



XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)



## Indagini sismiche per la determinazione della velocità delle onde di taglio nell'ambito degli studi di risposta sismica locale

Docente: Prof. Cesare Comina  
Università degli Studi di Torino  
Dipartimento di Scienze della Terra  
cesare.comina@unito.it

## Sommario

- Perché Vs?
- Caratterizzazione Sismica per la Risposta sismica Locale (RSL)
- Tecniche di misura

Focus su Onde superficiali

- Confronti Onde superficiali vs Prove in Foro
- Conclusioni

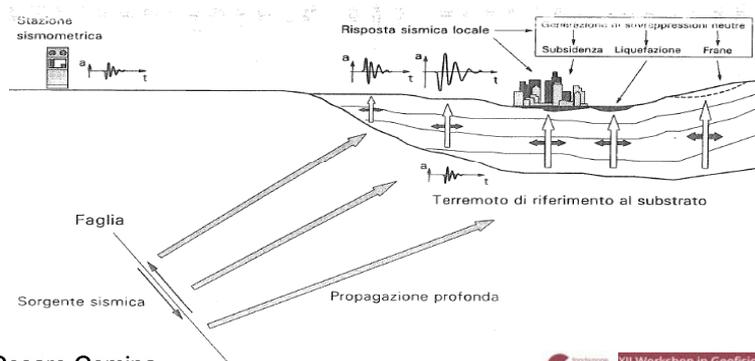
Prof. Cesare Comina



## Perchè Vs ?

Il moto sismico generato da un terremoto in un sito dipende dalla **complessa interazione** tra le **onde sismiche** e le **condizioni locali**.

Lo scopo della caratterizzazione sismica è pervenire ad una valutazione della **Risposta sismica locale** del sito rispetto a un sito di riferimento ideale, rigido, orizzontale.

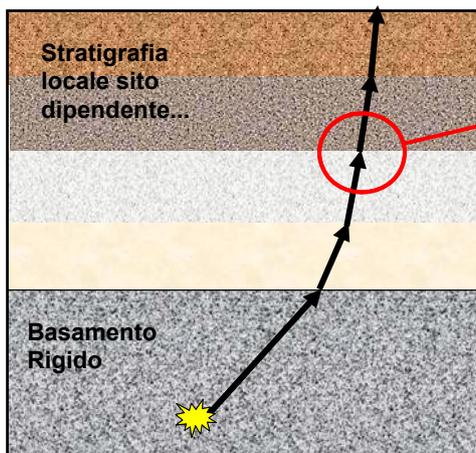


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Perchè Vs ?

Al passaggio nei depositi superficiali, a causa della riduzione di velocità, il raggio sismico tende a “verticalizzarsi”.



Legge di Snell:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$

$V_1 > V_2$

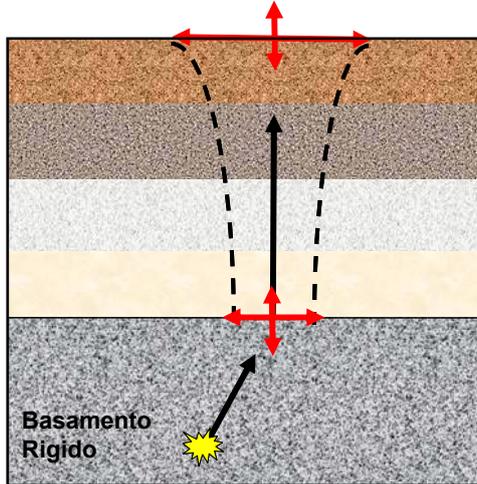
Ciò comporta che, a meno di fenomeni “near source”, la sollecitazione sismica è schematizzabile come una propagazione dal basso verso l’alto all’interno della stratigrafia sito-dipendente.

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Perchè Vs ?

Al passaggio nei depositi superficiali la componente **orizzontale (onde S)** è **amplificata**, la componente **verticale (onde P)** non è **amplificata** nella banda di frequenza di interesse.



Prof. Cesare Comina

L'entità dell'amplificazione è funzione del rapporto di impedenza acustica dei vari strati:

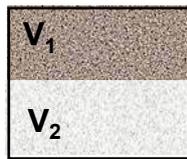
$$z_i = \rho_i \cdot V_i$$

$$\alpha_z = \frac{\rho_{i-1} \cdot V_{i-1}}{\rho_i \cdot V_i}$$

Cioè della **variazione di Vs**.

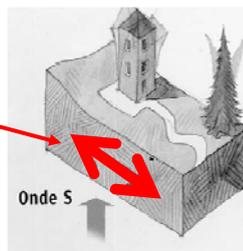
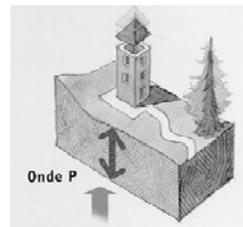
## Perchè Vs ?

Il moto oscillatorio risulta di conseguenza il più gravoso per le strutture:



$$\alpha_z = \frac{\rho_1 \cdot V_1}{\rho_2 \cdot V_2}$$

Impedance Ratio, $\alpha_z$	Displacement Amplitudes		
	Incident	Reflected	Transmitted
0	$A_i$	$A_i$	$2A_i$
$\frac{1}{4}$	$A_i$	$3A_i/5$	$8A_i/5$
$\frac{1}{2}$	$A_i$	$A_i/3$	$4A_i/3$
1	$A_i$	0	$A_i$
2	$A_i$	$-A_i/3$	$2A_i/3$
4	$A_i$	$-3A_i/5$	$2A_i/5$
$\infty$	$A_i$	$-A_i$	0



Prof. Cesare Comina

## Perché Vs ?

Perché, come conseguenza di quanto detto, lo prescrivono le norme:

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della **Caratterizzazione sismica** e della identificazione della categoria di sottosuolo, la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente **Vs,30** di propagazione delle onde di taglio.

$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

### Perché 30 m?

Da lavori di letteratura americana (principalmente Borcherdt (1994) - 100 piedi ~ 30m) recepiti dalle agenzie locali di rischio sismico statunitensi divenendo direttiva.

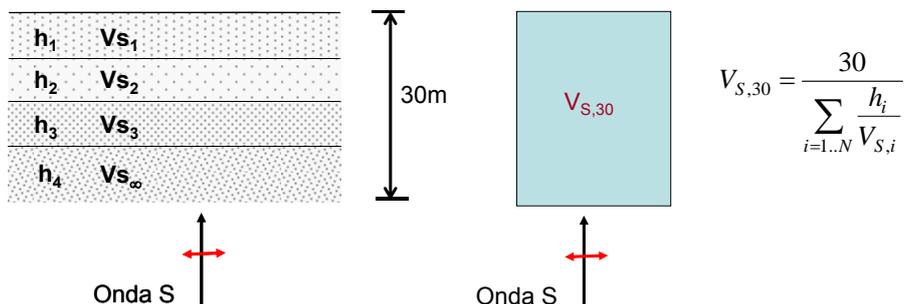
In generale la determinazione del profilo di **Vs fino al bedrock** sarebbe l'optimum per una corretta caratterizzazione.

