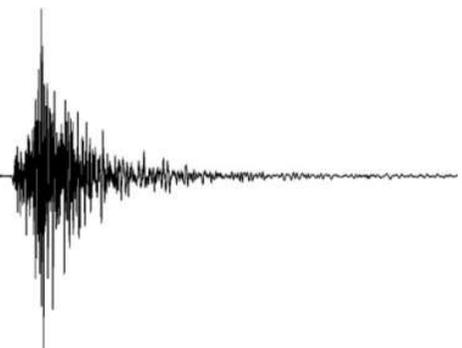


PERICOLOSITÀ SISMICA DI SITO APPROCCIO PRATICO AL PROBLEMA

(MODULO 1°)





Introduzione generale

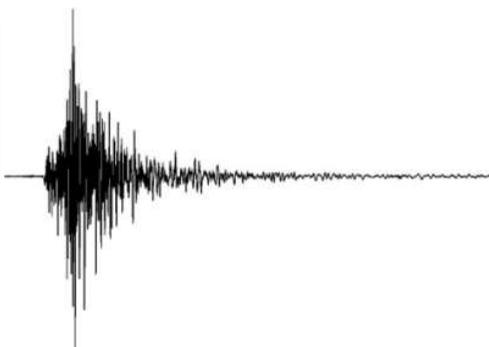
Dal piano di indagini al modello sismo – stratigrafico

Codici di calcolo 1D: Implementazione del modello sismo - stratigrafico

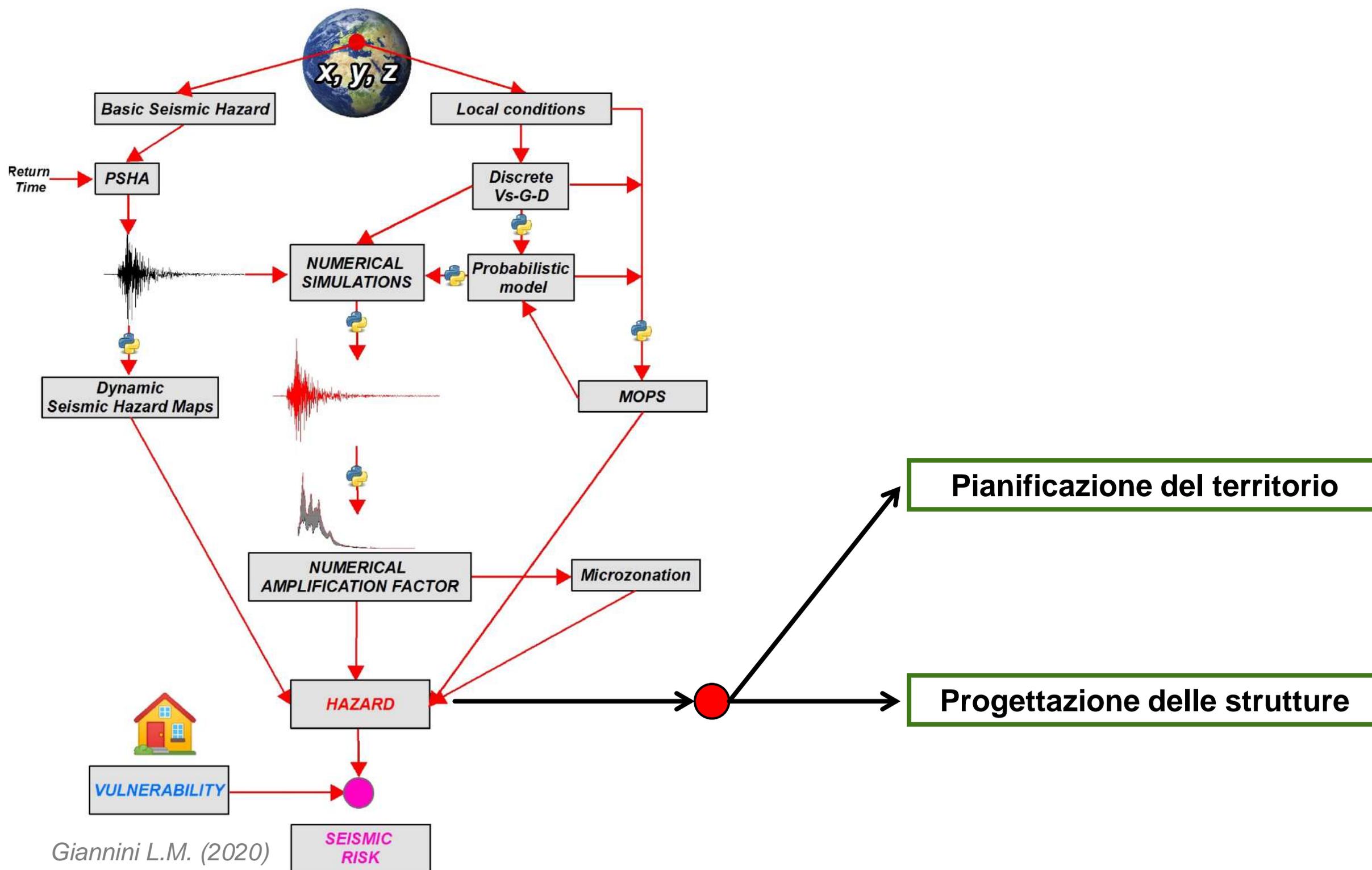
Casi studio

Analisi & Risultati

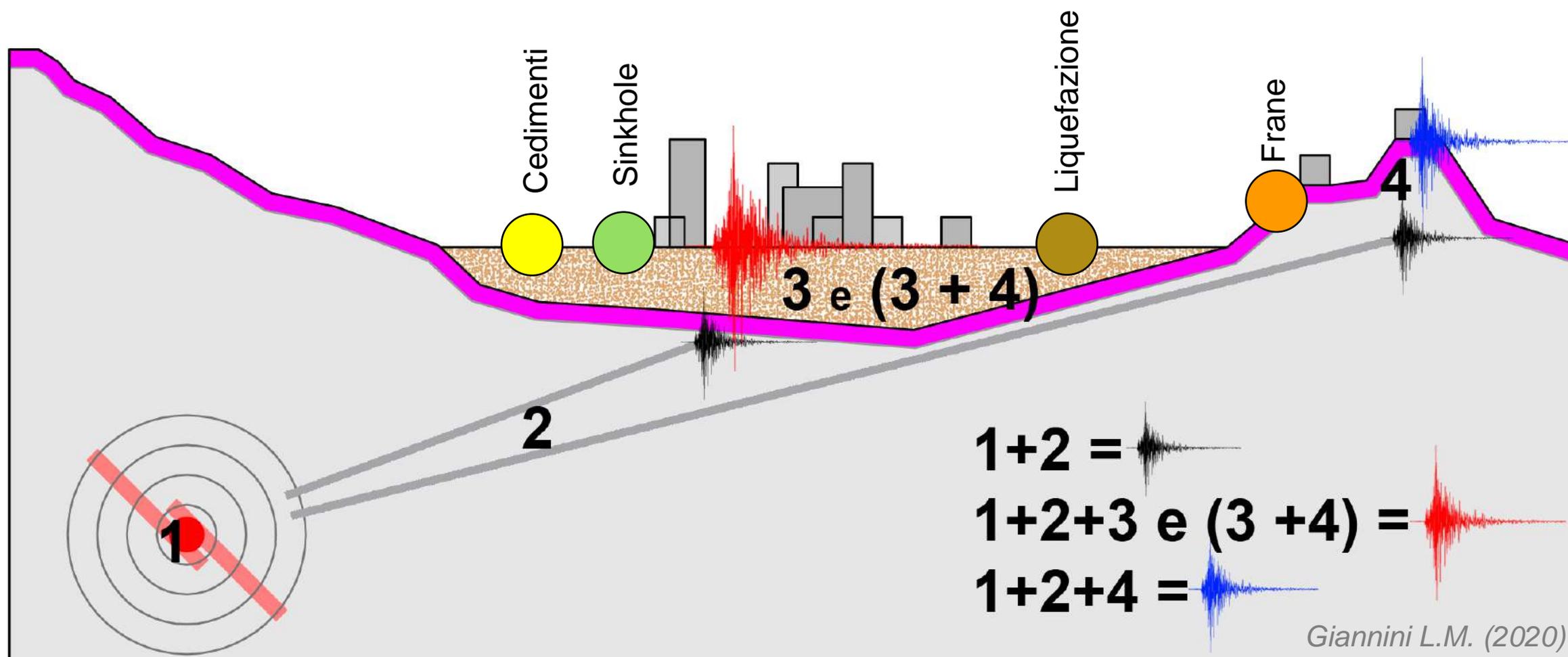
Condivisione delle esperienze professionali e domande



Introduzione generale



Introduzione generale

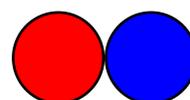


Base

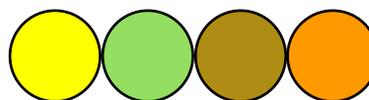
+

Sito

Effetti non permanenti



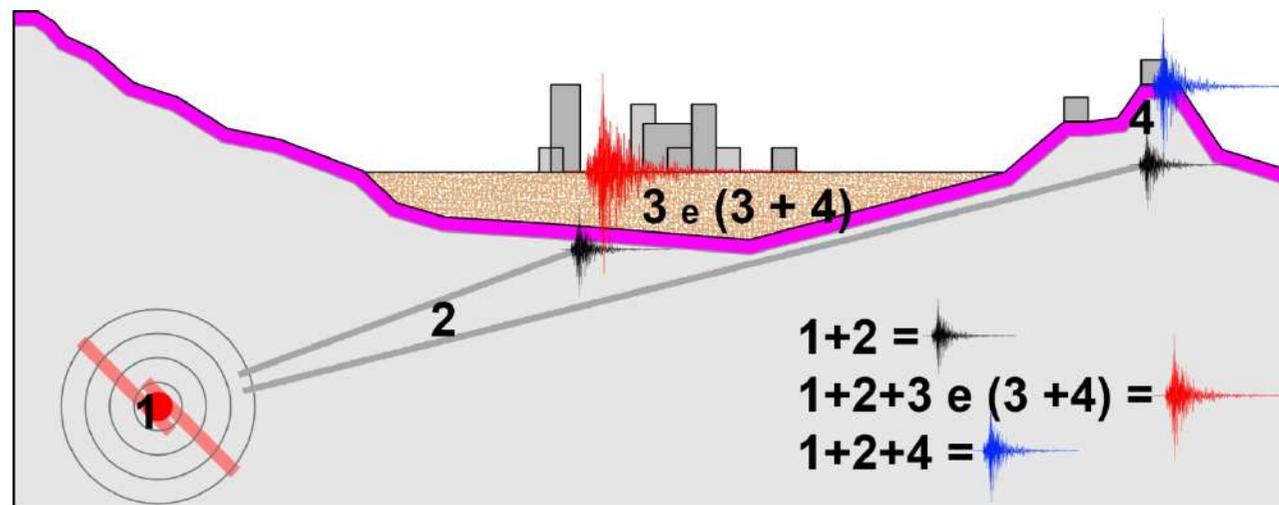
Effetti permanenti



Introduzione generale

L'analisi della pericolosità sismica in una determinata area dipende principalmente da tre macro fattori:

- **Sismologico** – caratteristiche sismogenetiche del territorio
- **Geotecnico – Geofisico** – proprietà fisico meccaniche dei materiali
- **Morfo – stratigrafico** – caratteristiche morfometriche topografiche e stratigrafiche



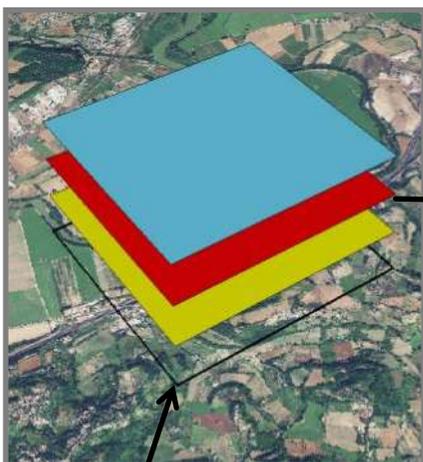
Il dominio delle nostre analisi è lo spazio compreso tra **substrato sismico** e la **superficie** in quanto qui avvengono le più significative modifiche del segnale sismico.

L'entità delle **modifiche** che il **segnale sismico** subisce nel tragitto che separa il **substrato sismico** e la **superficie** vengono spesso espresse in termini di **Amplificazione Sismica**.

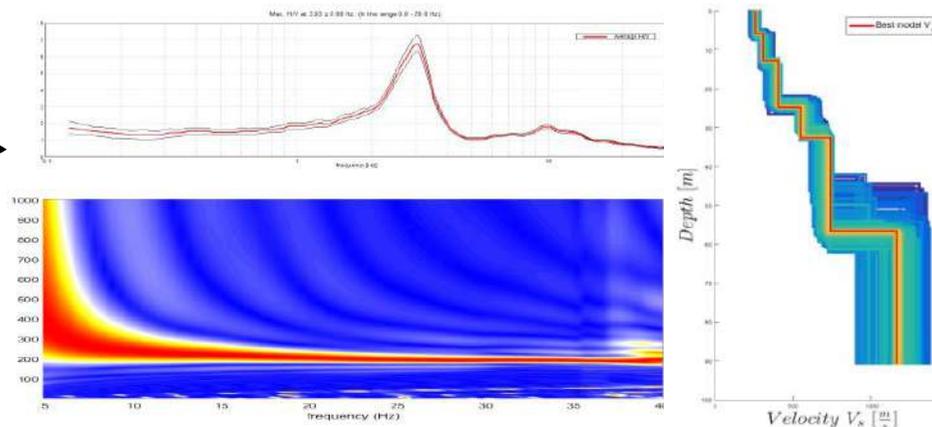
L'amplificazione (+ -) sismica è calcolata mettendo in **relazione** grandezze rappresentative del moto sismico (simulato o registrato) in superficie rispetto a quello di riferimento.

Introduzione generale

Condizioni di sito



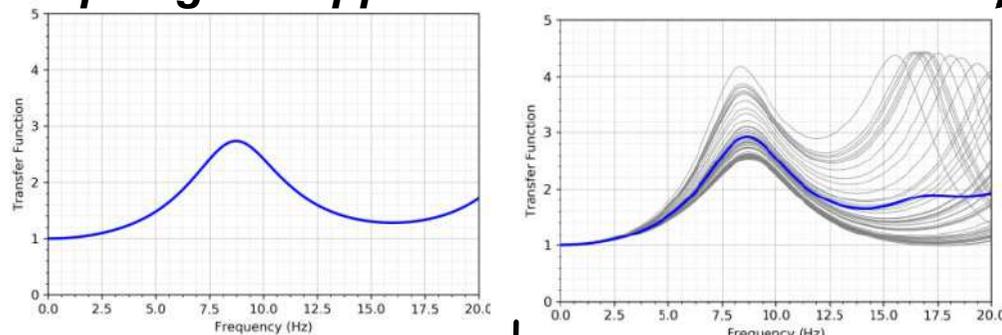
Acquisizione nuovi dati



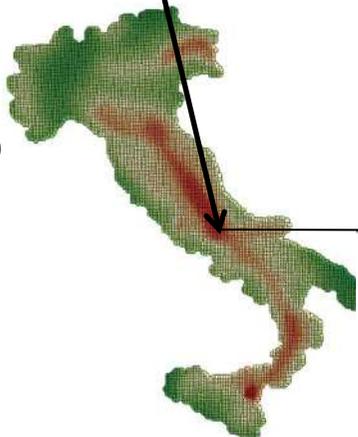
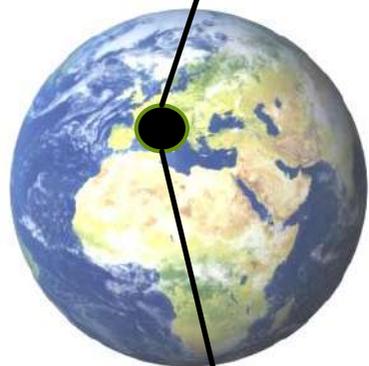
Rappresentatività



Tipologia di approccio di calcolo



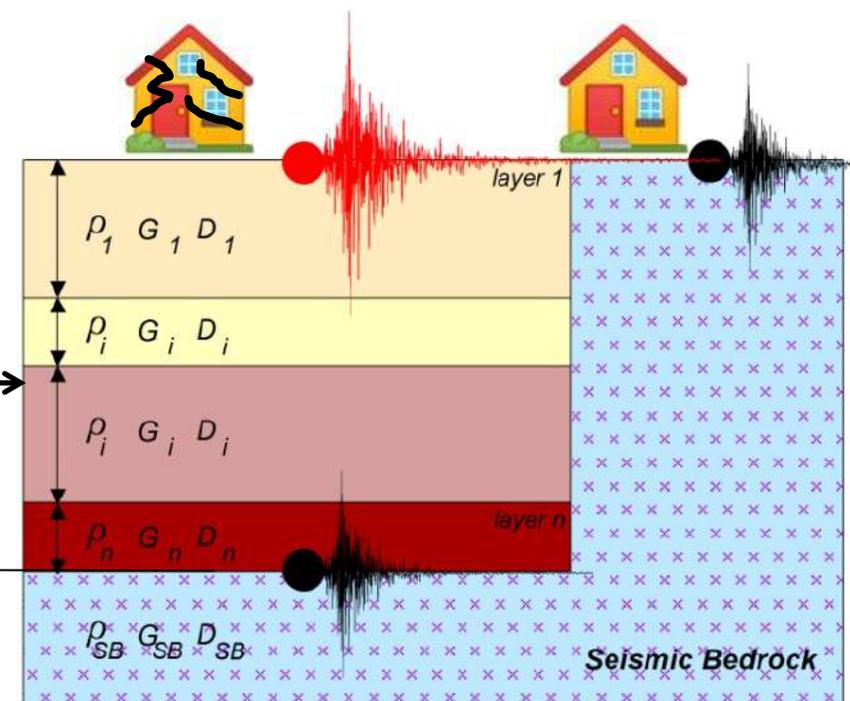
Condizioni regionali



Cu & Vn



PS base – input sismico



Giannini L.M. (2020)

Introduzione generale

Stima della pericolosità sismica di sito

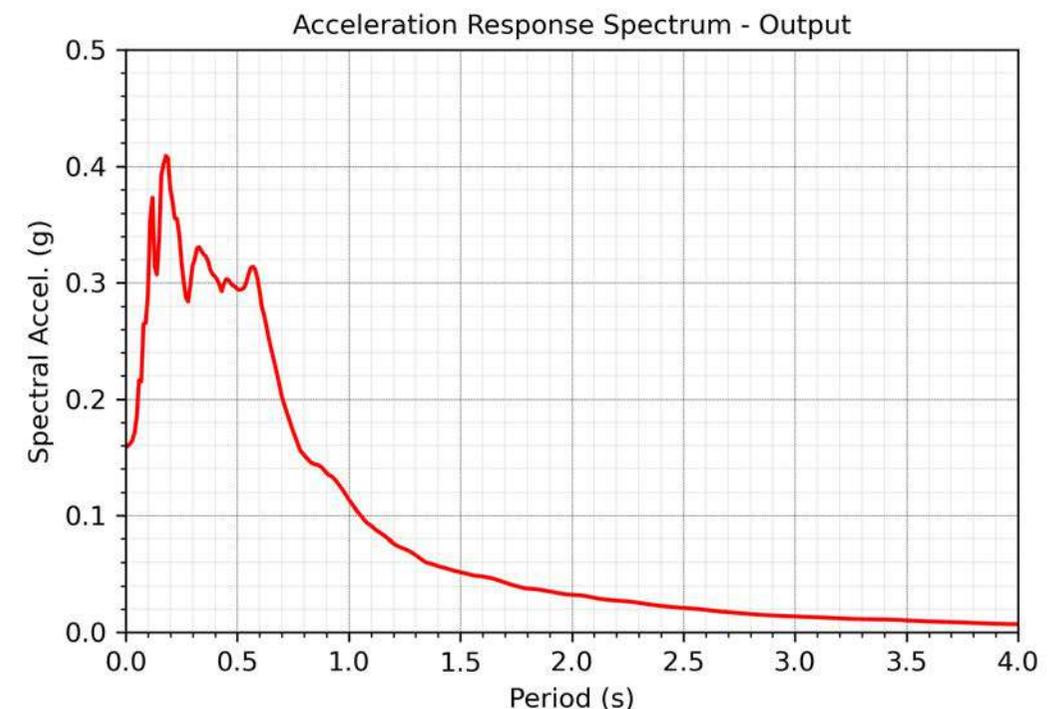
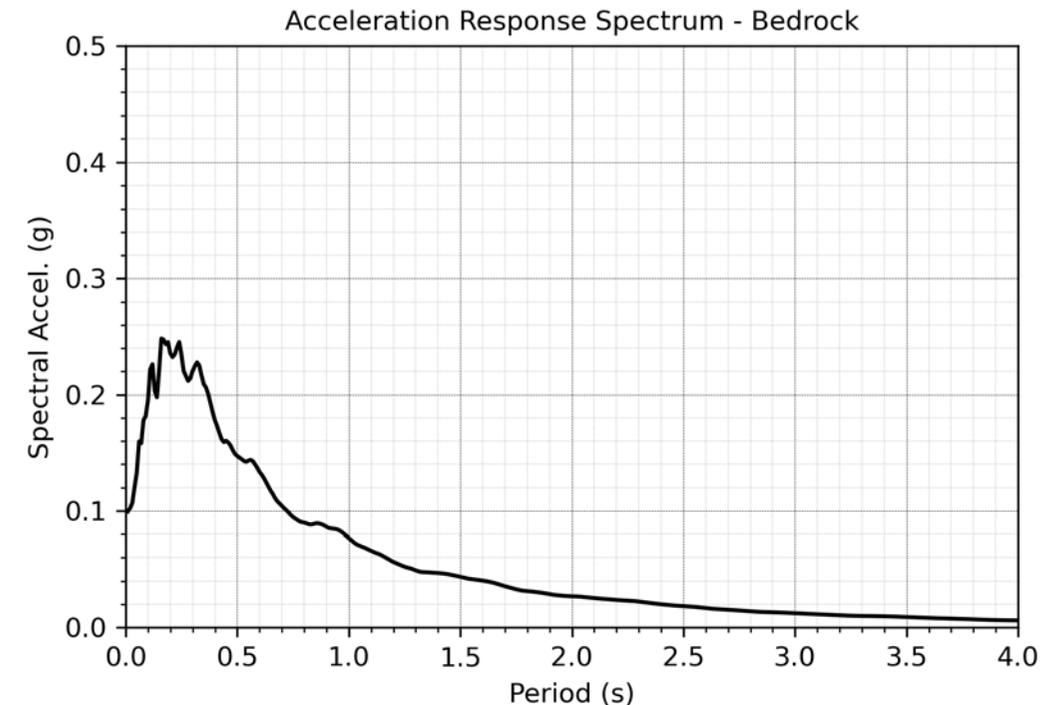
La differenza (rapporto) tra il segnale sismico atteso al Bedrock sismico (Cat. A T1 §3.2 NTC2018) e quello atteso in superficie.

Attraverso una funzione più o meno complessa dello **spostamento**, **velocità** o **accelerazione** in funzione del tempo.

Nel **dominio del tempo** e nel **dominio delle frequenze**.

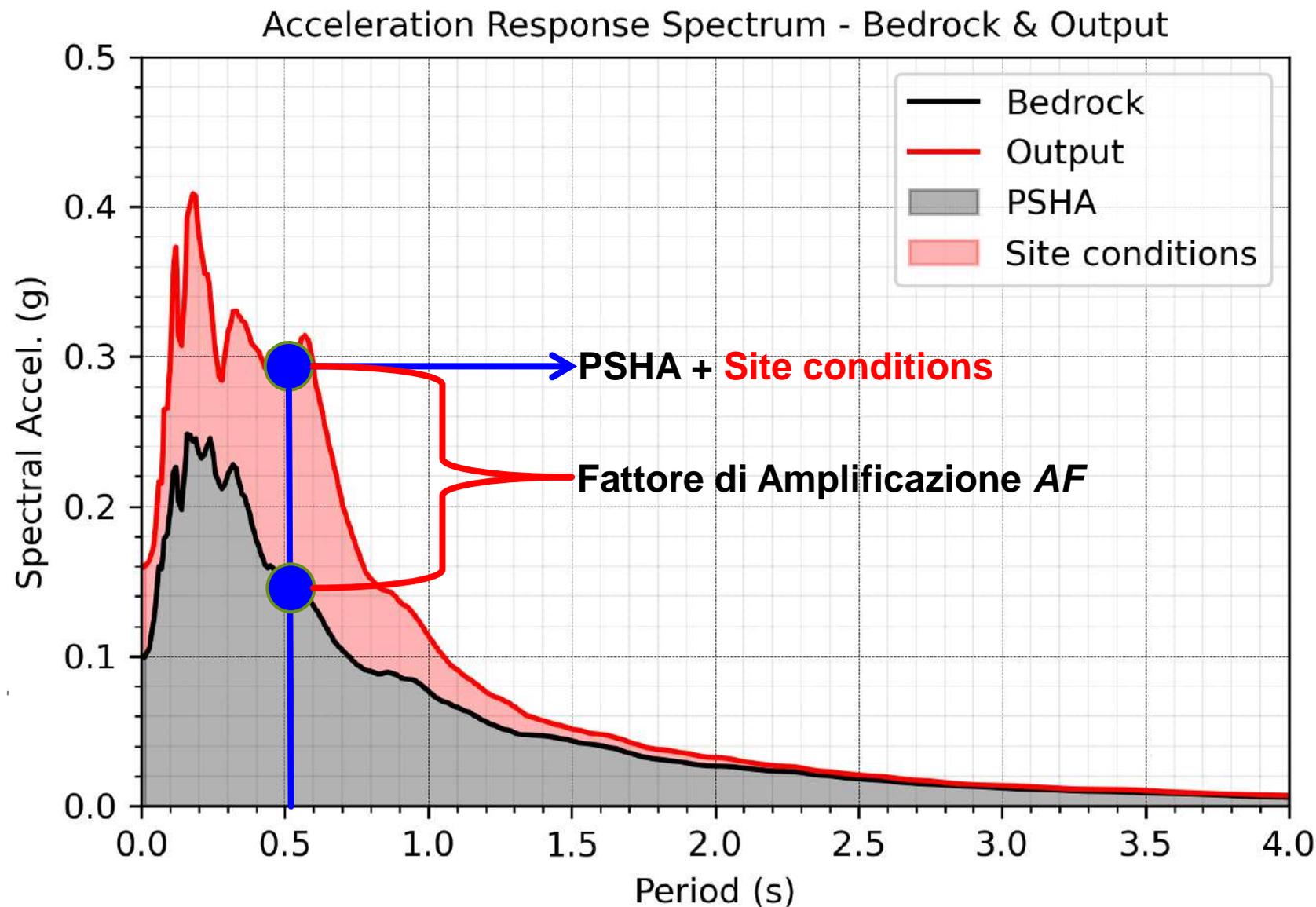
Per gli studi di risposta sismica di sito nell'ambito delle **discipline geo – ingegneristiche** le forme più utilizzate sono la velocità, lo spostamento e soprattutto l'accelerazione in termini di **spettro di risposta**.

Il vantaggio è che permette di rappresentare la risposta massima in termini di accelerazione (velocità o spostamento) per un sistema smorzato per differenti periodi naturali.



Introduzione generale

Stima della pericolosità sismica di sito



Che cosa notiamo?

$$AF_{p \div pi} = \frac{\int_p^{pi} PSA_{output}(t) dt}{\int_p^{pi} PSA_{input}(t) dt}$$

In funzione della finalità dello studio AF può essere calcolato per differenti intervalli di periodo (es. studi di MS3).

