

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI ENNA "KORE"



CONTROLS

Seminario Tecnico

Il comportamento dinamico dei terreni

Università degli Studi di Enna "Kore"

Enna, 20 giugno 2013



AGI

Associazione
Geotecnica
Italiana

Prove in sito

Tecniche sperimentali e risultati tipici



**POLITECNICO
DI TORINO**

Prof. Ing. Sebastiano Foti

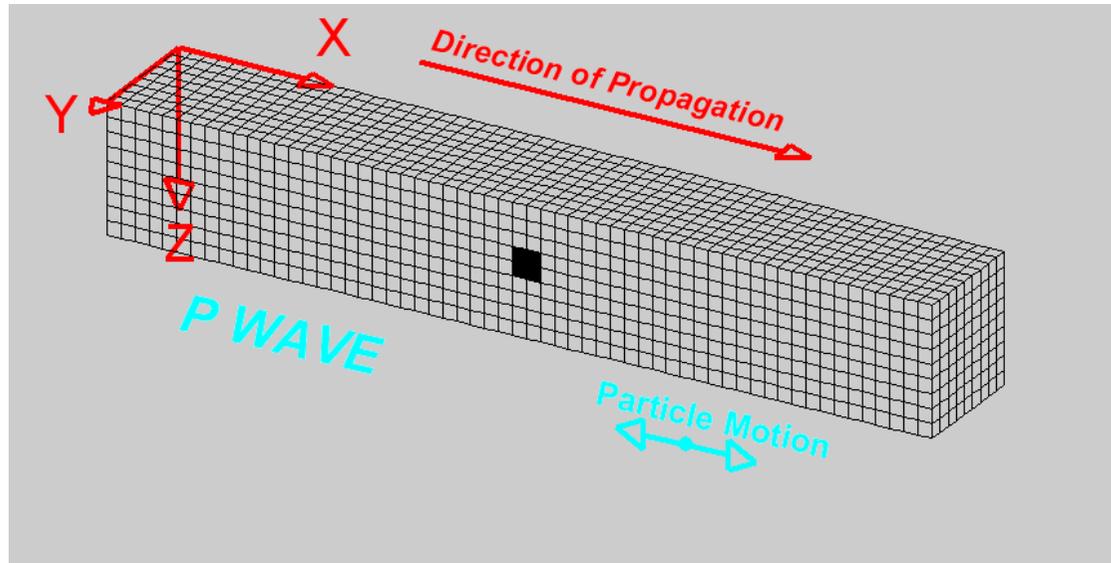
Email: sebastiano.foti@polito.it

www.soilmech.polito.it/people/foti_sebastiano

Onde di Volume

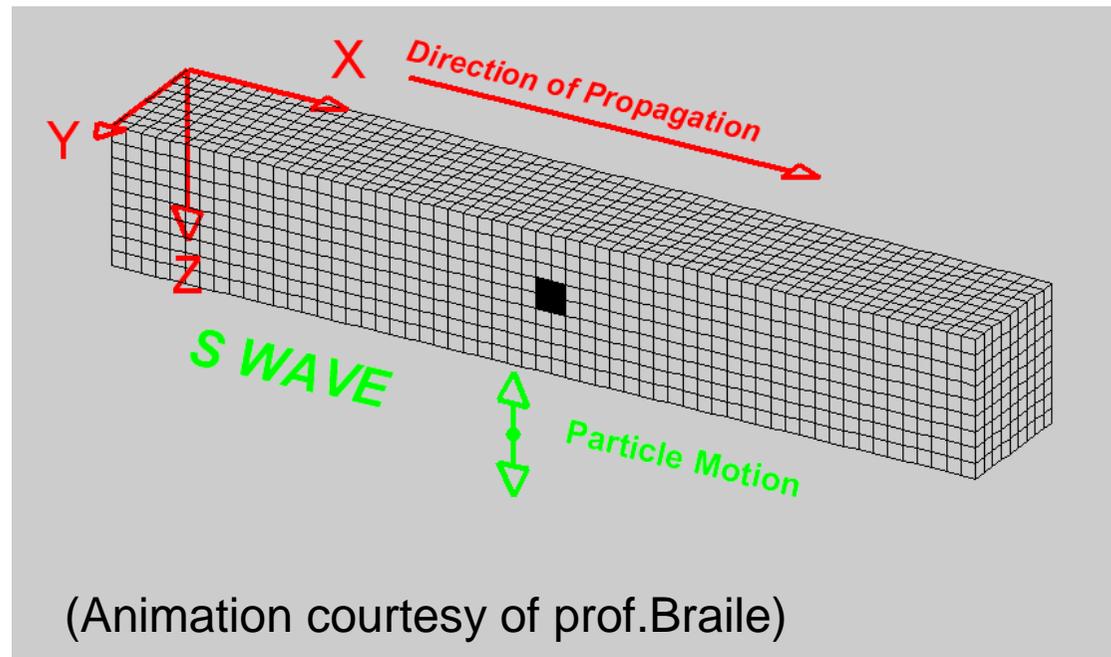
Onda di compressione
(onda Primaria – P)

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$



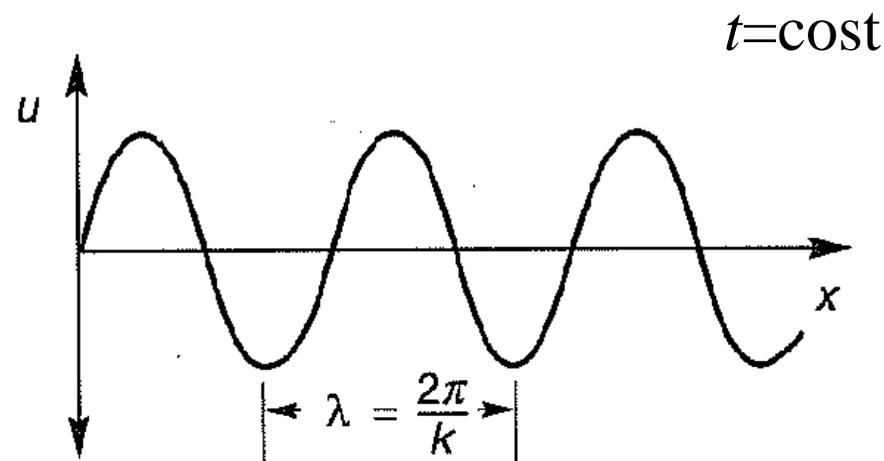
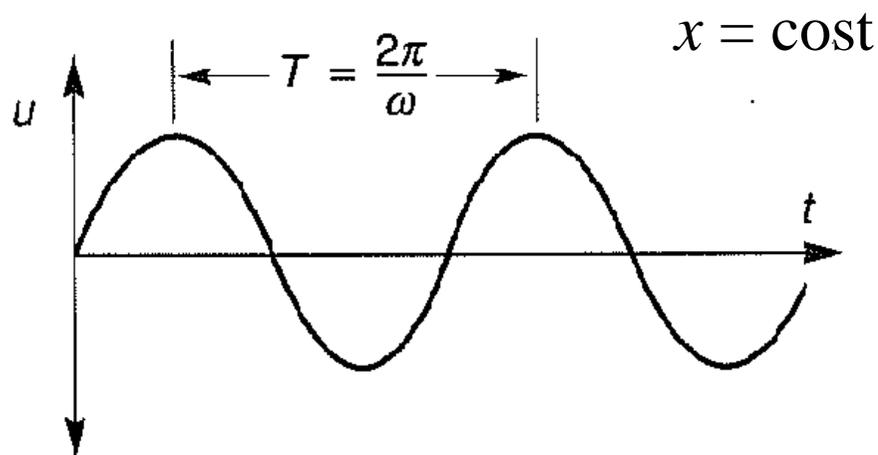
Onda di taglio
(onda Secondaria – S)