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Caratterizzazione sismica

**Vs,30** rappresenta quindi la velocità media in termini di lentezza, basata sul tempo che l'onda di taglio impiega a percorrere i 30 m



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

Al di là dello specifico la necessità di una caratterizzazione specifica in termini di Vs è di indubbia necessità anche per simulazioni di **RSL** più consistenti.

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

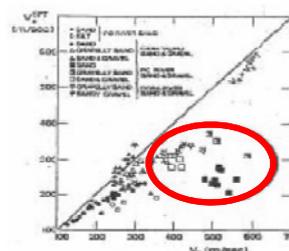
# Caratterizzazione sismica

N.B. la classificazione può **anche** essere effettuata in base ai valori del numero equivalente di colpi della prova penetrometrica dinamica (Standard Penetration Test) **NSPT,30**.

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

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Caratterizzazione sismica

## Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un <u>graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità</u> e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} \geq 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} \geq 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un <u>graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità</u> e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 \leq N_{SPT,30} \leq 50$ nei terreni a grana grossa e $70 \leq c_{u,30} \leq 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un <u>graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità</u> e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} \leq 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Le categorie di sottosuolo sono rilevanti ai soli fini della valutazione dell'azione sismica.

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

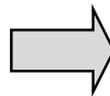
# Caratterizzazione sismica

## Categorie di sottosuolo

Per sottosuoli appartenenti alle ulteriori categorie **S1 ed S2** di seguito indicate è necessario predisporre specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di terreni suscettibili di liquefazione e/o di argille d'elevata sensitività possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo <u>non classificabile nei tipi precedenti.</u>

Necessario predisporre specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche.



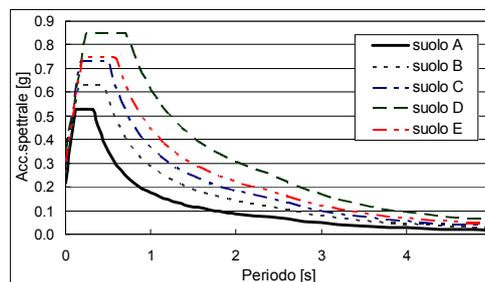
Conoscenza il più accurata possibile profilo di  $V_s$  fino al bedrock.

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Caratterizzazione sismica

In funzione delle precedenti categorie di sottosuolo la normativa permette di valutare le forme spettrali (**Spettri di risposta**) funzione anche del valore di accelerazione massima su sito di riferimento, dei fattori di amplificazione topografica e stratigrafica e del rapporto di smorzamento della struttura.



- Per strutture con periodi fondamentali superiori lo spettro deve essere definito da apposite analisi ovvero l'azione sismica deve essere descritta mediante **accelerogrammi**.
- In presenza di sottosuoli di categoria **S1 o S2** lo spettro deve essere definito da apposite analisi ovvero l'azione sismica deve essere descritta mediante **accelerogrammi**.

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Tecniche di misura Vs

Esistono varie tipologie di tecniche adottabili per la misura diretta del profilo di Vs 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
- Suspension logging
- ...

## Prove in sito + misure di Vs

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

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

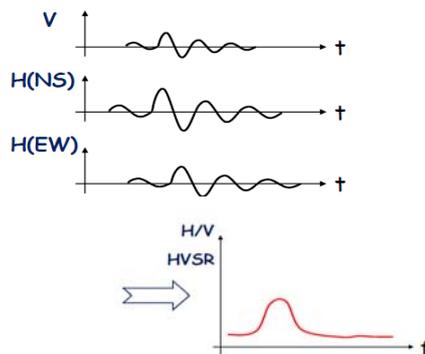
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Tecniche di misura Vs

**Metodi a Stazione singola tipo - H/V** non sono una tecnica di misura diretta della Vs...

Permettono invece una stima della frequenza di amplificazione (frequenza di risonanza del deposito) che sarà tanto più precisa quanto maggiore è il contrasto di impedenza sismica tra la roccia di base e il deposito stesso.



In casi semplici (depositi di terreno tenero su basamento rigido), è possibile utilizzare la relazione:

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

Ricavare Vs o H...

$$f_0 = 2.5 \text{ Hz} \begin{cases} H = 20 \text{ m} & V_s = 200 \text{ m/s} \\ H = 15 \text{ m} & V_s = 150 \text{ m/s} \\ H = 10 \text{ m} & V_s = 100 \text{ m/s} \end{cases}$$

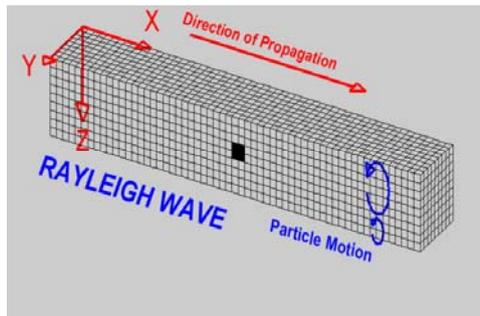
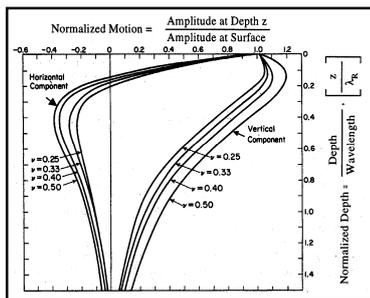
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Principalmente tramite l'uso di Onde di Rayleigh:

- Facilmente generabili e registrabili dalla superficie;
- Contengono 2/3 dell'energia globale rilasciata da una sorgente armonica puntuale posta sulla superficie di un semispazio omogeneo;
- Attenuazione geometrica ridotta ( $1/\sqrt{r}$ ) rispetto alle onde di volume;

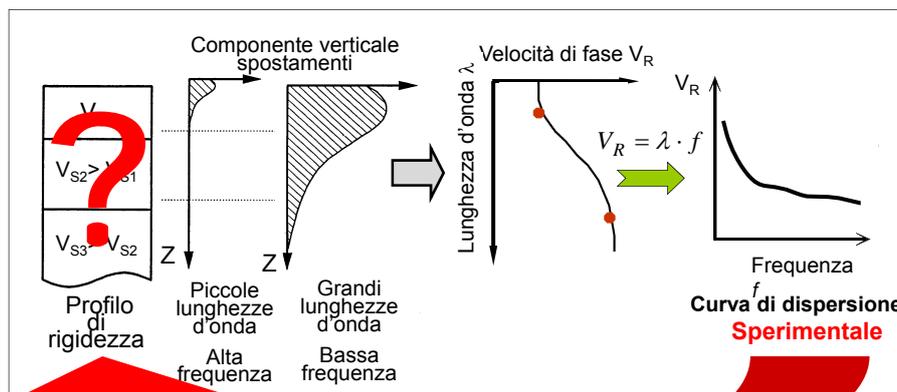


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Le proprietà dispersive ed energetiche delle onde superficiali possono essere utilizzate ai fini della caratterizzazione.