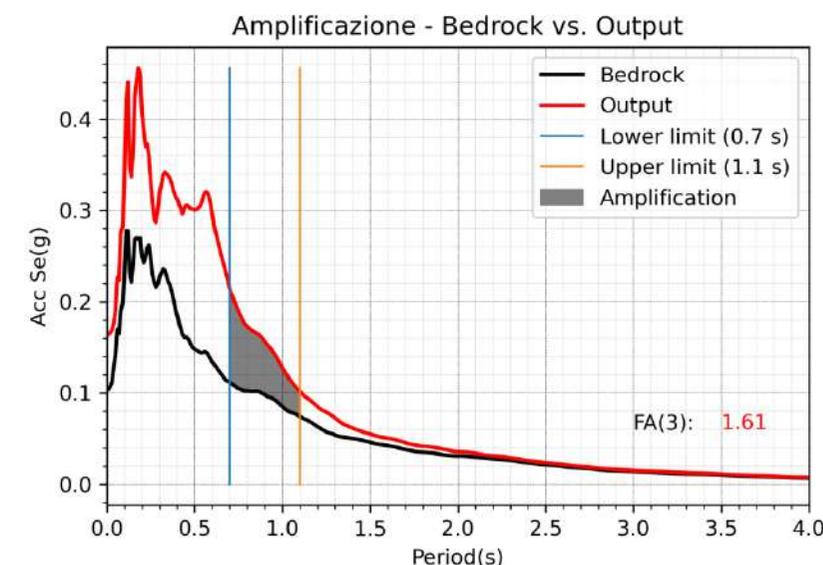
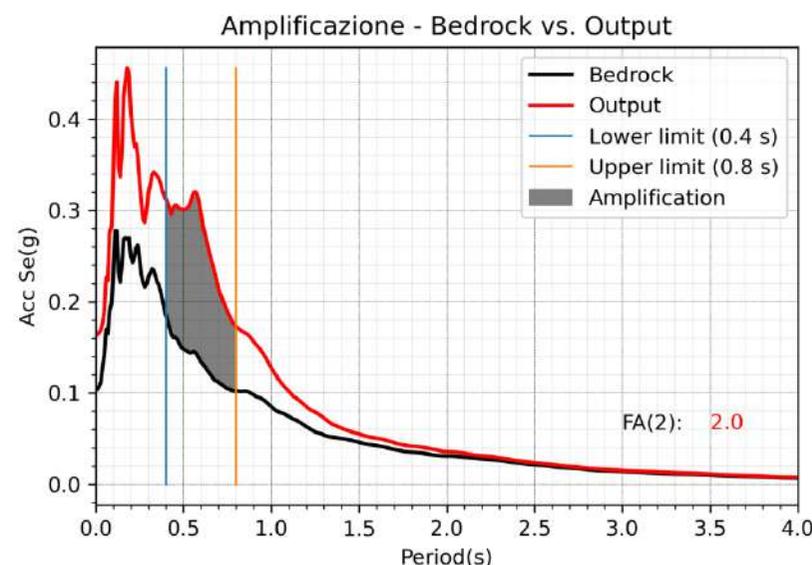
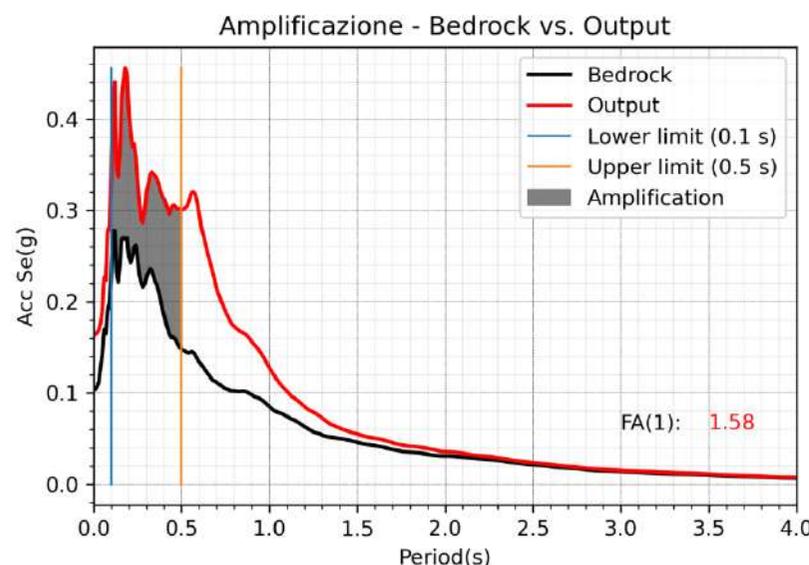
La normativa tecnica prevede anche l'utilizzo di approcci semplificati per la determinazione di AF (categorie di sottosuolo e topografiche § 3.2.2 NTC2018).

Introduzione generale

Stima della pericolosità sismica di sito

Per scopi ingegneristici è conveniente restringere il campo di analisi e valutazione del fattore di amplificazione AF per uno o più intervalli di periodo, tipicamente (per opere convenzionali) sono utilizzati intervalli [0.1-0.5], [0.4-0.8], [0.7-1.1] secondi; questi intervalli sono stati utilizzati per i calcoli del fattore di amplificazione AF nell'ambito degli studi di Microzonazione Sismica di livello 3 per le aree del cratere sismico 2016 (Ordinanza del Commissario straordinario n°24 del D.L. n°8 del 9 Febbraio 2017 - convertito con modificazioni in Legge 7 Aprile 2017, n°45).

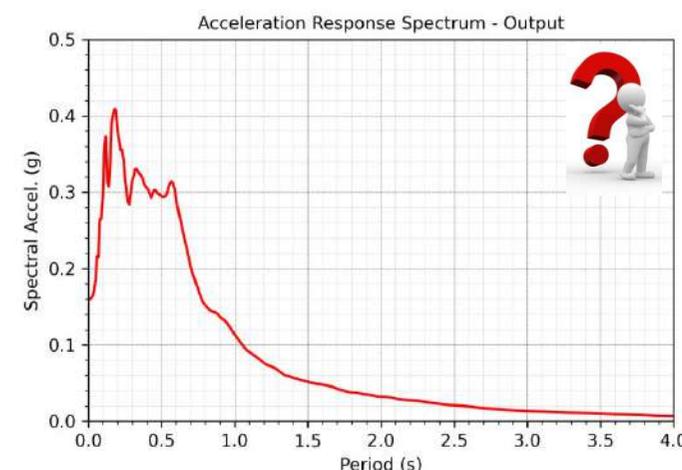
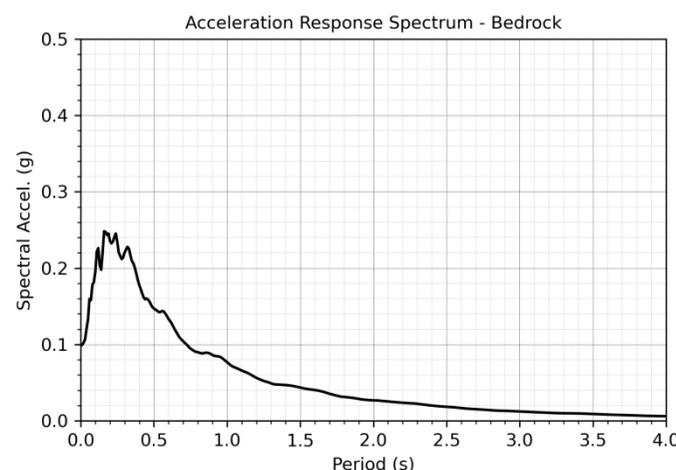
$$AF_{p \div pi} = \frac{\int_p^{pi} PSA_{output}(t) dt}{\int_p^{pi} PSA_{input}(t) dt}$$



FA [0.1-0.5] = 1.58
FA [0.4-0.8] = 2.00
FA [0.7-1.1] = 1.61

Introduzione generale

Stima della pericolosità sismica di sito



- La funzione filtro che i terreni generano nel segnale sismico è di fatto definibile in due modi:
 1. Il primo prevede una **misura diretta del rapporto** tra due misure reali di segnale, prese su due stazioni di misura, una posizionata su terreno non rigido e una su affioramento di *substrato sismico*.
 2. Il secondo metodo invece, prevede una **simulazione numerica** partendo dalla conoscenza delle proprietà fisico - meccaniche del *substrato sismico* e dei terreni non rigidi sovrastanti ad esso.

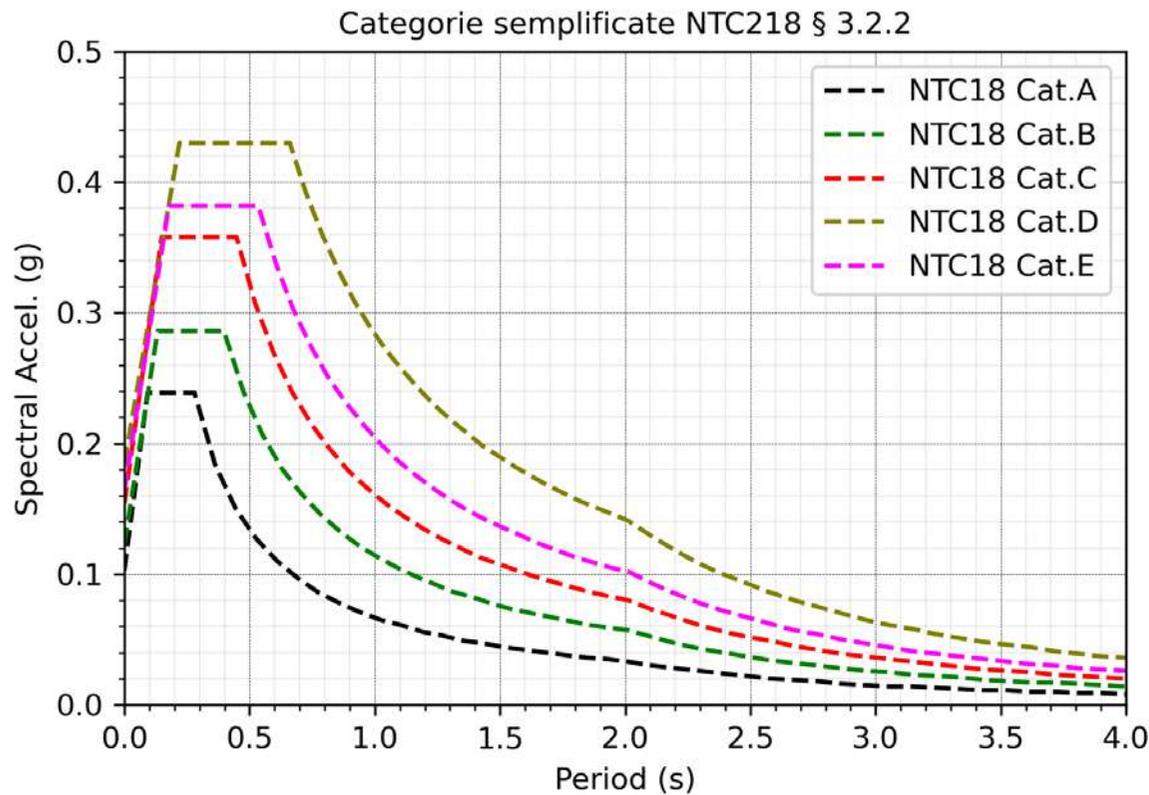
Poter disporre di coppie di segnali rispettivamente riferiti al *substrato sismico* e al piano campagna permette di ovviare ad artificiose analisi numeriche che sono imprescindibili per qualunque simulazione, e definire la **funzione di amplificazione** del segnale in superficie.

Per ovvie ragioni, non sempre si dispone di stazioni e dati tali da poter coprire vaste aree territoriali, pertanto nell'ambito tecnico scientifico, si ricorre molto spesso alla simulazione numerica per la definizione dell'*amplificazione attesa* per un determinato sito. Per terreni governati da leggi costitutive lineari è possibile definire una **funzione di trasferimento** (*Transfer Function TF*), che è una **proprietà intrinseca del sito e delle sue proprietà fisico - meccaniche – stratigrafiche**.

Introduzione generale

Stima della pericolosità sismica di sito

Normativa
NTC 2018



$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

§ 3.2.1

Parametri sismici di base: $a_g - F_0 - T_c^*$



Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_s e di C_c

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

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

$$S = S_s * S_T \text{ formula [3.2.3]}$$

Configurazioni stratigrafiche & topografiche
20 - [A,B,C,D,E] * [T1,T2,T3,T4]

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

| Categoria topografica | Ubicazione dell’opera o dell’intervento | S_T |
|-----------------------|---|-------|
| T1 | - | 1,0 |
| T2 | In corrispondenza della sommità del pendio | 1,2 |
| T3 | In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30° | 1,2 |
| T4 | In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30° | 1,4 |

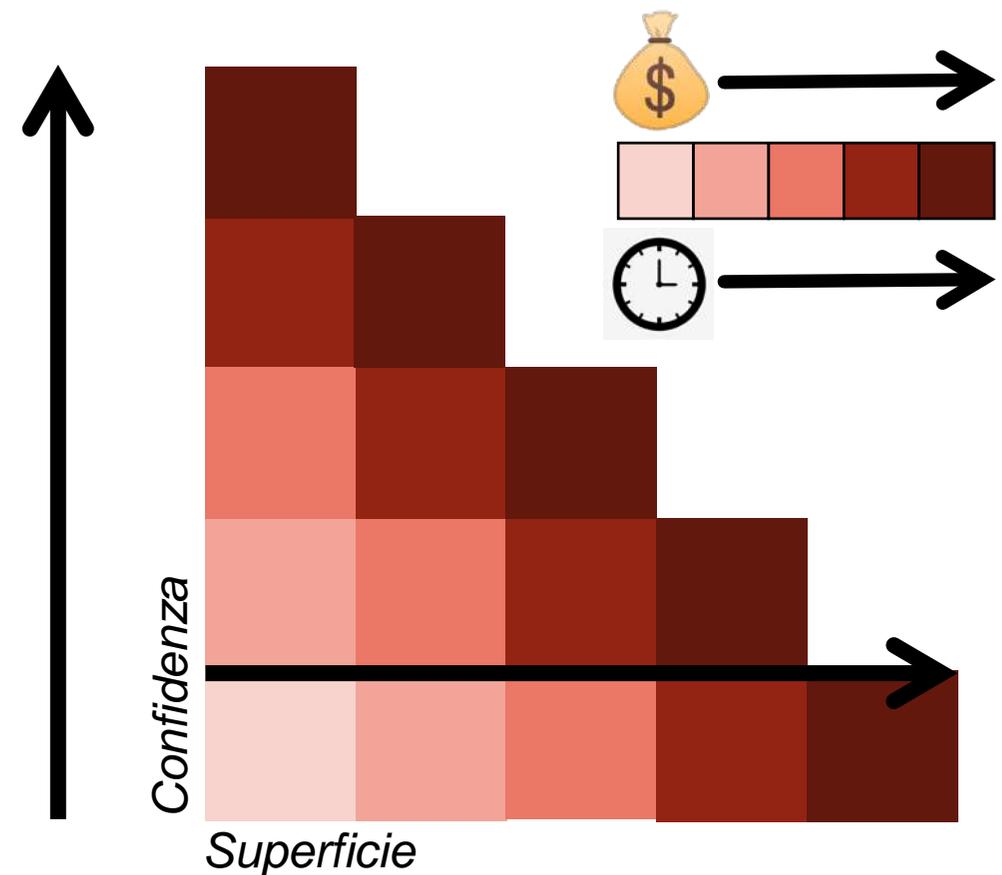
Piano di indagini

Investire risorse per ottenere un modello sismo – stratigrafico quanto più affidabile possibile



Definire con la maggiore accuratezza possibile le caratteristiche geotecniche – geofisiche e morfo – stratigrafiche dei terreni che hanno effetto sulle modificazioni del segnale sismico

- Tipo di opera.
- Contesto geologico (**e sismico**).
- Analisi della normativa nazionale e regionale (se presente).
- Reperimento ed **analisi** dei dati ancillari dell'area di studio.
- Pianificazione del piano di indagini.



Chi dovrebbe predisporre il piano di indagini?

N.T.C. 2018 - § 6.2.2 - § 7.11.2

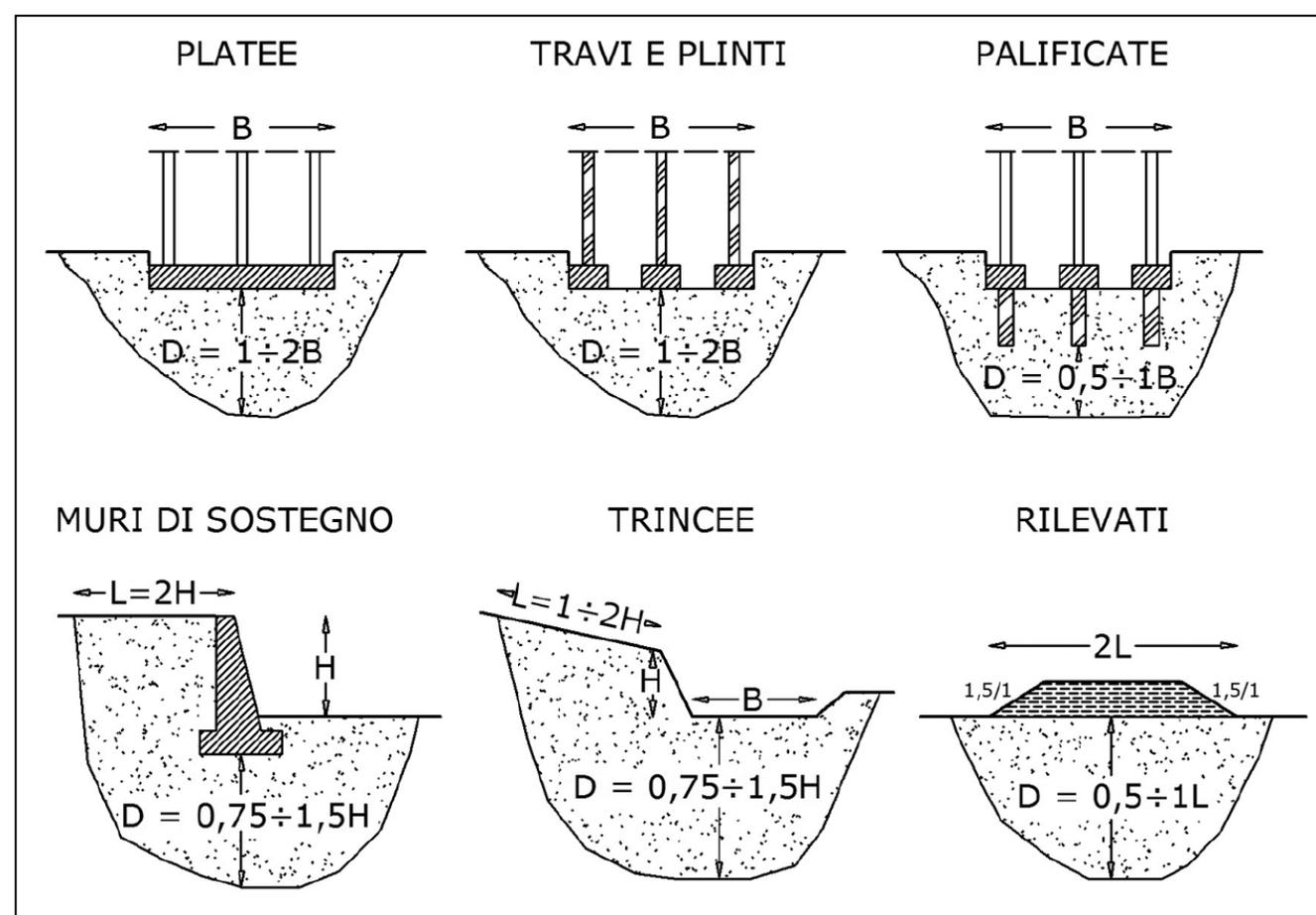
“Le indagini geotecniche devono essere predisposte dal progettista in presenza di un quadro geologico **adeguatamente definito**, che comprenda i principali caratteri tettonici e litologici, nonché l'eventuale preesistenza di fenomeni di instabilità del territorio”.



@web (Pinterest)

Piano di indagini

Volume significativo

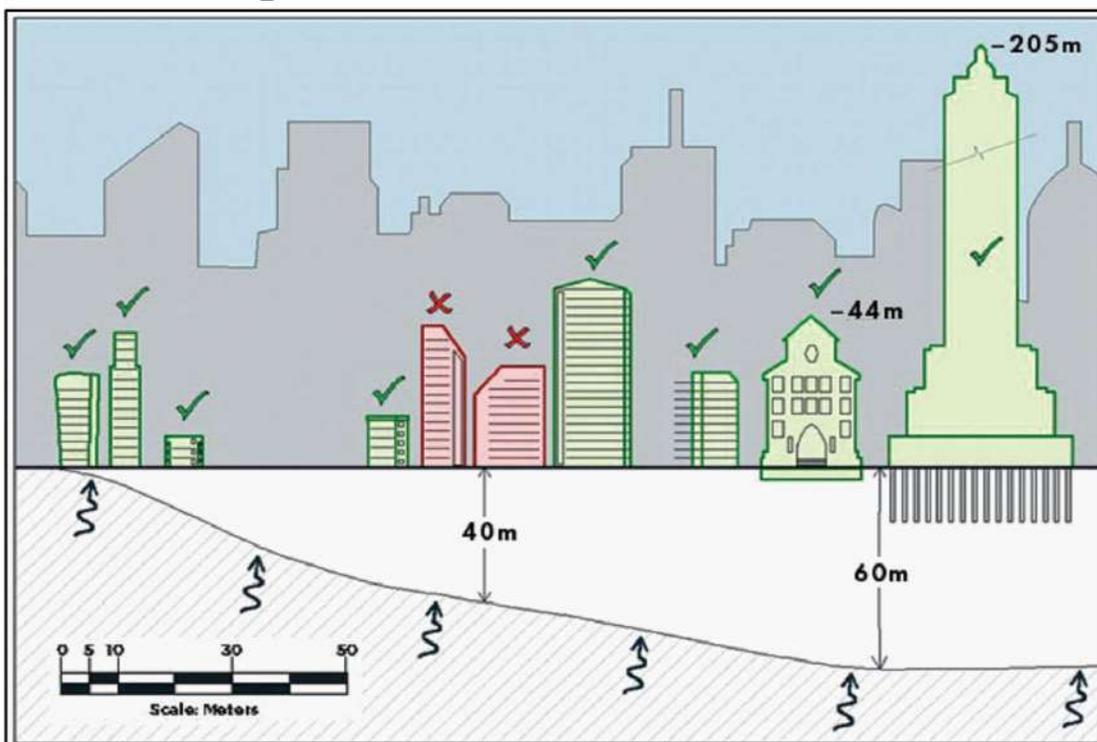


(A.G.I. 1977)

- Sovrappressione indotta dalla struttura
- Tipo & geometria delle fondazioni
- Proprietà fisico – meccaniche dei terreni

Piano di indagini

Volume significativo

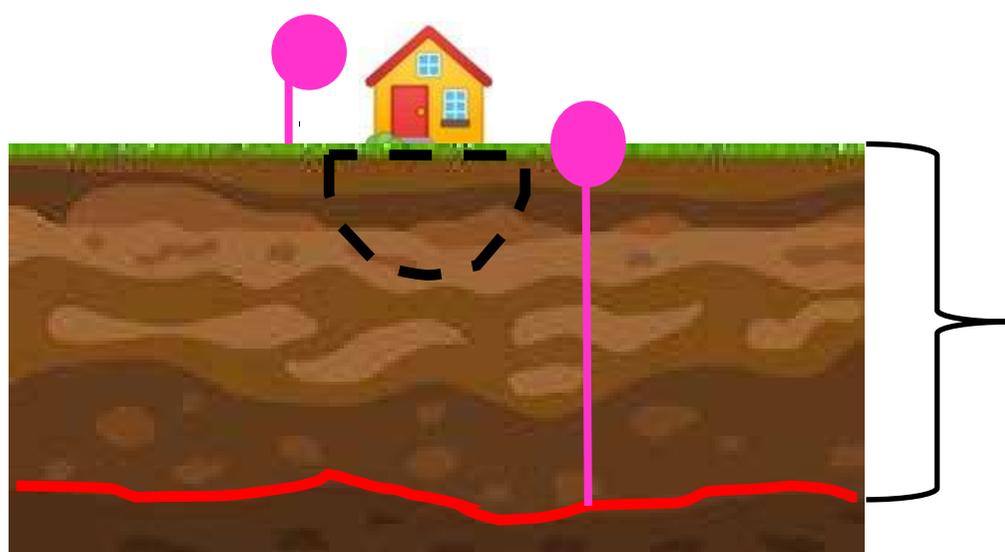


Sissy Nikolaou (2018)

“Geoseismic Design Challenges in Mexico City”



Amatrice (RI) – Civic Tower



C7.11.3.1.2 (NTC2018)

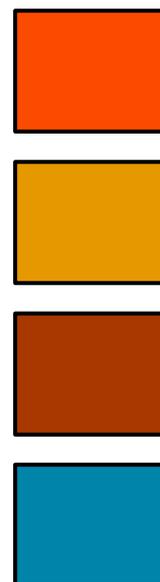
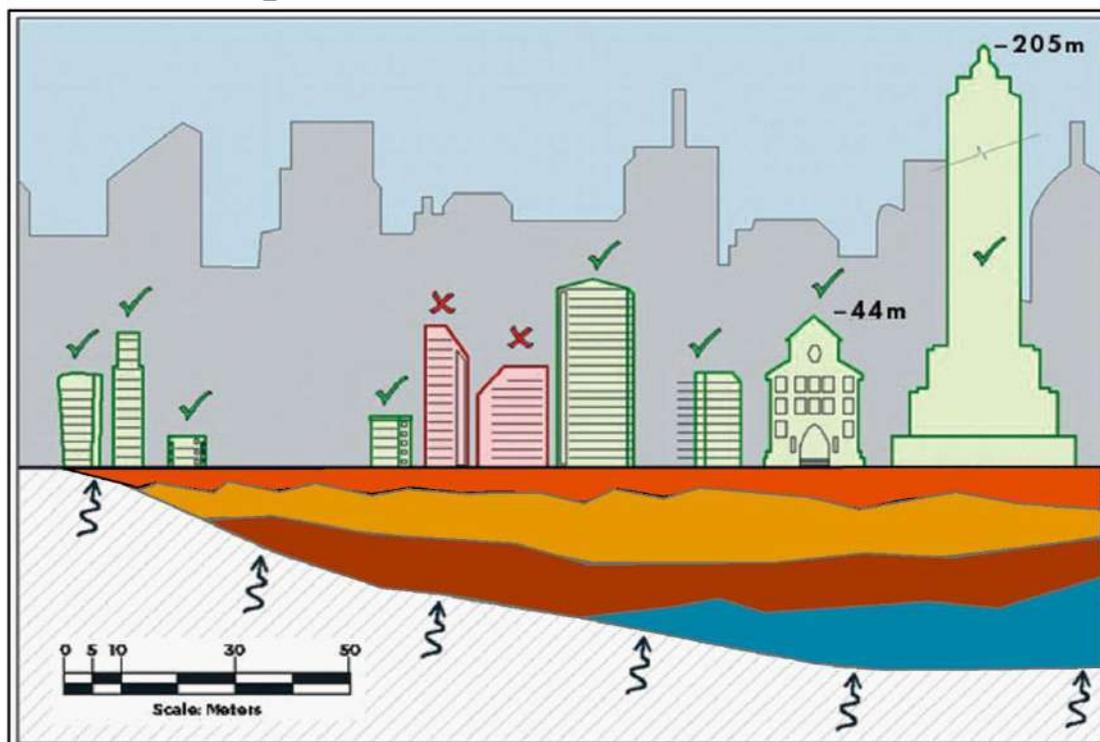
“*Volume significativo sismico*”

Frequenza (o *periodo* per gli ingegneri)

Caratteristiche del pendolo

Piano di indagini

Volume significativo



**Significatività delle unità
sismo – stratigrafiche**

Sissy Nikolaou (2018)

“Geoseismic Design Challenges in Mexico City”



Il peso da associare alla cura nella definizione parametrica dei vari sismo – strati in una analisi per la stima della pericolosità sismica di sito può essere definito (anche) in funzione delle differenti tipologie di strutture.

Piano di indagini

“*Indagini minime*” per eseguire uno studio di pericolosità sismica di sito

“*minime*” – obiettivo (*ahinoi geologi*) forviante

“*non ho effettuato la prova Down Hole.....*”

“*ho 5 sondaggi con 30 pesi di volume per altrettanti campioni.....*”

“*ho eseguito due MASW una prova Down Hole.....*”

Bull Earthquake Eng (2018) 16:2367–2420
<https://doi.org/10.1007/s10518-017-0206-7>



ORIGINAL RESEARCH PAPER

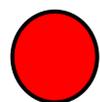
Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project

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

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

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

Un prodotto del progetto InterPACIFIC



Indagini eseguite in numero e tipo che permettano di giungere ad una definizione del modello sismo – stratigrafico dell'area ritenuto accettabile in funzione della tipologia di progetto.