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$



Onde Armoniche

$$u = B_2 \sin(kx - \omega t)$$



Simbolo	Grandezza	Dimensioni	Unità di misura SI
A	Ampiezza	varie	varie
ω	frequenza radiale	[1/tempo]	[rad/s]
f	Frequenza (ciclica)	[cicli/tempo]	[Hz=1/s]
λ	Lunghezza d'onda	[lunghezza]	[m]
k	Numero d'onda	[1/lunghezza]	[1/m]
V	Velocità di fase	[lunghezza /tempo]	[m/s]
T	Periodo	[tempo]	[s]

$$k\lambda = 2\pi$$

$$\omega T = 2\pi$$

$$\omega = kV_B$$

$$\lambda = \frac{V_B}{f}$$

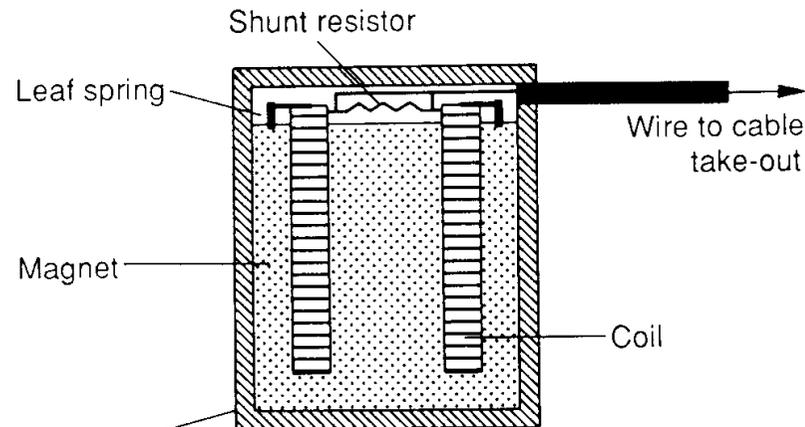
$$V_B = \frac{2\pi f}{k}$$

Metodi Geofisici

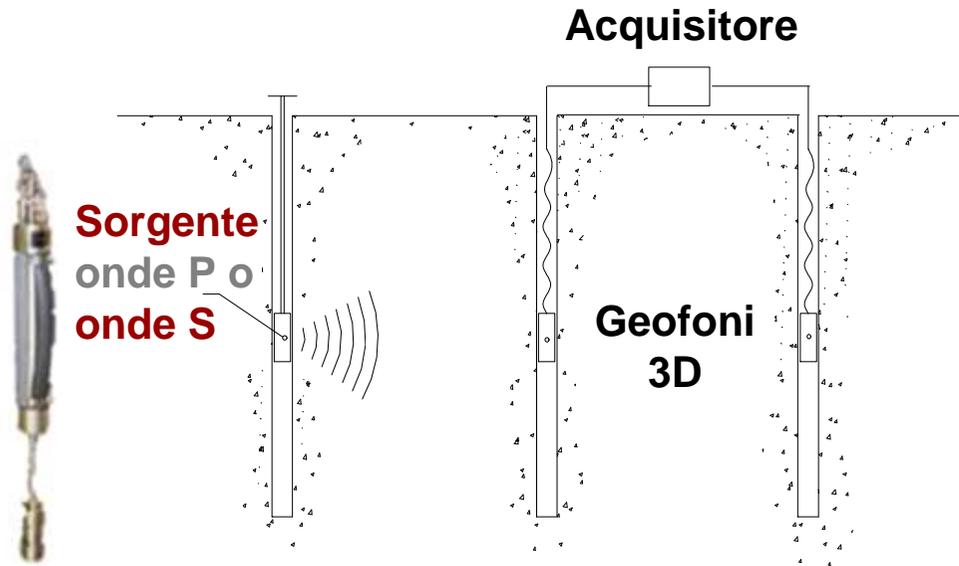
- Prove in foro
 - Prove Cross-hole
 - Prove Down-hole
 - In foro
 - SCPT-SDMT
- Prove dalla superficie
 - Prove sismica a rifrazione (onde SH)
 - Analisi delle onde superficiali
 - Metodi attivi (SASW, MASW)
 - Metodi passivi (fk, SPAC, ReMi, H/V)

Allestimento ed attrezzatura prove CHT

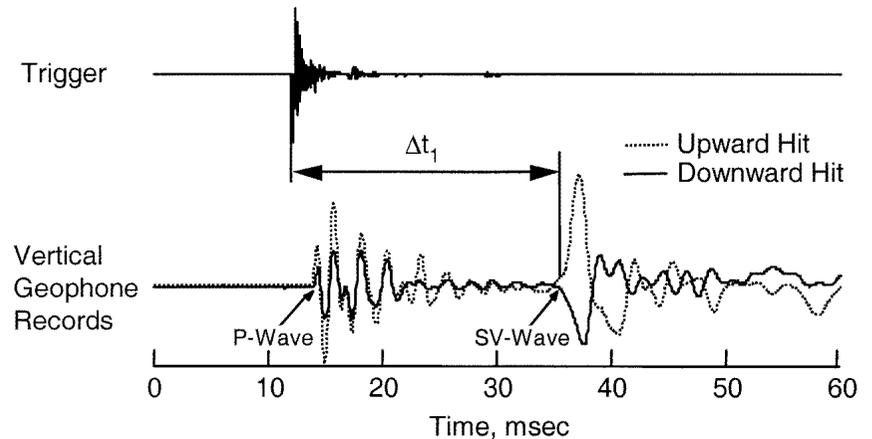
- Fori (2 o 3): distanza 3-5m, rivestimento tubi PVC 80-100 mm, cementazione intercapedine
- Rilievo inclinometrico: distanza tra i fori alle diverse profondità
- Verifica cementazione con log sonico
- Sorgenti: ad impatto meccanico (terreni) o piezoelettriche (roccia)
- Ricevitori: geofoni 3D con sistema di ancoraggio alle pareti del foro



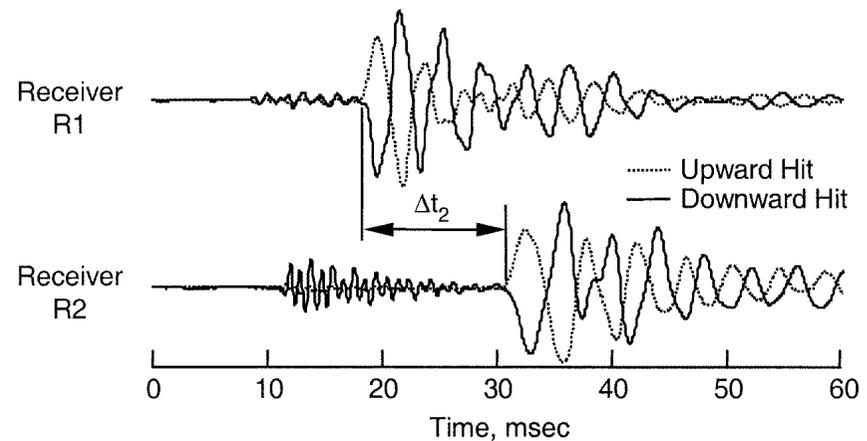
Cross-Hole (standard ASTM D-4428-M)



- 2 o 3 fori rivestiti e cementati con controllo verticalità (costi ↑)
- tempi di arrivo → V_p & V_s
- onde P Sv Sh

