



# La risposta sismica locale: il ruolo del Geologo

Prof. Cesare Comina

Università degli Studi di Torino

Dipartimento di Scienze della Terra

[cesare.comina@unito.it](mailto:cesare.comina@unito.it)

# Outline

- Cosa serve per valutare e quantificare la RSL;
- Quali sono i parametri che valutano e quantificano la RSL;
- Come posso fare per quantificare la RSL;
- Cenni di caratterizzazione Geotecnica;
- Caraterizzazione Sismica, metodi e confronti, incertezze;

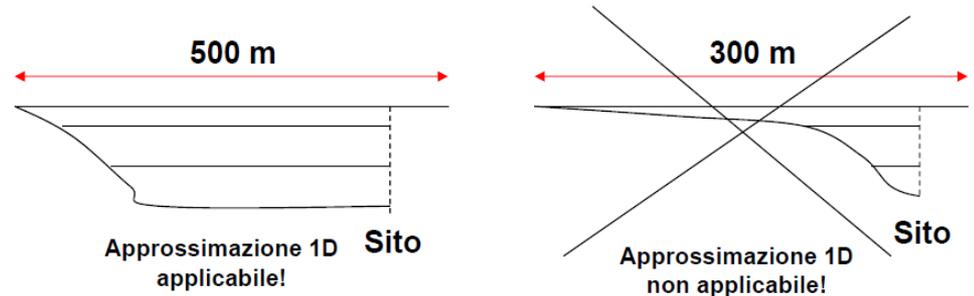
# Risposta sismica locale

Cosa serve per valutare e quantificare la RSL:

- **Topografia;**
- **Morfologia dei depositi superficiali;**
- **Morfologia del bedrock sismico;**
- **Profilo stratigrafico;**
- **Profilo di Vs al sito;**

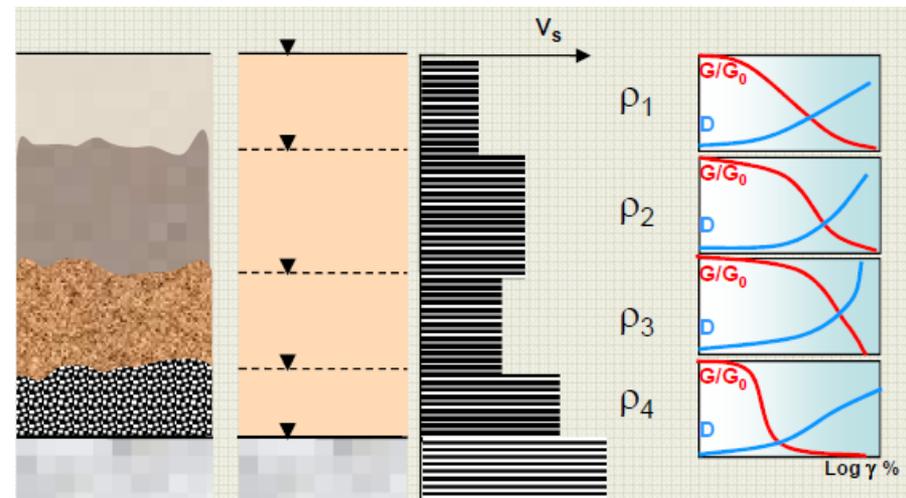
$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

- **Caratteristiche geotecniche in campo dinamico dei depositi;**
- **Caratteristiche dell'input sismico dal quale ci si vuole "proteggere".**



Geologia e Geofisica

Geotecnica

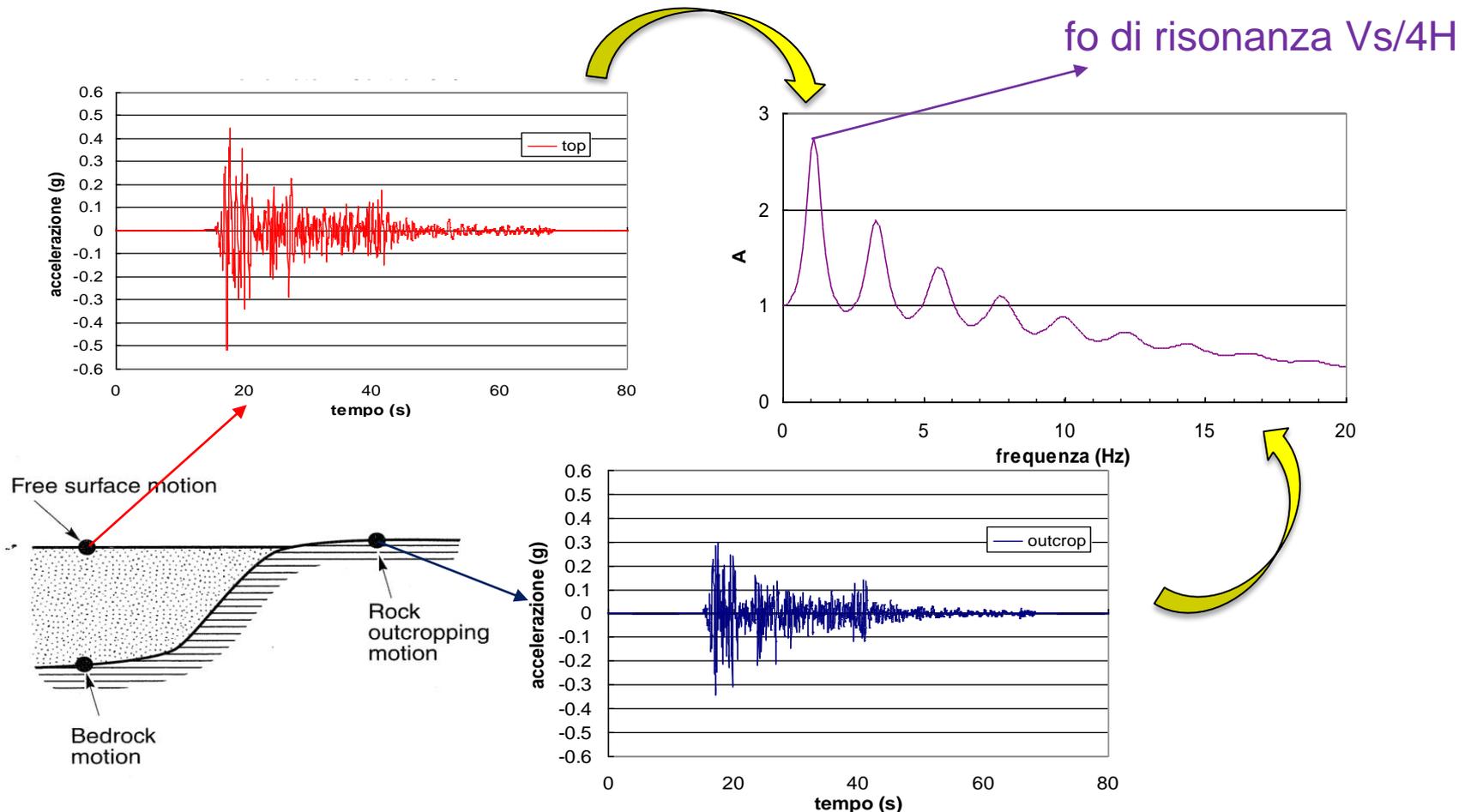


# Risposta sismica locale

Quali sono i parametri che valutano e quantificano la RSL:

## Funzione di Amplificazione:

Si osserva come data una certa stratigrafia l'amplificazione è massima per certe specifiche frequenze (**frequenze di risonanza**), che dipendono principalmente dallo spessore dei depositi (**H**) e dalla velocità delle onde S (**Vs**) al loro interno.