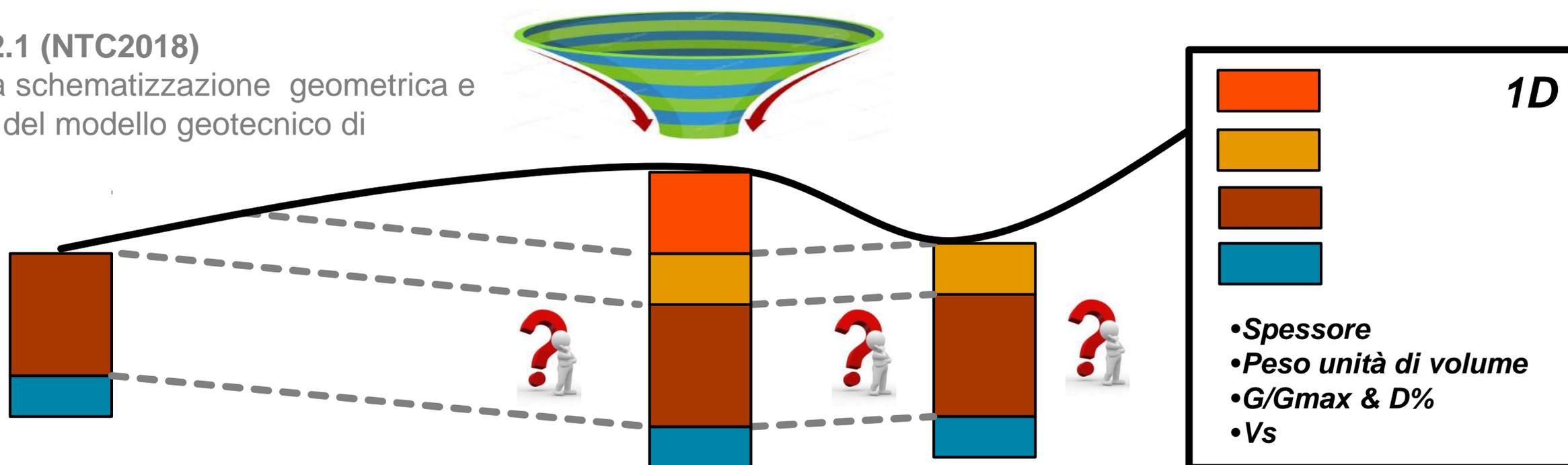
**Analisi di rumore ambientale a
stazione singola (HVSr)**

Piano di indagini



C7.11.3.1.2.1 (NTC2018)

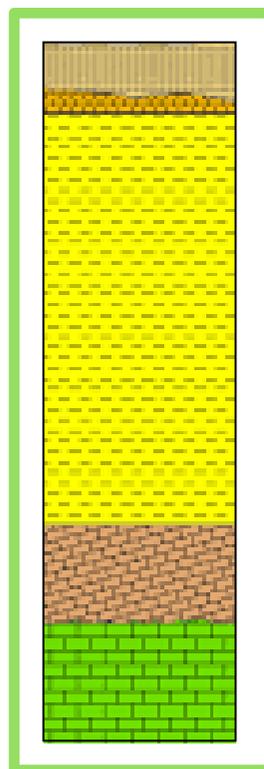
Scelta della schematizzazione geometrica e definizione del modello geotecnico di sottosuolo



Modello sismo - stratigrafico



Far convergere tutte le informazioni verso un modello di rappresentazione del sottosuolo fruibile per le simulazioni numeriche



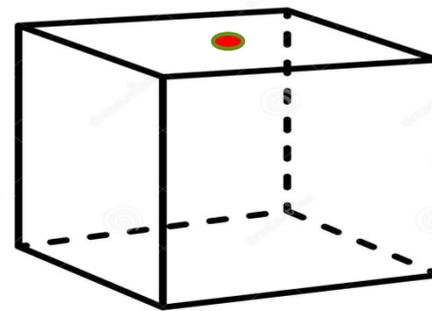
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[g/mc3] | Damping[%] |
|--------------|--------|----------|------------|
| 3 | 190 | 1.7 | 2 |
| 6 | 320 | 1.8 | 2 |
| 8 | 450 | 2 | 2 |
| 4 | 640 | 2.1 | 2 |
| 0 | 1000 | 2.4 | 1 |

Modello sismo - stratigrafico

| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[g/mc3] | Damping[%] |
|--------------|--------|----------|------------|
| 3 | 190 | 1.7 | 2 |
| 6 | 320 | 1.8 | 2 |
| 8 | 450 | 2 | 2 |
| 4 | 640 | 2.1 | 2 |
| 0 | 1000 | 2.4 | 1 |



Volume significativo



Volume
13*13*8
1352 m³

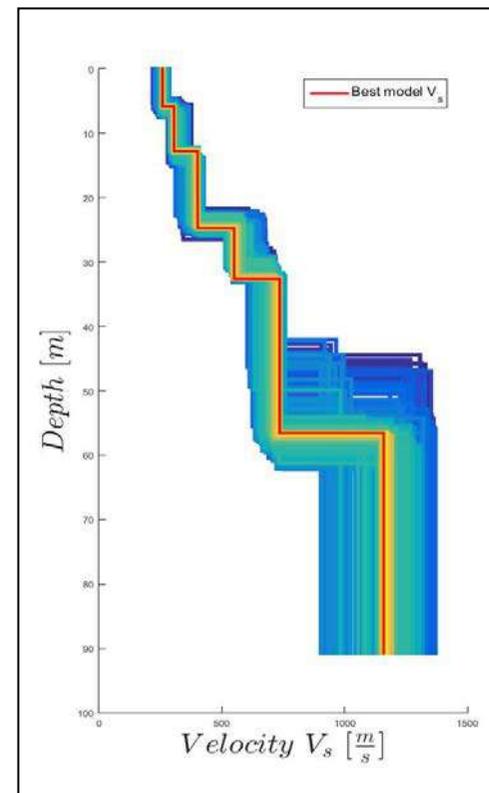
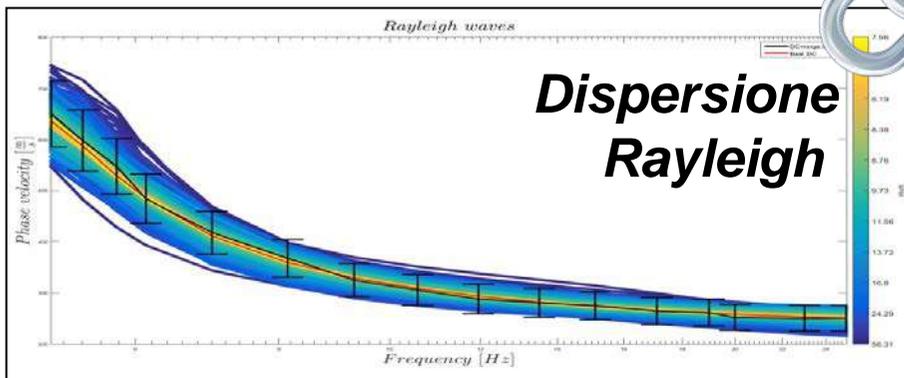
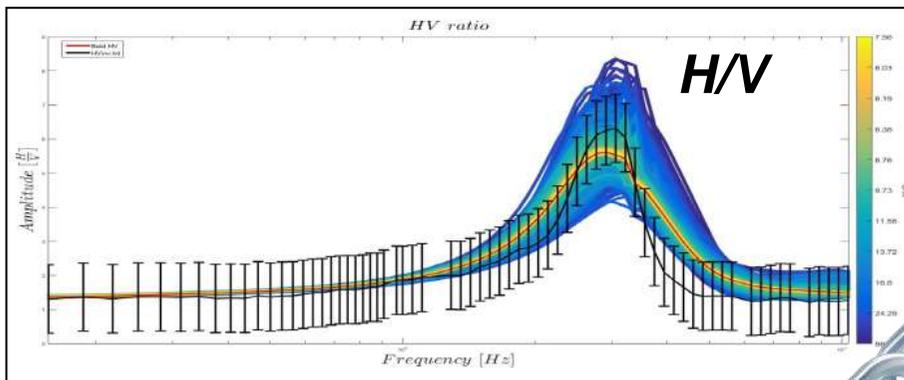


Volume
0.05*0.05*8
0.0628 m³

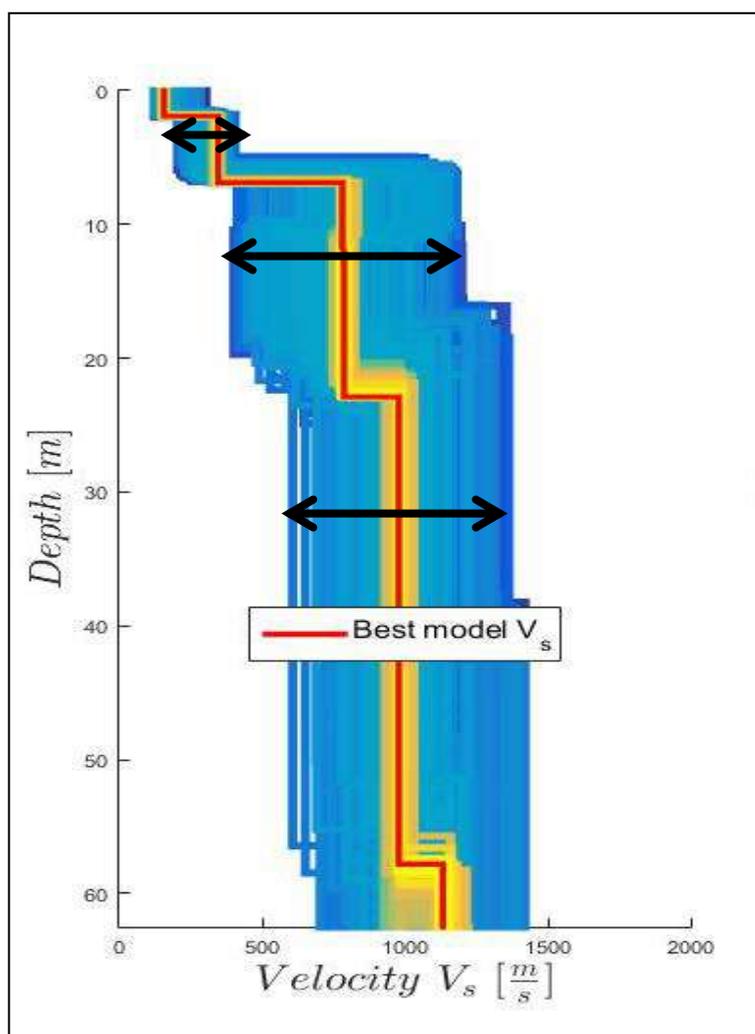


Volume
0.05*0.05*0.4
0.00314 m³

Gestire le incertezze



Modello sismo - stratigrafico

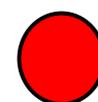


Esempio inversione di indagini geofisiche attive e passive

Il processo di inversione prevede la simulazione di una serie di modelli teorici (principalmente V_s e spessori sismo strati) usando la **curva di dispersione delle onde di Rayleigh** e la **curva HVSR** sperimentali come target, con assunzione a priori di alcuni parametri (numero degli strati, coefficiente di *Poisson*, densità).

Il processo non ammette una soluzione univoca pertanto, **anche per un singolo punto di analisi** dovremmo ammettere un certo grado di dispersione nel profilo sismo - stratigrafico.

Per un **SITO** (una **MOPS** un **CLUSTER**) dovremo individuare il grado di *coesione* dei profili individuati e provare a tracciarne i principali **caratteri descrittivi** da un punto di **vista statistico per stimare al meglio il profilo sismo - stratigrafico caratteristico**.

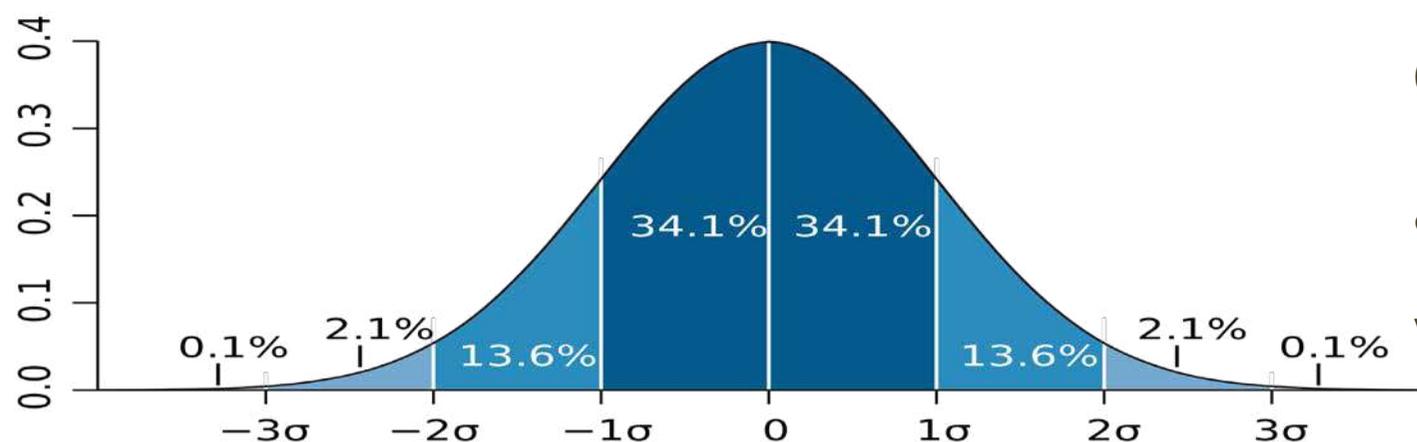


Nelle analisi per la stima della pericolosità sismica di sito è possibile (ed auspicabile) tener conto della variabilità dei parametri.

Modello sismo - stratigrafico

Descrivere la variabilità dei dati

- ✓ Immaginiamo che esista un valore considerato vero di V_s ad una determinata profondità h , determinato (misurato) in condizioni ideali, in assenza di quei fattori che ne alterano il valore (perturbazioni). Ideali vs Reali.
- ✓ Nella realtà esiste la perturbazione, supponiamo che possa produrre variazioni positive e negative con la medesima probabilità.
- ✓ Perturbazioni che producono grandi variazioni (+/-) sono meno probabili di perturbazioni che producono piccole variazioni (+/-).
- ✓ Con queste assunzioni eseguendo un numero significativo di misure otteniamo il grafico della loro distribuzione in frequenza con la tipica curva a campana (curva di Gauss).



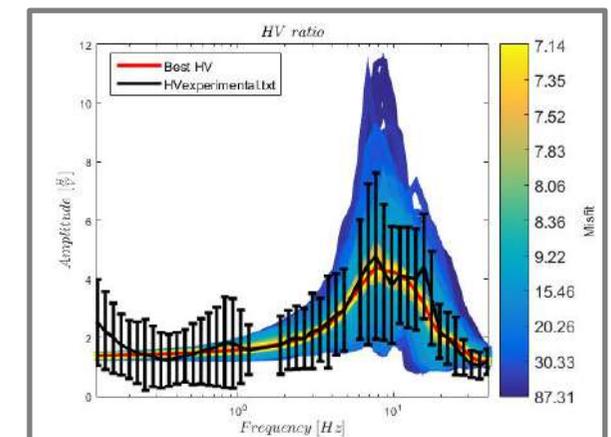
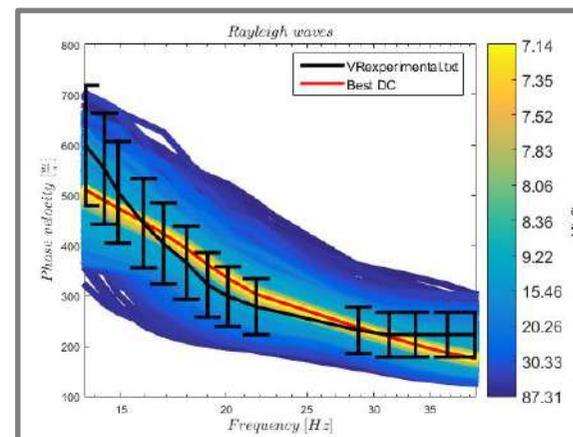
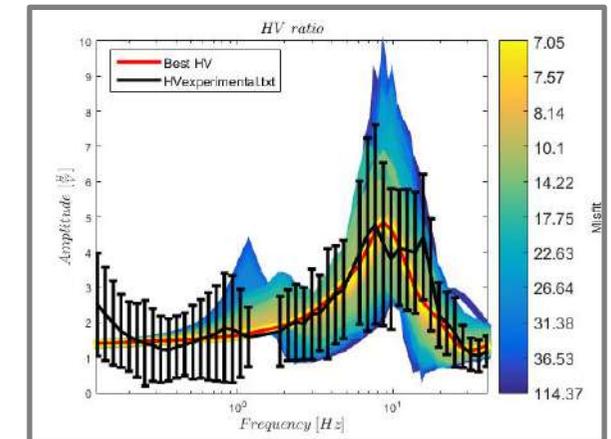
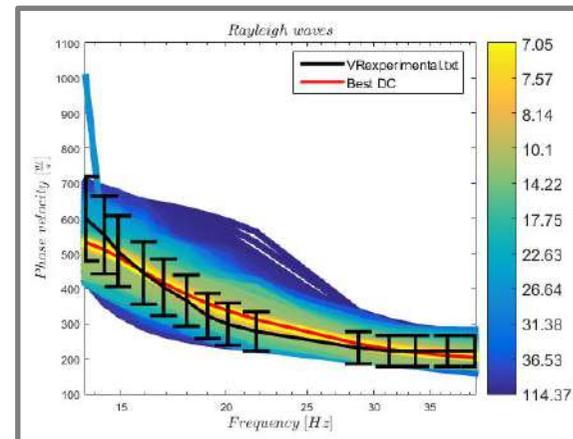
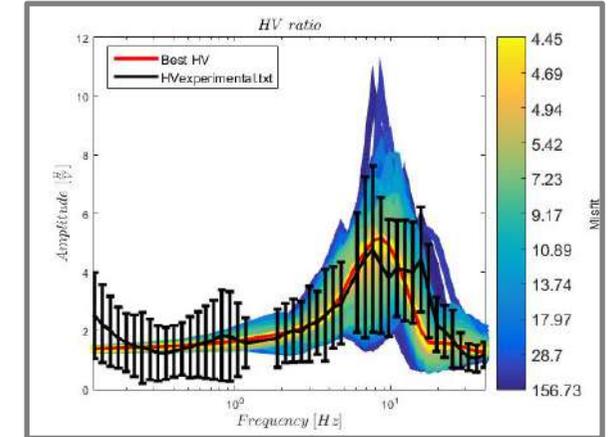
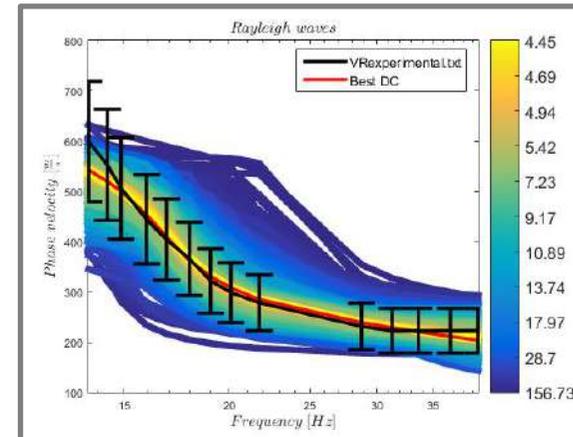
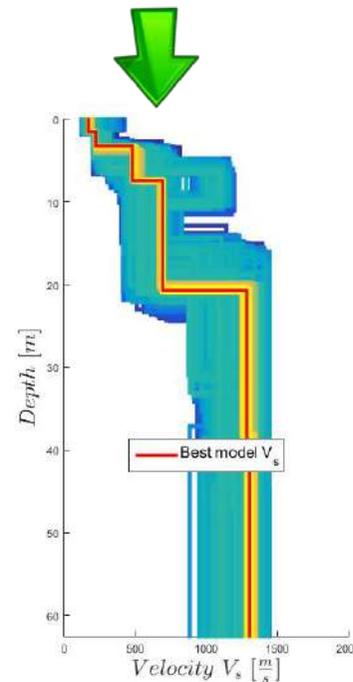
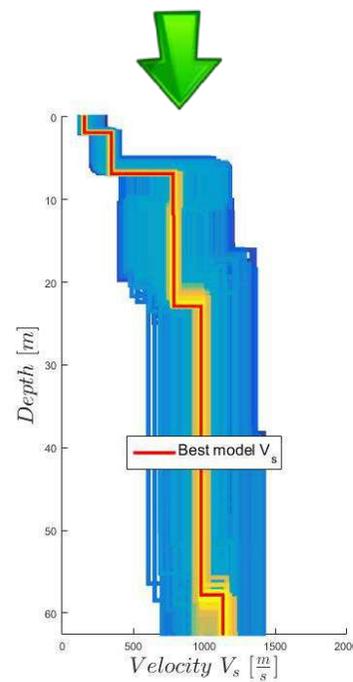
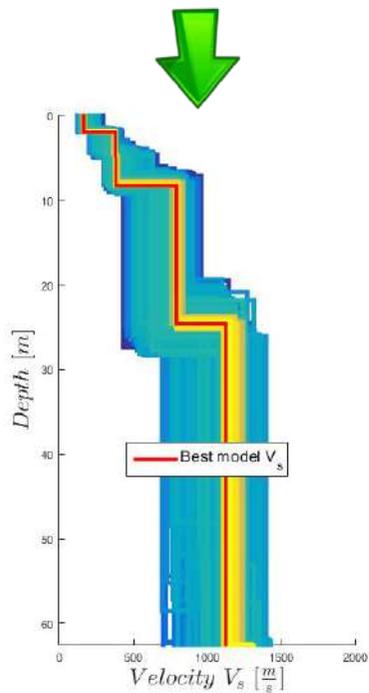
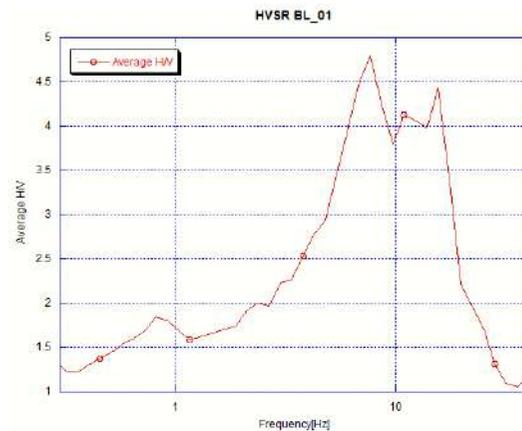
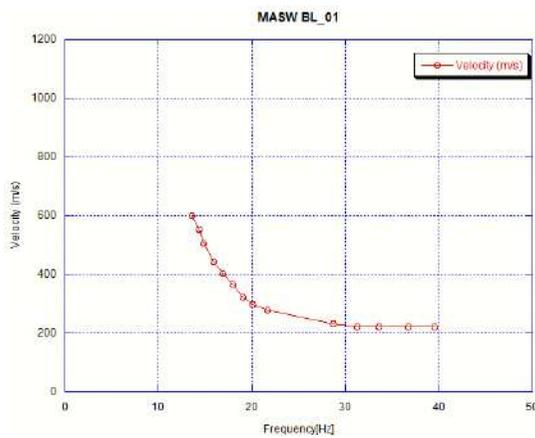
$0 = \mu$ Valore medio (vero)
Rappresenta il valore di riferimento

σ = deviazione standard
Rappresenta la dispersione dei valori

- ✓ Un adeguato numero di indagini può permettere di realizzare curve di distribuzione dei dati caratteristiche di sito.

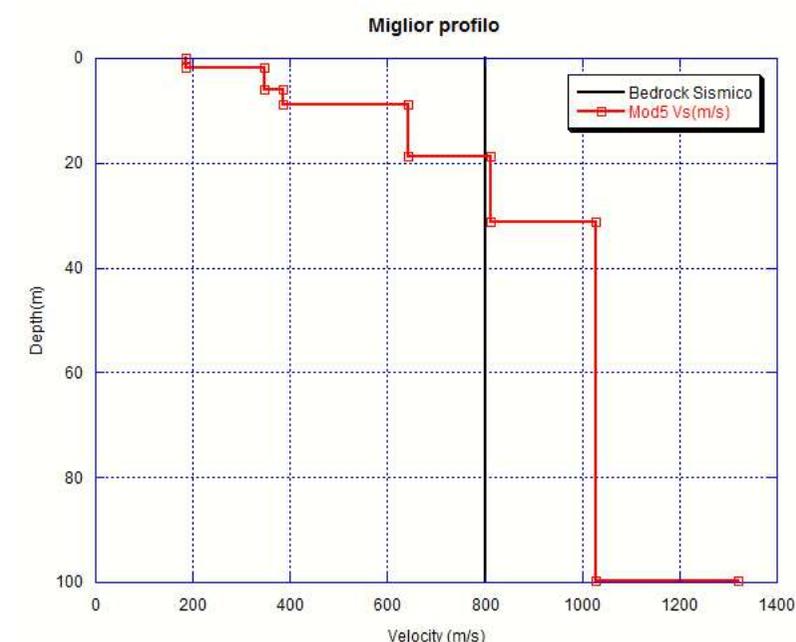
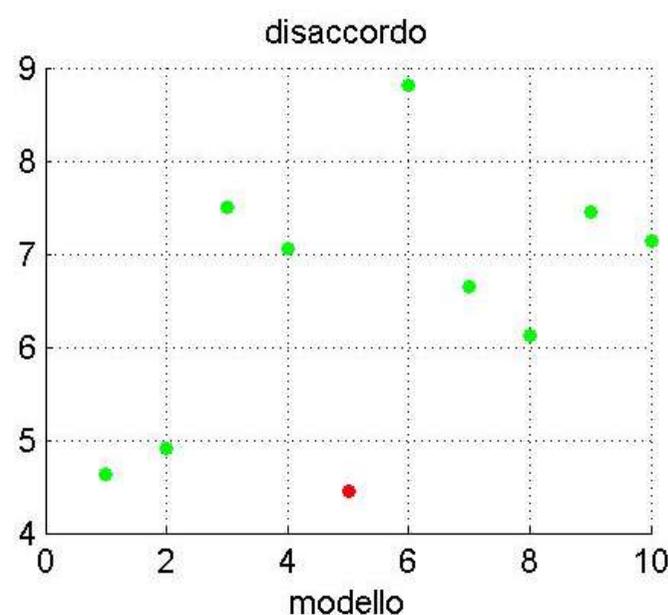
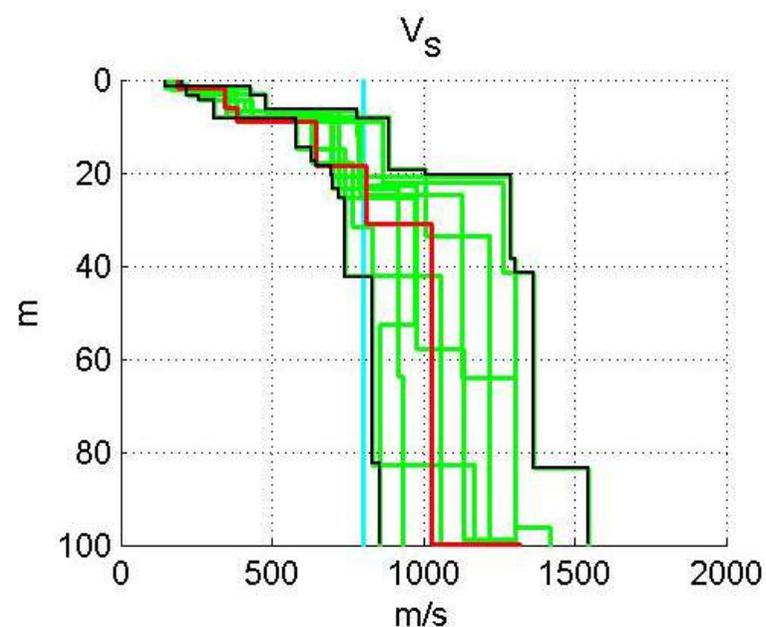
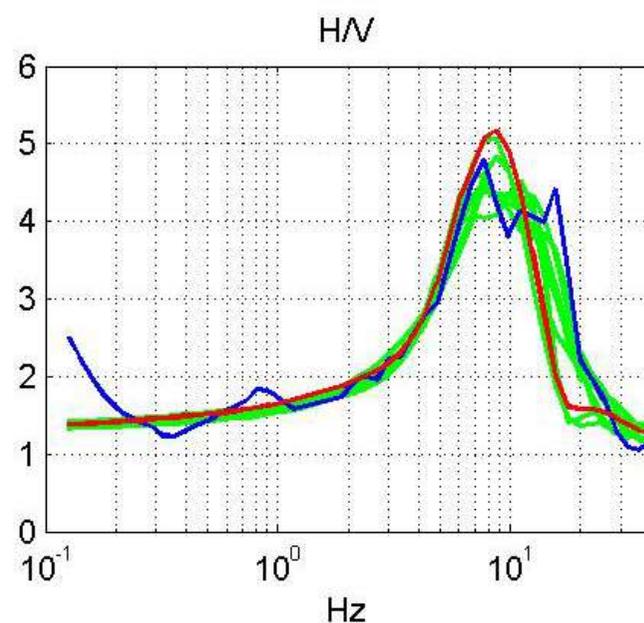
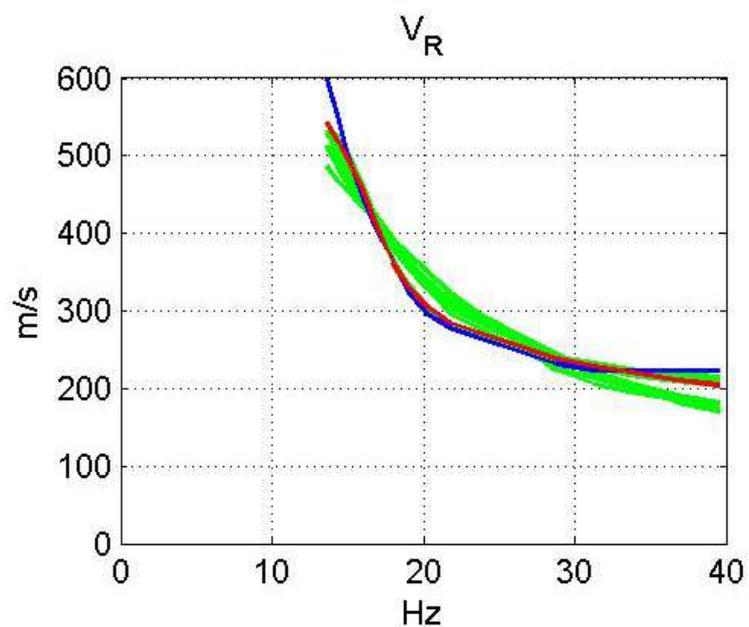
Modello sismo - stratigrafico

Descrivere la variabilità dei dati



Modello sismo - stratigrafico

Descrivere la variabilità dei dati



Modello sismo - stratigrafico

Descrivere la variabilità dei dati

Variabilità di Vs con la profondità.