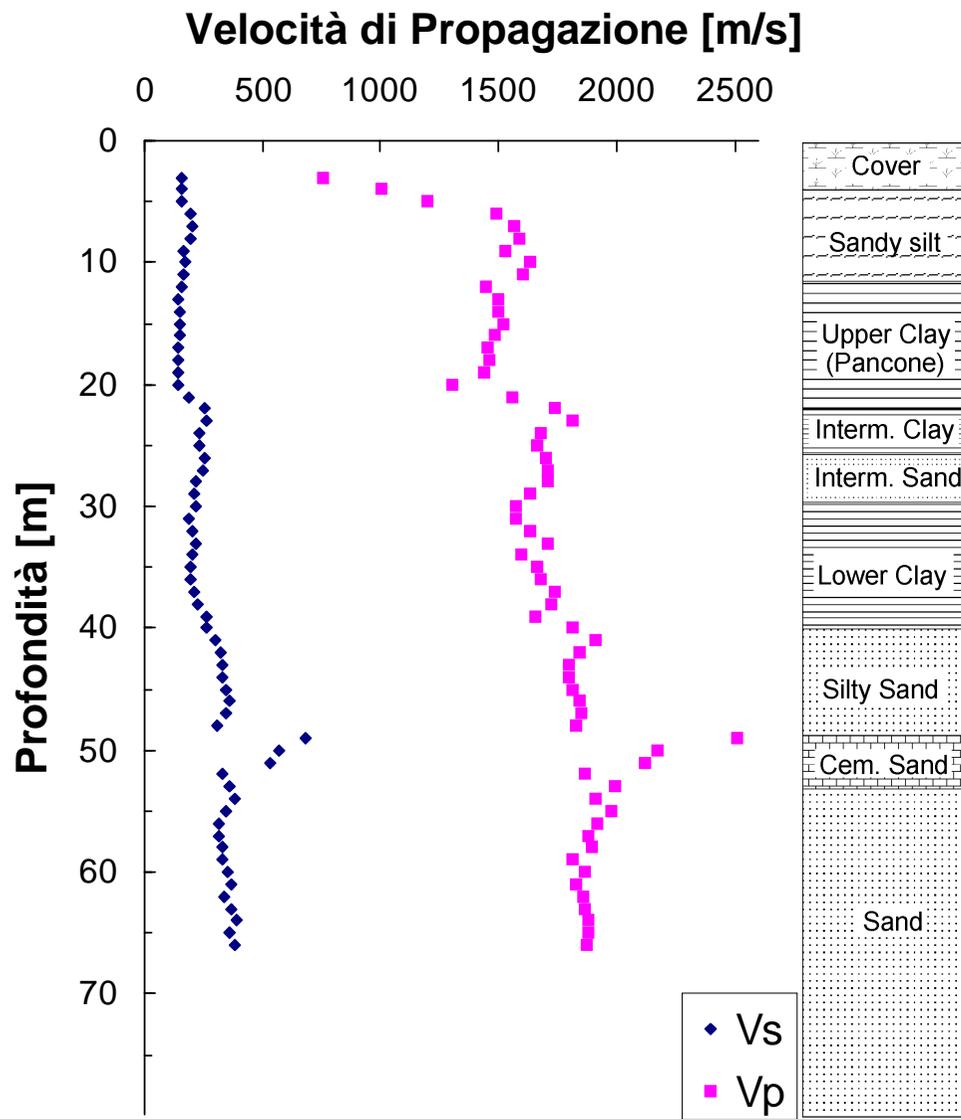


a. Record Illustrating a Direct Travel Time Measurement of an SV Wave

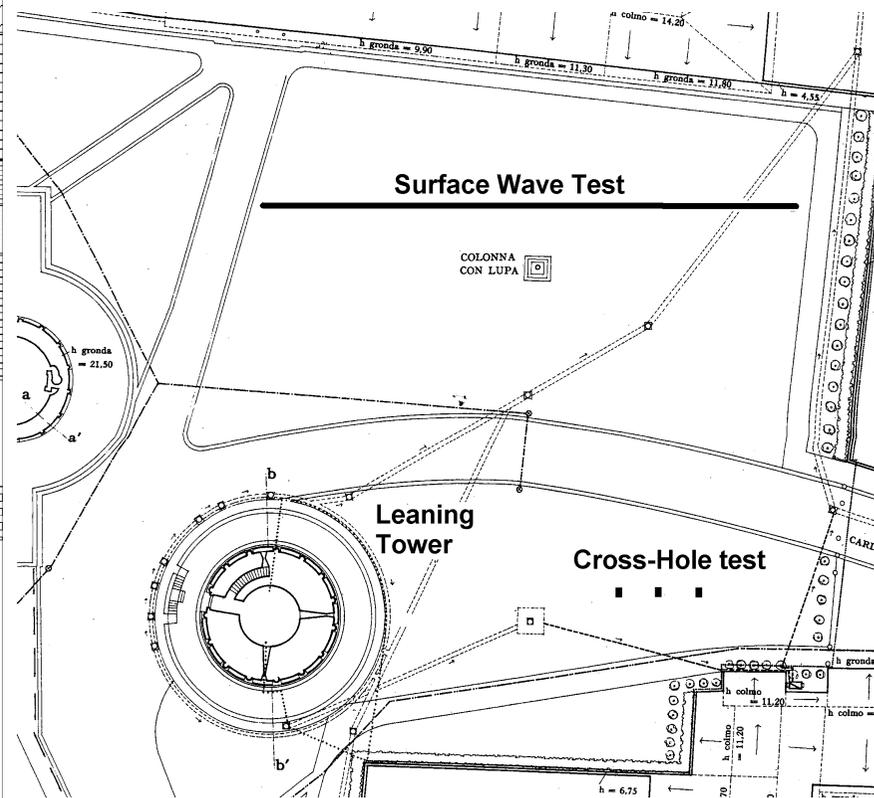


(after Santamarina and Stokoe, 2000)

Prove Cross-Hole (Pisa)