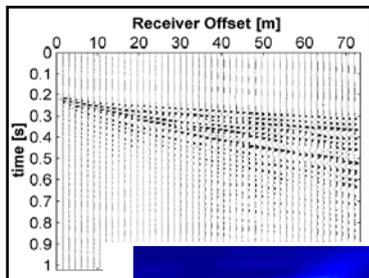


Prof. Cesare Comina

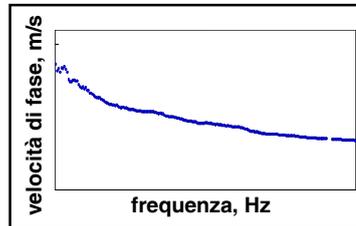
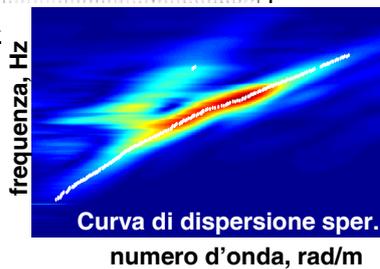
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Acquisizioni specifiche o altri dati sismici (lunghezza finestra di acquisizione).



Altre trasformate (ad es.  $\tau, p$ )



Massimi spettrali:

$$v_R(f) = \frac{2\pi \cdot f}{k|_{P=P_{\max}}}$$

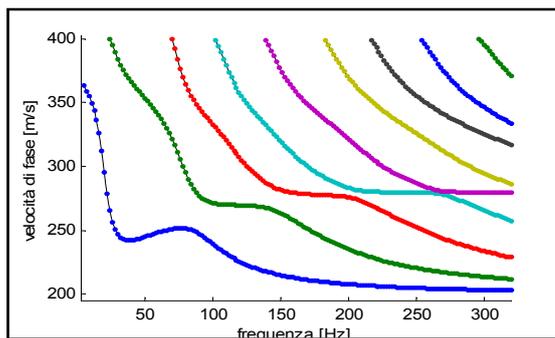
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Il fenomeno è Multimodale!!

Cioè l'energia (il **massimo spettrale assoluto o locale**) può distribuirsi su più modi di vibrazione in funzione delle caratteristiche stratigrafiche del sito.



I modi superiori sono particolarmente rilevanti in presenza di:

- Forti contrasti di impedenza;
- Inversioni di velocità (particolarmente near surface).

Prof. Cesare Comina

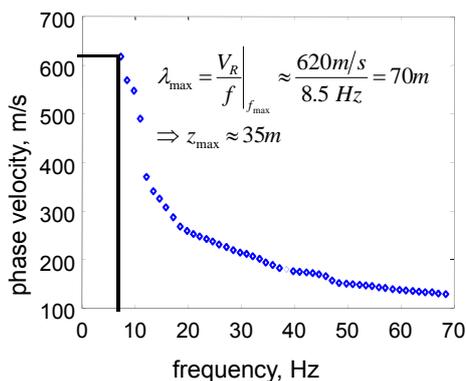
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Profondità d'indagine:

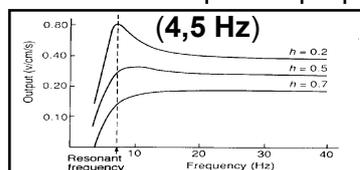
Strategie:

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



- 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

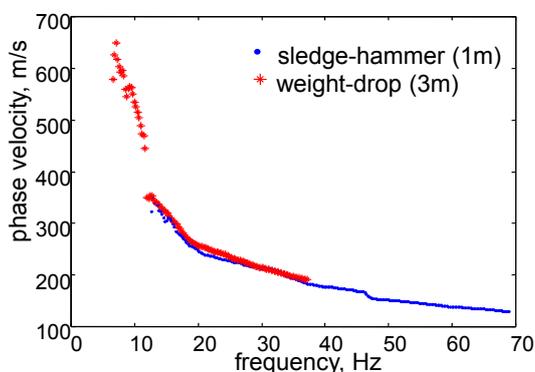
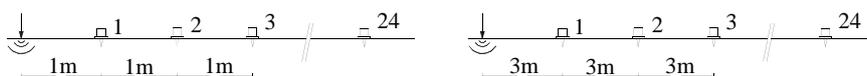


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Combinazione di sorgenti pesanti e lunghezza stendimento...

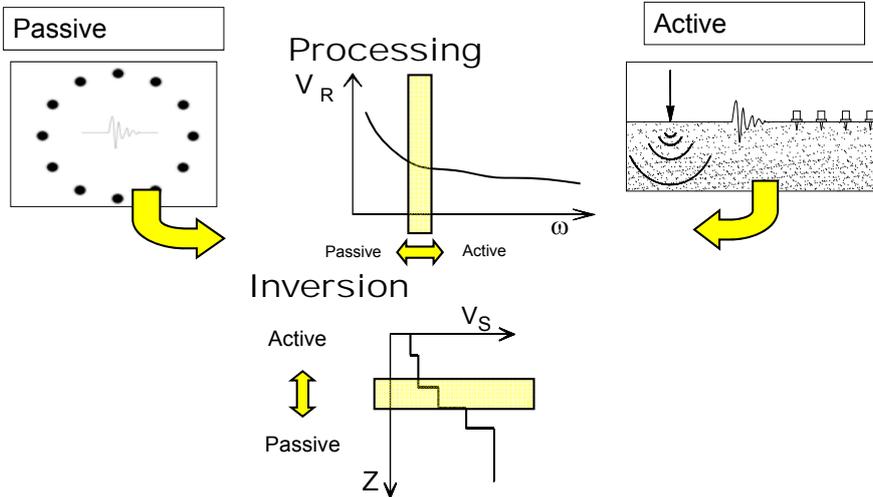


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

L'utilizzo di dati da misure passive di microtremorei naturali può aiutare nell'approfondire la profondità d'indagine.