Profondità con passo 1 metro.

Distribuzione log-normale

$$m_{ln} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln(Vs_i)$$

$$s_{ln} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\ln(Vs_i) - m_{ln}]^2}$$

$$Vs_{rif} = e^{m_{ln}}$$

| Prof | Vs 1 | Vs 2 | Vs 3 | ln(Vs 1) | ln(Vs 2) | ln(Vs 3) | m_{ln} | s_{ln} | $e^{(m_{ln})}$ | $e^{(m_{ln}-s_{ln})}$ | $e^{(m_{ln}+s_{ln})}$ | Min | Max |
|------|------|------|------|----------|----------|----------|----------|----------|----------------|-----------------------|-----------------------|-----|-----|
| 1 | 180 | 180 | 220 | 5.193 | 5.193 | 5.394 | 5.260 | 0.1159 | 192 | 171 | 216 | 180 | 220 |
| 2 | 180 | 180 | 220 | 5.193 | 5.193 | 5.394 | 5.260 | 0.1159 | 192 | 171 | 216 | 180 | 220 |
| 3 | 230 | 180 | 300 | 5.438 | 5.193 | 5.704 | 5.445 | 0.2555 | 232 | 179 | 299 | 180 | 300 |
| 4 | 230 | 180 | 300 | 5.438 | 5.193 | 5.704 | 5.445 | 0.2555 | 232 | 179 | 299 | 180 | 300 |
| 5 | 230 | 180 | 300 | 5.438 | 5.193 | 5.704 | 5.445 | 0.2555 | 232 | 179 | 299 | 180 | 300 |
| 6 | 230 | 180 | 300 | 5.438 | 5.193 | 5.704 | 5.445 | 0.2555 | 232 | 179 | 299 | 180 | 300 |
| 7 | 230 | 260 | 300 | 5.438 | 5.561 | 5.704 | 5.568 | 0.1330 | 262 | 229 | 299 | 230 | 300 |
| 8 | 230 | 260 | 340 | 5.438 | 5.561 | 5.829 | 5.609 | 0.1999 | 273 | 223 | 333 | 230 | 340 |
| 9 | 230 | 260 | 340 | 5.438 | 5.561 | 5.829 | 5.609 | 0.1999 | 273 | 223 | 333 | 230 | 340 |
| 10 | 230 | 260 | 340 | 5.438 | 5.561 | 5.829 | 5.609 | 0.1999 | 273 | 223 | 333 | 230 | 340 |
| 11 | 330 | 400 | 340 | 5.799 | 5.991 | 5.829 | 5.873 | 0.1035 | 355 | 320 | 394 | 330 | 400 |
| 12 | 330 | 400 | 340 | 5.799 | 5.991 | 5.829 | 5.873 | 0.1035 | 355 | 320 | 394 | 330 | 400 |
| 13 | 330 | 400 | 450 | 5.799 | 5.991 | 6.109 | 5.967 | 0.1566 | 390 | 334 | 456 | 330 | 450 |
| 14 | 500 | 400 | 450 | 6.215 | 5.991 | 6.109 | 6.105 | 0.1116 | 448 | 401 | 501 | 400 | 500 |
| 15 | 500 | 400 | 450 | 6.215 | 5.991 | 6.109 | 6.105 | 0.1116 | 448 | 401 | 501 | 400 | 500 |
| 16 | 500 | 400 | 450 | 6.215 | 5.991 | 6.109 | 6.105 | 0.1116 | 448 | 401 | 501 | 400 | 500 |
| 17 | 500 | 400 | 450 | 6.215 | 5.991 | 6.109 | 6.105 | 0.1116 | 448 | 401 | 501 | 400 | 500 |
| 18 | 500 | 400 | 450 | 6.215 | 5.991 | 6.109 | 6.105 | 0.1116 | 448 | 401 | 501 | 400 | 500 |

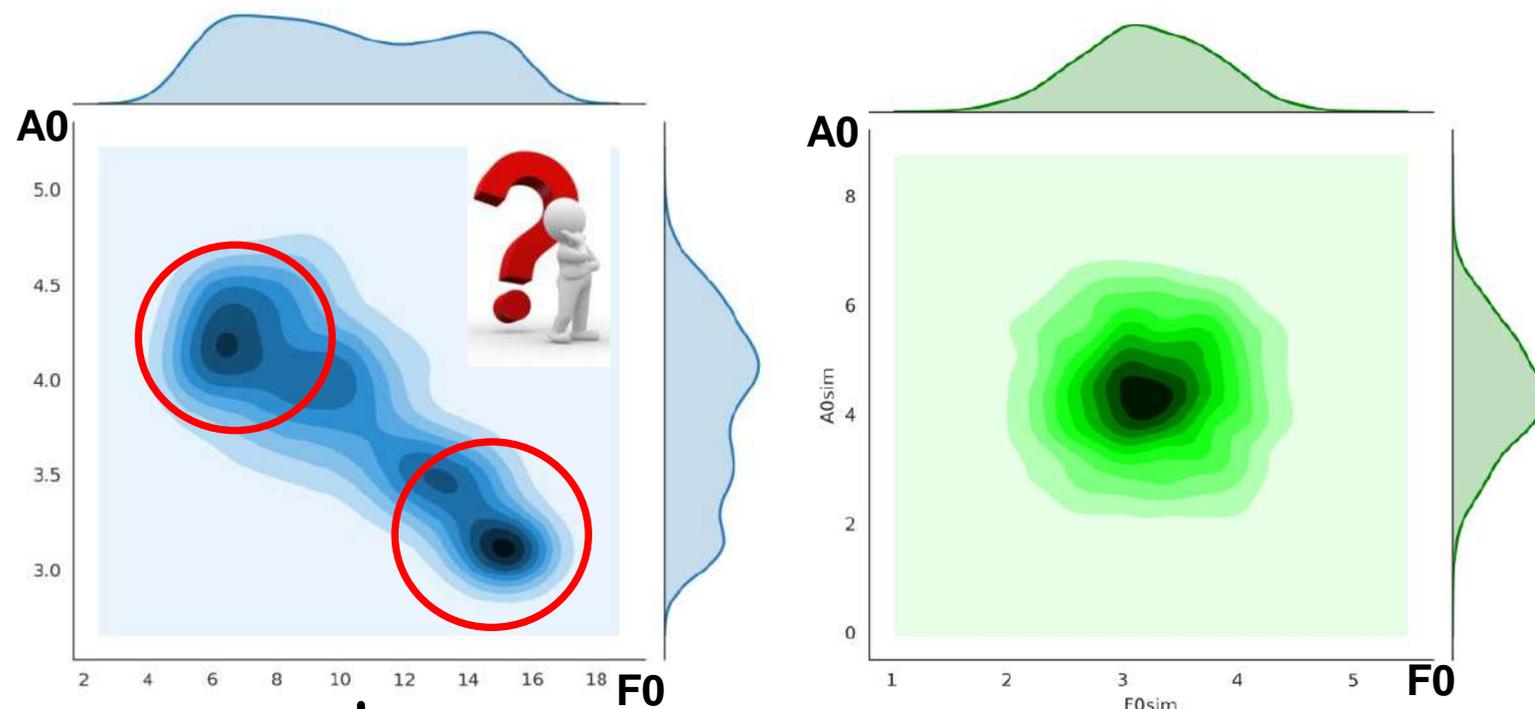
“Protocolli di acquisizione ed elaborazione dati relativi alla attività di Microzonazione Sismica di livello 3 in Italia Centrale”
Centro MS

Modello sismo - stratigrafico

Descrivere la variabilità dei dati

- Un determinato dato **all'interno di un SITO** dovrebbe essere caratterizzato da una distribuzione molto vicina quella normale.
- Non dovrebbero essere pertanto ammesse distribuzioni bi - modali.
- Andrebbe valutato il grado di deviazione standard dei dati.
- Non dovrebbero essere presenti *outlier*.

Valori simulati di F0 vs A0



Giannini L.M. (2020)

Omogeneità del sito...

Microzona Omogenea in Prospettiva Sismica

In questa condizione

Suddivido l'area di studio

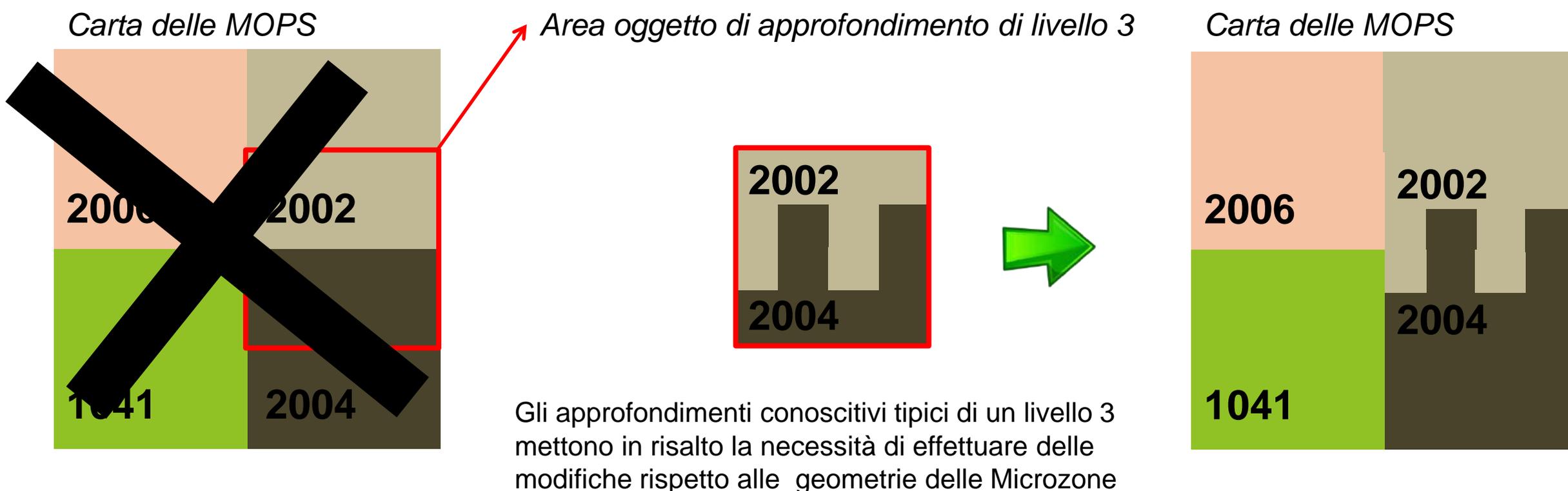
Analisi numeriche non monodimensionali

Modello sismo - stratigrafico

Descrivere la variabilità dei dati (in ottica di Microzonazione Sismica)

MS1: Piccola scala, basso grado di definizione delle proprietà delle microzone omogenee individuate; sono ammessi range di variabilità molto ampi delle caratteristiche morfo - lito - stratigrafiche all'interno della stessa microzona. L'approccio di studio è principalmente qualitativo, vengono raccolti i dati, per lo più di archivio, afferenti all'area e interpretati in prospettiva sismica.

MS3: Grande scala, aumenta sensibilmente il grado di definizione delle proprietà delle microzone omogenee individuate; si restringe, rispetto al livello 1 (e 2), il range di variabilità ammesso per le caratteristiche morfo - lito - stratigrafiche all'interno della stessa microzona. L'approccio di studio è quantitativo, vengono definiti in modo numerico valori numerici di amplificazione; valutati anche eventuali effetti 2/3D.

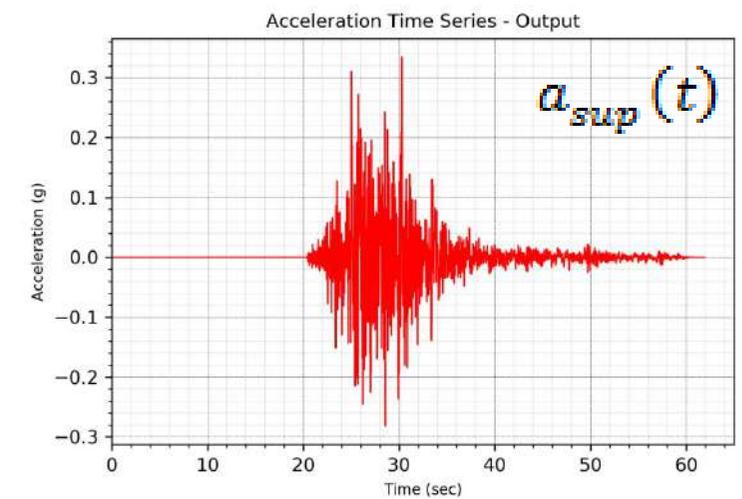
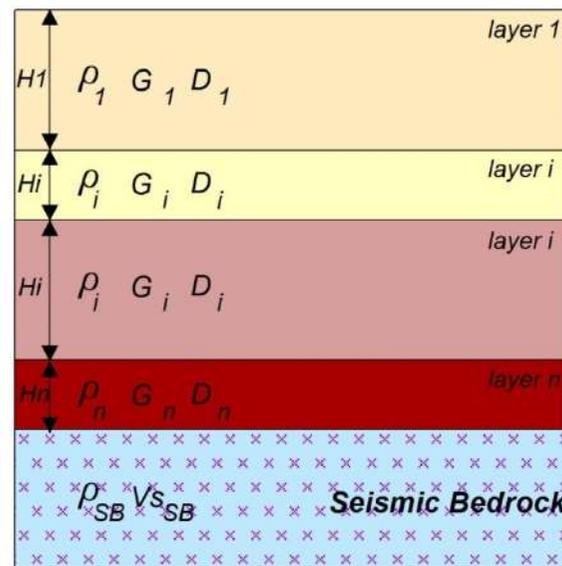
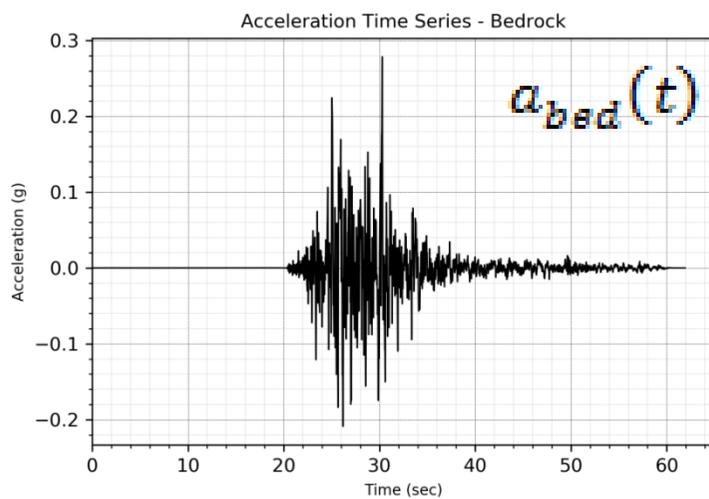


Codici di analisi 1D

Analisi numeriche di Risposta Sismica Locale

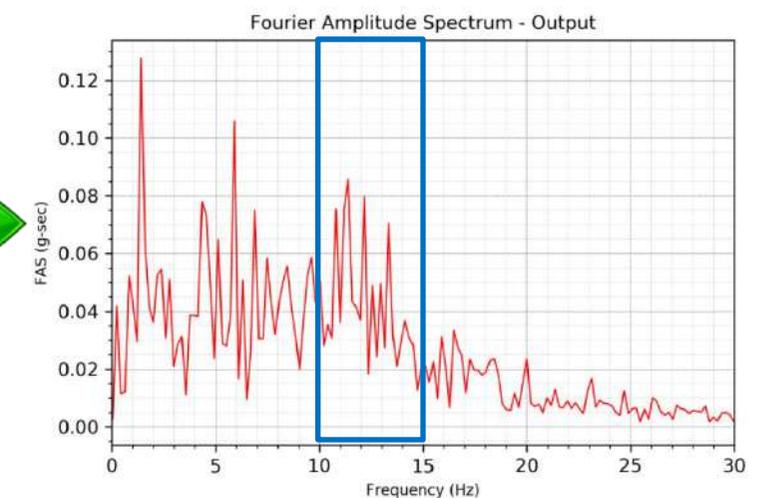
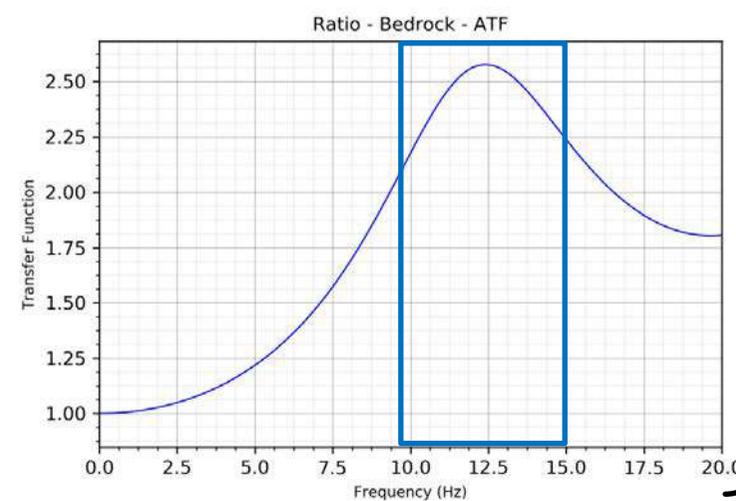
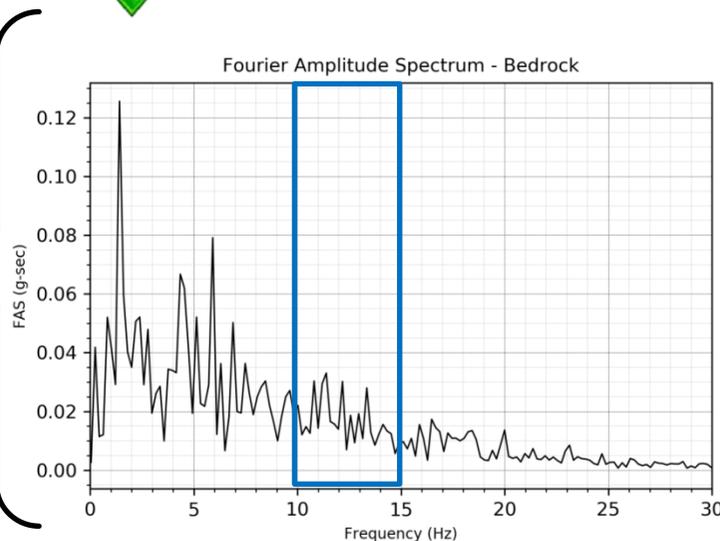
$$a_{sup}(t) = IFFT\{TF(\omega) \cdot FFT[a_{bed}(t)]\}$$

Giannini L.M. (2020)



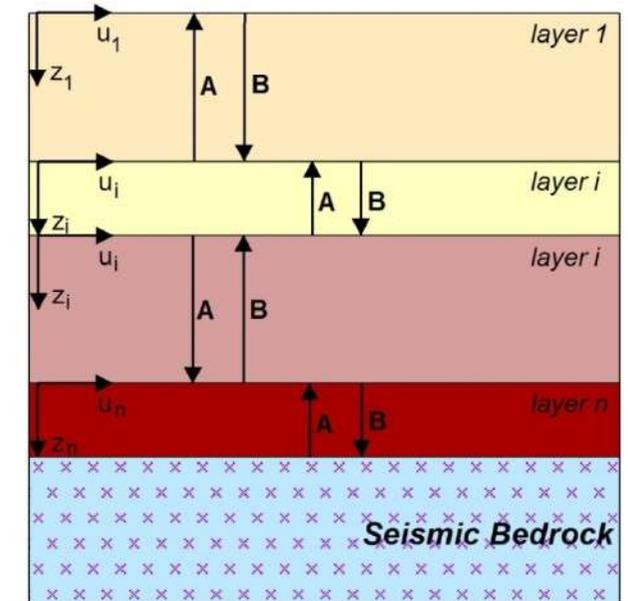
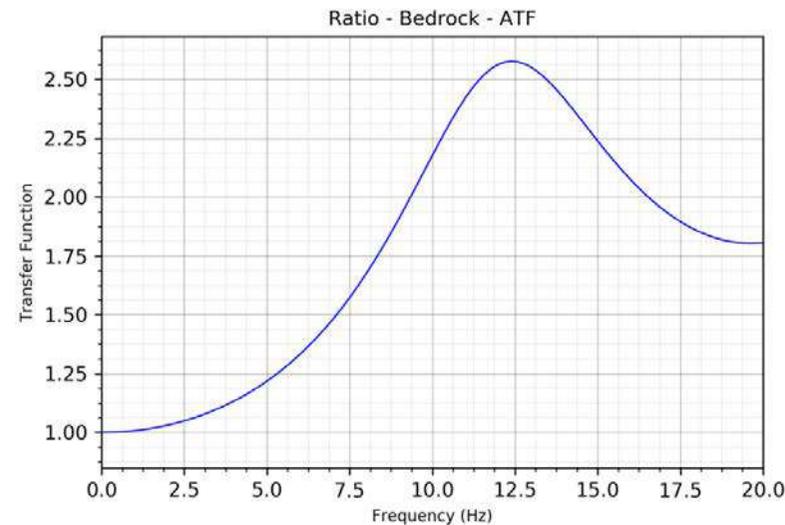
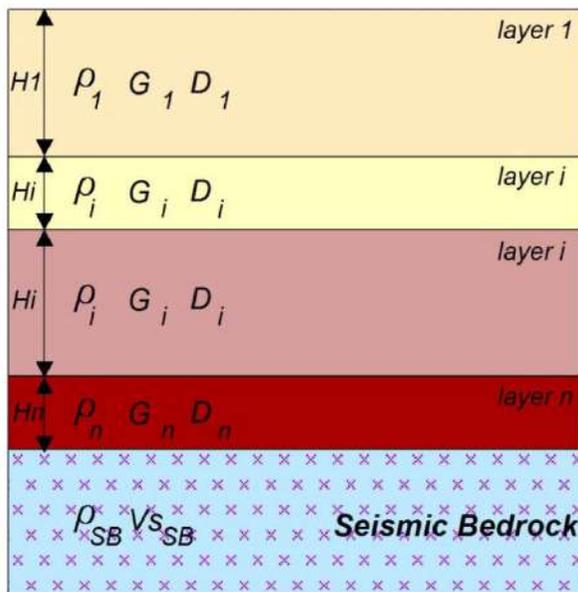
$FFT[a_{bed}(t)]$

$TF(\omega)$



Codici di analisi 1D

Soluzione analitica per definire la funzione di trasferimento



Basandosi sulla legge della conservazione dell'energia va soddisfatta l'equazione di equilibrio dinamico che governa la modalità di propagazione delle onde elastiche in ciascuno strato (Kramer, 1996).

$$\rho_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \eta_i \frac{\partial^3 u_i}{\partial t \partial z^2} - G_i \frac{\partial^2 u_i}{\partial z^2} = 0$$

La funzione può essere espressa come somma di ampiezze delle onde upward (-z) e downward (+z), rispettivamente A e B

$$u(z, t) = A \exp[i(\omega t + k^* z)] + B \exp[i(\omega t - k^* z)]$$

$$TF(\omega) = TF_{i,1N} = \frac{A_{i,1} + B_{i,1}}{A_{i,N} + B_{i,N}}$$



$$f = \frac{1}{T} = \frac{V_s}{4H}$$

Per approfondimenti:
Lanzo – Silvestri: Risposta Sismica Locale

Codici di analisi 1D

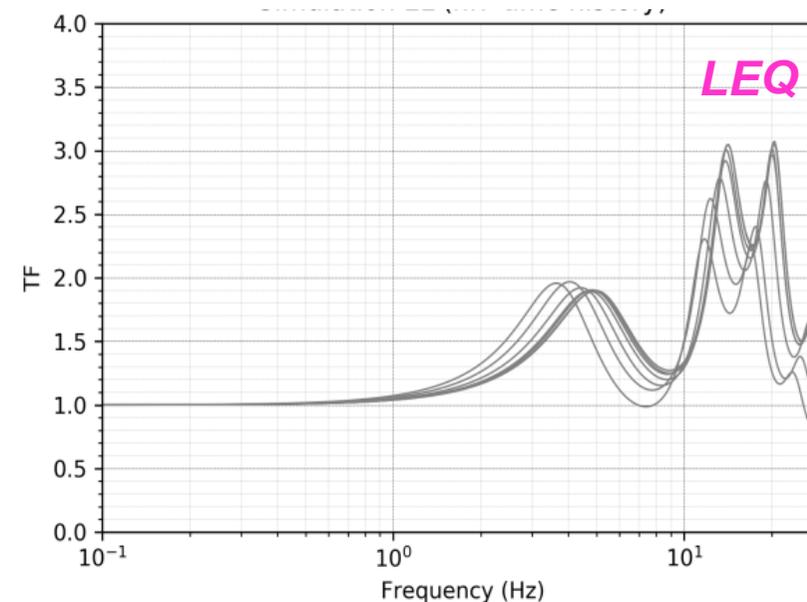
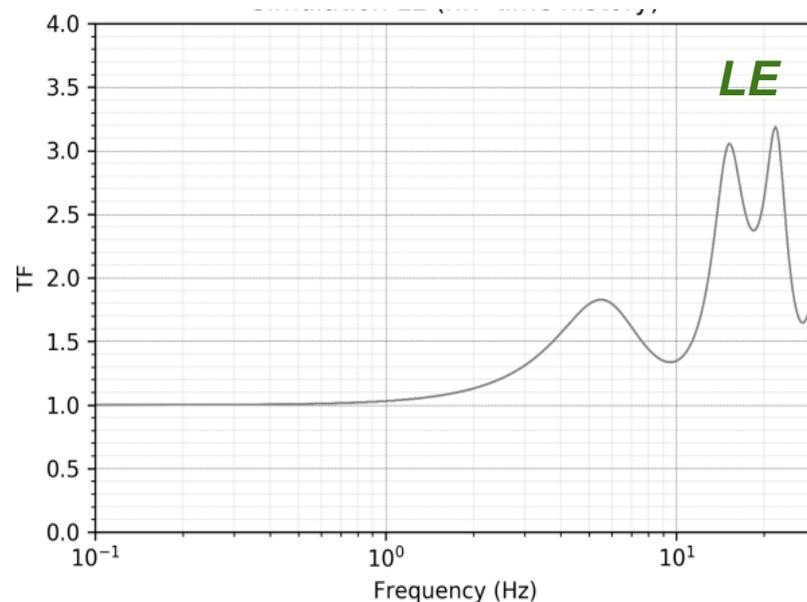
Analisi 1D

✓Le analisi numeriche possono essere condotte in termini di comportamento **Lineare** e **Non Lineare**.

✓Le analisi condotte in termini di comportamento lineare elastico **LE** non sempre sono rappresentative delle reali condizioni geologiche. Nella gran parte delle situazioni pratiche si deve considerare, per via analitica, la non linearità nel comportamento dei terreni.

✓Per tenere conto degli effetti non lineari viene può essere utilizzato un approccio di calcolo noto come equivalente lineare **LEQ** che imposta una non linearità sulla base di successive iterazioni di modellazioni lineari, aggiornando progressivamente i parametri di *rigidezza* e *smorzamento* dei terreni in funzione dello stato tensionale indotto da un accelerogramma. In alternativa si approccio al problema con analisi di tipo **Non Lineare** molto più complesse che non rientrano negli obiettivi di questo corso introduttivo.

✓La funzione di trasferimento **TF** è indipendente dal segnale sismico nel caso di analisi **LE**. Per uno stesso modello di terreno vengono effettuate n°7 simulazioni per altrettanti accelerogrammi, prima in condizioni **LEQ** poi in condizioni **LE**. Differenze nelle risultanti funzioni di trasferimento per il calcolo **LEQ**, mentre per il calcolo **LE** dove per i n°7 si ottiene la medesima funzione di trasferimento.