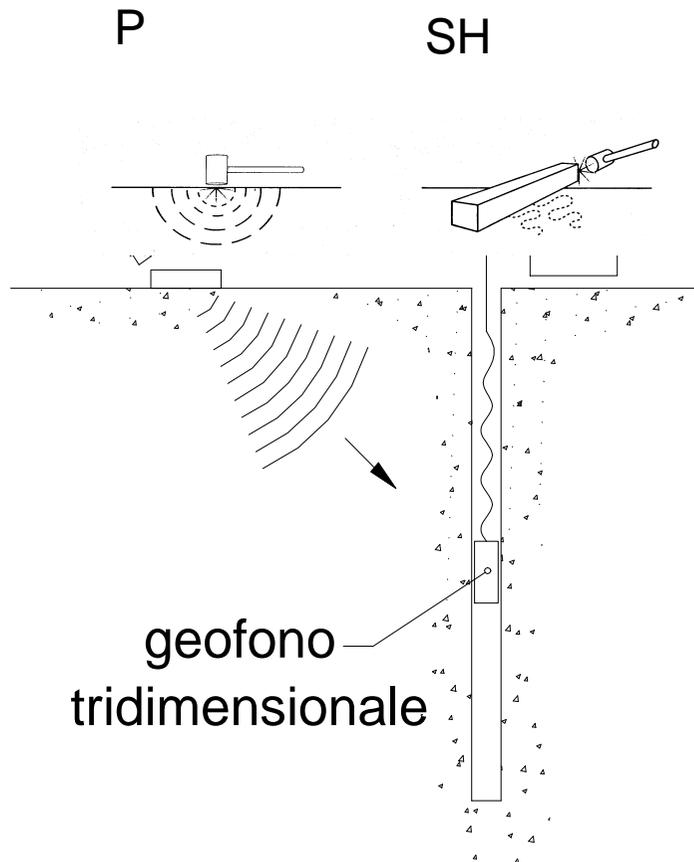


Prova Cross-Hole



Down-Hole

Un solo foro; minore sensibilità
verticalità foro di sondaggio

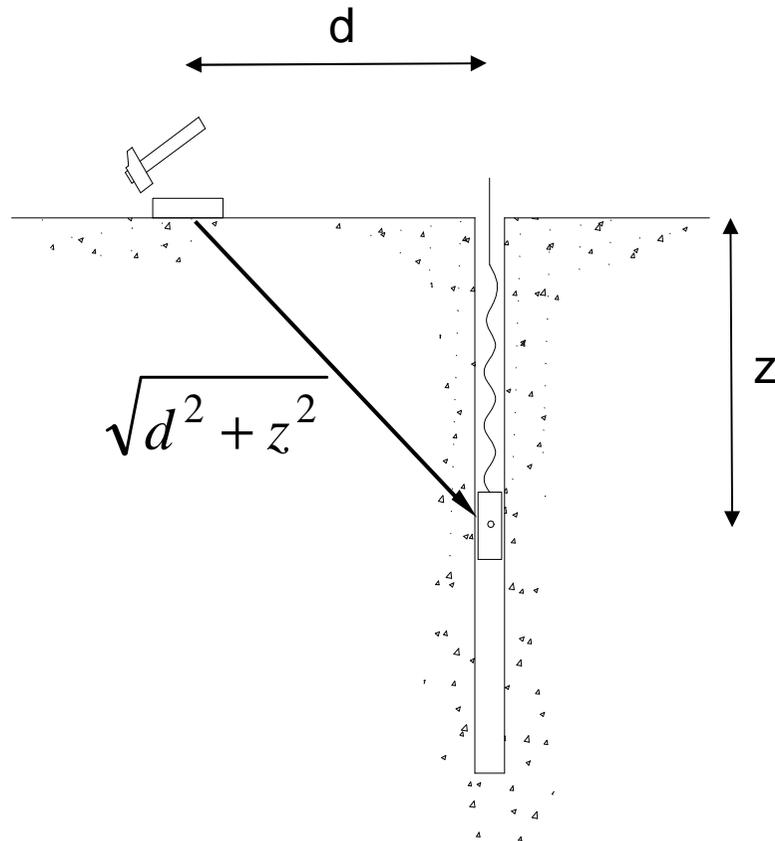


limitazione a profondità
di 50-60m

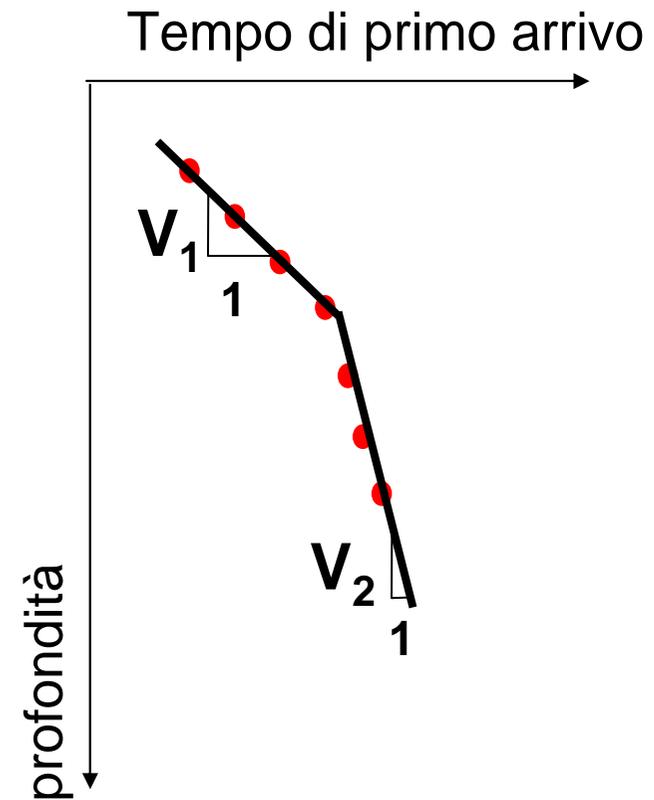
Metodi di interpretazione

- Metodo tempi intercetti
- Metodo true interval
- Inversione dei tempi di primo arrivo con raggi sismici curvilinei

Prova Down Hole

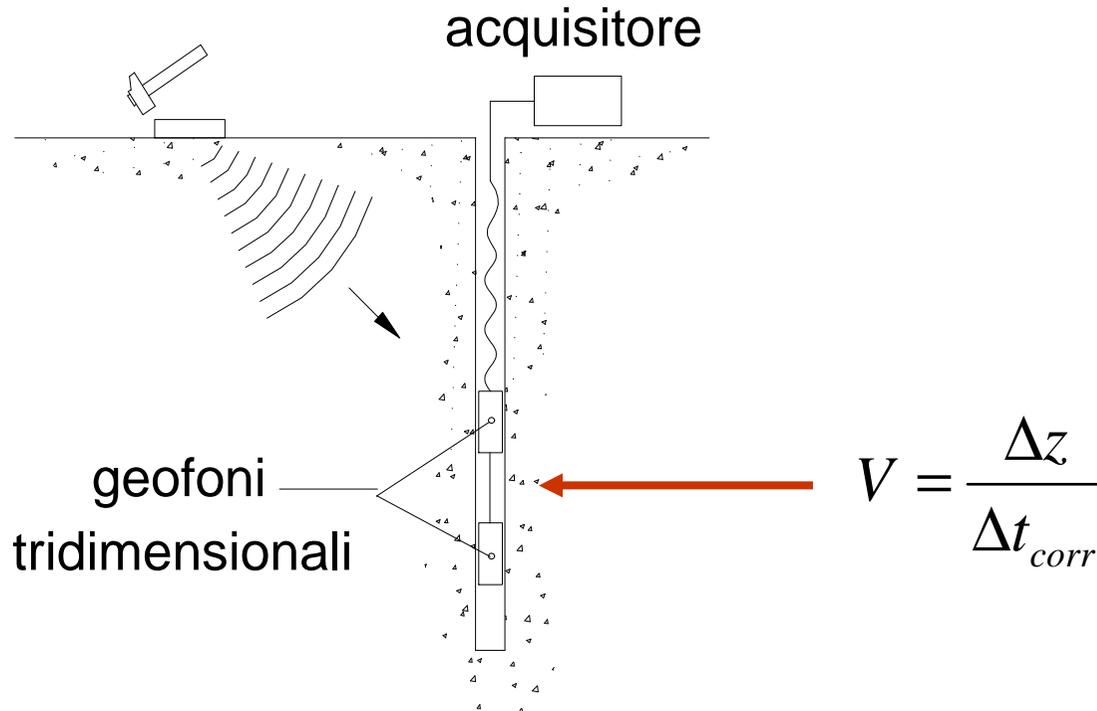


$$t_{corr} = t_{mis} \frac{z}{\sqrt{d^2 + z^2}}$$



Down Hole

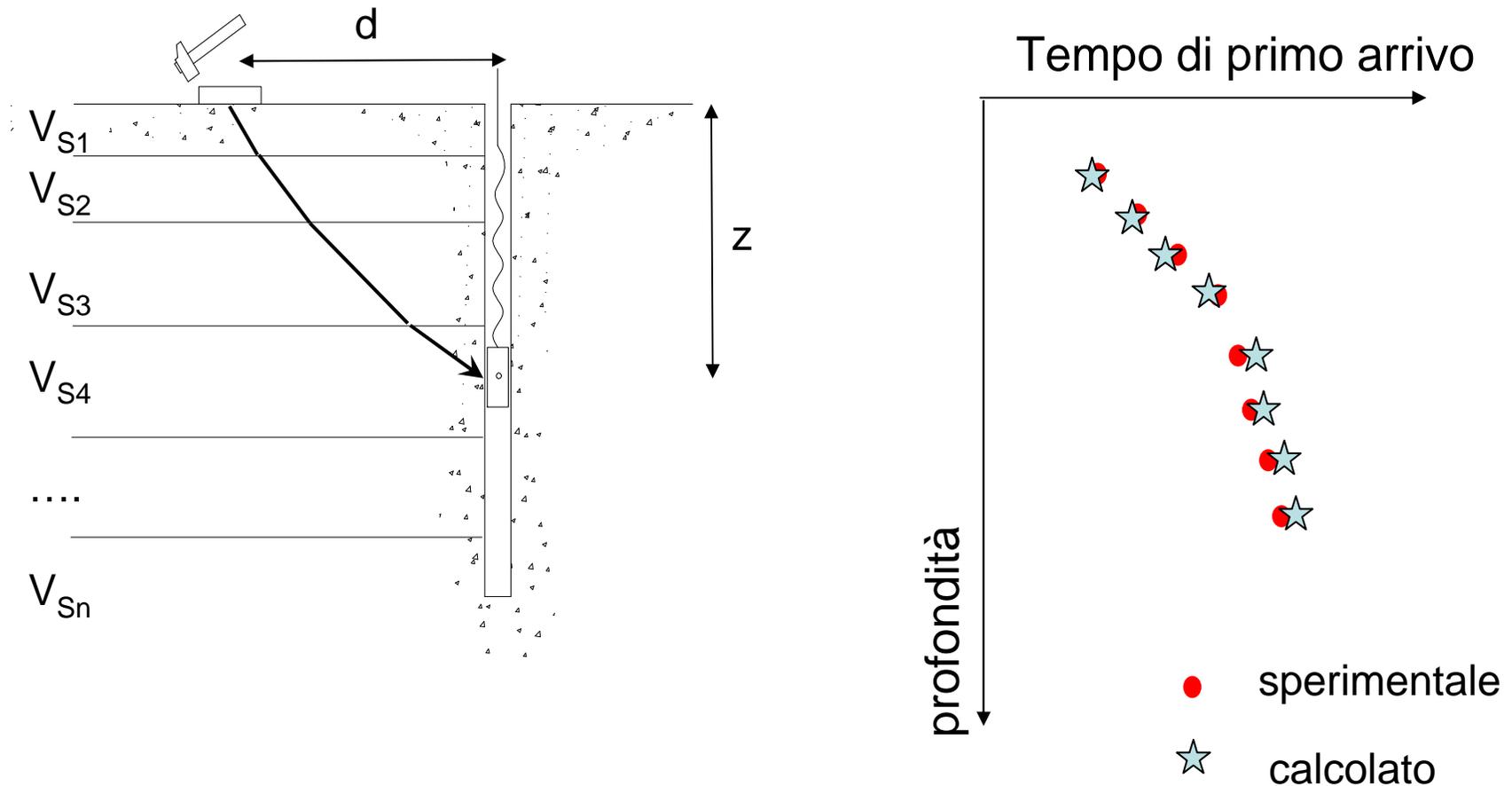
Due ricevitori (true interval)