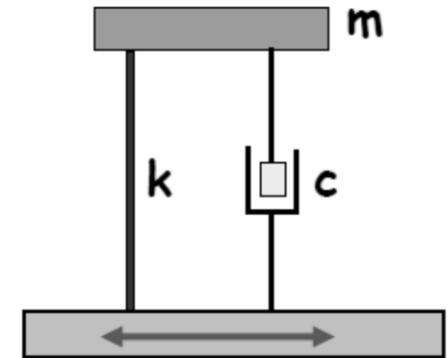
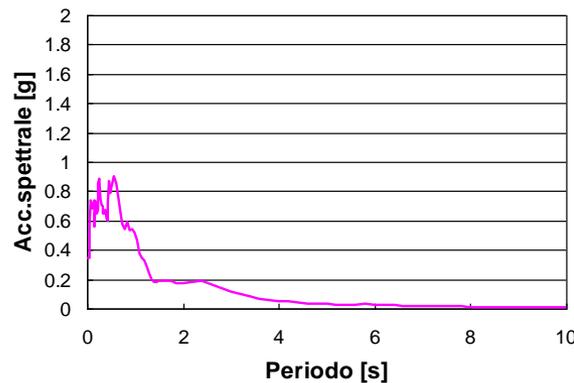
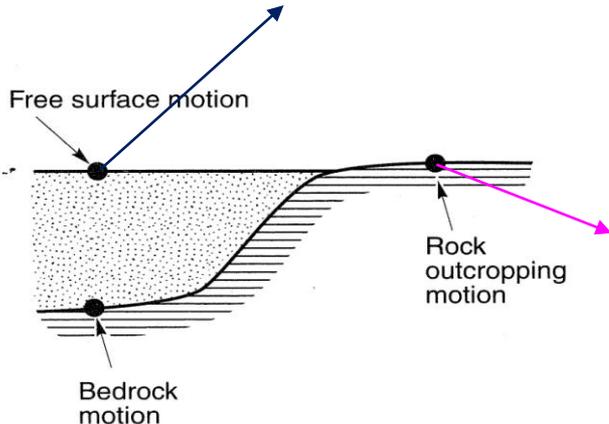
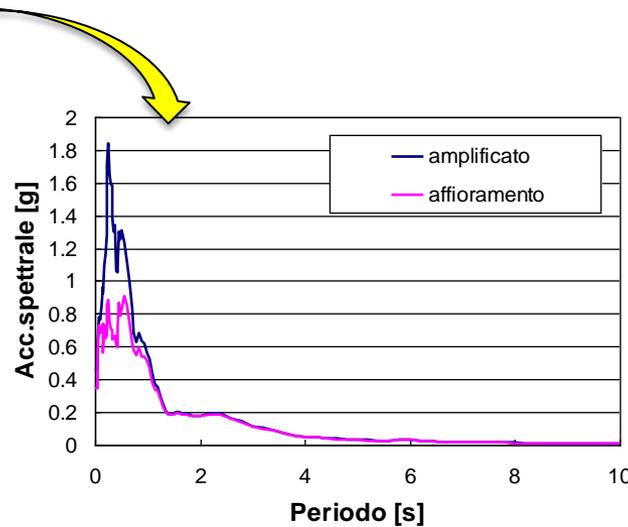
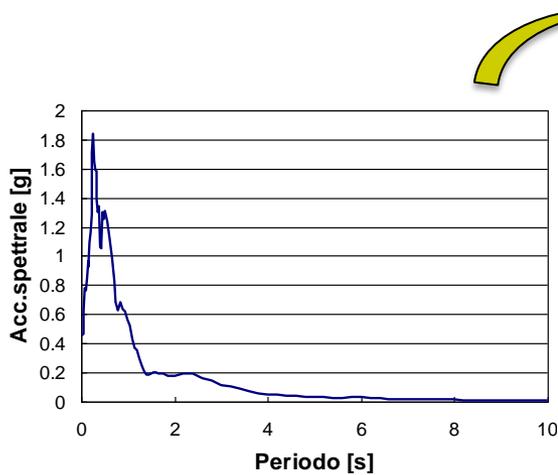


# Risposta sismica locale

Quali sono i parametri che valutano e quantificano la RSL:

## Spettro di Risposta:

Luogo dei massimi della risposta (picco in termini di spostamento, velocità o accelerazione) di oscillatori dinamici semplici ad un moto di input in funzione del loro periodo naturale e del loro rapporto di smorzamento.



Di particolare importanza ai fini della progettazione in quanto quantifica la massima risposta di una specifica struttura alla sollecitazione sismica che essa subisce al sito.

# Risposta sismica locale

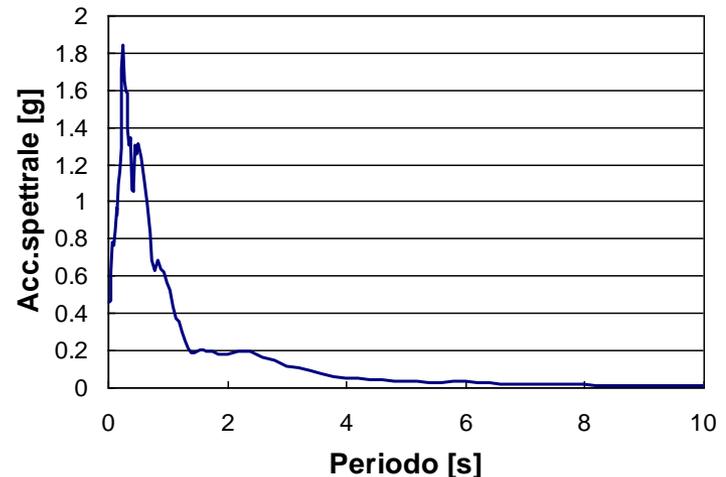
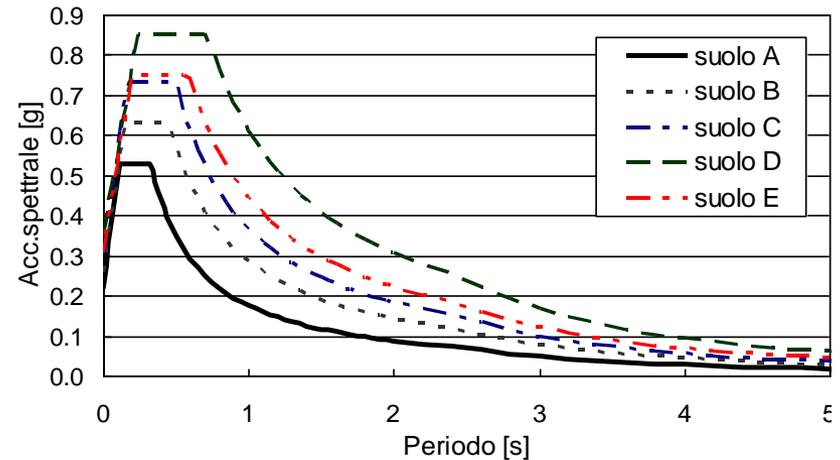
Come posso fare per quantificare la RSL e fornire al progettista i parametri di cui sopra:

- Approccio Semplificato via Normativa;

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s,eq}$  di propagazione delle onde di taglio.

- Valutazione sito specifica.

Specifiche analisi di RSL tramite opportuni software e storie di accelerazione a partire da una caratterizzazione sismica ( $V_s$ ) e geotecnica ( $G-\gamma$ ,  $D-\gamma$ ) sito specifica.



# Risposta sismica locale

Quando **non** posso usare l'approccio semplificato:

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante **specifiche analisi**.

- qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni **non** siano chiaramente riconducibili alle categorie di sottosuolo (**incremento delle proprietà meccaniche con la profondità**);

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

- per condizioni topografiche complesse;
- per strutture con periodo fondamentale superiore a 4,0 s.