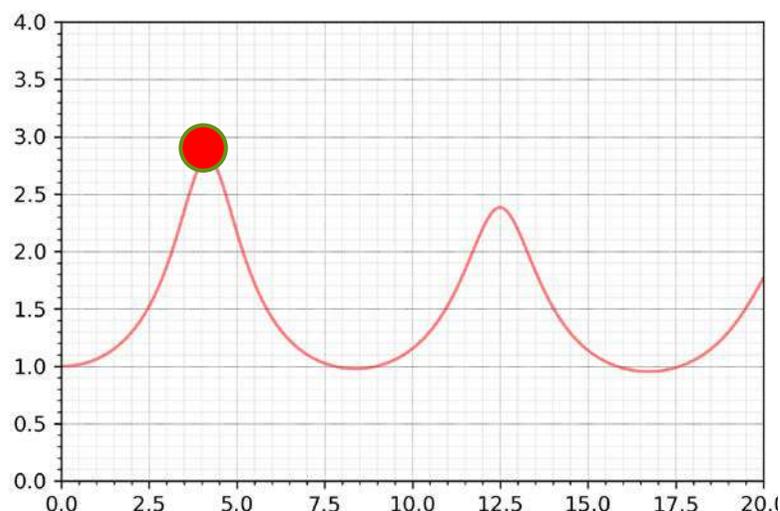
Codici di analisi 1D

Analisi 1D – il ruolo della misura di rumore ambientale a stazione singola (HVSr)

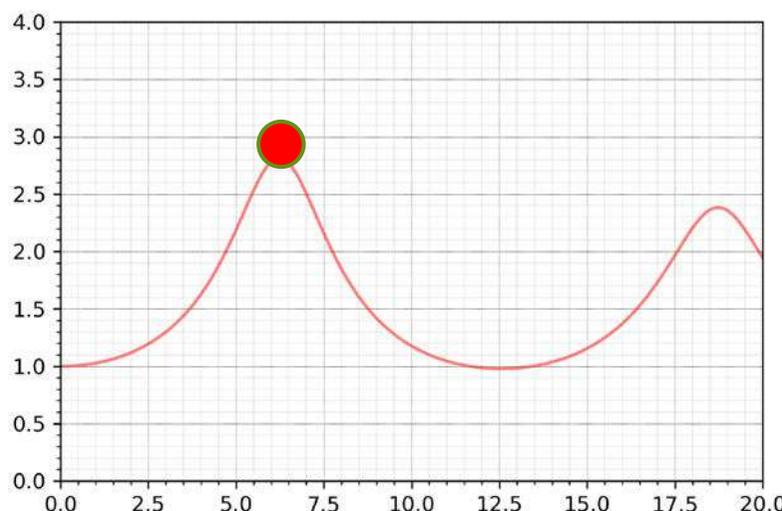
- ✓ Per modeste deformazioni è plausibile considerare un approccio *LE* per definire la *funzione di trasferimento*.
- ✓ Il risultato della prova di rumore ambientale a stazione singola elaborata con tecnica *HVSr* (*curva H/V*) è una sorta di firma spettrale caratteristica dei terreni, da cui poi derivare, tramite operazioni di inversione, caratteristiche geometriche e dinamiche dei terreni. La *curva H/V* è stata, al centro di discussioni scientifiche riguardo un suo potenziale utilizzo diretto nella valutazione dell'amplificazione di sito, in sostituzione della *funzione di trasferimento*. Recenti lavori (Ludedei e Malischewsky, 2015) evidenziano come la *curva H/V* non possa essere utilizzata in sostituzione della *funzione di trasferimento*, salvo in alcuni particolari casi. Rimane tuttavia sempre valido il confronto tra *curva H/V* e *funzione di trasferimento* per quanto riguarda la posizione in frequenza di in relazione al primo modo della *funzione di trasferimento* calcolata con approccio *lineare elastico LE*.
- ✓ Risulta fondamentale effettuare un confronto tra la *funzione di trasferimento* calcolata in condizioni *LE* e la curva *H/V* quando il modello sismo stratigrafico adottato nelle analisi non è derivato da analisi congiunte di inversione di dati geofisici.

Codici di analisi 1D

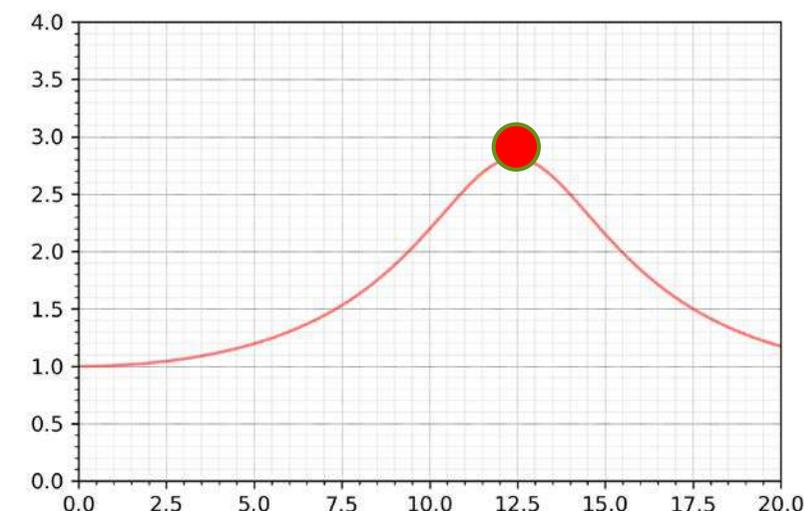
Analisi 1D – influenza della variazione dei parametri



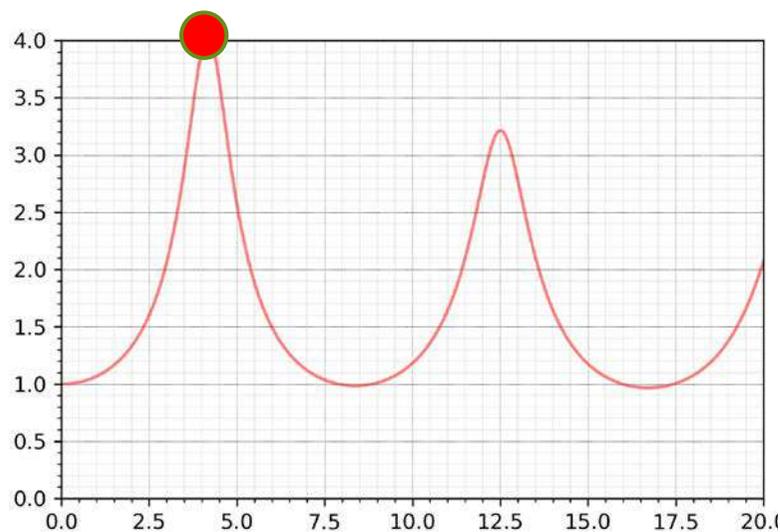
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|------------|---------|------------|
| 18 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 800 | 2.2 | 1 |



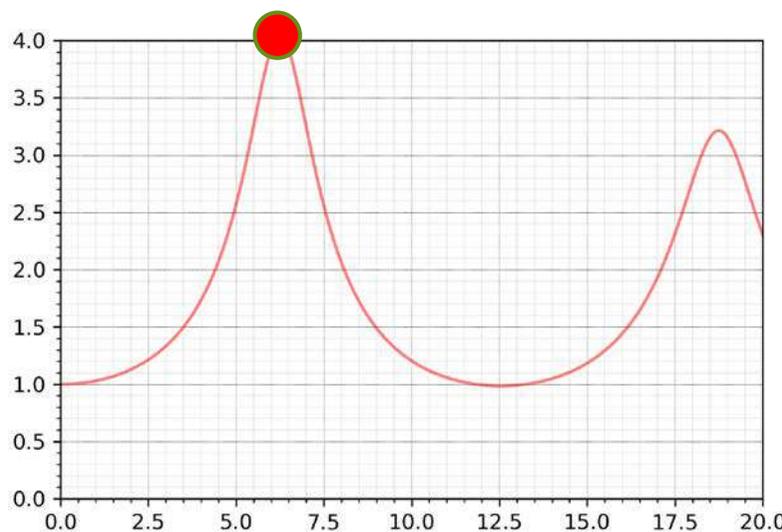
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|------------|---------|------------|
| 12 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 800 | 2.2 | 1 |



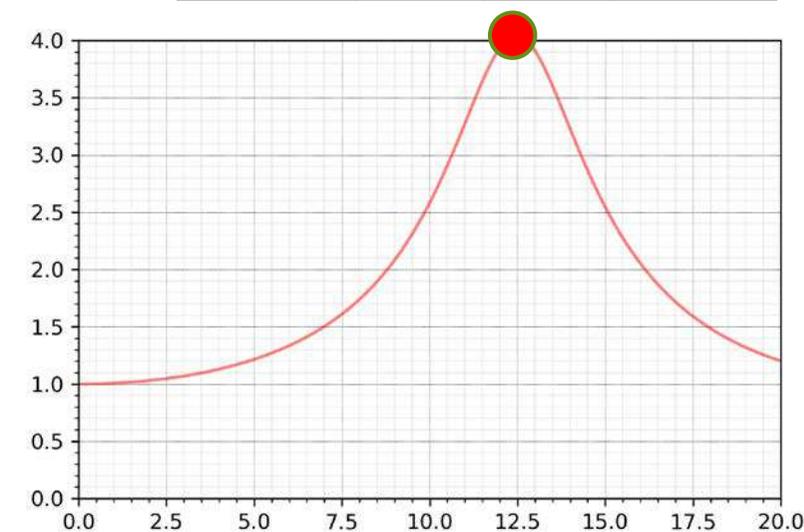
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|------------|---------|------------|
| 6 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 800 | 2.2 | 1 |



| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|-------------|---------|------------|
| 18 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 1200 | 2.2 | 1 |



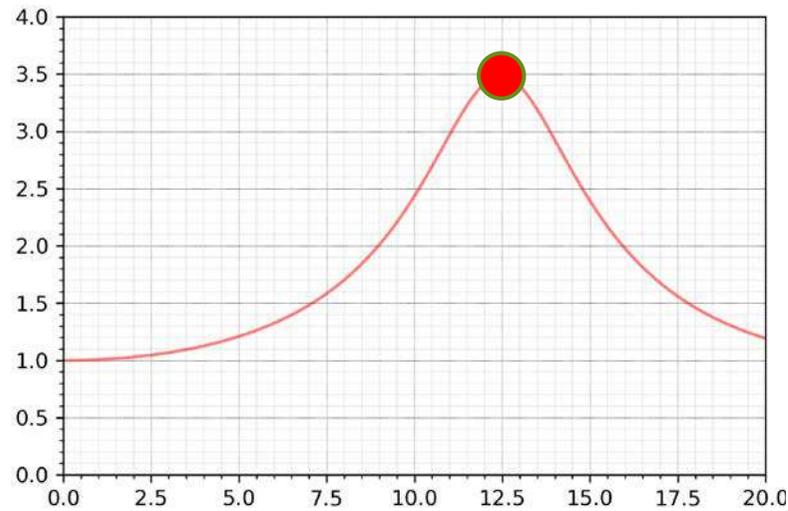
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|-------------|---------|------------|
| 12 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 1200 | 2.2 | 1 |



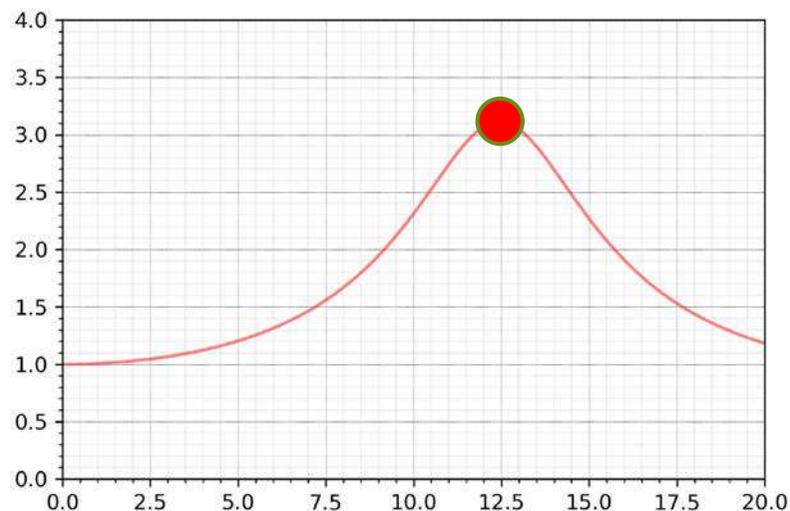
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|-------------|---------|------------|
| 6 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 1200 | 2.2 | 1 |

Codici di analisi 1D

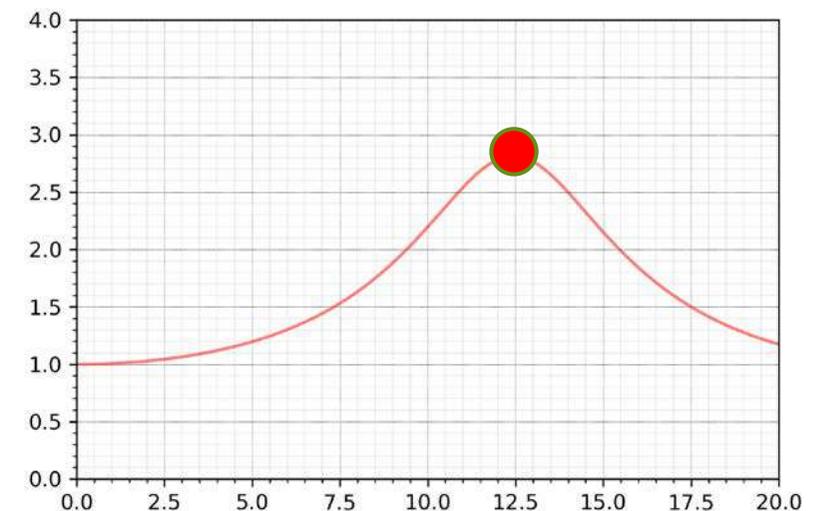
Analisi 1D – influenza della variazione dei parametri



| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|--------|------------|------------|
| 6 | 300 | 1.5 | 2 |
| 0 | 800 | 2.2 | 1 |



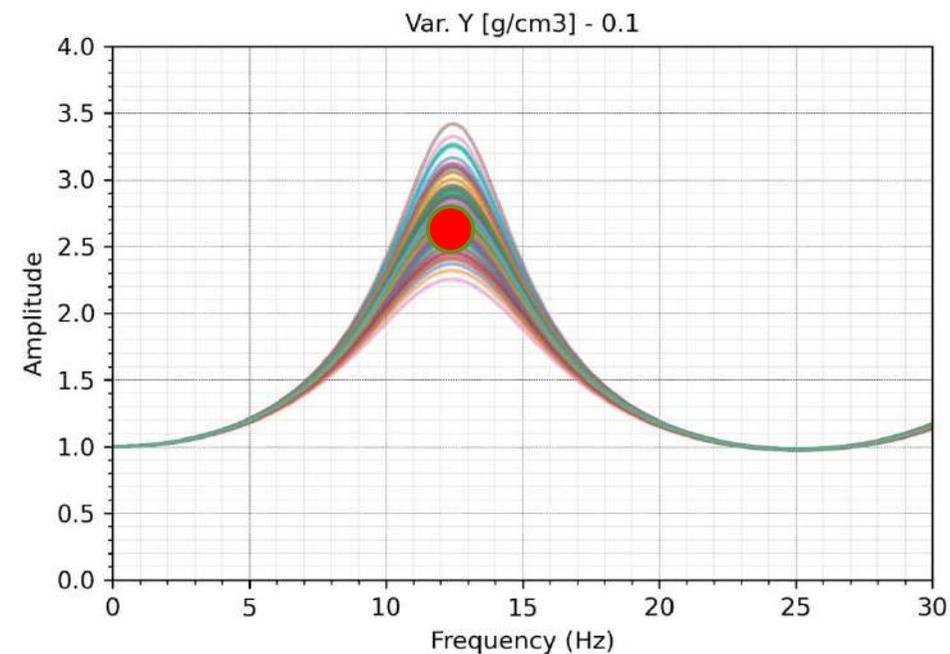
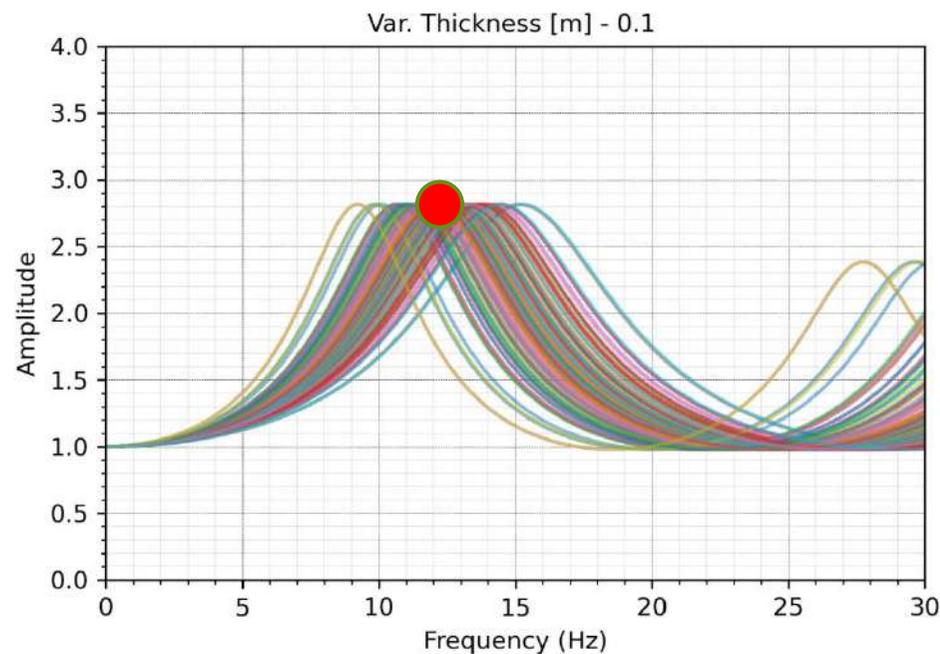
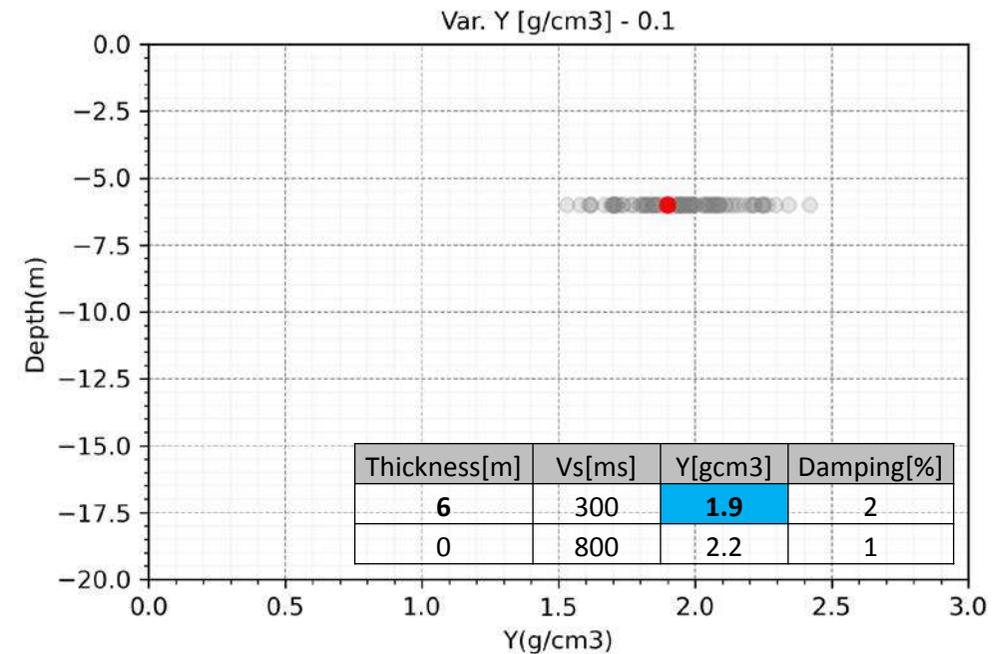
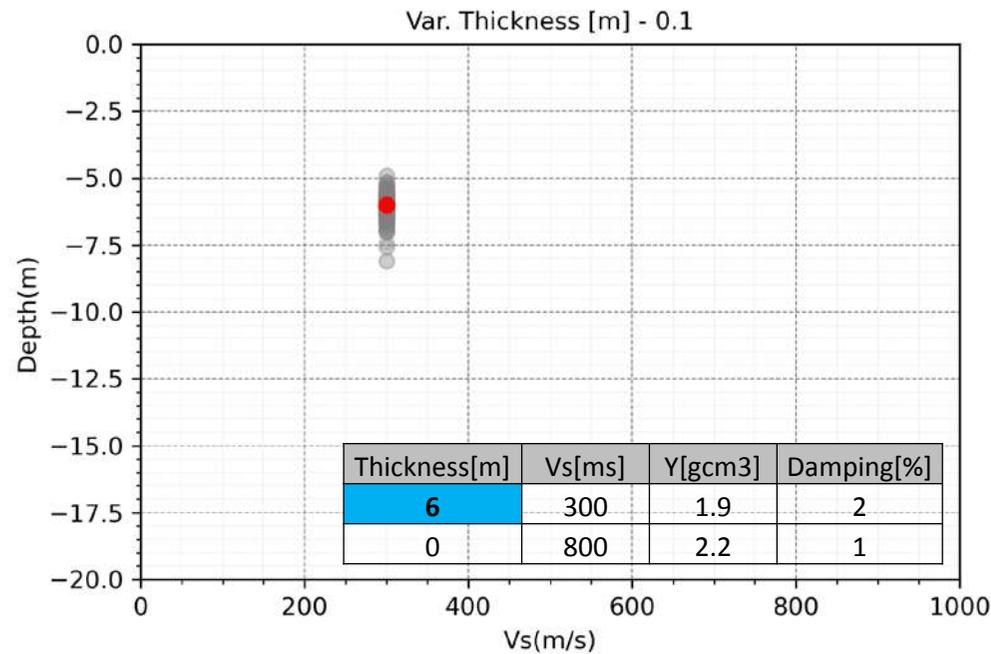
| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|--------|------------|------------|
| 6 | 300 | 1.7 | 2 |
| 0 | 800 | 2.2 | 1 |



| Thickness[m] | Vs[ms] | Y[gcm3] | Damping[%] |
|--------------|--------|------------|------------|
| 6 | 300 | 1.9 | 2 |
| 0 | 800 | 2.2 | 1 |

Codici di analisi 1D

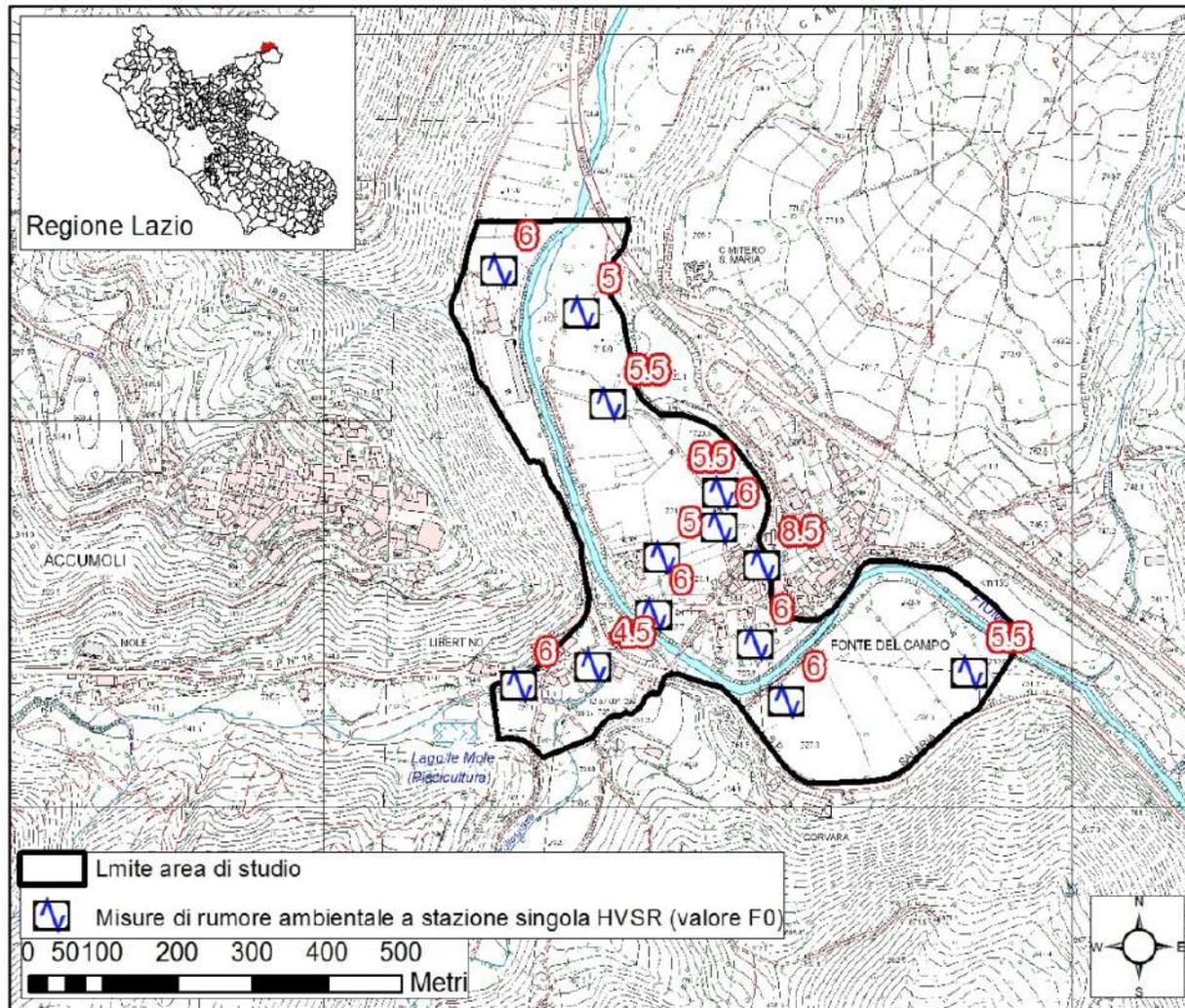
Analisi 1D – influenza della variazione dei parametri



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

Individuare quali parametri influenzano maggiormente il risultato in termini di **AF** e di conseguenza valutare se opportune indagini integrative possano abbassarne il grado di aleatorietà, riducendo di conseguenza la dispersione del valore di **FA**.



Vs media dei depositi: **400 m/s**
Min: 150 – Max: 600:

Vs media del substrato sismico: **1100 m/s**
Min: 900 – Max: 1300

Spessore depositi medio: **17 metri**
Min: 10 – Max: 25

Rigidità - smorzamento: **Derendeli 2001**

Input sismico: **n°7 accelerogrammi (CMS)**

Modelli realizzati: **3500**

Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

✓ Sono state effettuate in totale *per ogni input sismico n°4 analisi, facendo variare* le velocità delle onde di taglio V_s (' V_s '), la *profondità del bedrock ('Thickness'), rigidezza e smorzamento* dei materiali ('*Shear-Damping*') e infine una simulazione facendo variare *tutti i parametri di input ('Global')*; per ogni analisi sono state effettuate n°500 realizzazioni.

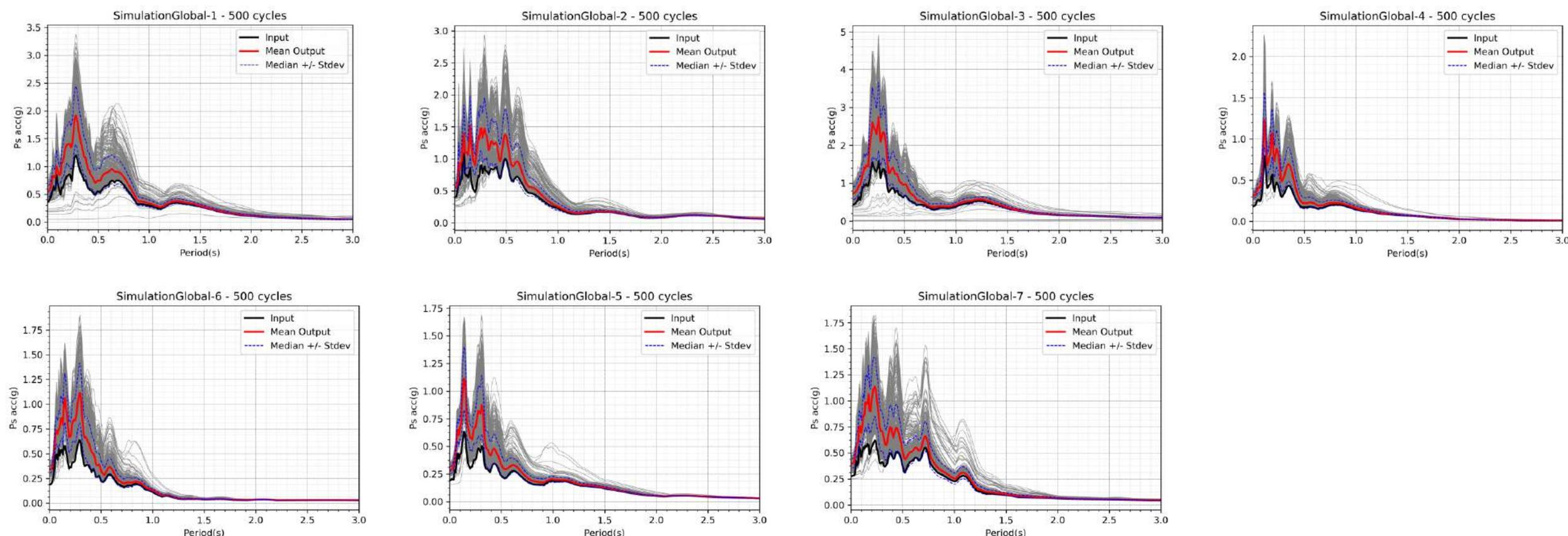
✓ Per ogni realizzazione (modello sismo stratigrafico realizzato) è stato calcolato il *fattore di amplificazione AF* per tre differenti intervalli di periodo (0.1-0.5 0.4-0.8 0.7-1.1) in modo da valutare gli effetti della variabilità dei parametri anche in funzione del periodo spettrale di calcolo.