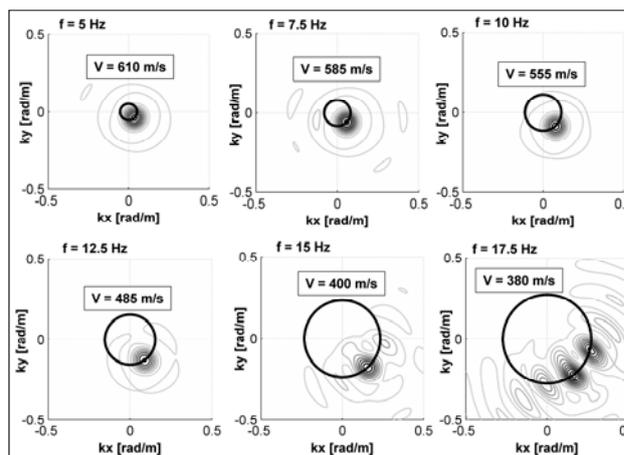
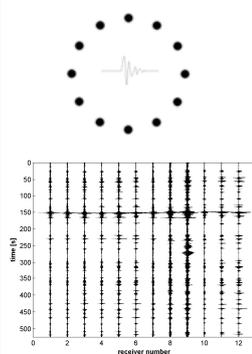
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

Svariati metodi di analisi di dati di microtremore passivo su array di sensori sismici disposti spazialmente (SPAC, ESAC), f-k spectra (FDBF, MLM, Music), ...

Frequency Domain BeamFormer



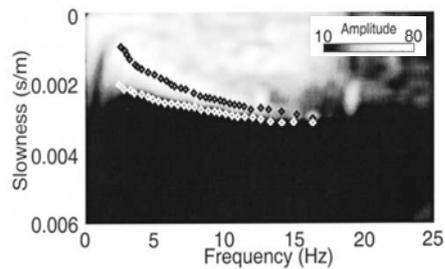
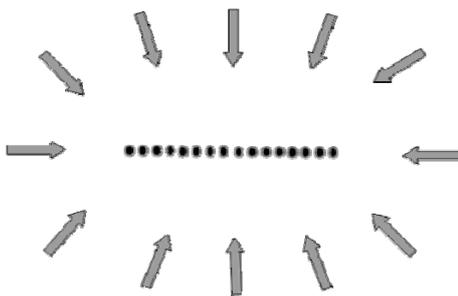
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

**Metodo ReMi** – Acquisizione di rumore ambientale con array lineare.

Si assume che le fonti di rumore siano omni-direzionali rispetto all'allineamento scelto. Se ci sono direzioni di propagazione predominanti si perviene ad una sovrastima della Vs.



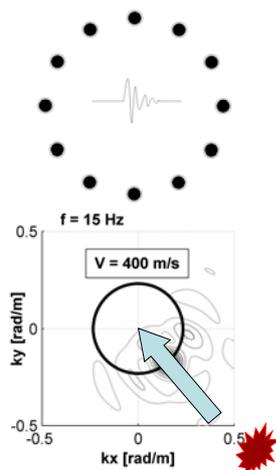
(Stephenson et al., 2005)

Prof. Cesare Comina

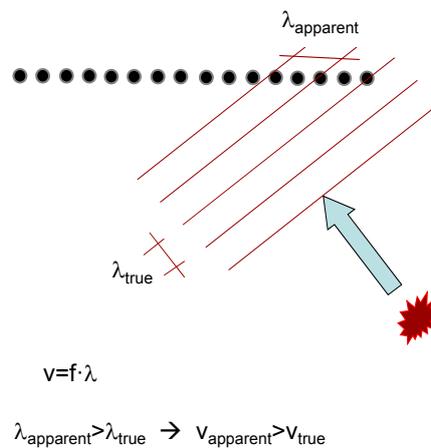
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Onde superficiali

2D array



ReMi – linear array



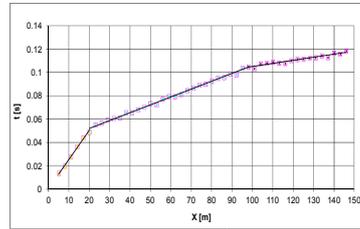
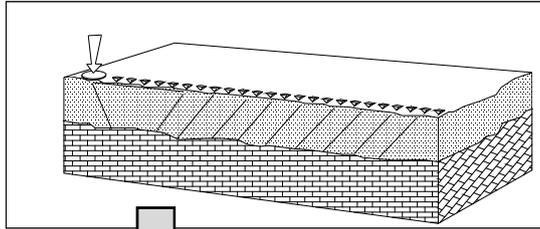
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

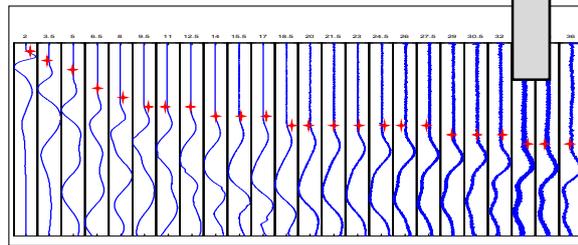
# Rifrazione SH

Utilizzo dei metodi classici di sismica a rifrazione per la ricostruzione del profilo di velocità.

Interpretazione Dromocrona.



Picking dei tempi di primo arrivo.

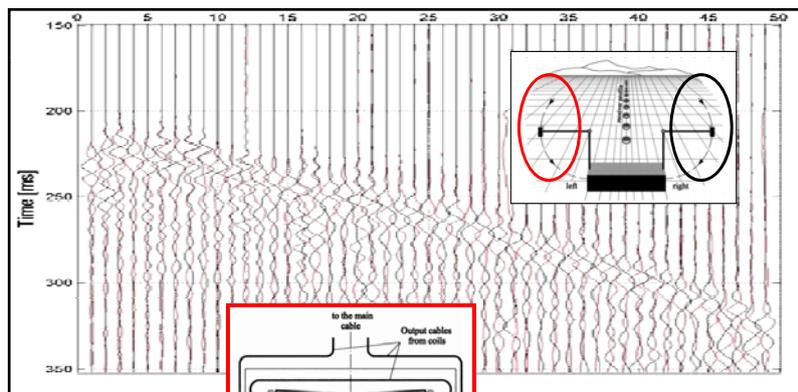


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Rifrazione SH

Energizzazione piu' complessa (necessità di adeguata zavorra per trasmettere energia sufficiente).



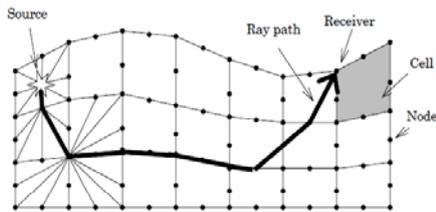
Swyphones...