# Risposta sismica locale

Quando **non** posso usare l'approccio semplificato:

- simulazioni numeriche semplificate 1D;
- simulazioni numeriche avanzate 2D o 3D;

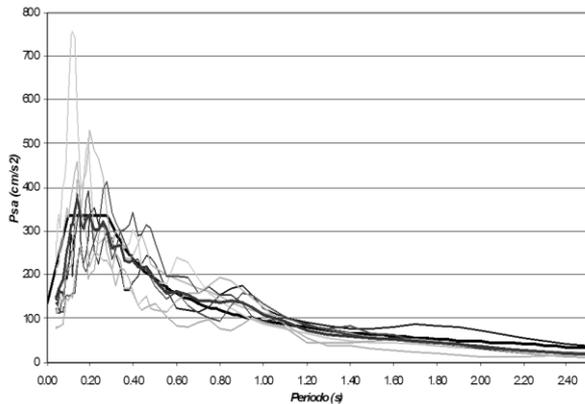
Disponibili in commercio o gratuitamente in rete diversi programmi per le **analisi 1D** della risposta sismica locale

a partire da:

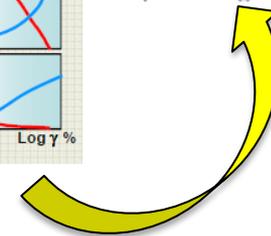
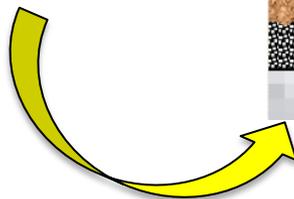
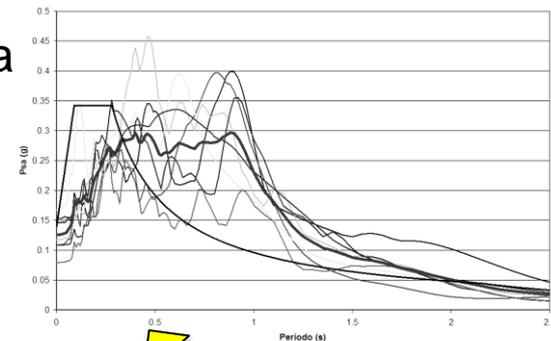
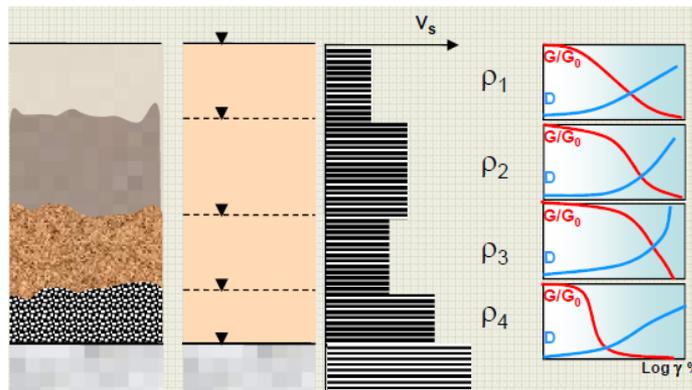
profili di **V<sub>s</sub>** (e relative incertezze),

informazioni geotecniche (curve di decadimento **G-γ** e smorzamento **D-γ**),

accelerogrammi spettrocompatibili di riferimento.



Geologia e Geofisica      Geotecnica



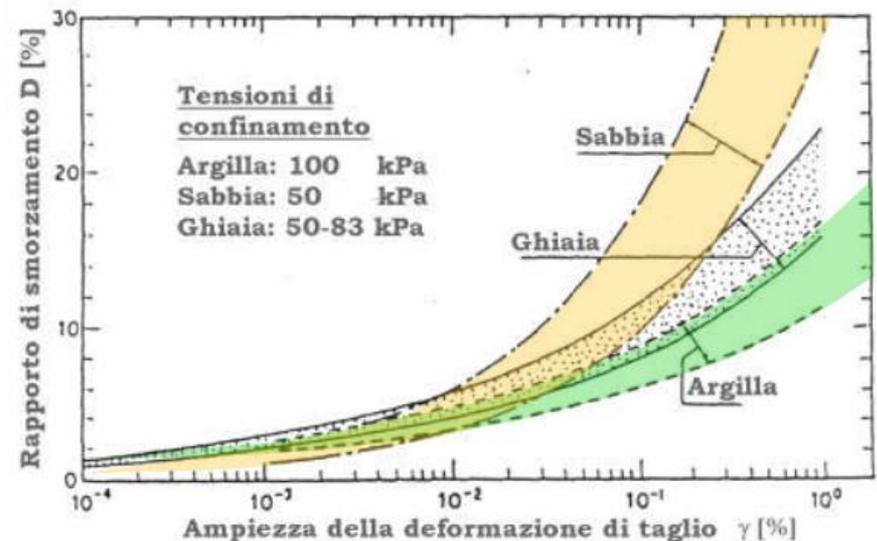
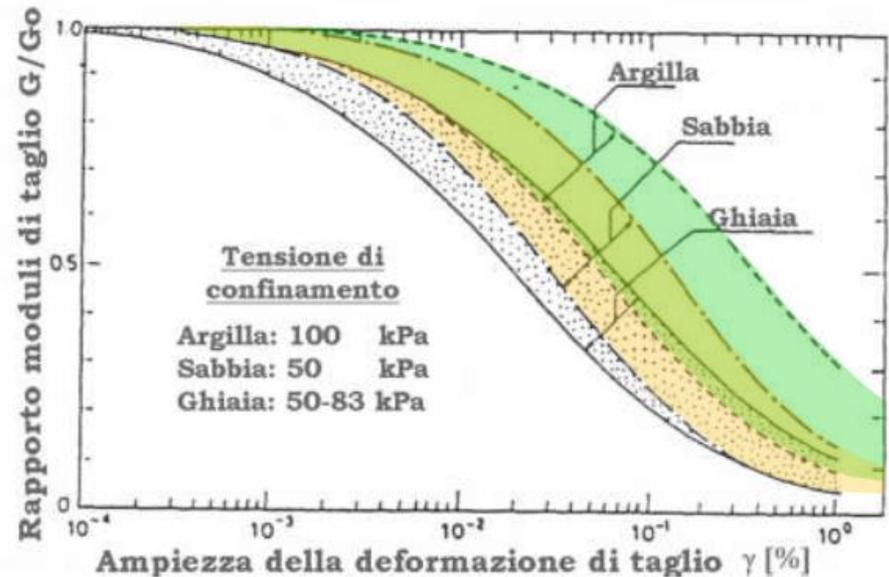
# Caratterizzazione geotecnica

La risposta dei depositi cambia con la sollecitazione e con il tipo di deposito in funzione della forma delle curve di decadimento **G- $\gamma$**  e smorzamento **D- $\gamma$** .

Tali curve si possono ottenere:

- Da letteratura;
- Da prove di laboratorio:

Colonna Risonante,  
Taglio Torsionale Ciclico,  
Taglio Diretto Ciclico,  
Triassiale Ciclica.