✓ Con questa configurazione di analisi, sono state effettuate in totale **14000** simulazioni, considerando i tre intervalli di periodo, sono stati gestiti in totale **42000** valori relativi al *fattore di amplificazione AF*.

Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

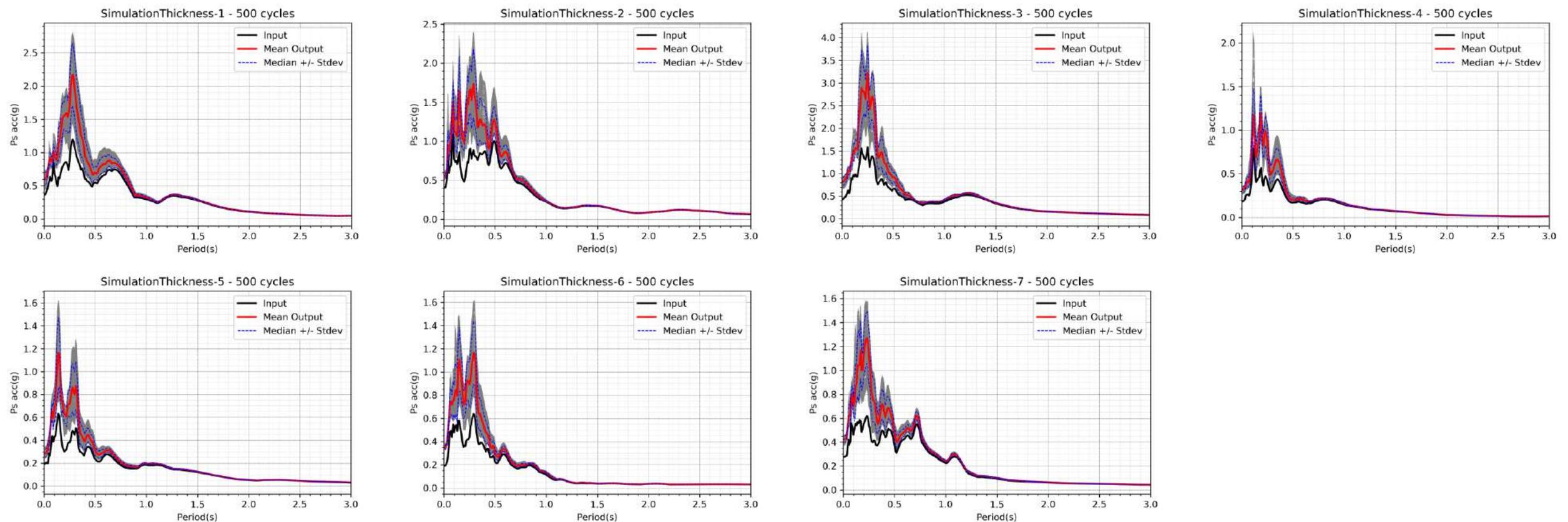
✓ Variabilità di tutti i parametri contemporaneamente “**Global**”



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

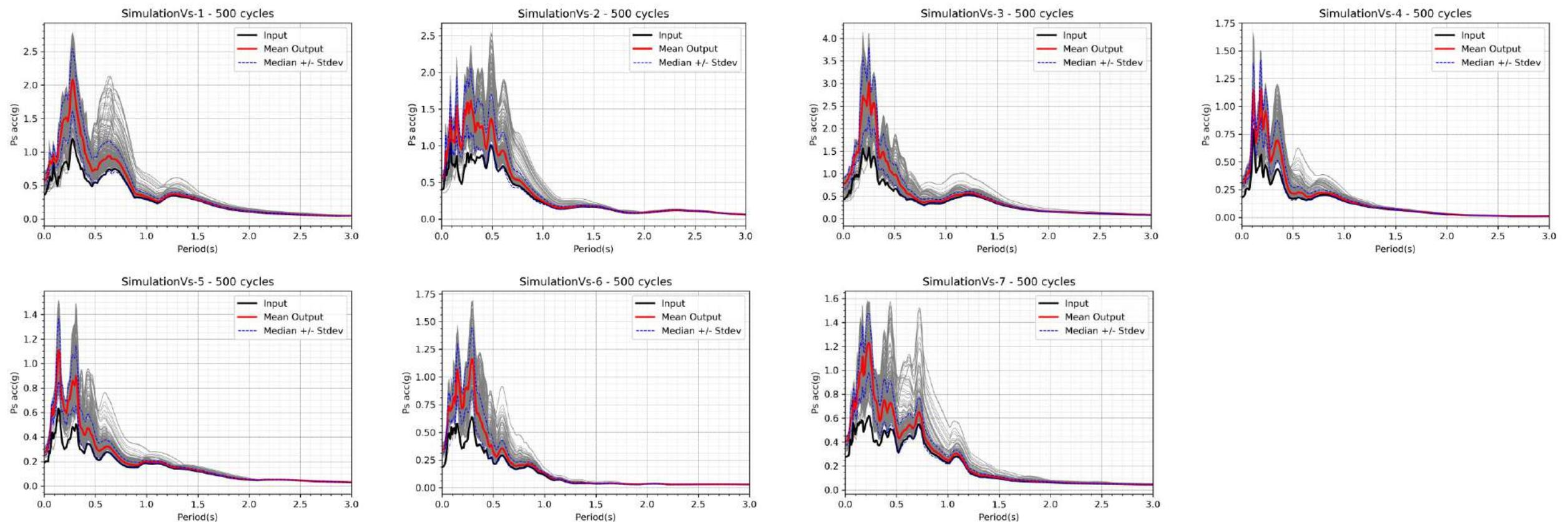
✓ Variabilità spessore depositi “*Thickness*”



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

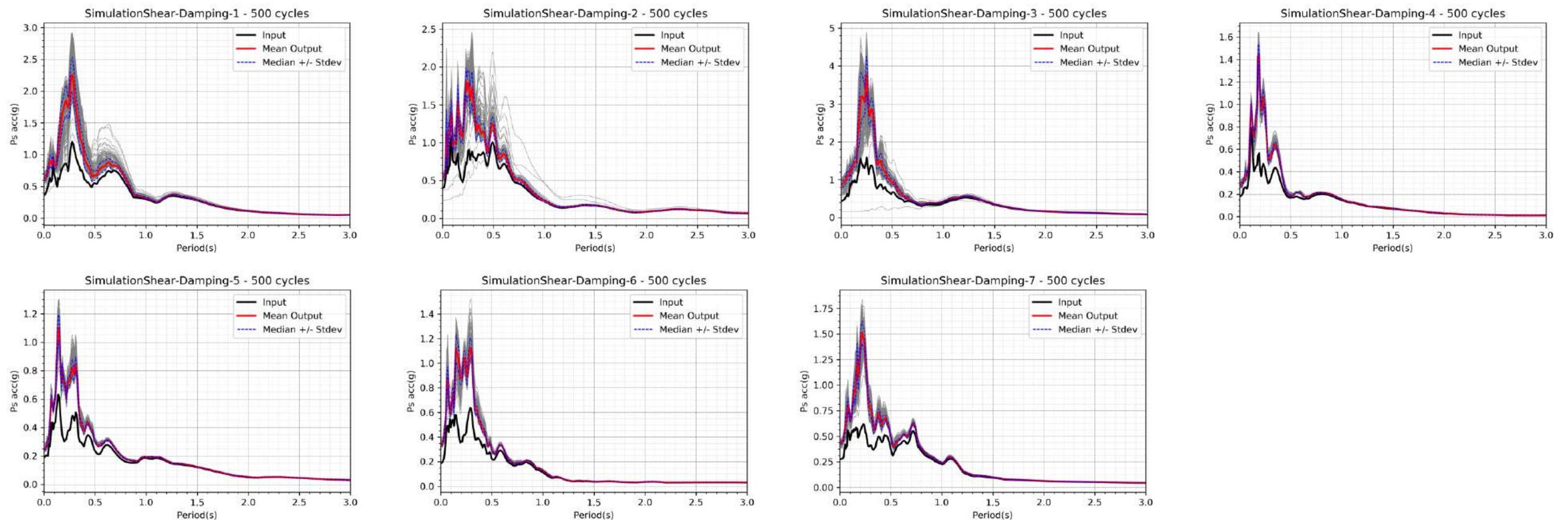
✓ Variabilità velocità onde di taglio Vs depositi “Vs”



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

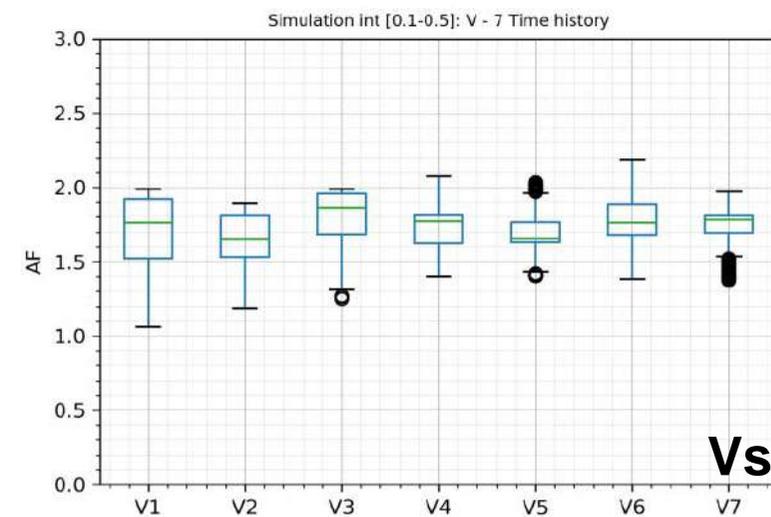
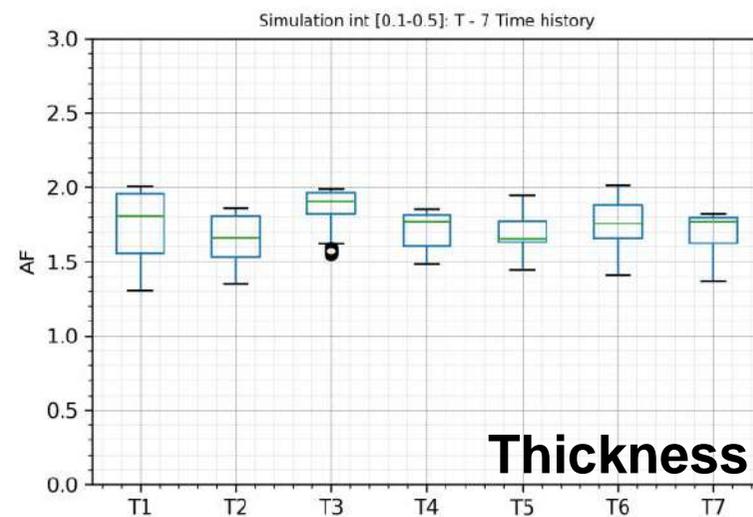
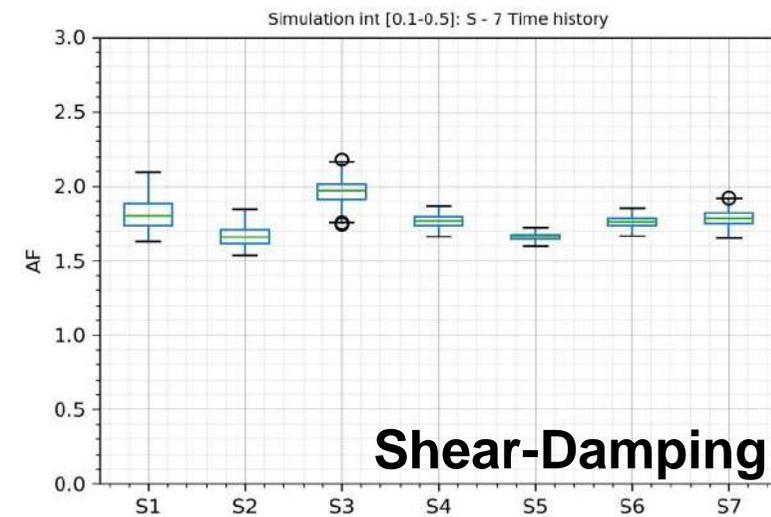
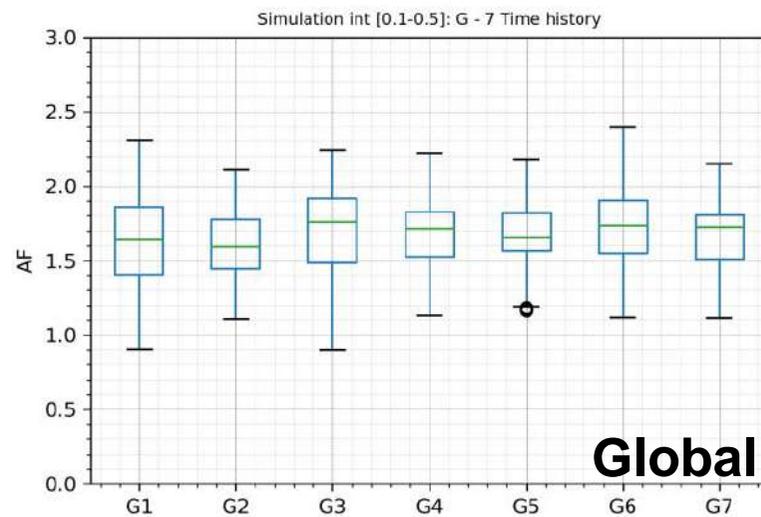
✓ Variabilità proprietà dei materiali “*Shear-Damping*”



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

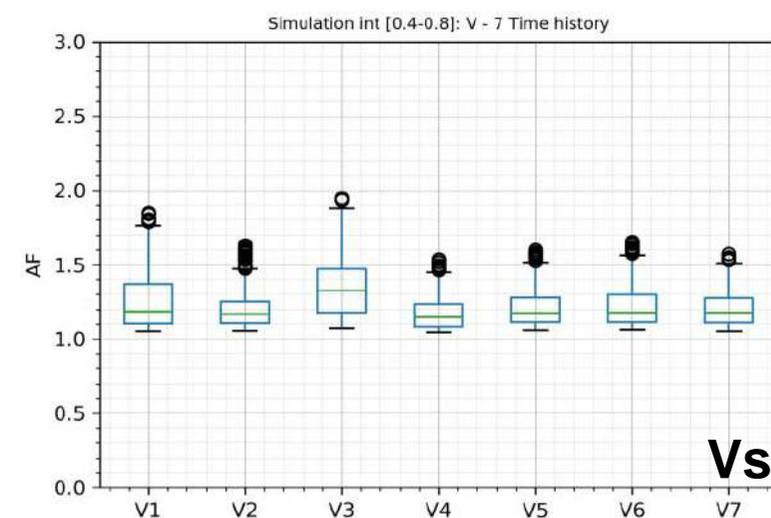
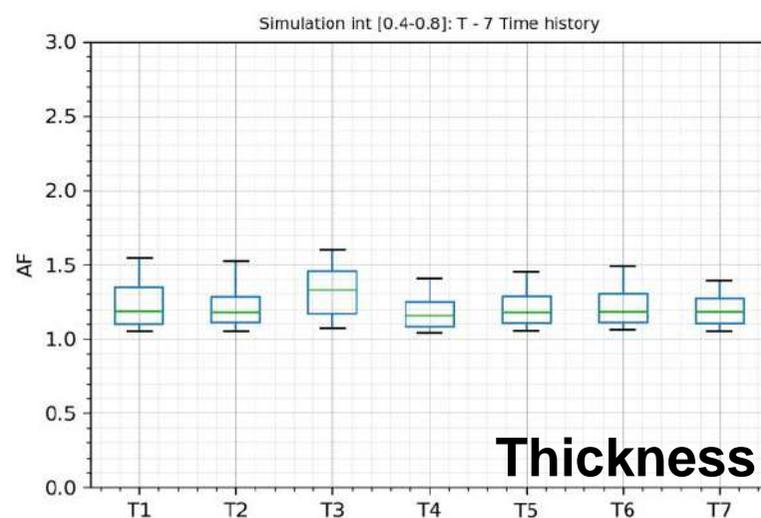
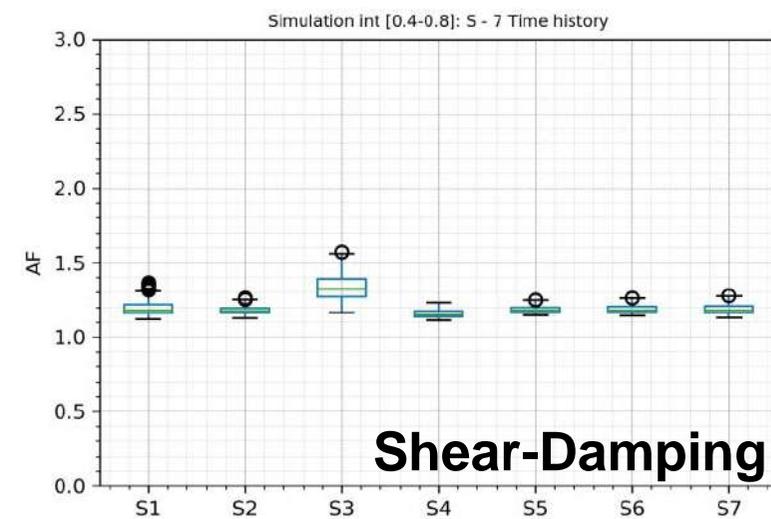
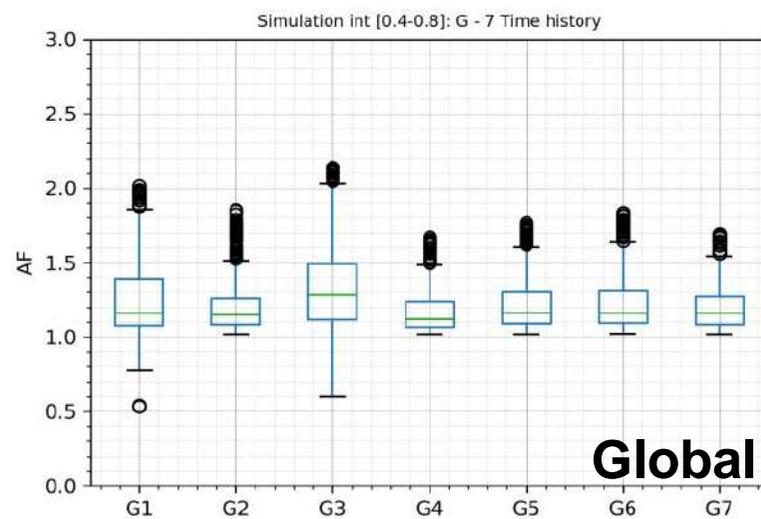
✓ Analisi sulle distribuzioni dei fattori di amplificazione **AF** calcolati nell'intervallo **[0.1 – 0.5]** secondi



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

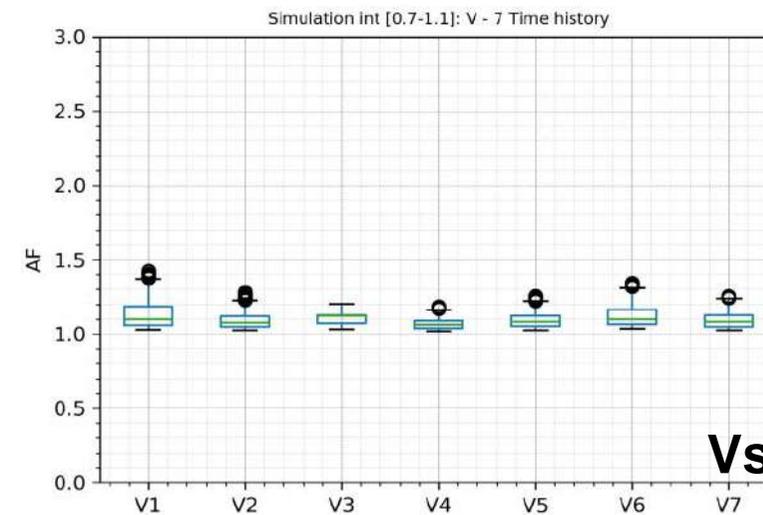
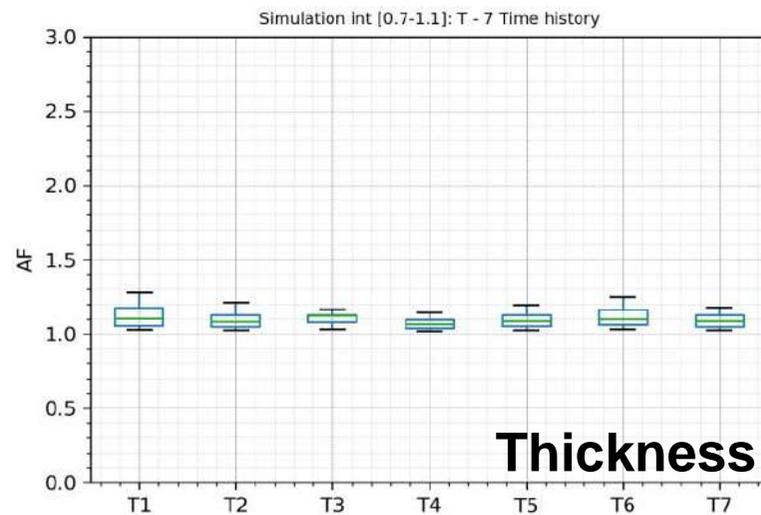
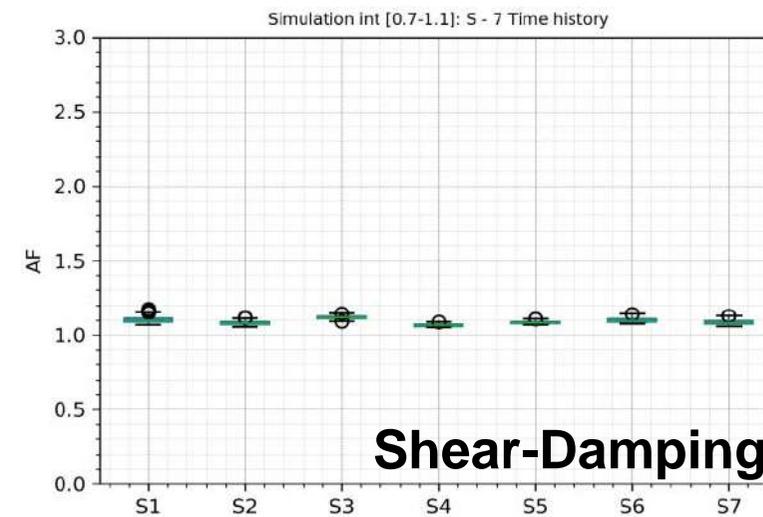
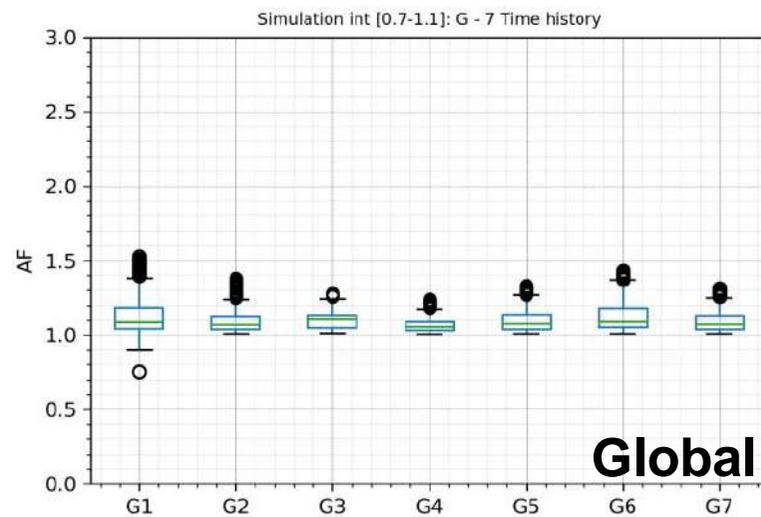
✓ Analisi sulle distribuzioni dei fattori di amplificazione **AF** calcolati nell'intervallo **[0.4 – 0.8]** secondi



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

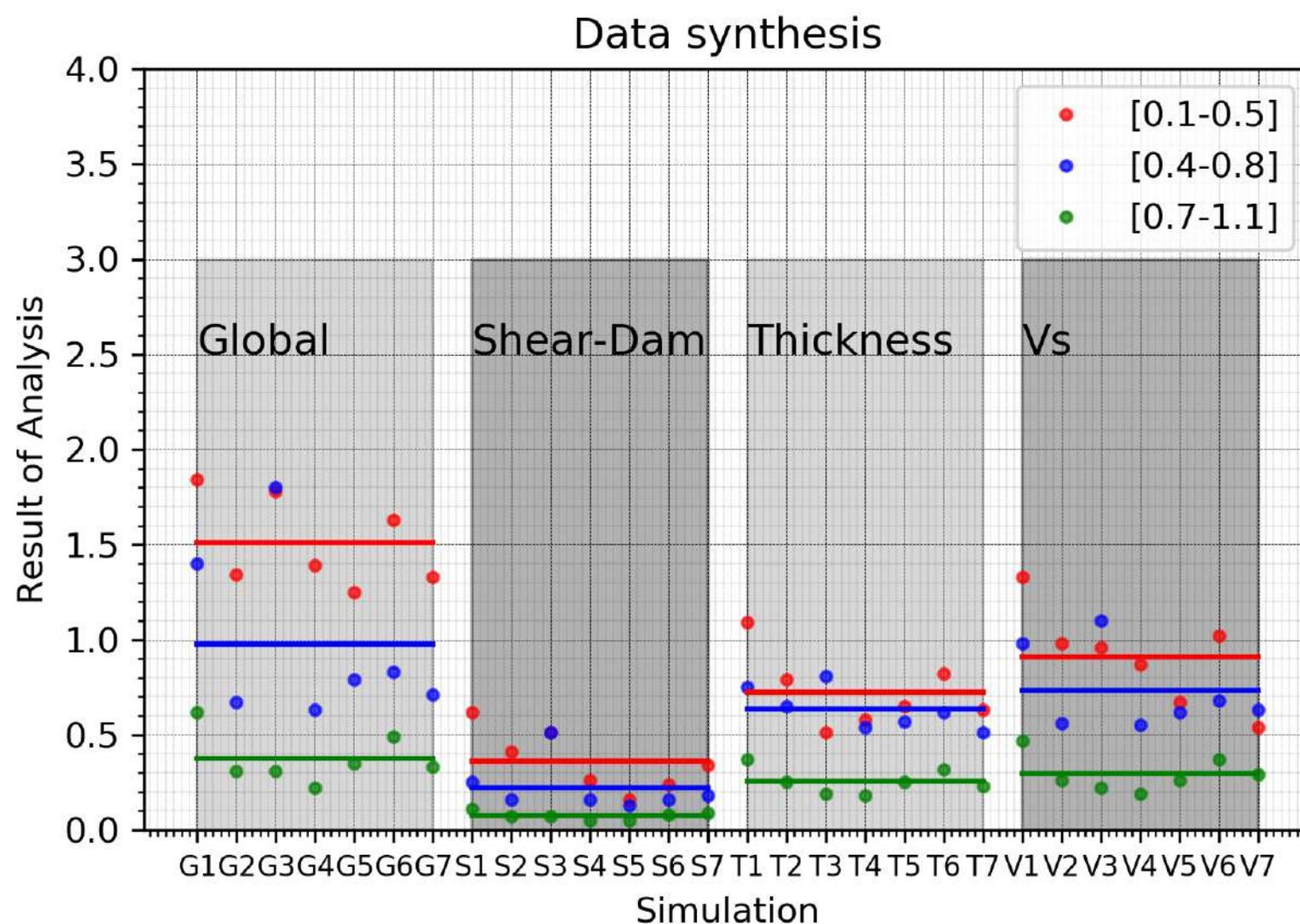
✓ Analisi sulle distribuzioni dei fattori di amplificazione **AF** calcolati nell'intervallo **[0.7 – 1.1]** secondi



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 1: Influenza della variabilità dei parametri – Loc. “Fonte del Campo” - Accumoli (RI)

✓ Sintesi dei risultati e considerazioni

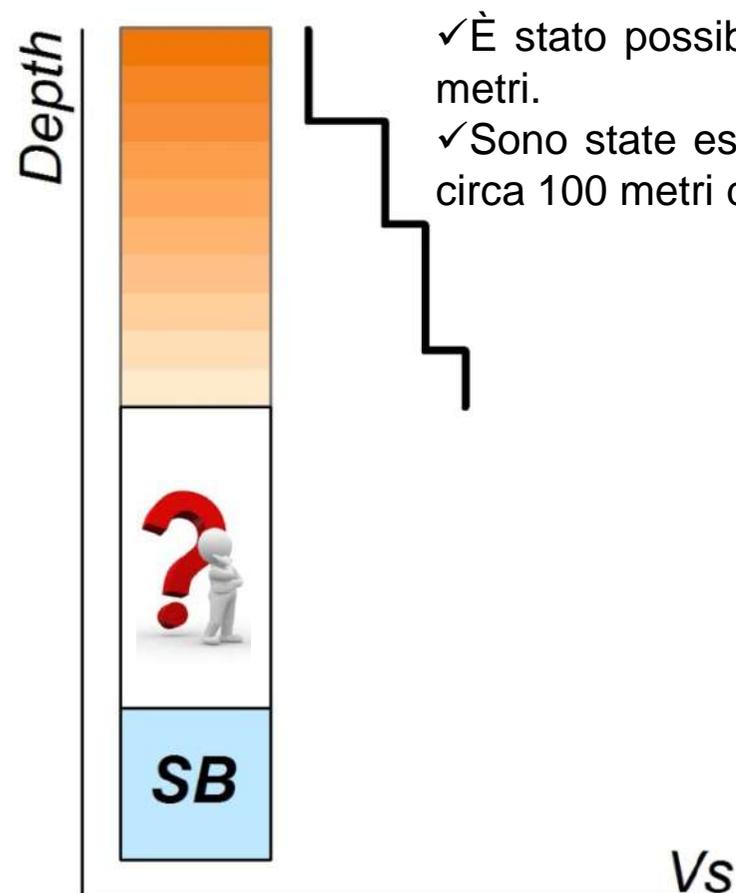


Analisi 1D – casi studio

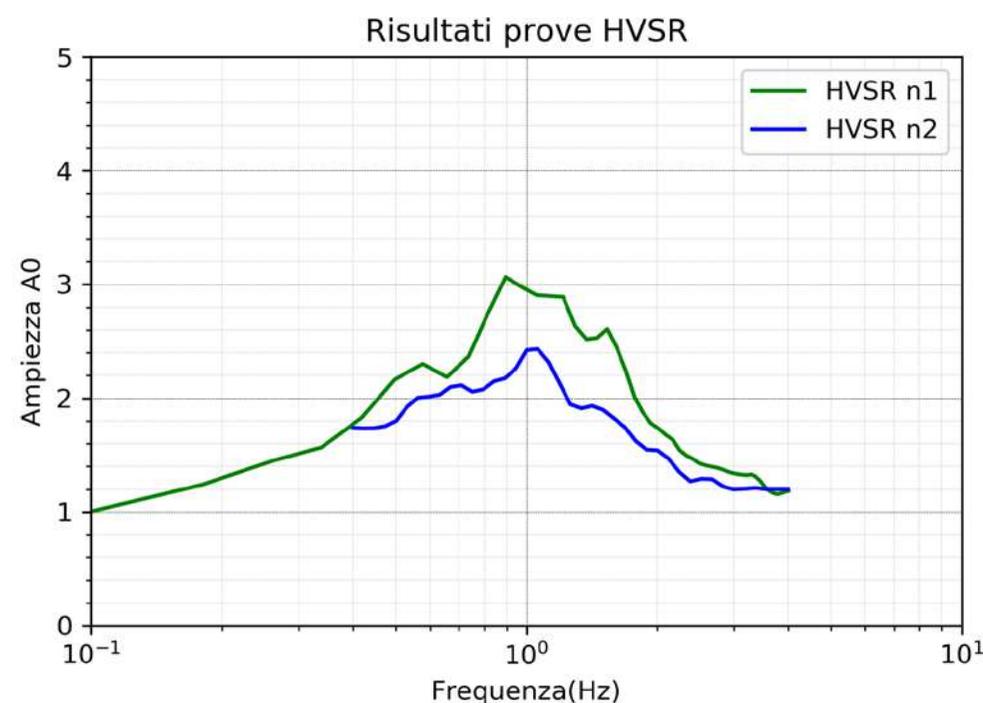
Caso studio 2: Modello sismo – stratigrafico definito con HVSR “risonante”

Definire modelli sismo stratigrafici in assenza di informazioni ‘profonde’

Indagini Down Hole & Masw non intercettano in Bedrock sismico – HVSR risonante



- ✓ È stato possibile identificare un profilo della velocità delle onde di taglio V_s fino ad una profondità di 35 metri.
- ✓ Sono state eseguite n°2 prove HVSR una in prossimità delle prove Down Hole e MASW e la seconda a circa 100 metri di distanza.



