naturali con frequenza fondamentale di circa 0.2-0.3 Hz poggianti su bedrock sismico con  $V_S$  circa pari a 3000 m/s;
- gli autori hanno osservato una sottostima dell'amplificazione in corrispondenza delle frequenze comprese tra i valori di risonanza.



# Conclusioni

## **Effetto della posizione del *bedrock* sismico nel modello numerico.**

Con riferimento al caso di studio, implementare nel modello numerico una profondità minore del *bedrock* rispetto alle reali condizioni di sito, determina la sovrastima dell'amplificazione sismica per  $0.1 < T < 0.5$  s e la sottostima per  $T > 0.4$  s.

## **Effetto della presenza di inversioni di velocità.**

Con riferimento al caso di studio, realizzare un modello numerico basato su una incompleta caratterizzazione geologica e geotecnica di sito (inversione di velocità non individuata tramite prove geofisiche in foro) comporta la sovrastima dell'amplificazione sismica per  $0.1 < T < 0.8$  s e la sottostima per  $T > 0.7$  s.

## **Modellazione stocastica dei profili stratigrafici con il codice STRATA.**

I modelli numerici stocastici di sottosuolo generati con il codice STRATA attraverso l'approccio di Toro (1995) non risultano congruenti con il modello geologico e geotecnico di riferimento, quindi, devono essere aggiornati secondo giudizio esperto. Inoltre, l'introduzione dell'approccio stocastico per generare diversi profili di  $V_S$  a parità di spessore di ogni strato può comportare, nel caso in cui non si introduce un intervallo di variazione delle proprietà meccaniche, una notevole sottostima dell'amplificazione rispetto ai casi in cui la variabilità (quindi la DS) è minore.

## **Input sismico: accelerogramma (analisi *time-history*) vs spettro di risposta (analisi *Random Vibration Theory*, RVT).**

L'analisi della risposta sismica locale eseguita con l'approccio RVT permette di ottenere risultati utili alla pianificazione urbana e gestione dell'emergenza (fattori di amplificazione) con una unica simulazione invece delle 7 necessarie con approccio *time-history*.

# Bibliografia

1. Ancheta, T. D., et al. 2012. "PEER NGA-West2 database: A database of ground motions recorded in shallow crustal earthquakes in active tectonic." In Proc., 15th World Conf. on Earthquake Engineering. Lisbon, Portugal.
2. Darendeli M. B. (2001) Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Austin, Texas: The University of Texas.
3. D'Amico M, Felicetta C, Russo E, et al (2020) Italian Accelerometric Archive v 3.1. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Dipartimento della Protezione Civile Nazionale. doi: 10.13127/itaca.3.1
4. 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>.
5. Gibbs, J., J. Tinsley, and W. Joyner. 1996. Seismic velocities and geological conditions at twelve sites subjected to strong ground motion in the 1994 Northridge, California, earthquake. No. 96-740. Washington, DC: USGS.
6. Hussan, M., M. S. Rahman, F. Sharmin, D. Kim, and J. Do. 2018. "Multiple tuned mass damper for multi-mode vibration reduction of offshore wind turbine under seismic excitation." Ocean Eng. 160 (Jul): 449–460. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.041>.

# Bibliografia

7. 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.
8. Kottke, A.R., Rathje, E.M. 2013. Comparison of time series and random-vibration theory site-response methods. Bulletin of the Seismological Society of America 103, 2111–2127. <https://doi.org/10.1785/0120120254>.
9. Lanzo G., Silvestri F. (1999). Risposta sismica locale. Teoria ed Esperienze. Hevelius Edizioni.
10. Nguyen, P. C., N. T. N. Doan, C. Ngo-Huu, and S. E. Kim. 2014. “Nonlinear inelastic response history analysis of steel frame structures using plastic-zone method.” Thin Walled Struct. 85 (Dec): 220–233. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.09.002>.
11. 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).
12. 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.
13. Tran T-T, Salman K, Han S-R, Kim D (2020) Probabilistic Models for Uncertainty Quantification of Soil Properties on Site Response Analysis. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering 6:04020030. doi: 10.1061/ajrua6.0001079.