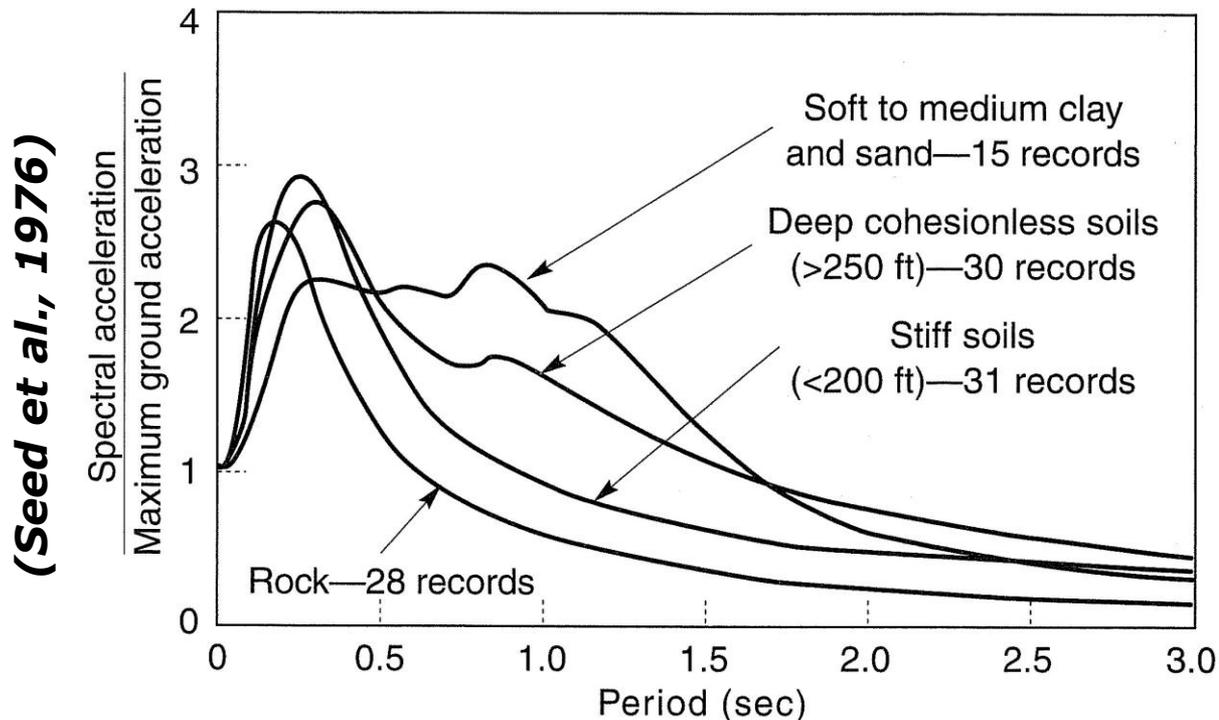


# Caratterizzazione geotecnica

All'aumentare della deformazione (accelerazione),  
G diminuisce, D aumenta, quindi:

- G → l'amplificazione aumenta e diminuisce la frequenza di risonanza;
- D → l'amplificazione diminuisce;

In generale, quindi la risposta del suolo cambia con la sollecitazione e con il tipo di suolo in funzione della forma delle curve di decadimento **G- $\gamma$**  e smorzamento **D- $\gamma$** .



# Caratterizzazione sismica

- **Profilo stratigrafico;**
- **Profilo di  $V_s$  al sito;**

Esistono varie tipologie di tecniche adottabili per la misura diretta del profilo di  $V_s$  o della sua distribuzione spaziale:

## Prove di superficie

- Sismica a rifrazione
- Sismica a riflessione
- Onde Superficiali

Attive + Passive

(**MASW**, SASW etc... **ReMi**)

- Tomografia sismica
- ...

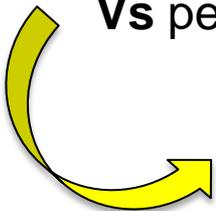
## Prove in foro

- Cross-Hole
- Down-Hole
- ...

## Prove in sito + misure di $V_s$

- Cono Sismico (SCPT)
- Dilatometro Sismico (SDMT)
- ...

**Metodi a Stazione singola tipo - H/V non** sono una tecnica di misura diretta della  $V_s$  permettono solo estrapolazioni non sempre completamente affidabili.



Hanno tuttavia una loro utilità in termini di inversione congiunta, profondità di indagine, conoscenza a priori del sito.

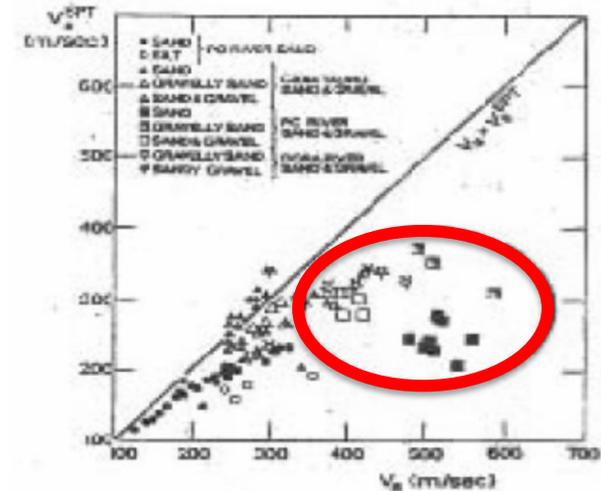
# Caratterizzazione sismica

Può **anche** essere effettuata, **con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato**, tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche

Ma la valutazione indiretta tramite NSPT può essere fortemente fuorviante:

- Non è possibile eseguire la prova SPT in tutti i terreni (SPT a rifiuto in depositi ghiaiosi e ciottolosi);
- C'è un'elevata dispersione nelle correlazioni  $N_{spt} / V_s$ ;

Es. Limiti della correlazione di Otha e Goto



Vengono messe ambiguamente sullo stesso piano tecniche geofisiche consolidate con correlazioni empiriche che sia la pratica professionale sia la letteratura scientifica indicano come non pienamente affidabili.

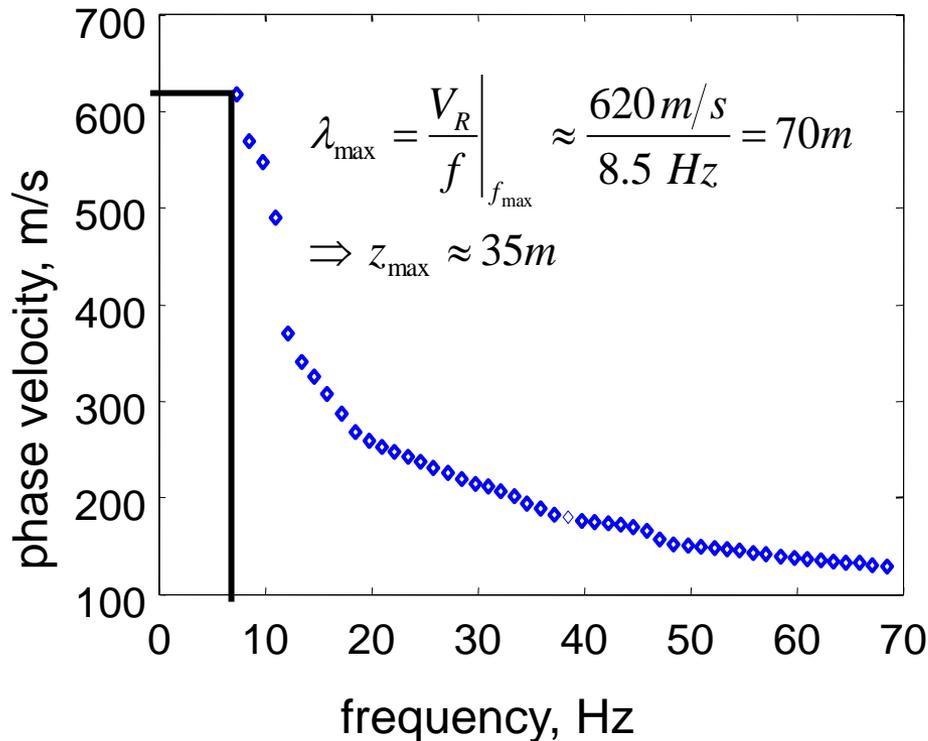
# Caratterizzazione sismica

Prove per onde Superficiali:

Profondità d'indagine:

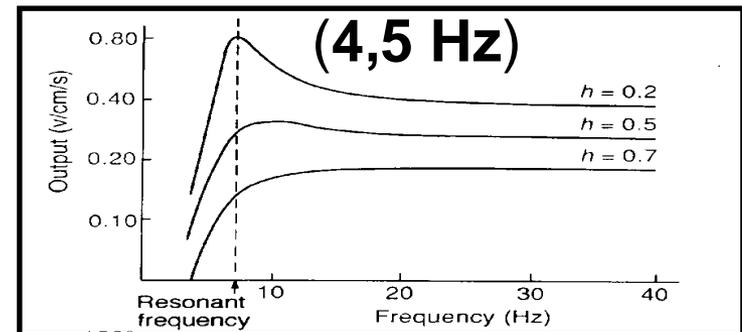
Strategie:

$$z_{\max} \approx \frac{\lambda_{\max}}{2}$$



- Sorgenti pesanti per generare energia in basse frequenze;
- Stendimenti lunghi per campionare correttamente grandi lunghezze d'onda ( $z_{\max} \approx \frac{1}{2} L_{\text{stend}}$ );

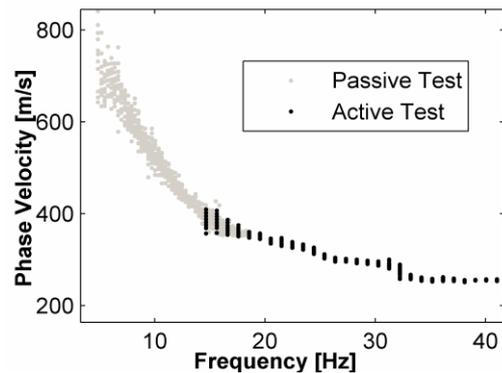
Assoluta necessità di geofoni a bassa frequenza propria



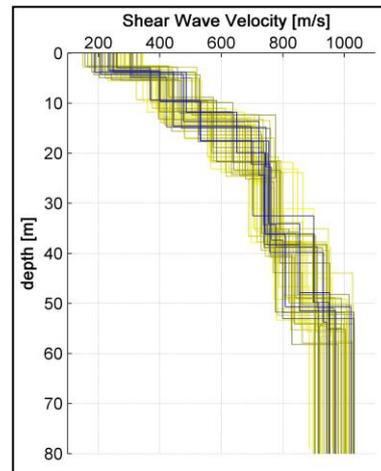
# Confronti

L'uso di metodi di ricerca globale del minimo (Monte Carlo) permette di studiare l'incertezza associata all'inversione delle Prove per Onde Superficiali.

Dati



Profili di Vs



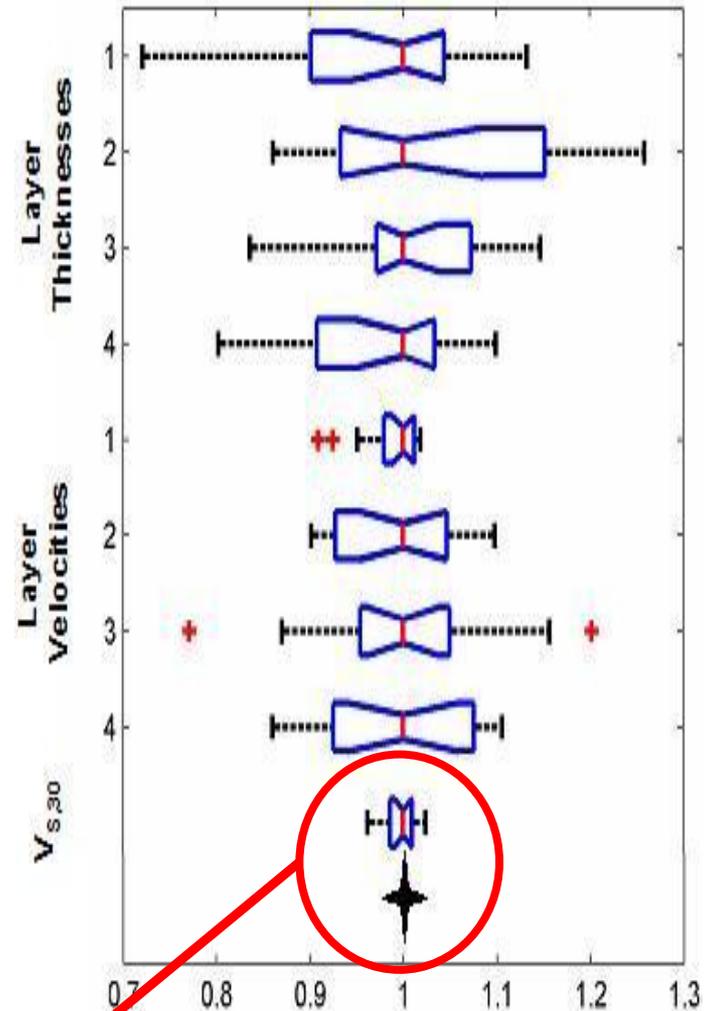
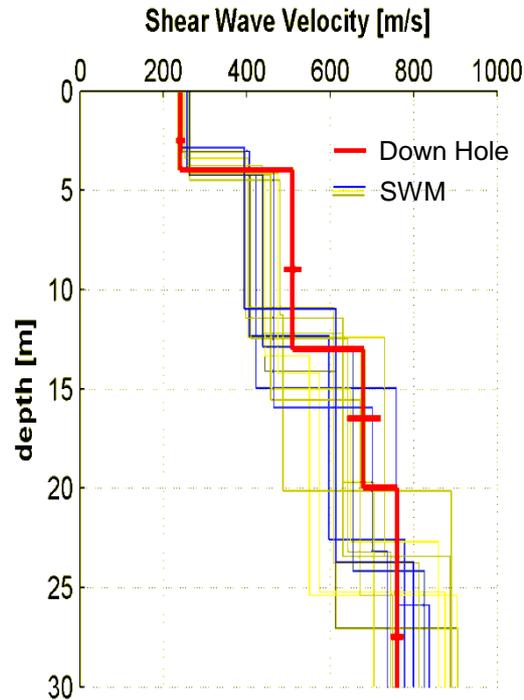
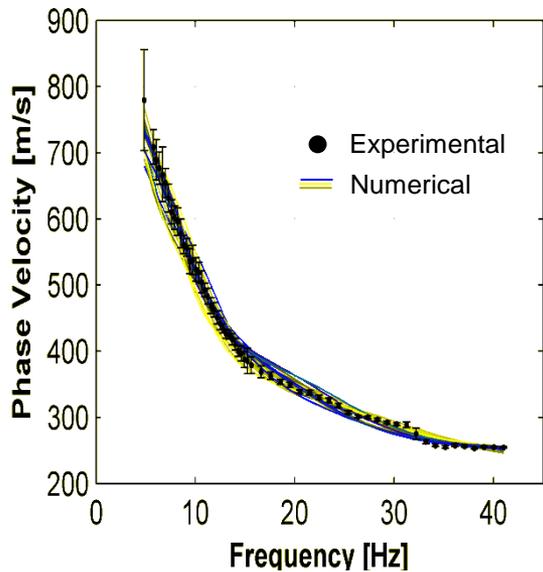
Parametri di risposta  
sismica locale.

Confronto dei risultati con diverse tipologie di prove invasive (DH, CH, SDMT).