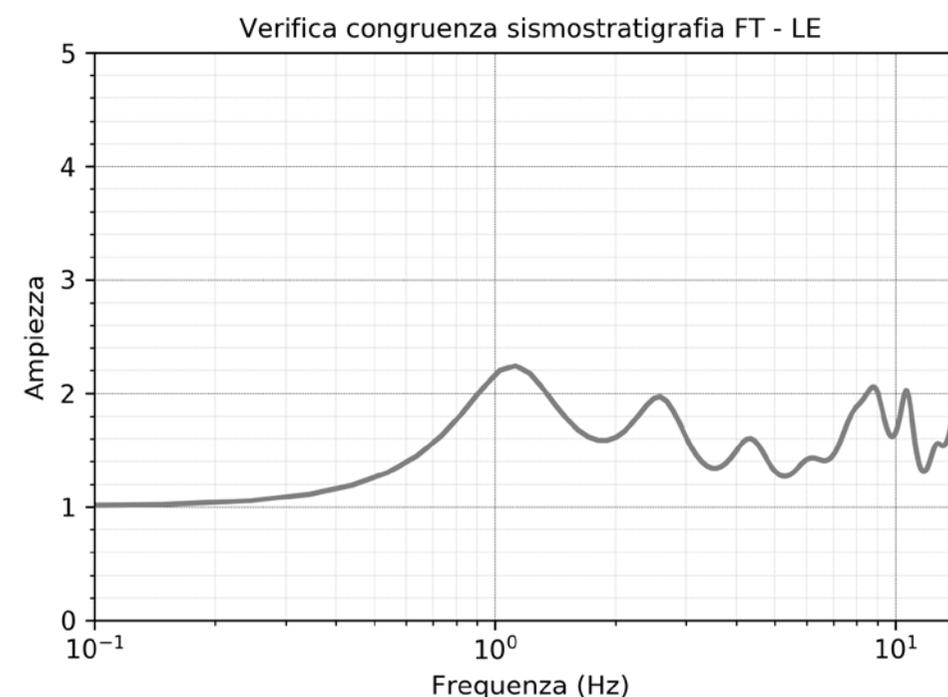
Analisi 1D – casi studio

Caso studio 2: Modello sismo – stratigrafico definito con HVSR “risonante”

✓ Realizzo un modello sismo stratigrafico coerente con le curve HVSR

| Sismo STRATO | Spessore | Letto Strato | Velocità Vs (m/s) | Smorzam. |
|--------------|----------|--------------|-------------------|----------|
| Riporti 1 | 1 | 1 | 190 | Costante |
| Riporti 2 | 2 | 3 | 220 | Costante |
| Limi | 2 | 5 | 260 | Costante |
| Argille 1 | 10 | 15 | 280 | Costante |
| Argille 2 | 10 | 25 | 300 | Costante |
| Argille 2 | 10 | 35 | 330 | Costante |
| Argille 2 | 15 | 50 | 360 | Costante |
| Argille 3 | 20 | 70 | 420 | Costante |
| Argille 3 | 25 | 95 | 480 | Costante |
| Argille 4 | 15 | 110 | 600 | Costante |
| Argille 4 | 10 | 120 | 650 | Costante |
| Bedrock | ∥ | ∥ | 800 | 1% |

✓ Fino a **35 metri di profondità** ho il dato derivato da Down Hole e MASW.

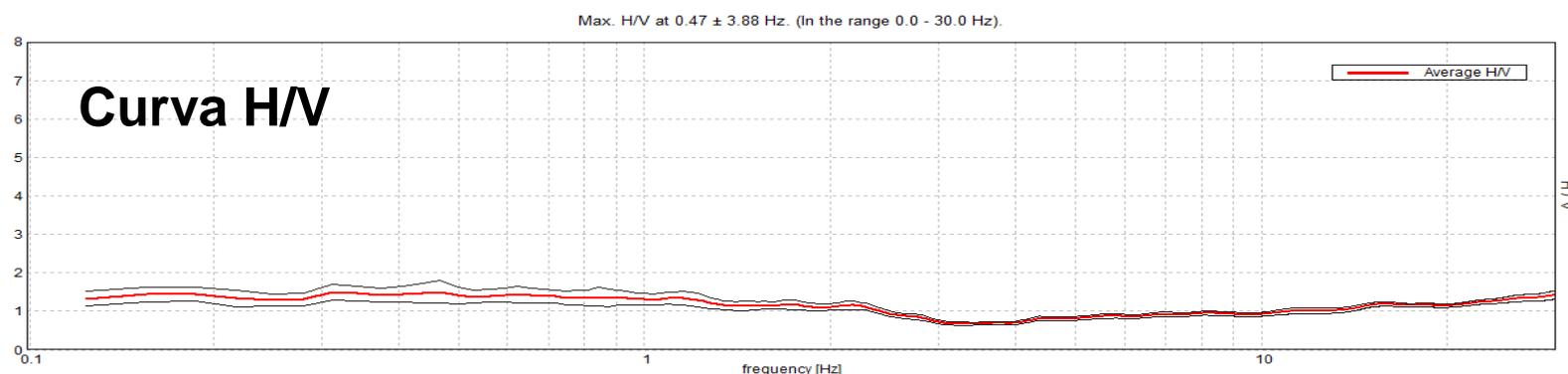


Analisi 1D – casi studio

Caso studio 3: Modello sismo – stratigrafico con HVSR “non risonante”

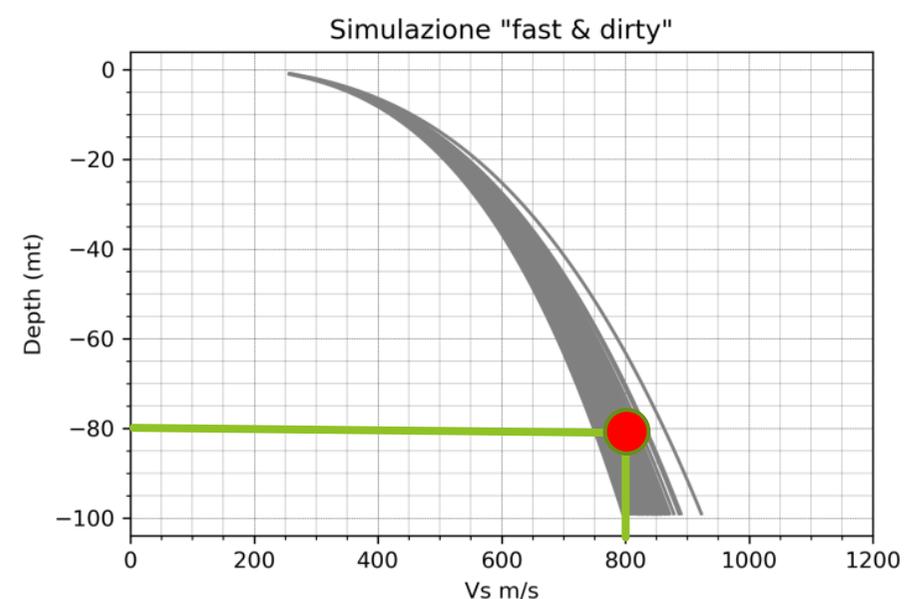
Definire modelli sismo stratigrafici in assenza di informazioni ‘profonde’

Indagini Down Hole & Masw non intercettano in Bedrock sismico – HVSR non risonante



$$V_s(h) = V_0(h + 1)^x$$

(0.2 - 0.5)

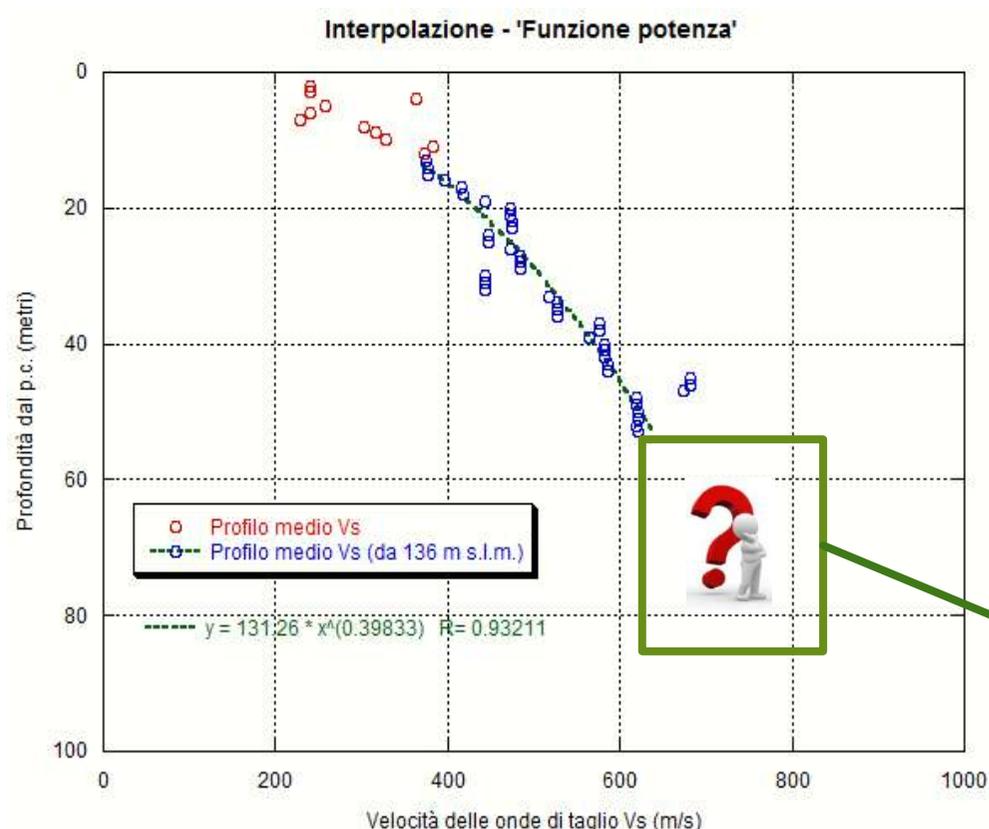


(Albarelo et. al., 2011; Ibs-von Seht e Wohlenberg, 1999)

Analisi 1D – casi studio

Caso studio 3: Modello sismo – stratigrafico con HVSR “non risonante”

✓ Realizzo un modello sismo stratigrafico fruttando la funzione potenza



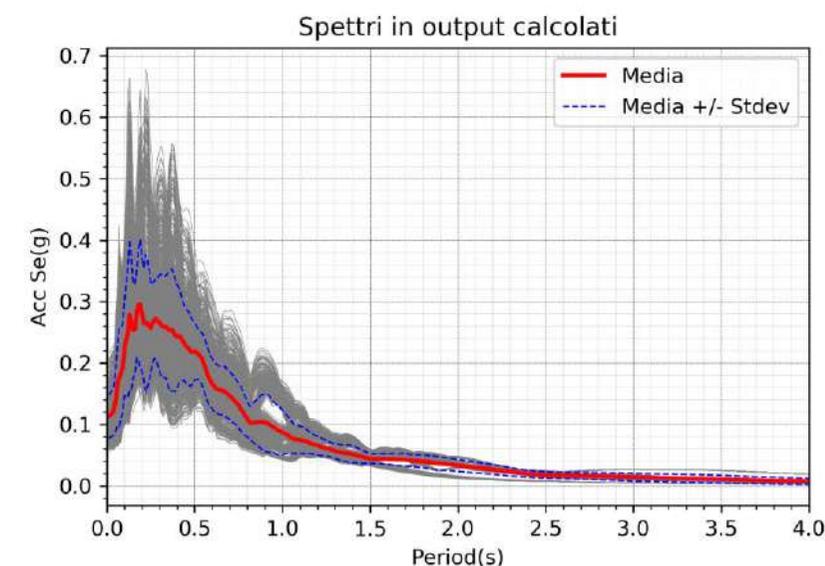
| Sismo STRATO | Spessore | Letto Strato | Velocità Vs (m/s) | Curve Sim:LEO |
|-----------------|----------|--------------|-------------------|-----------------------|
| Sismo strato 1 | 4 | 4 | 381 | D1C4 |
| Sismo strato 2 | 2 | 6 | 416 | S2C4 |
| Sismo strato 3 | 14 | 20 | 463 | S2C4 |
| Sismo strato 4 | 12 | 32 | 561 | S2C4 |
| Sismo strato 5 | 9 | 41 | 639 | Rollins et al. (1998) |
| Sismo strato 6 | 5 | 46 | 670 | Rollins et al. (1998) |
| Sismo strato 7 | 6 | 50 | 700 | Rollins et al. (1998) |
| Sismo strato 8 | 8 | 60 | 720 | Rollins et al. (1998) |
| Sismo strato 9 | 8 | 68 | 740 | Rollins et al. (1998) |
| Sismo strato 10 | 8 | 76 | 760 | Rollins et al. (1998) |
| Sismo strato 11 | 8 | 85 | 780 | Rollins et al. (1998) |
| Bedrock | ∥ | ∥ | 800 | Costante 1% |

Analisi 1D – casi studio

Caso studio 3: Modello sismo – stratigrafico con HVSR “non risonante”

✓ Introduco nel modello la variabilità dei parametri di input (Vs – Curve)

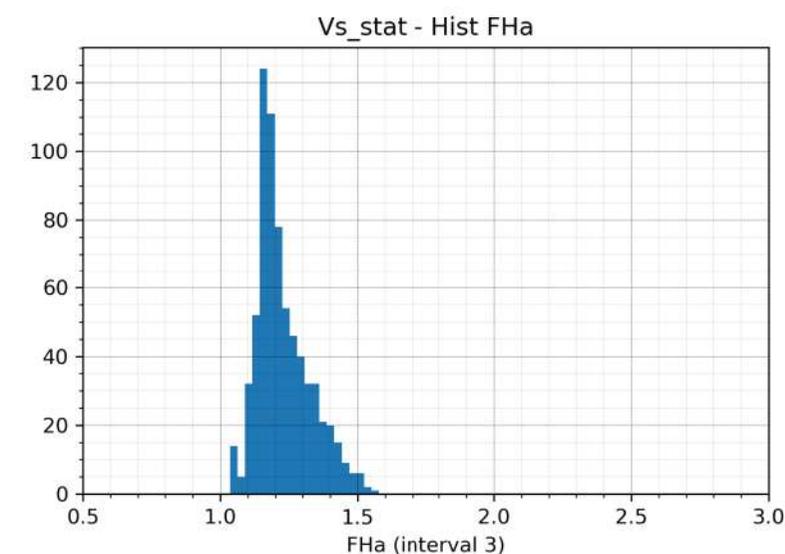
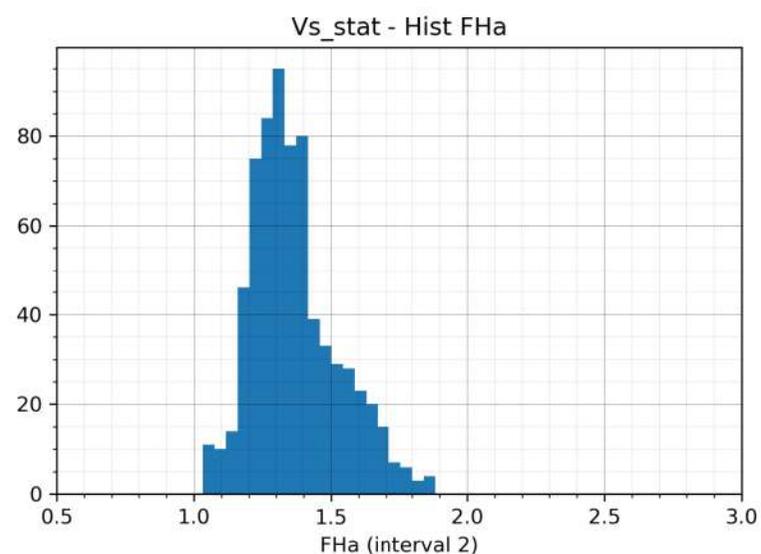
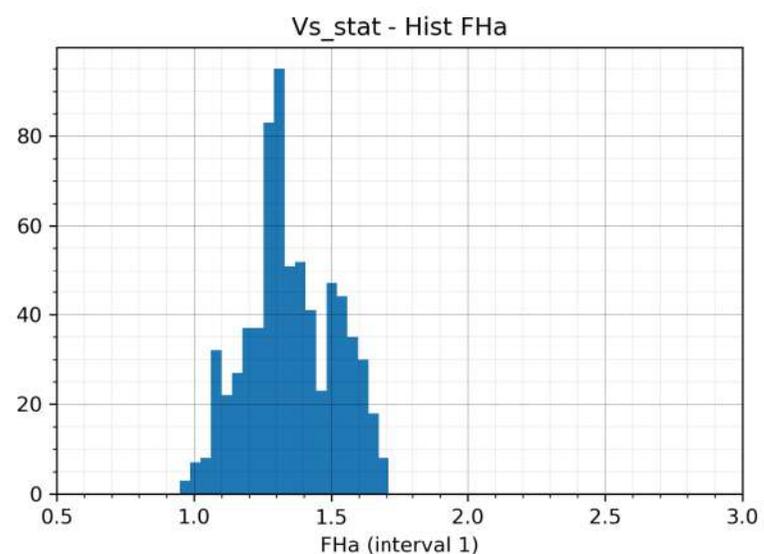
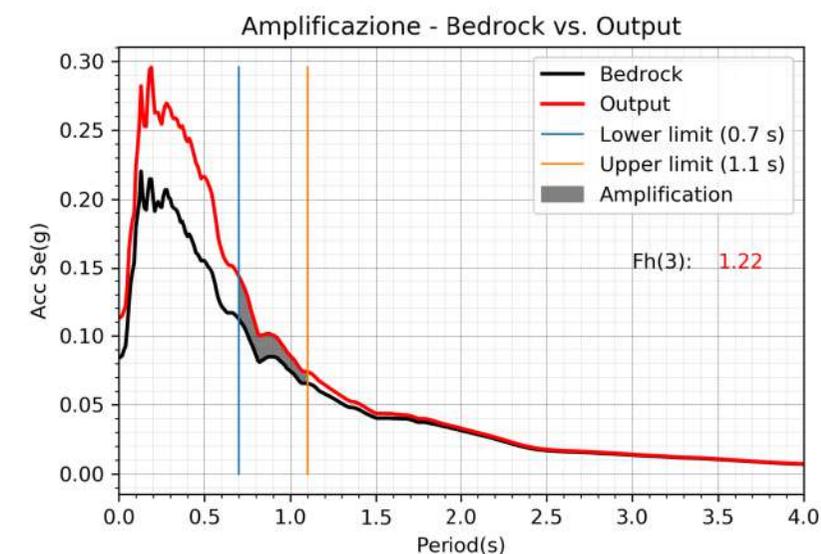
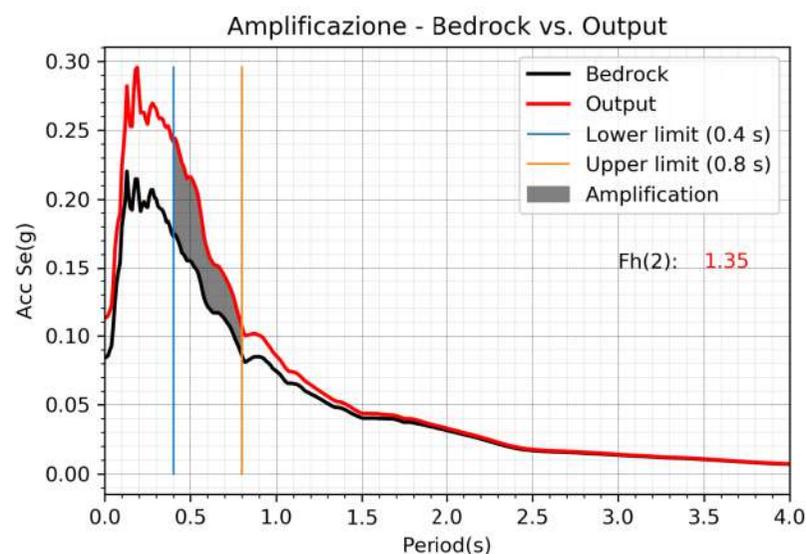
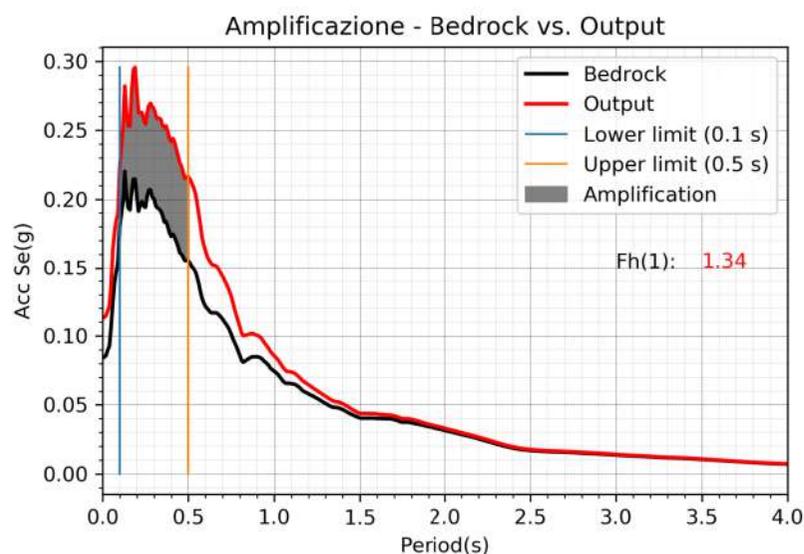
| Sismo STRATO | Spessore | Letto Strato | Velocità Vs (m/s) | Curve Sim:LEQ |
|-----------------|----------|--------------|-------------------|-----------------------------|
| Sismo strato 1 | 4 | 4 | 381 (360-450) | D1C4 - var |
| Sismo strato 2 | 2 | 6 | 416 (360-460) | S2C4 - var |
| Sismo strato 3 | 14 | 20 | 463 (360-550) | S2C4 - var |
| Sismo strato 4 | 12 | 32 | 561 (430-710) | S2C4 - var |
| Sismo strato 5 | 9 | 41 | 639 (490-850) | Rollins et al. (1998) - var |
| Sismo strato 6 | 5 | 46 | 670 (550-880) | Rollins et al. (1998) - var |
| Sismo strato 7 | 6 | 50 | 700 (580-900) | Rollins et al. (1998) - var |
| Sismo strato 8 | 8 | 60 | 720 (600-900) | Rollins et al. (1998) - var |
| Sismo strato 9 | 8 | 68 | 740 (650-900) | Rollins et al. (1998) - var |
| Sismo strato 10 | 8 | 76 | 760 (680-900) | Rollins et al. (1998) - var |
| Sismo strato 11 | 8 | 85 | 780 (700-900) | Rollins et al. (1998) - var |
| Bedrock | ∥ | ∥ | 800 (700-1000) | Costante 1% - var |



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 3: Modello sismo – stratigrafico con HVSR “non risonante”

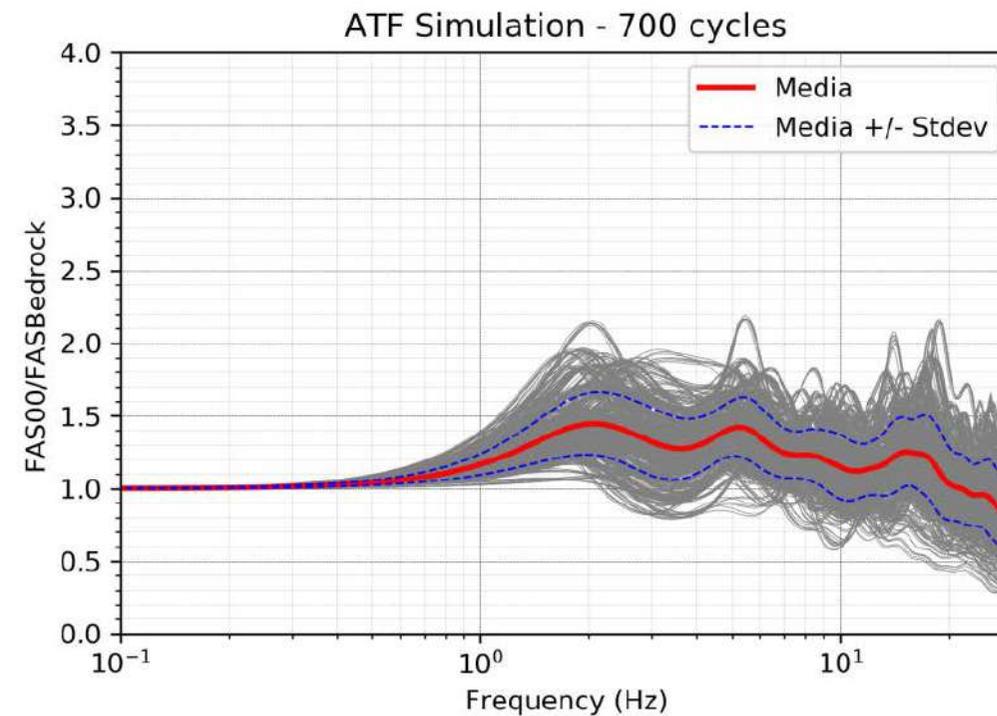
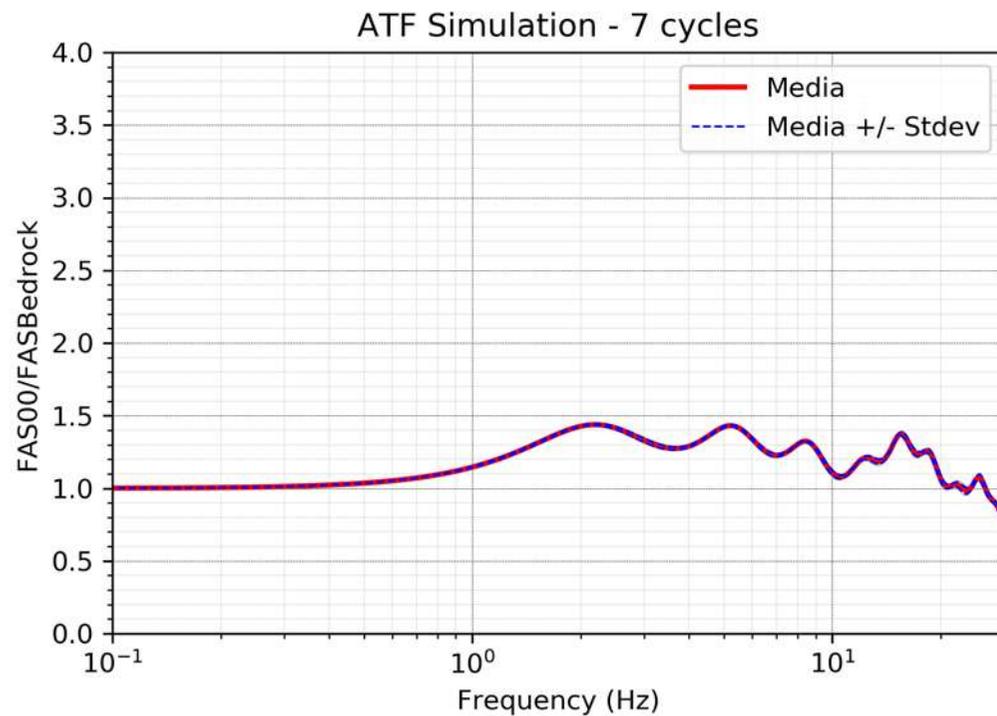
✓ Valutazione dei risultati



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 3: Modello sismo – stratigrafico con HVSR “non risonante”

✓ Funzione di trasferimento e HVSR



✓ Posso realizzare un **modello** sismo – stratigrafico la cui funzione di trasferimento è \approx “piatta”?