Analoga interpretazione con successive posizioni singolo geofono (pseudo-interval): fortemente sconsigliata

Prova Down Hole

Inversione dei tempi di primo arrivo con raggi sismici curvilinei



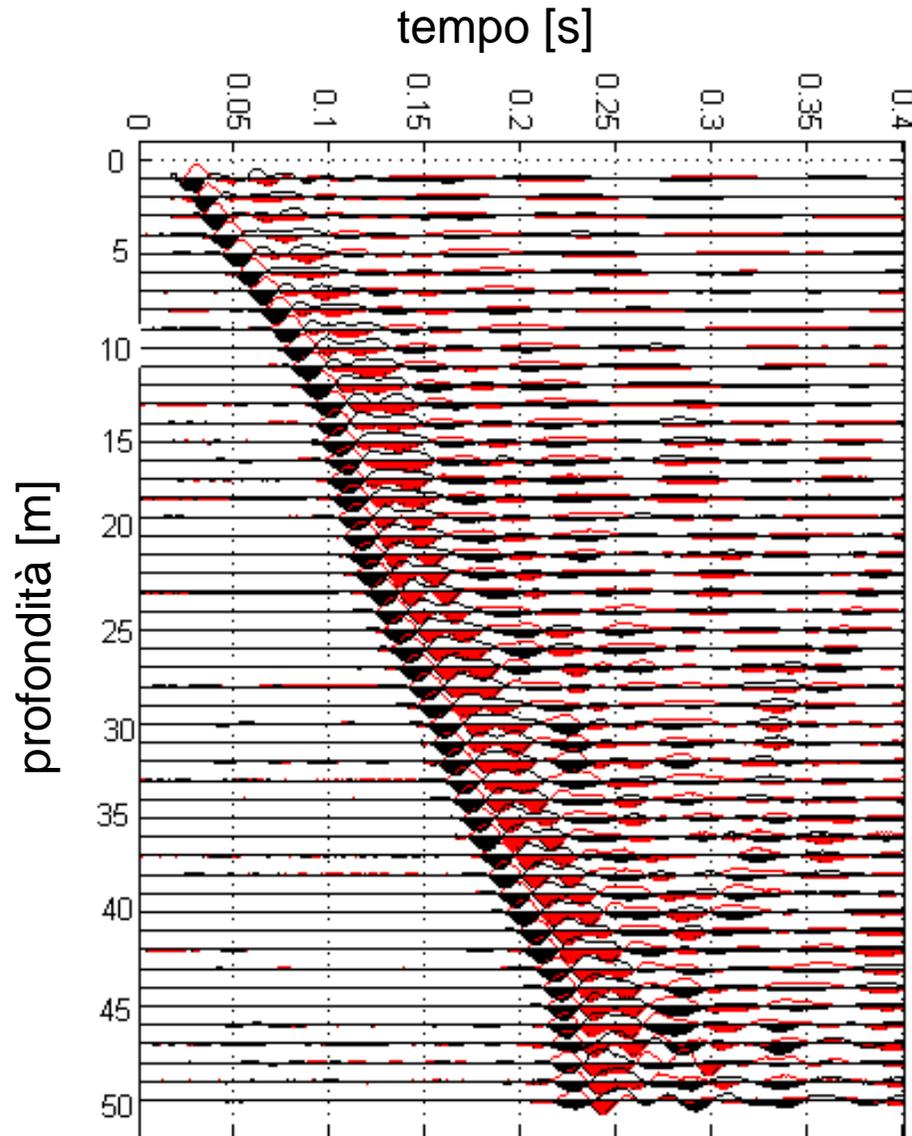
Problema inverso: trovare i parametri di modello (V_S) tali da minimizzare la differenza tra dati sperimentali e tempi calcolati

Esempio: Prova Down Hole

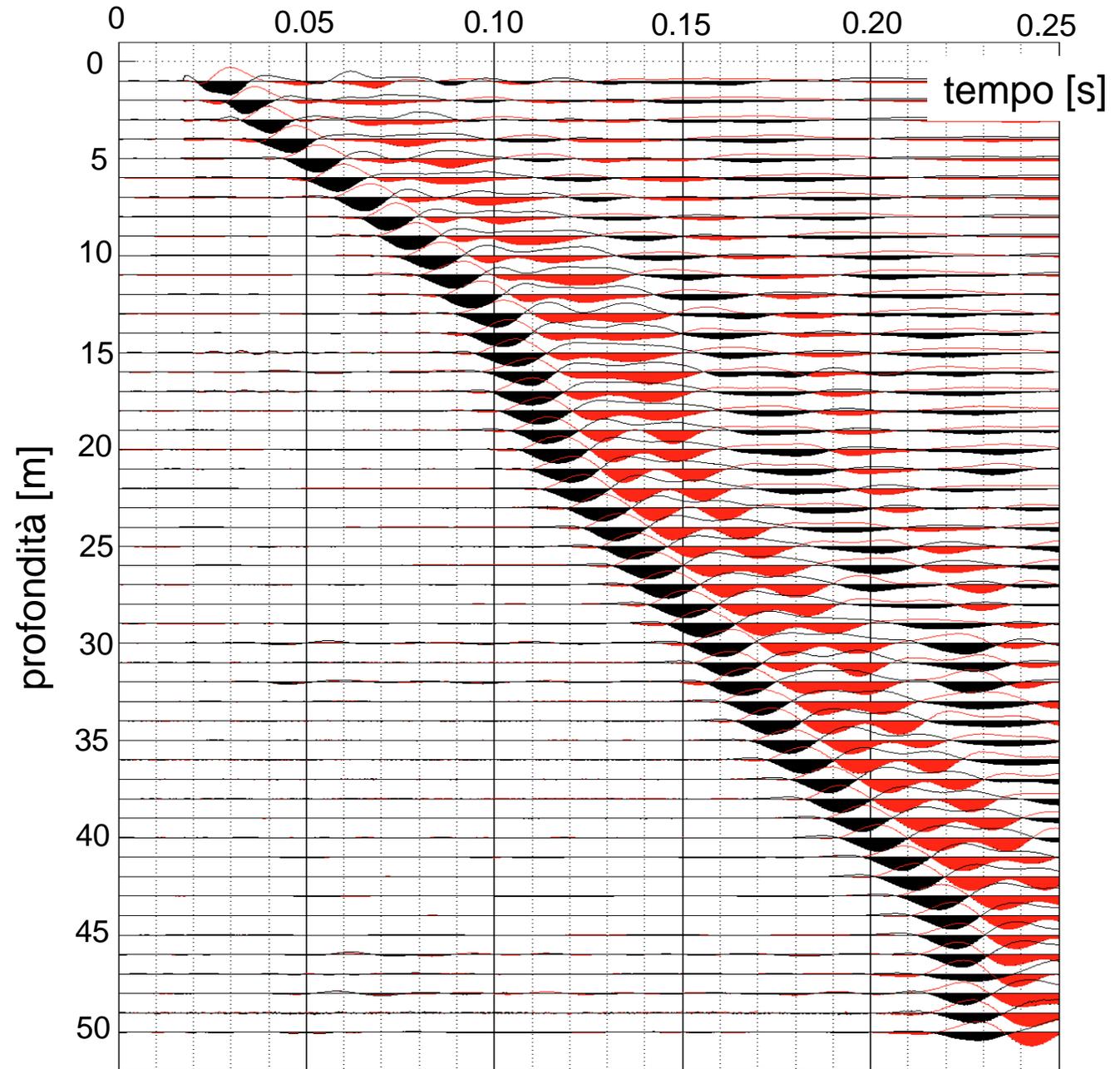
- Profilo di V_s
 - Metodo tempi intercetti
 - Metodo true interval
- $V_{s,30}$