Prof. Cesare Comina

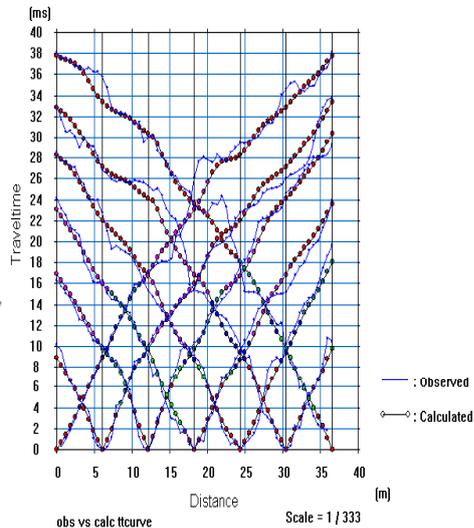
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Rifrazione SH

Uso di algoritmi di "ray tracing" per definire le caratteristiche del sottosuolo a partire dai tempi di primo arrivo osservati.



Possibilità di ricostruzione tomografica 2D...

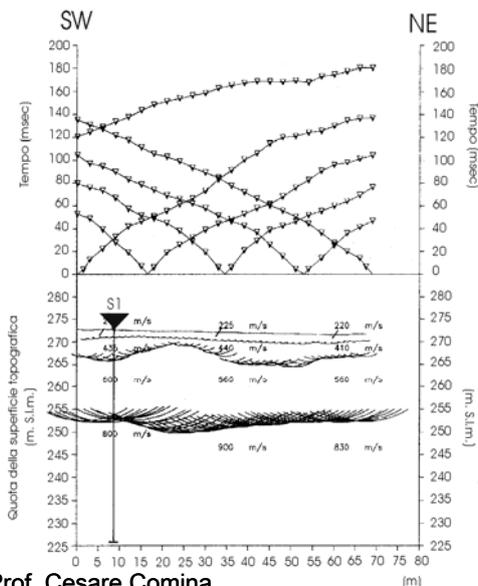


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

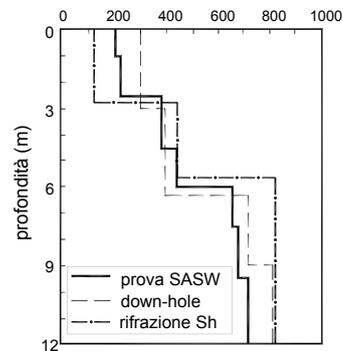
# Rifrazione SH

Esempio di interpretazione GRM e confronto con altre tipologie di prove che vedremo



Prof. Cesare Comina

Vs (m/sec)



(after Foti et al., 2002)

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

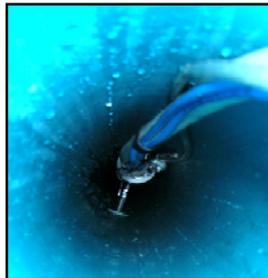
# Prove in Foro

Utilizzo di perforazioni di sondaggio **allestite** per la misura (tubazione PVC e cementazione):

- Tra due o più fori di sondaggio (**Cross-Hole**)
- All'interno di un singolo foro di sondaggio (**Down-Hole**)

## Check:

- Qualità della cementazione;
- Accoppiamento sensori;
- Orientazione sensori;
- Verticalità della perforazione (Cross-hole).



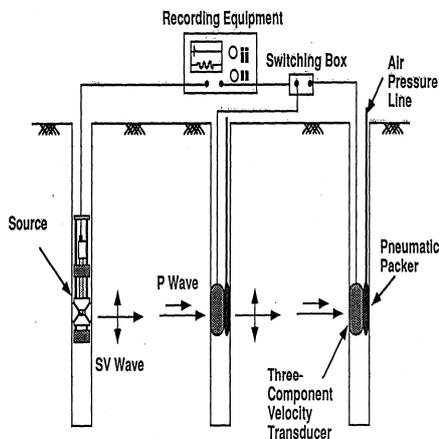
Vantaggio della disponibilità della perforazione di sondaggio come strumento di calibrazione delle interfacce, aumento del dettaglio di indagine con la profondità.

Prof. Cesare Comina

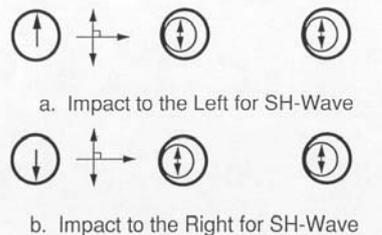
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Cross-Hole

- Possibilità di misura delle velocità **SV**, **SH**;
- Possibilità di utilizzo di due fori di sondaggio ma tre sono preferibili;
- Si può determinare un profilo di  $V_s$  molto accurato.



Sorgenti di tipo meccanico o elettromeccanico sia per onde SV che SH.



Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Cross-Hole

Sorgenti di tipo meccanico o elettromeccanico:

- Affidabilità del trigger;
- Energia immessa e controllo direzionalità.

### Sorgente Meccanica.



### Sparker Sismico.



Solitamente maggiori frequenze immesse, affidabilità del trigger.

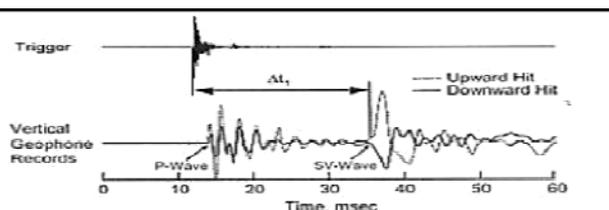
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Cross-Hole

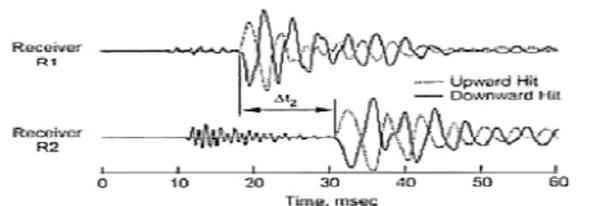
Preferibile l'utilizzo di tre fori di sondaggio per maggiore affidabilità nella determinazione dei tempi di viaggio della propagazione.

### Due Fori



a. Record Illustrating a Direct Travel Time Measurement of an SV Wave

### Tre Fori



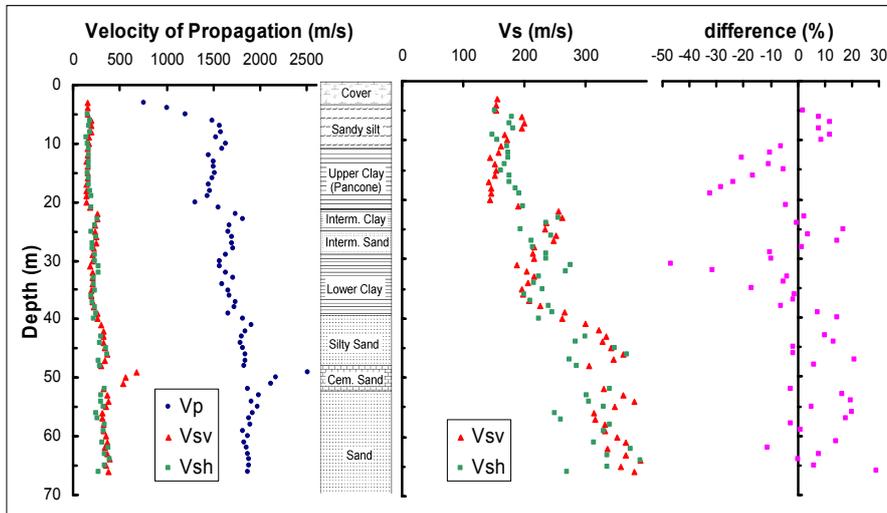
b. Record Illustrating an Interval Travel Time Measurement of an SV Wave

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Cross-Hole

Interpretazione molto semplice; Possibilità di studio anisotropia...