Analisi 1D – casi studio

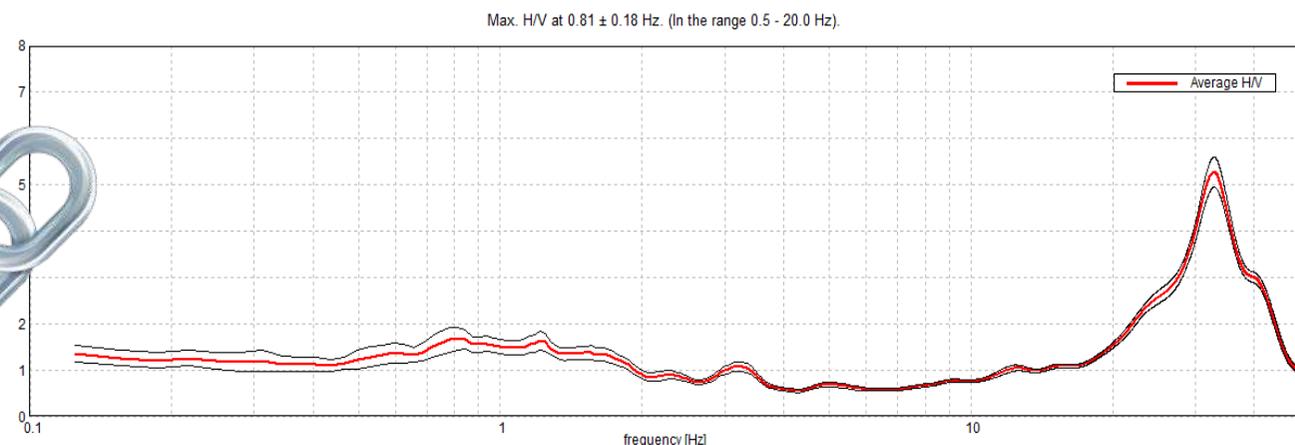
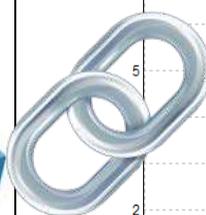
Caso studio 4: Influenza di un sismo – strato rigido superficiale

✓ Modello sismo – stratigrafico (approccio semplificato & RSL)

| Sismo STRATO | Spessore | Letto Strato | Velocità Vs (m/s) | Smorzamento |
|---------------|-----------|--------------|-------------------|-------------|
| Copertura | 3 | 3 | 300 | Costante |
| Rigido | 35 | 38 | 850 | Costante |

Cat. A (NTC2018 - § 3.2.2)

✓ Non prevedo amplificazioni del moto sismico

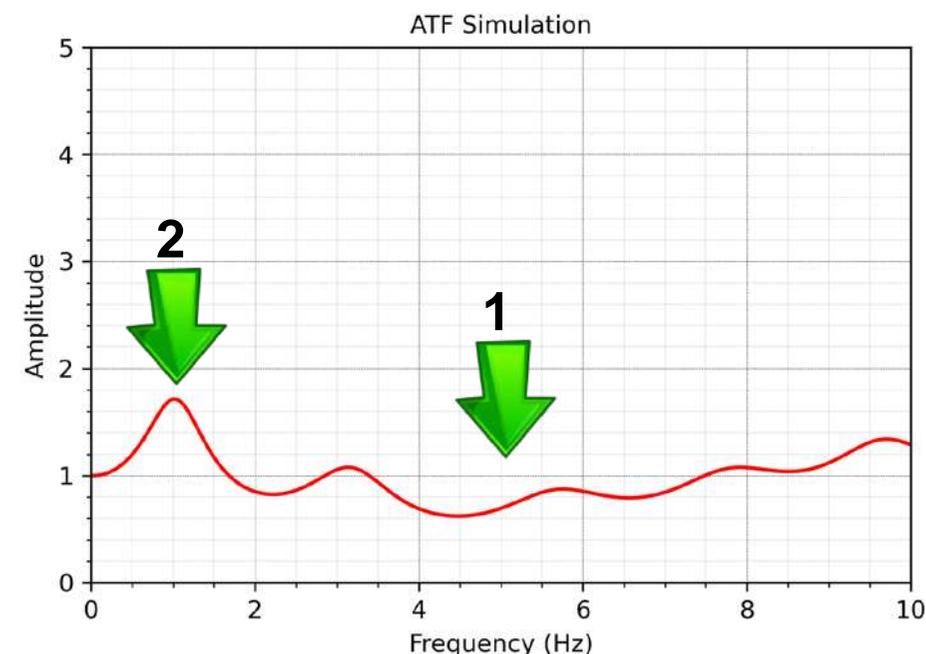


Analisi 1D – casi studio

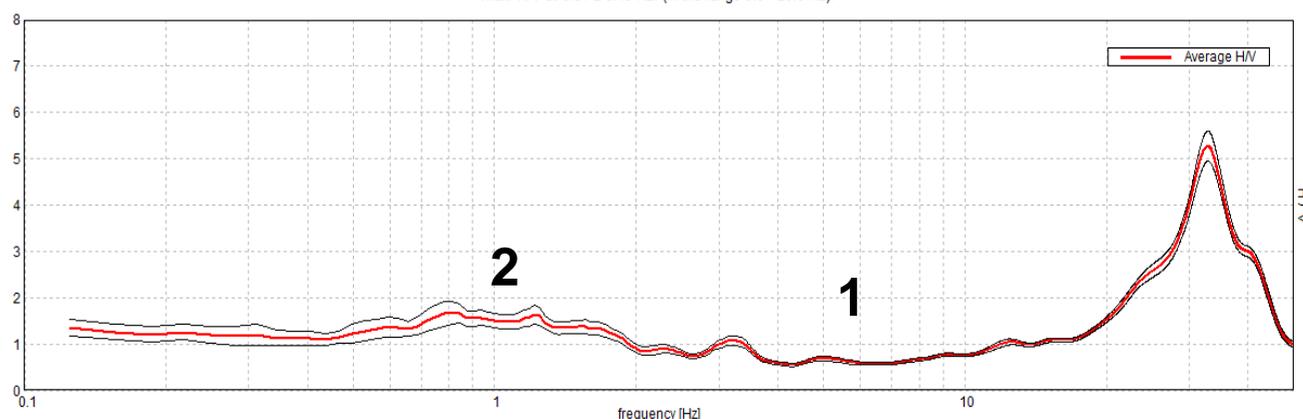
Caso studio 4: Influenza di un sismo – strato rigido superficiale

✓ Modello sismo – stratigrafico (approccio semplificato & RSL)

| Sismo STRATO | Spessore | Letto Strato | Velocità Vs (m/s) | Smorzamento |
|---------------|-----------|--------------|-------------------|-------------|
| Copertura | 3 | 3 | 300 | Costante |
| Rigido | 35 | 38 | 850 1 | Costante |
| Alluvioni 1 | 30 | 68 | 500 | Costante |
| Alluvioni 2 | 50 | 118 | 550 | Costante |
| Pre - Bedrock | 20 | 138 | 650 2 | Costante |
| Bedrock | ∥ | ∥ | 1200 | 1% |



Max. H/V at 0.81 ± 0.18 Hz. (In the range 0.5 - 20.0 Hz).



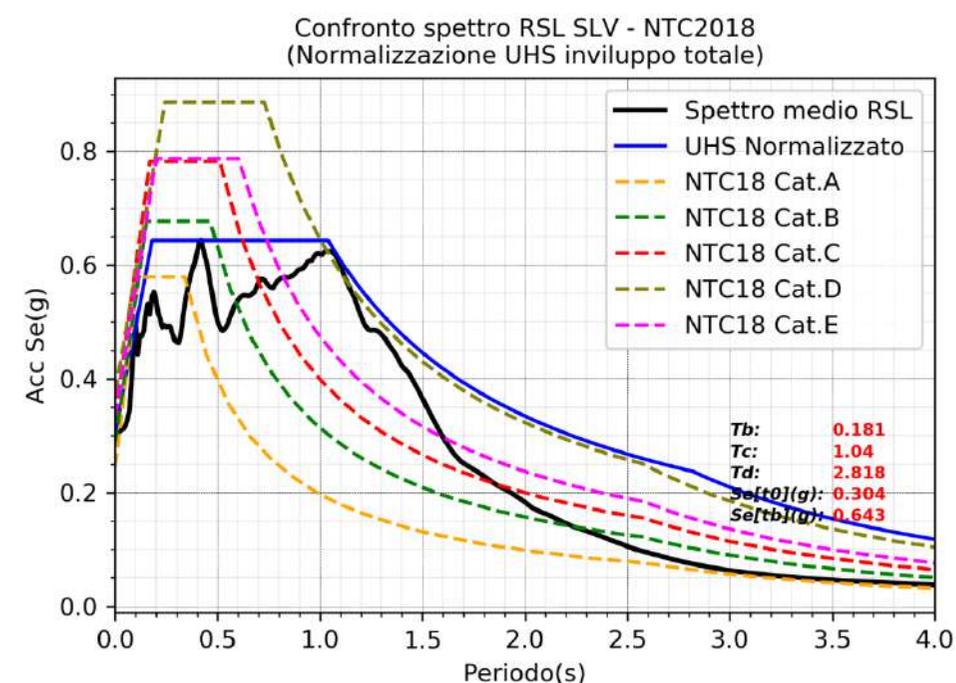
Analisi 1D – casi studio

Caso studio 4: Influenza di un sismo – strato rigido superficiale

✓ Modello sismo – stratigrafico (approccio semplificato & RSL)

~~Cat.A?~~

| Sismo STRATO | Spessore | Letto Strato | Velocità Vs (m/s) | Curve Sim:LEQ |
|---------------|-----------|--------------|-------------------|-----------------------|
| Copertura | 3 | 3 | 300 | Rollins et al. (1998) |
| Rigido | 35 | 38 | 850 | Costante 1% |
| Alluvioni 1 | 30 | 68 | 500 | Rollins et al. (1998) |
| Alluvioni 2 | 50 | 118 | 550 | Rollins et al. (1998) |
| Pre - Bedrock | 20 | 138 | 650 | Costante 1% |
| Bedrock | ∥ | ∥ | 1200 | 1% |



Analisi 1D – casi studio

Caso studio 5: “Nostro” – Esercitazione 1D

| GEOMETRIA | Codice di calcolo | Tipo di analisi |
|-----------|---------------------|-----------------|
| 1D | SHAKE | LEQ |
| 1D | SHAKE91 | LEQ |
| 1D | PROSHAKE | LEQ |
| 1D | SHAKE2000 | LEQ |
| 1D | EERA | LEQ |
| 1D | STRATA | LEQ |
| 1D | NERA | NL |
| 1D | DEEPSOIL | NL |
| 1D | DESRA_2 | NL |
| 1D | DESRAMOD | NL |
| 1D | D-MOD_2 | NL |
| 1D | SUMDES | NL |
| 1D | CYBERQUAKE | NL |
| 2D | QUAD4 | LEQ |
| 2D | QUAD4M | LEQ |
| 2D | FLUSH | LEQ |
| 2D | QUAKE/W version 5.0 | LEQ |
| 2D | DYNAFLOW | NL |
| 2D | GEFDYN | NL |
| 2D | TARA-3 | NL |
| 2D | FLAC | NL |
| 2D | PLAXIS | NL |

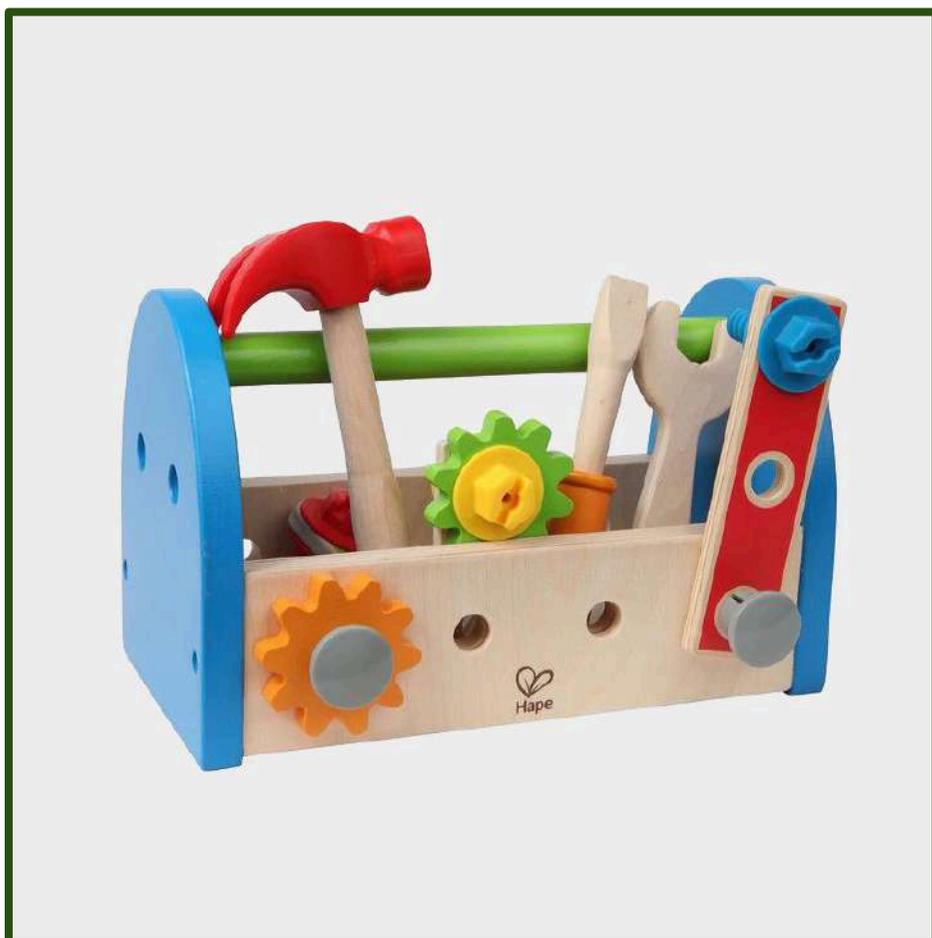
- ✓ *Gratuito*
- ✓ Possibilità di effettuare analisi *LE* e *LEQ*.
- ✓ Molto diffuso il suo utilizzo: esistono diverse guide (anche in lingua italiana).
- ✓ Permette di eseguire analisi con approccio probabilistico.
- ✓ Il codice sorgente è aperto.
- ✓ Stabile.

- ✓ *Non permette di effettuare il calcolo del fattore di amplificazione.*
- ✓ *Non permette di eseguire analisi statistiche avanzate sui risultati.*
- ✓ Per le analisi dei dati è necessario utilizzare altri programmi dedicati.

Permette le analisi con metodi basati sulla Random Vibration Theory (RVT).

Analisi 1D – casi studio

Caso studio 5: “Nostro” – Esercitazione 1D



- ✓ **Informazioni relative alla struttura (o area) per cui si deve stimare la pericolosità sismica.**
 - ✓ Posizione: (latitudine – longitudine);
 - ✓ Classe d'uso e Vita Nominale (§ 3.2 NTC2018);
 - ✓ Probabilità di superamento (%) – per quali stati limite eseguire le analisi;
 - ✓ Eventuali modificazioni dello stato dei luoghi tra ante e post operam.
 - ✓ Nel caso di strutture, tipologia, piano e tipologia delle fondazioni.

- ✓ **Informazioni relative alle condizioni geo – sismo – morfo – stratigrafiche dei luoghi.**
 - ✓ Ricerca bibliografica;
 - ✓ Ricerca indagini di archivio;
 - ✓ Studi di Microzonazione Sismica; *
 - ✓ Profilo sismo – stratigrafico (nel nostro caso colonna sismo – stratigrafica).

* Gli studi di MS sono fondamentali per uno studio di RSL

Livelli 1 (MOPS) forniscono un quadro generale sismo – stratigrafo.

Livelli 3 forniscono un quadro sismo – stratigrafo di dettaglio e permettono di effettuare un confronto tra coefficienti di amplificazione RSL vs MS.

Analisi 1D – casi studio

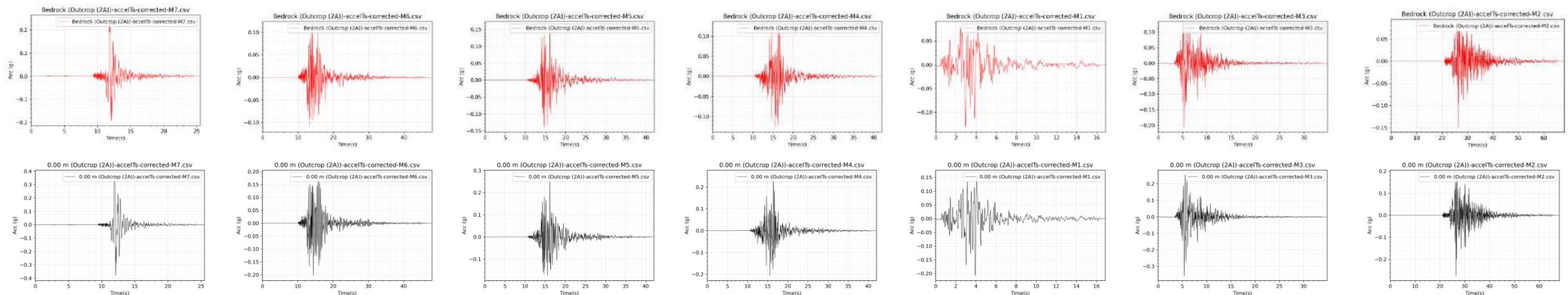
Caso studio 5: “Nostro” – Esercitazione 1D



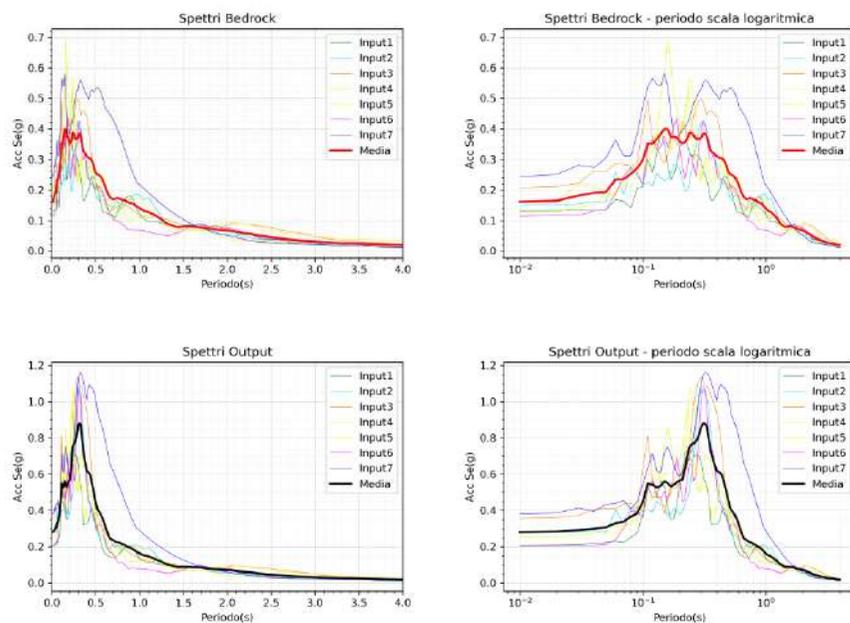
Analisi 1D – casi studio

Caso studio 5: “Nostro” – Esercitazione 1D

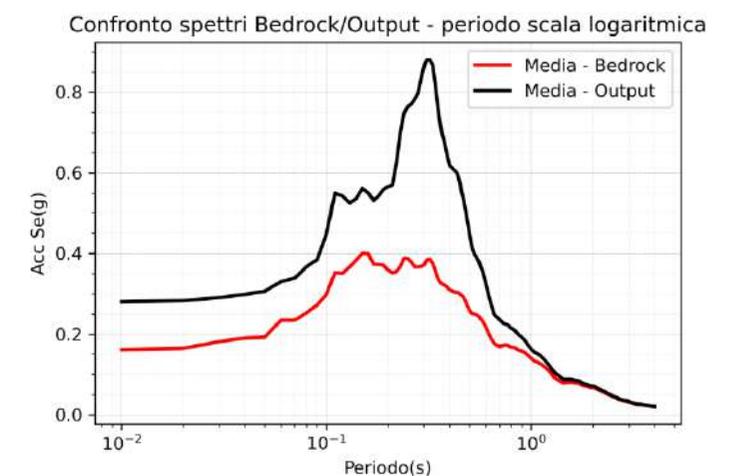
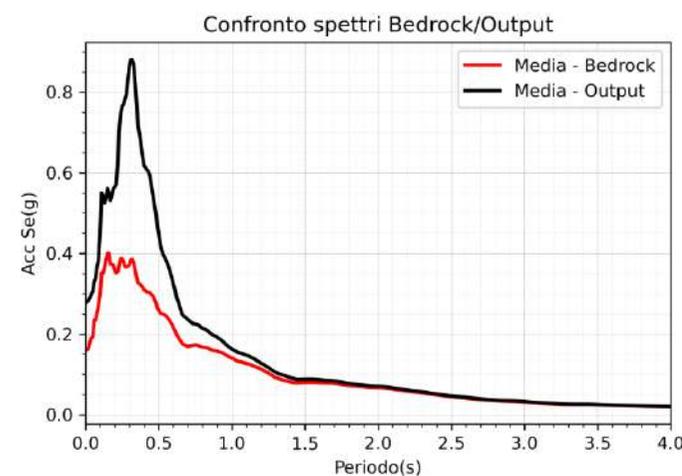
✓ Accelerogrammi



✓ Spettri



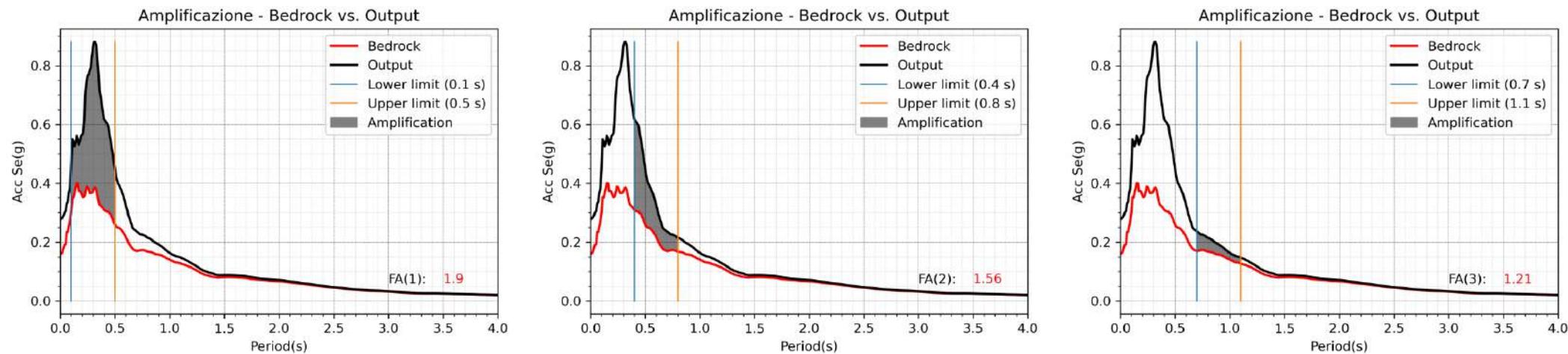
✓ Confronto spettri medi



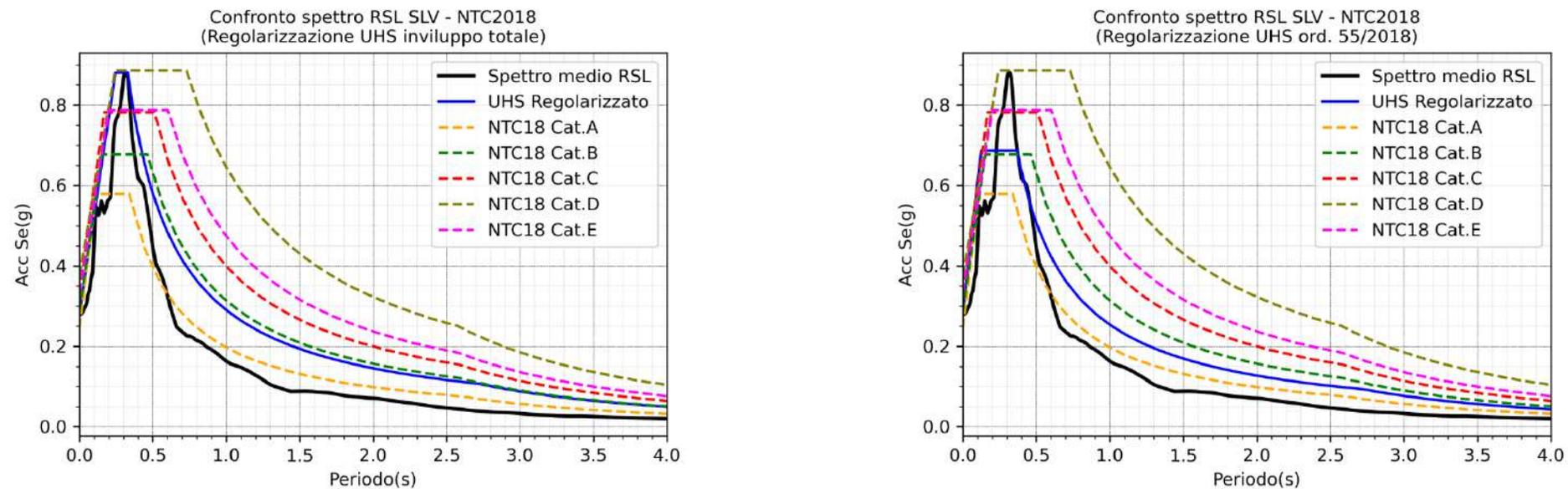
Analisi 1D – casi studio

Caso studio 5: “Nostro” – Esercitazione 1D

✓ Fattori di amplificazione



✓ Confronto spettri di Normativa e regolarizzazione



Conclusioni

- ✓ Campo di studio: Ricerca – Pianificazione/Urbanistica – Ingegneria delle strutture.
- ✓ Normative – Regolamenti – Linee guida – Testi scientifici.
- ✓ Risorse economiche.
- ✓ Dati ancillari a disposizione e loro affidabilità.
- ✓ Complessità del contesto geologico.
- ✓ Complessità del tessuto urbano e sua vulnerabilità.
- ✓ Dimensionalità del modello di sintesi del terreno e suo comportamento.
- ✓ Criticità nella lettura dei risultati.
- ✓ Stretta collaborazione (in tutte le fasi) tra le diverse figure professionali.

GRAZIE A TUTTI
PER L'ATTENZIONE

LEONARDO MARIA GIANNINI