# Confronti

SITO: La Salle (AO)

SWM active + passive



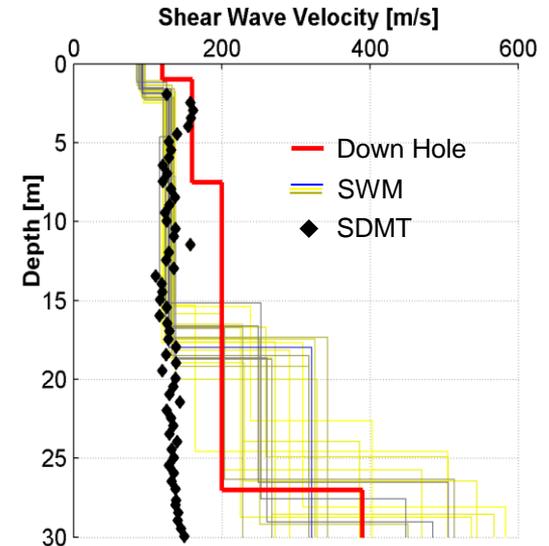
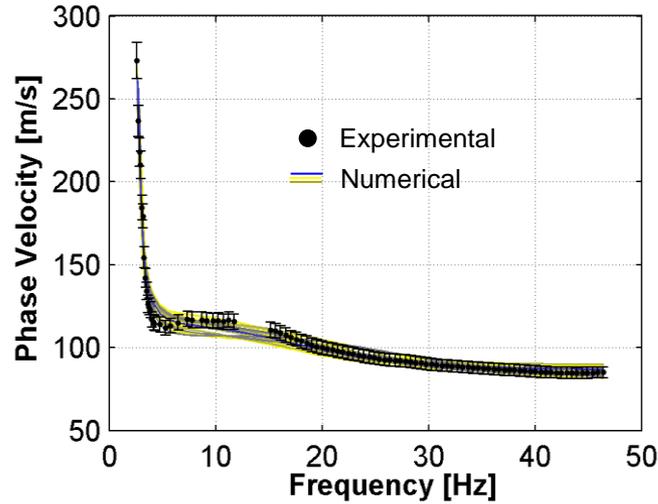
L'incertezza sui singoli parametri di modello collassa in termini di risposta globale della stratigrafia

# Confronti

Per sottolineare che I metodi invasivi non sono a loro volta privi di incertezze:

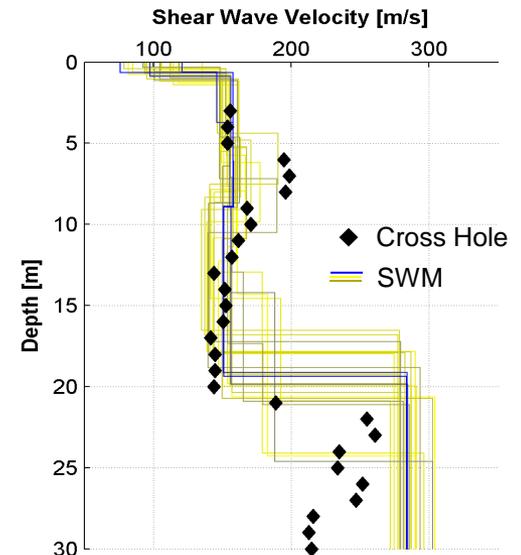
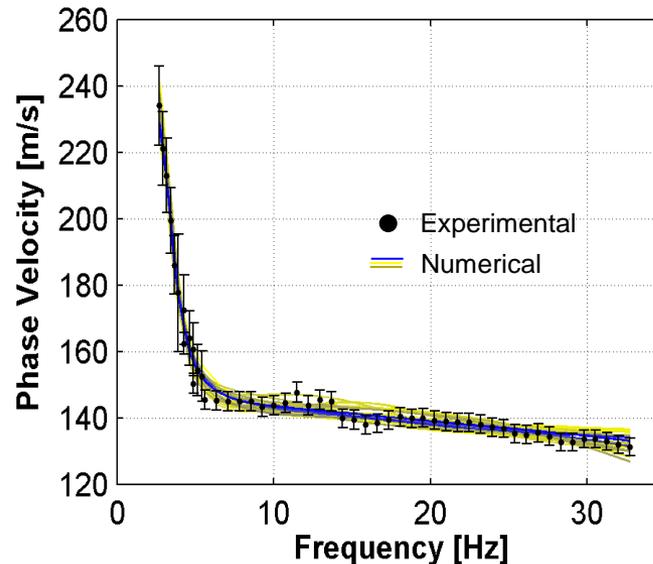
## SITO: Catania (CT)

SWM active + passive



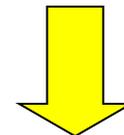
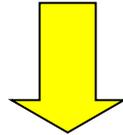
## SITO: Pisa (PI)

SWM active + passive



# Confronti

L'incertezza sui singoli parametri di modello collassa in termini di risposta globale della stratigrafia



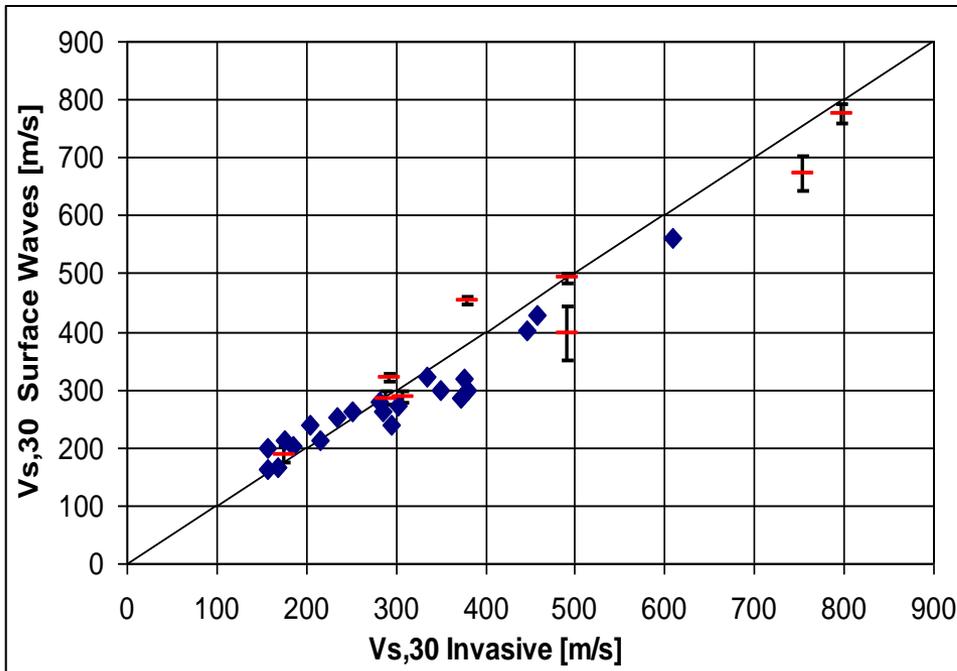
	$\lambda_{\max}^{\text{SW}}$ [m]	No di profili equivalenti	$V_{S,30}^{\text{SW}}$ [m/s]	Std $V_{S,30}$ [m/s]	CoV $V_{S,30}$ [%]	$V_{S,30}$ [m/s] Invasive
<b>SW Attive</b>						
<b>Pontremoli</b>	63	22	774	15.2	2.0	797 (DH)
<b>Saluggia</b>	85	39	452	7.8	1.7	380 (CH)
<b>Torre Pellice</b>	145	16	319	7.4	2.1	294 (DH)
<b>SW Attive + Passive</b>						
<b>La Salle</b>	155	16	491	8.2	1.7	491 (DH)
<b>Rojo Piano</b>	110	21	312	3.6	1.1	290 (DH)
<b>Pianola</b>	90	33	303	6.7	2.2	308 (DH)
<b>Catania</b>	110	24	162	3.5	2.1	195 (DH)
<b>Pisa</b>	90	25	181	2.0	1.1	176 (CH)

Quando la profondità di indagine è adeguata l'incertezza sulla stima della  $V_{S,30}$  è ridotta ~ 2%