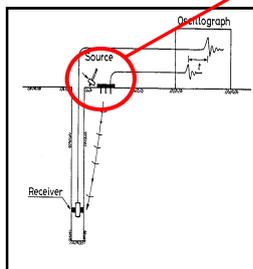


Prof. Cesare Comina

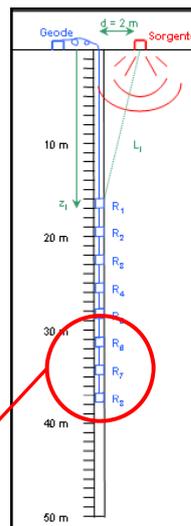
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Down-Hole

- Sorgenti classiche della sismica di superficie;
- Meno problemi di sincronizzazione del trigger;
- Profondità d'indagine legata all'energia immessa.



Preferibile l'utilizzo di arrays di geofoni; per calate successive si sovrappongono le posizioni dei geofoni estremi.



Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

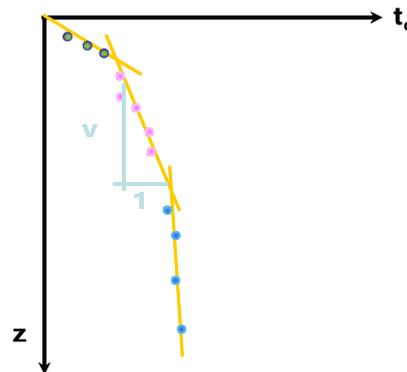
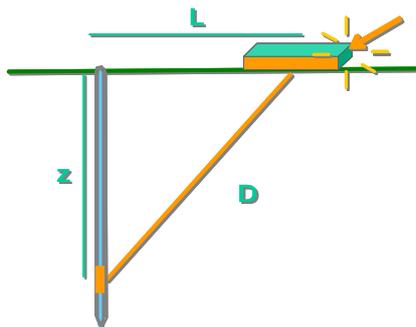
# Down-Hole

## Interpretazione: Tempi Medi

- L non superiore ai 2,5 m;
- Si assume che il tempo di arrivo sia legato all'onda diretta da sorgente a sensore (rifrazione alle interfacce, raytracing).

$$D = \sqrt{L^2 + z^2}$$

$$t_C = \frac{z}{D} \cdot t$$

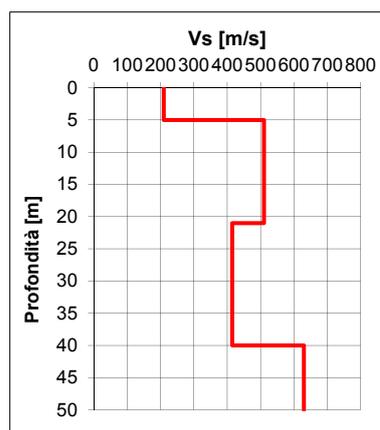
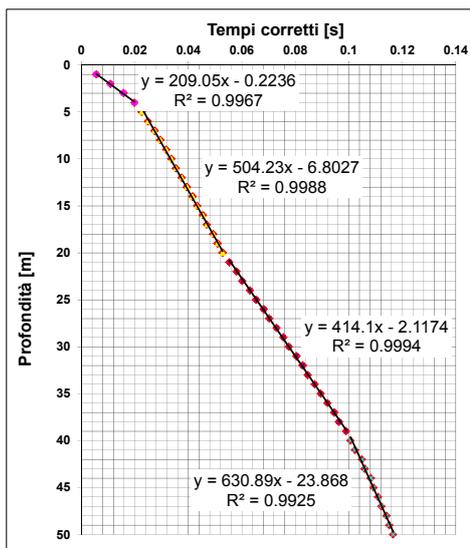


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Down-Hole

## Interpretazione: Tempi Medi



Profilo di velocità a strati.

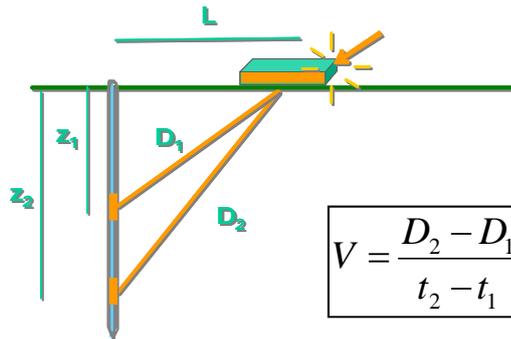
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Down-Hole

## Interpretazione: True Interval

- Si valuta la velocità (ritardo di arrivo) tra coppie di sensori con la profondità;



L'interpretazione con il metodo del true-interval è molto sensibile e necessita di dati di altissima qualità,

Interpretazione simile con singolo sensore pseudo-interval sconsigliabile...

Prof. Cesare Comina

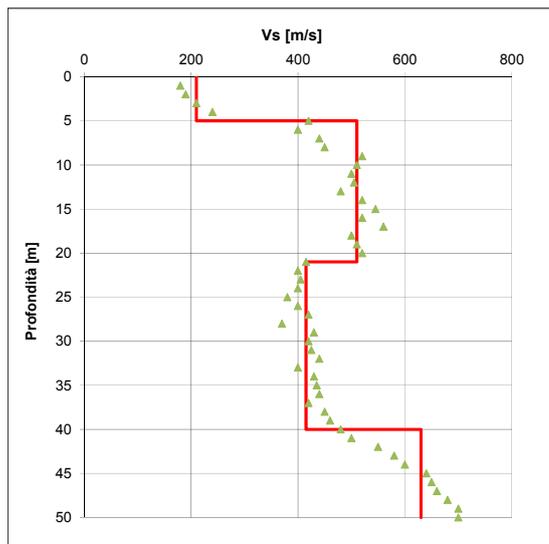
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Down-Hole

## Interpretazione: True Interval

Potenzialmente si possono distinguere dettagli maggiori rispetto all'interpretazione dei tempi medi...