Esempio: Prova Down Hole

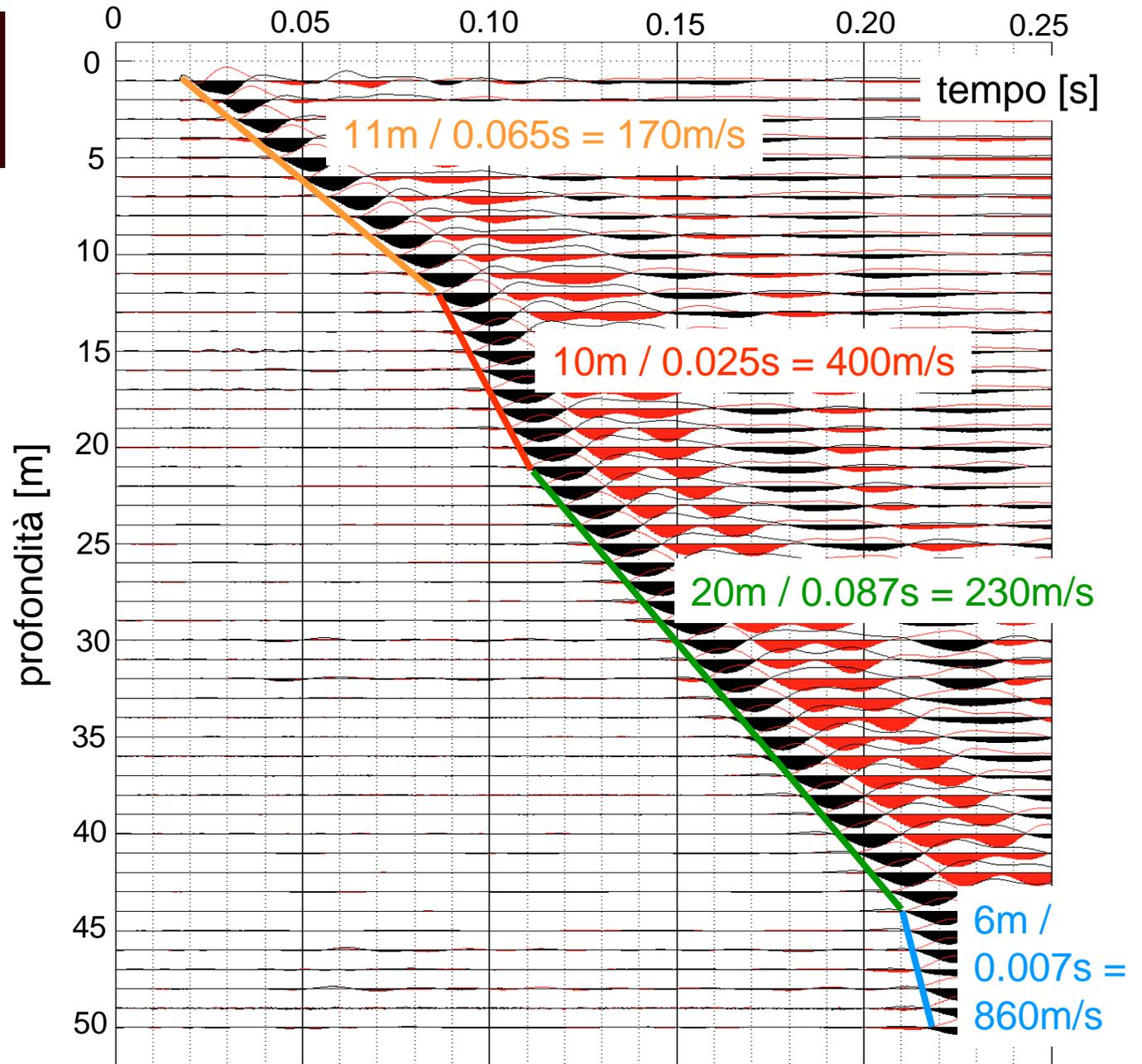
Stringa 8 geofoni da foro con riaggancio