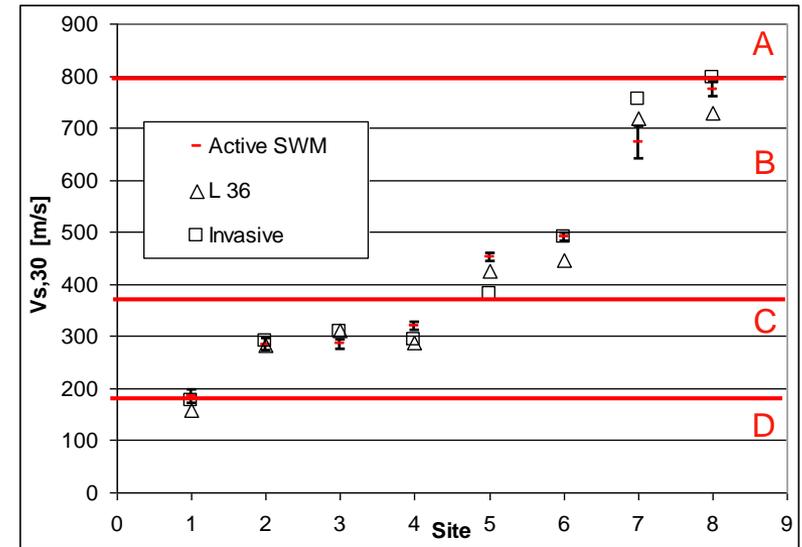
# Confronti

L'incertezza sui singoli parametri di modello collassa in termini di risposta globale della stratigrafia

Quando la profondità di indagine è adeguata il legame tra SWM e le prove invasive è approssimativamente 1-1



Quando la profondità di indagine è adeguata in termini di classificazione sismica → metodi semplificati



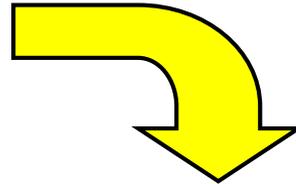
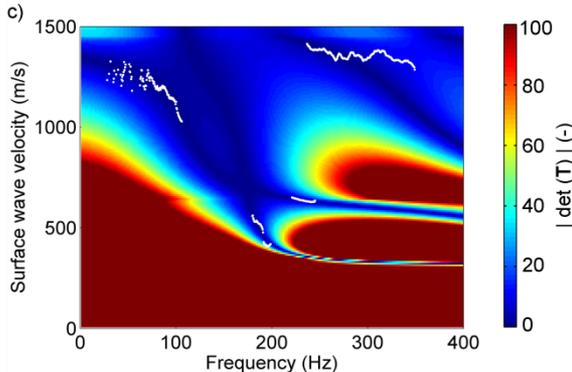
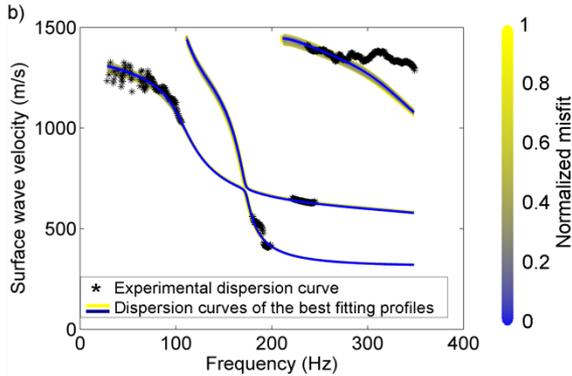
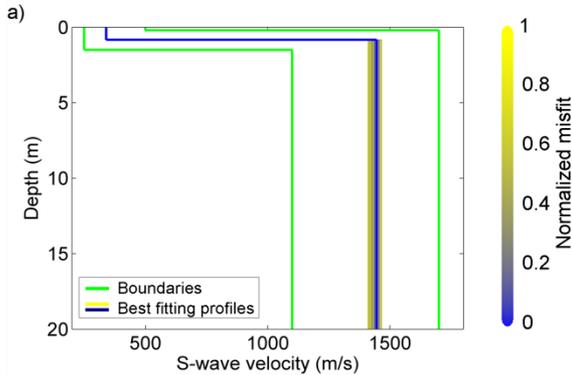
Brown et al. (2000)

$$V_{S,30} = V_s @ \lambda_{36m}$$

Incertezza stimata del 6%

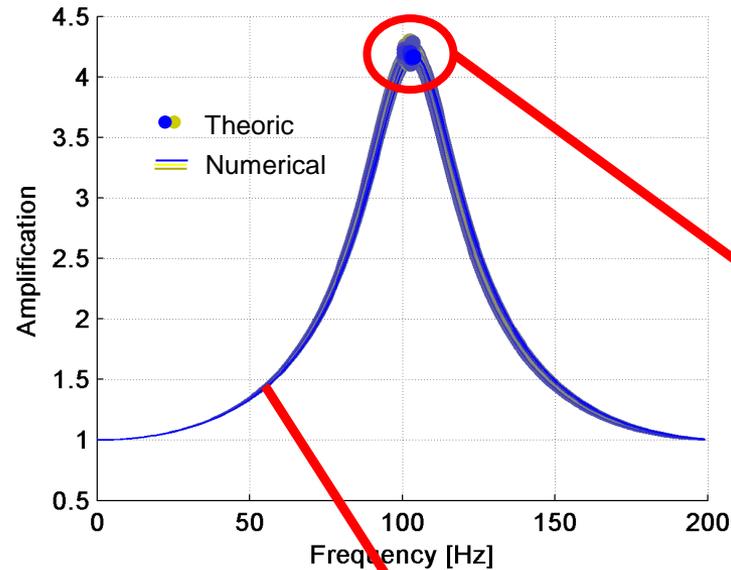
# Incertezza RSL

Quando il profilo di velocità, con la relativa incertezza, è utilizzato per una determinazione quantitativa della RSL:



SITO: Ispica (RG)

SWM active

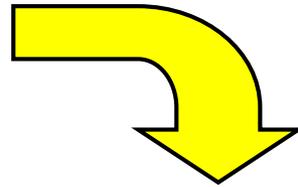


Valutazione analitica in funzione della  $V_s$  media (slowness) dei depositi e del contrasto di impedenza.

Risposta sismica locale 1D

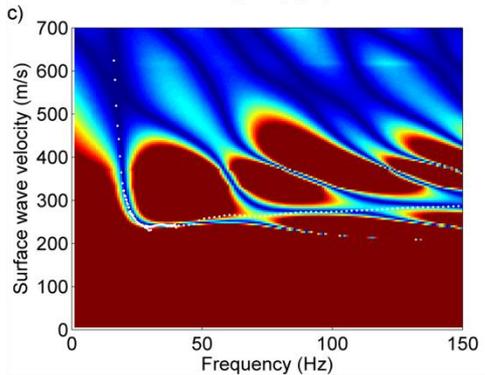
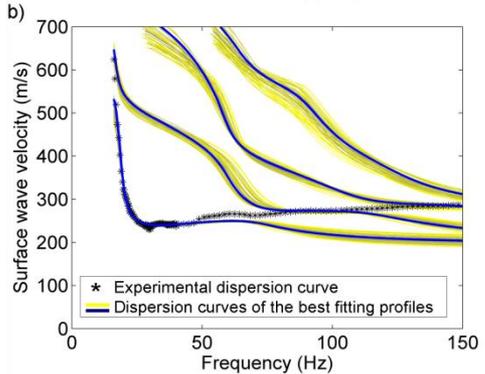
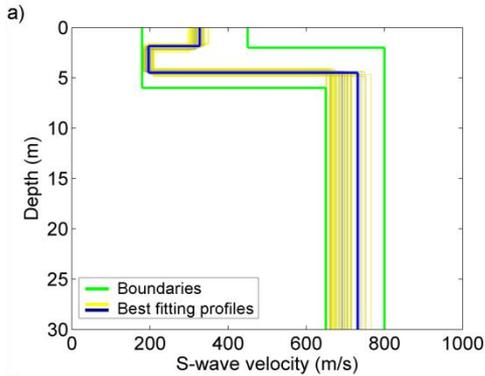
# Incertezza RSL

Quando il profilo di velocità, con la relativa incertezza, è utilizzato per una determinazione quantitativa della RSL:

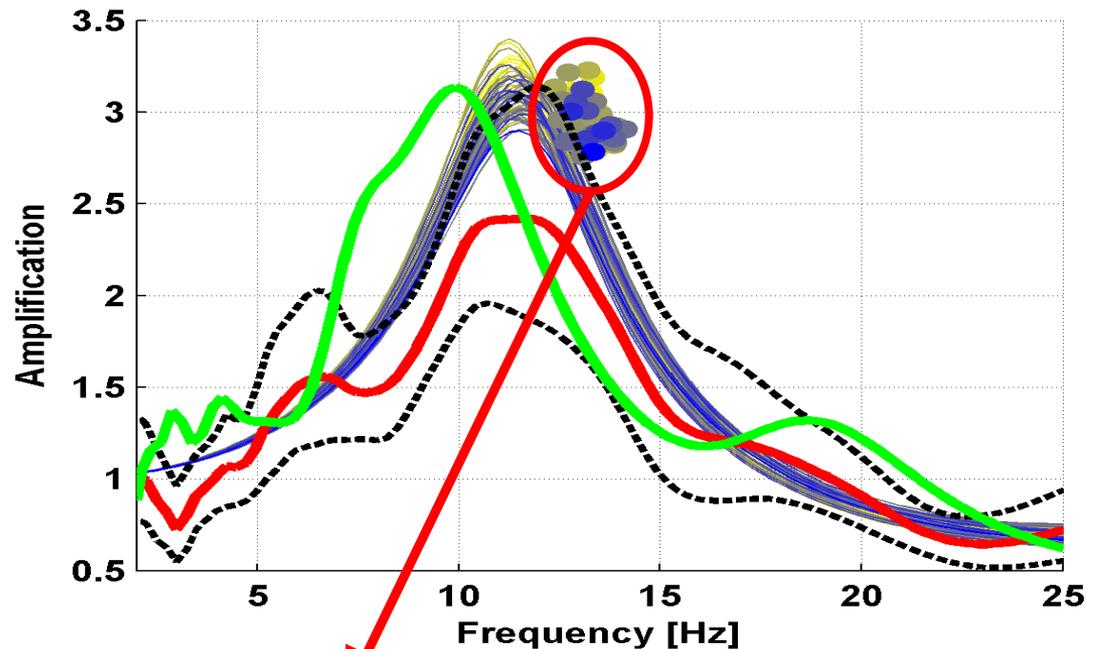


## SITO: Sestri Levante (GE)

SWM active



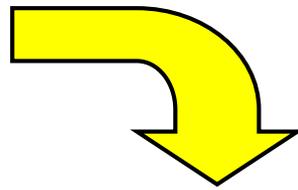
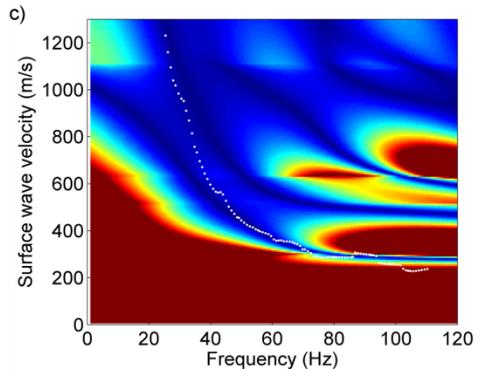
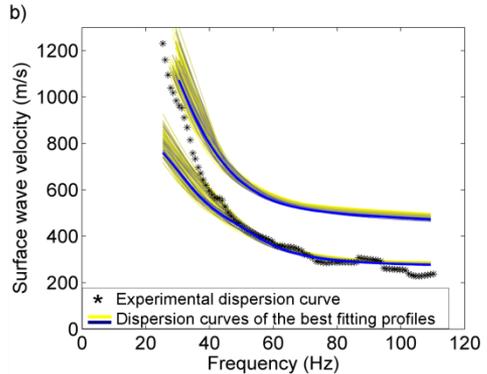
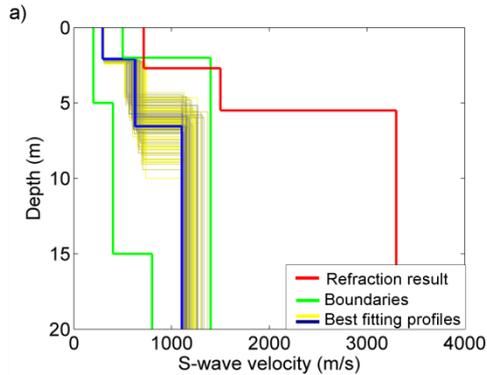
- Theoric
- Numerical
- H/V curve on purpose
- - - H/V standard deviation
- H/V curve from earthquake record



Sovrastima (Vs media)

# Incertezza RSL

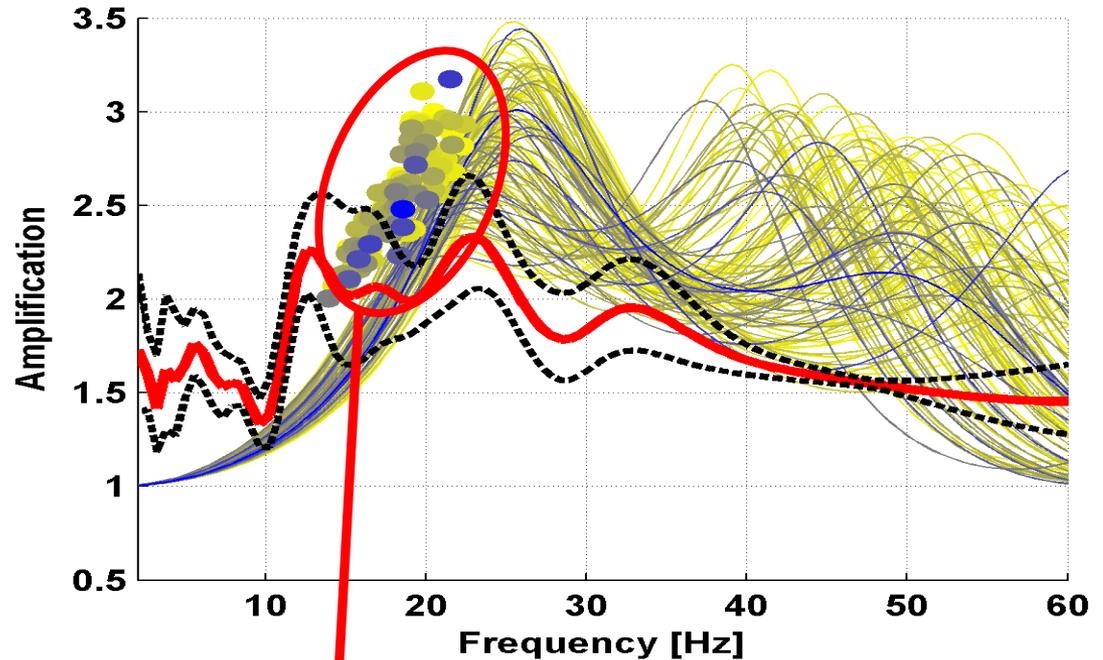
Quando il profilo di velocità con la relativa incertezza è utilizzato per una determinazione quantitativa della RSL:



## SITO: Varese Ligure (SP)

SWM active

- Theoric
- Numerical
- H/V curve on purpose
- H/V standard deviation



Sottostima (Vs media)

# Conclusioni

- Necessità di misura diretta della  $V_s$ ;
  - Affidabilità delle Onde superficiali per la stima di parametri medi (e.g.  $V_{s,eq}$ );
- NB:** modi superiori, profondità d'indagine, misure passive;
- Prove in foro non prive di incertezza (Modalità esecutive)
  - Necessità di definizione accurata del profilo di velocità per RSL (**che è solo un primo passo...**).