Dati di alta qualità!!



Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Prove in Foro

## Cross-Hole

- Trigger e sincronizzazione della sorgente;
- rifrazioni critiche per elevati contrasti di velocità;
- Verticalità del foro e problemi di posizionamento della sorgente;
- Costi elevati.

## Criticità:

## Down-Hole

- Minor accuratezza (rifrazioni alle interfacce);
- Valori di velocità medi;
- Profondità di indagine non elevata (dipendente dalla sorgente);

## Vantaggi:

- Elevato dettaglio di indagine (Anisotropia) ed affidabilità dei risultati;
- Relativa semplicità interpretativa;
- Elevate profondità di indagine.

- Minori problemi di verticalità del foro;
- Costi ridotti.

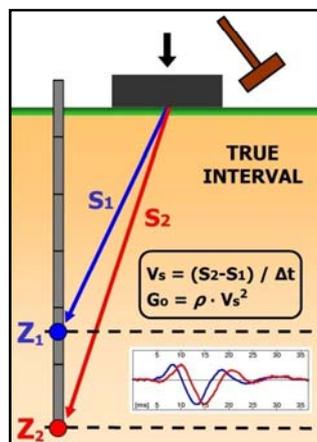
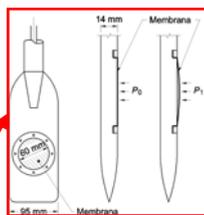
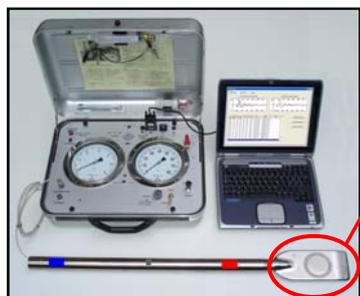
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Dilatometro Sismico

Esempio, sempre più diffuso, di metodi di caratterizzazione geotecnica ad infissione (e.g. cono sismico) con possibilità di misura diretta del profilo di Vs.

- Problematicità di infissione;
- Ottimo accoppiamento dei sensori;
- Profondità d'indagine legata all'energia immessa.

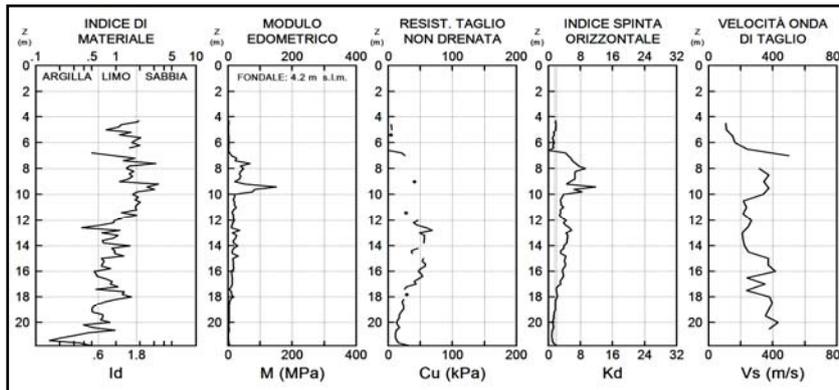
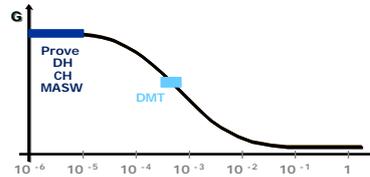


Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Dilatometro Sismico

Combino la misura di parametri geotecnici a livelli deformativi superiori con la misura diretta della velocità di propagazione.



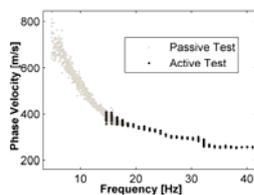
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

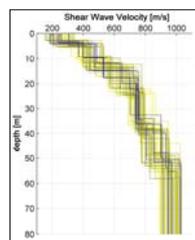
# Confronti

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:

•  $V_{S,30}$



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

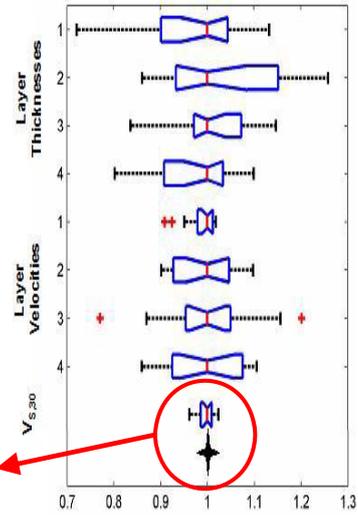
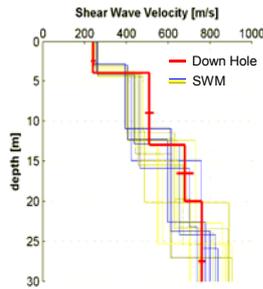
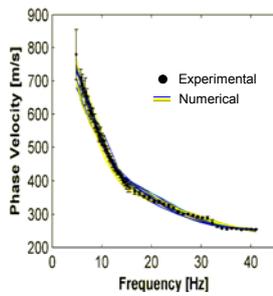
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Confronti

SITO: La Salle (AO)

SWM active + passive



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

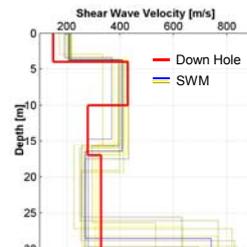
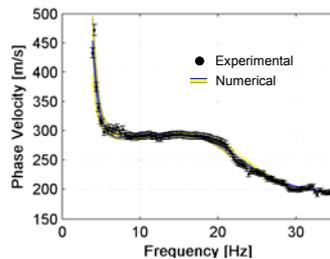
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Confronti

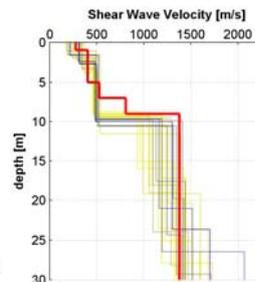
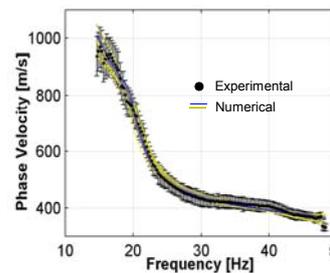
SITO: Torre Pellice (TO)

SWM attive con sorgente pesante



SITO: Pontremoli (MS)

SWM attive con sorgente pesante



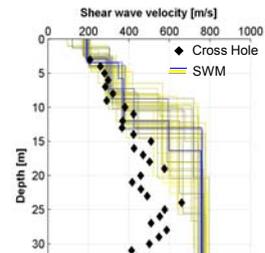
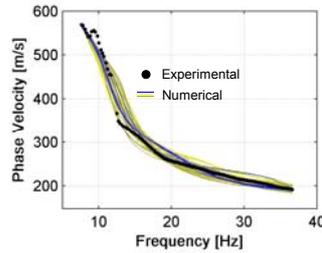
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Confronti