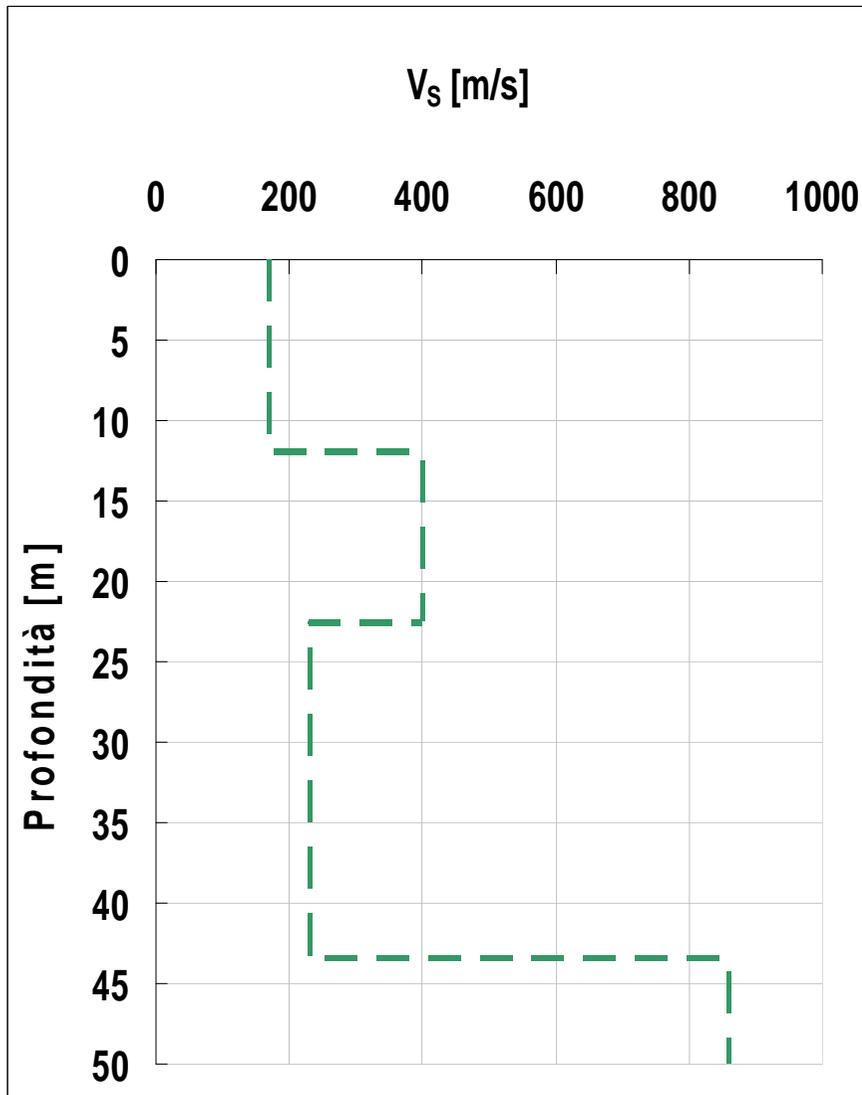
zoom



Interpretazione
semplificata



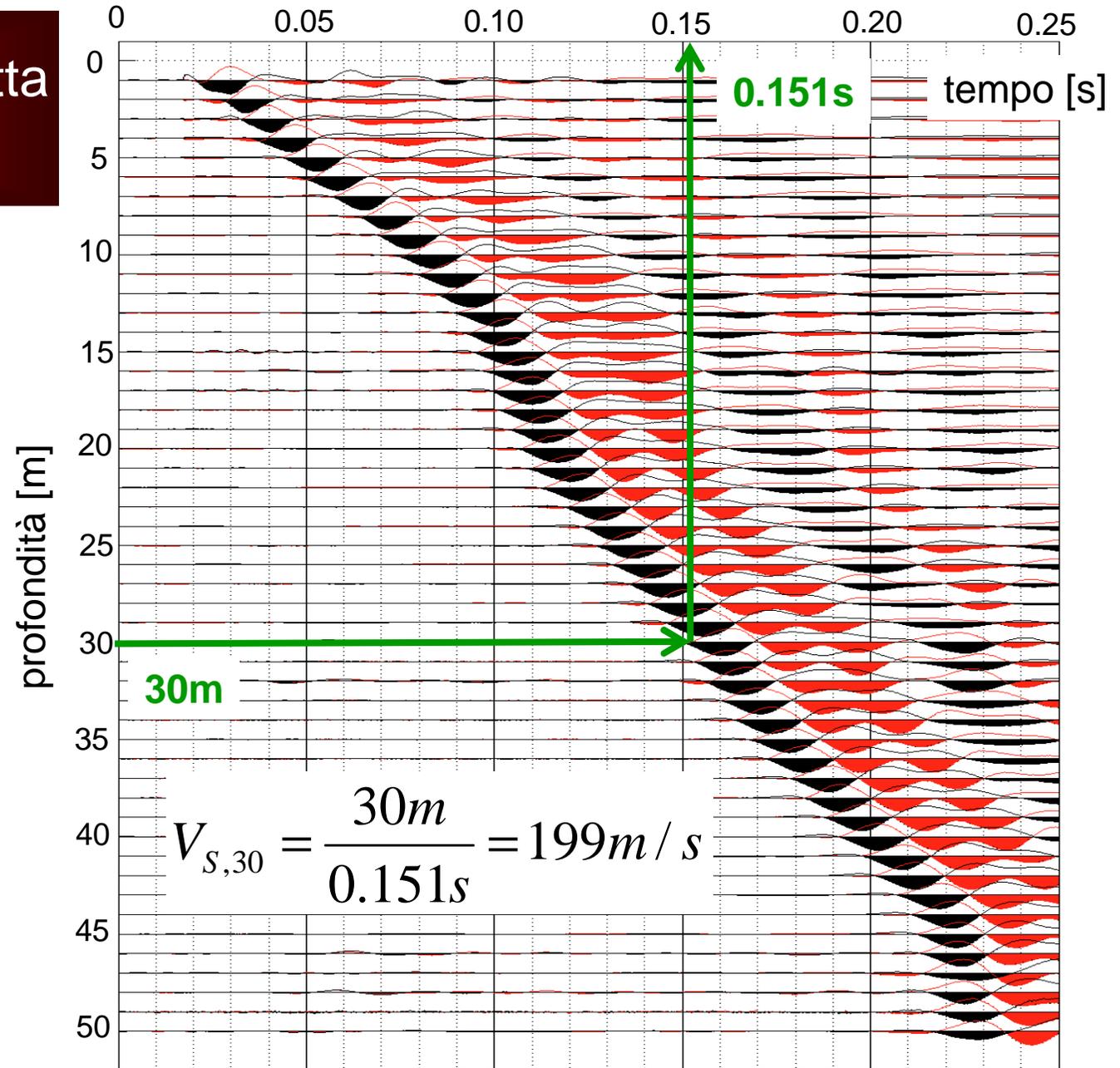
Interpretazione "manuale"



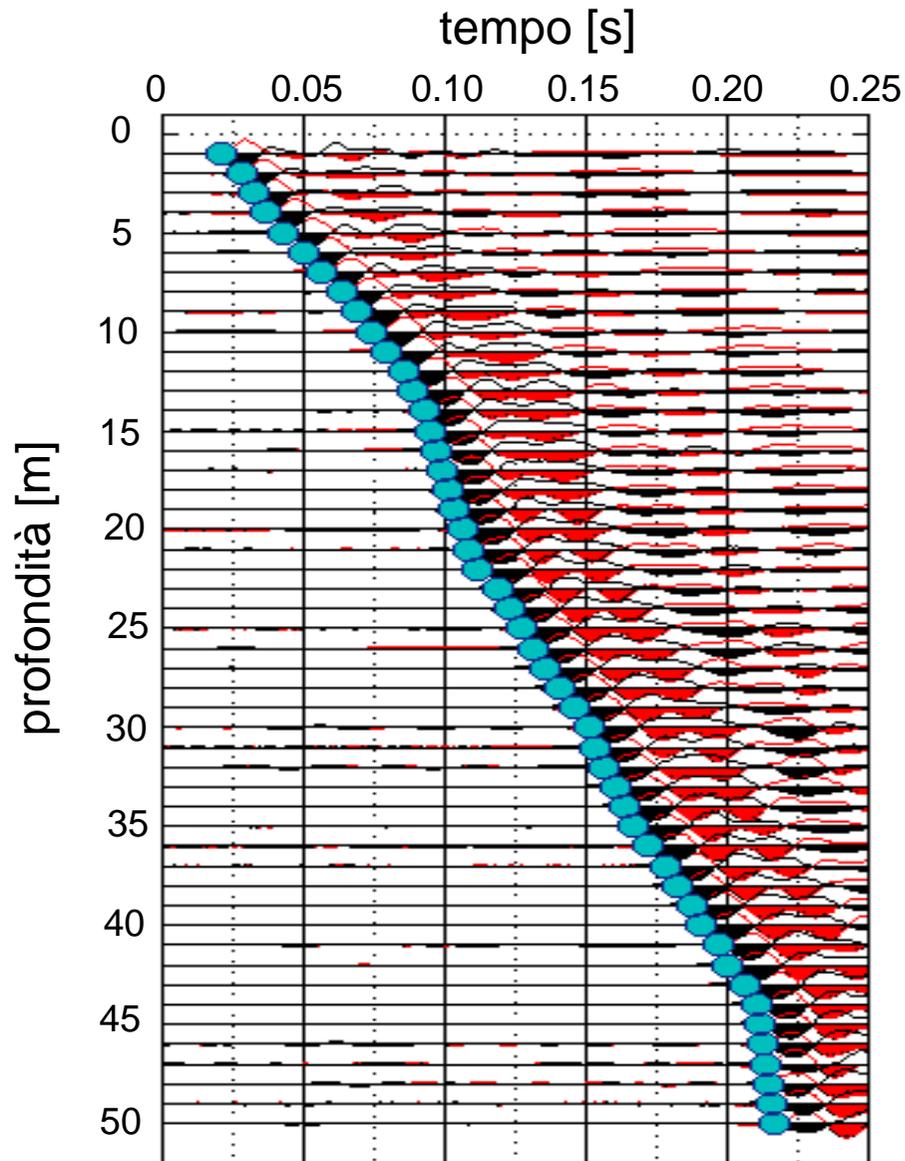
$$V_{S,30} = \frac{30}{\sum_{i=1..N} \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

$$V_{S,30} = \frac{30}{\frac{12}{170} + \frac{10.5}{400} + \frac{7.5}{230}} = 230 \text{ m/s}$$