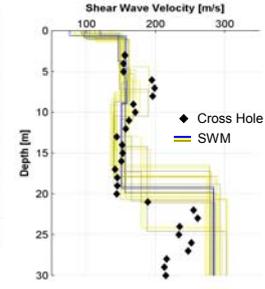
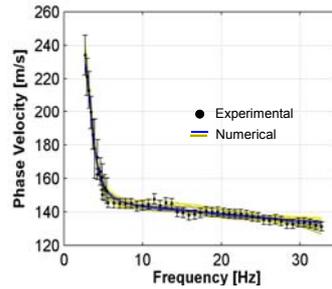
SITO: Saluggia (VC)

SWM attive con sorgente pesante



SITO: Pisa (PI)

SWM attive + passive



Prof. Cesare Comina

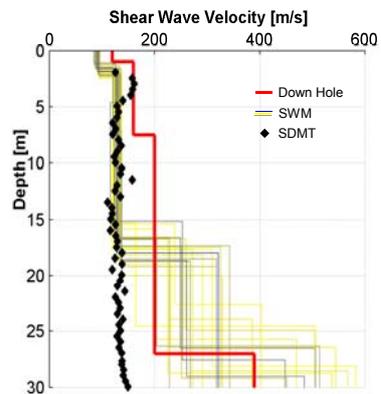
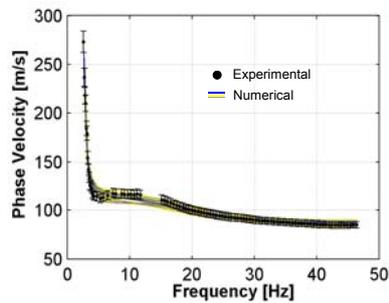
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

# Confronti

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

SITO: Catania (CT)

SWM attive + passive



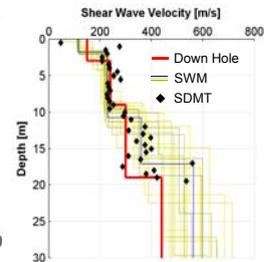
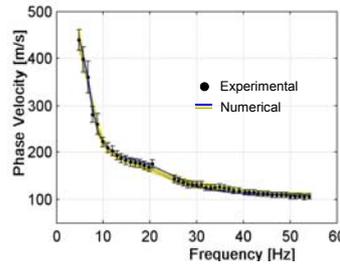
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Confronti

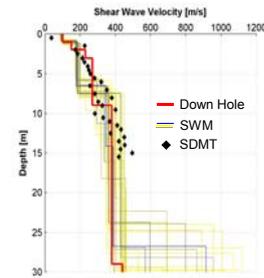
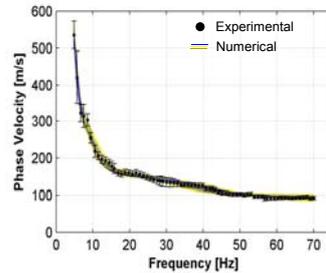
SITO: Rojo Piano (AQ)

SWM attive + passive



SITO: Pianola (AQ)

SWM attive + passive



Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Confronti

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

Prof. Cesare Comina

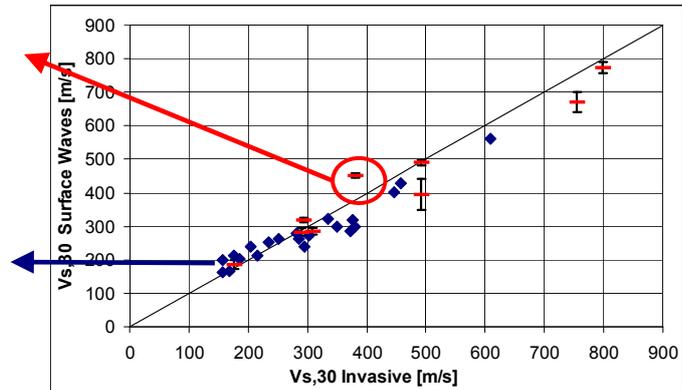
XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Confronti

Quando la profondità di indagine è adeguata il legame con le prove invasive è approssimativamente 1-1

Saluggia,  
CH a 2 fori

Include dati di  
P-S suspension  
logging



Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

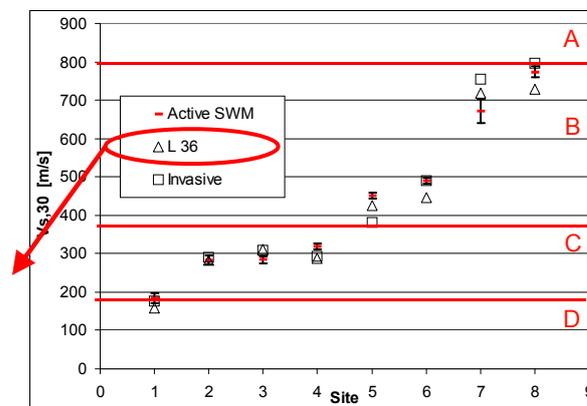
## Confronti

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

Brown et al. (2000)

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

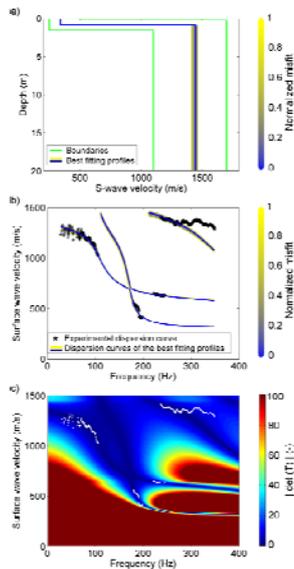
Incertezza stimata  
del 6%



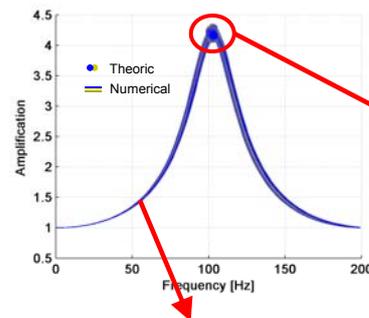
Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di formazione (2015)

## Confronti



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 (Shake91)

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di  
formazione (2015)

## Conclusioni

- Necessità di misura diretta della  $V_s$ ;
  - Affidabilità delle Onde superficiali per la stima di parametri medi (e.g.  $V_{S,30}$ );
- 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...).

Prof. Cesare Comina

XII Workshop in Geofisica e III Giornata di  
formazione (2015)