Valutazione diretta
della $V_{S,30}$



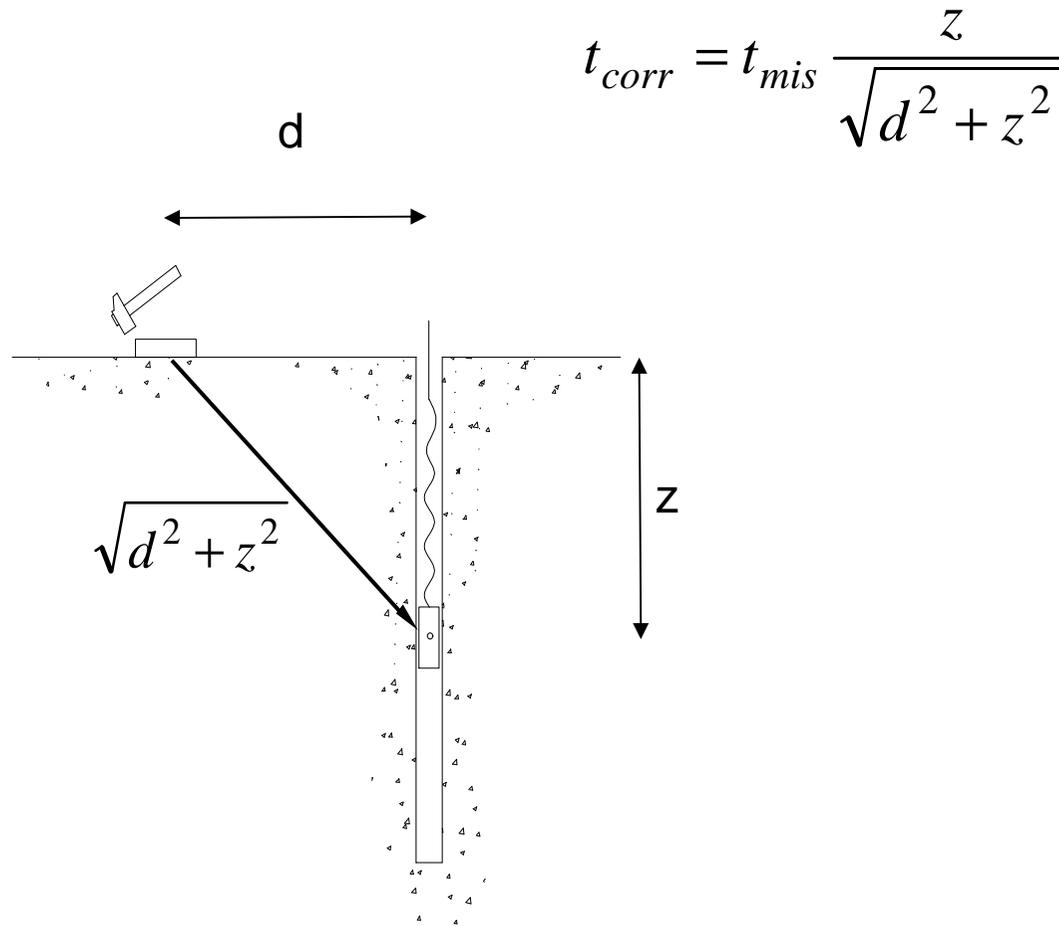
Tempi di primo arrivo



Z [m]	Ts [s]	Z [m]	Ts [s]
1	0,0214	26	0,1314
2	0,0283	27	0,1361
3	0,0325	28	0,1409
4	0,0374	29	0,1459
5	0,0434	30	0,1513
6	0,0502	31	0,1532
7	0,0567	32	0,1567
8	0,0642	33	0,1606
9	0,0689	34	0,164
10	0,0747	35	0,1676
11	0,0799	36	0,1722
12	0,0855	37	0,1787
13	0,0893	38	0,1826
14	0,0928	39	0,1876
15	0,0949	40	0,1915
16	0,0969	41	0,1978
17	0,0994	42	0,2009
18	0,1016	43	0,2067
19	0,1041	44	0,2109
20	0,1065	45	0,2119
21	0,1088	46	0,2129
22	0,1121	47	0,214
23	0,1189	48	0,2151
24	0,1236	49	0,2161
25	0,1277	50	0,2174

Tempi corretti

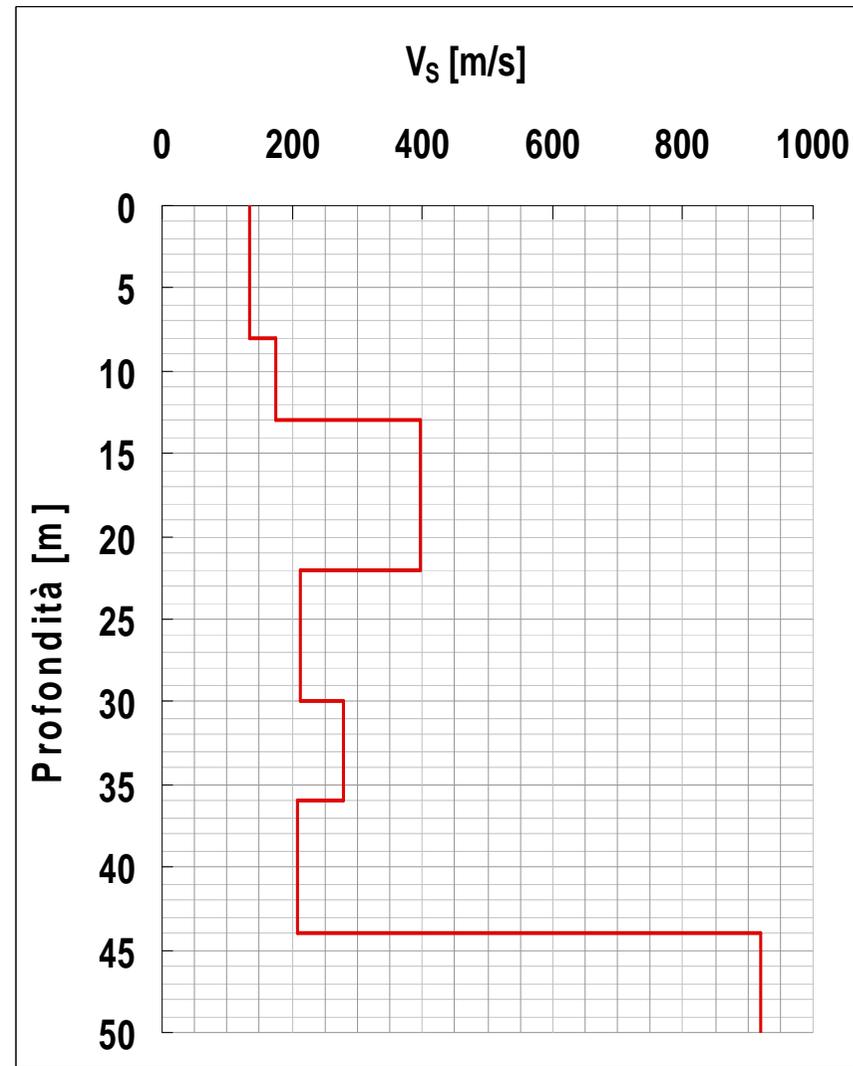
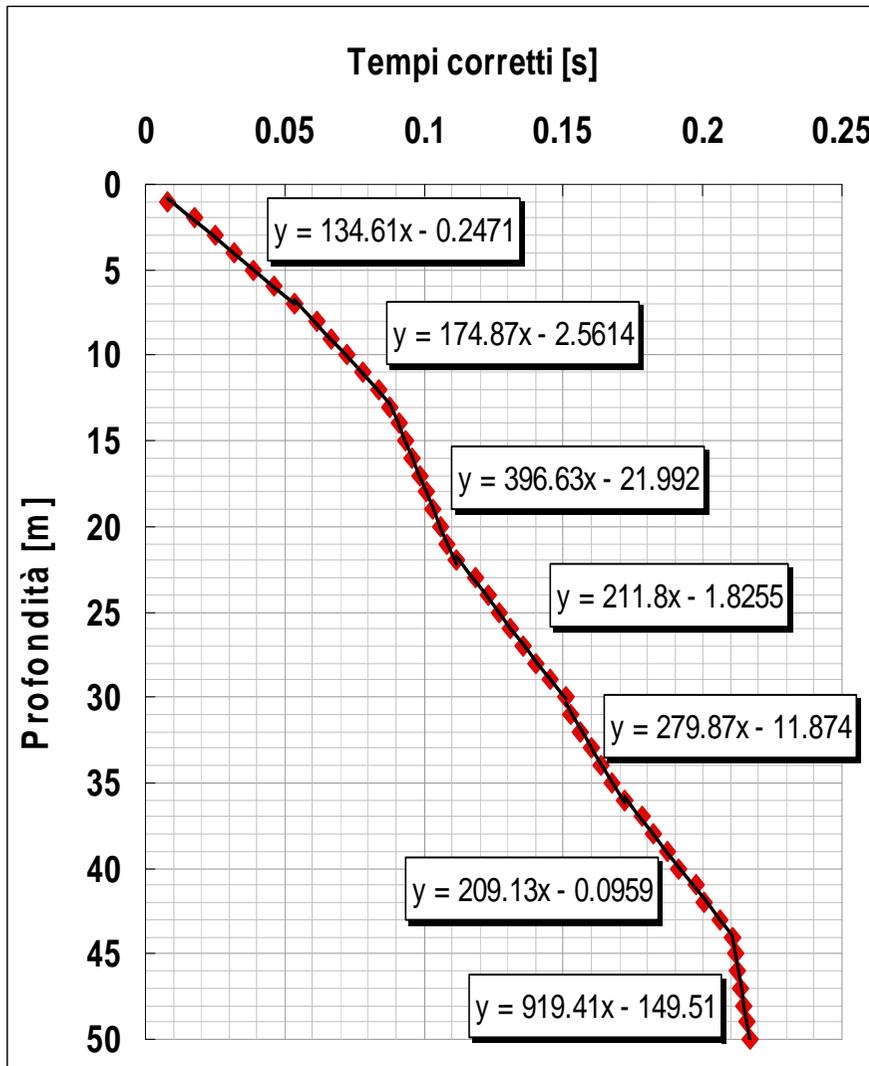
Tempo associato al percorso verticale
p.c. → z



Z	Ts corr	Z	Ts
[m]	[s]	[m]	[s]
1	0,0079	26	0,1314
2	0,0177	27	0,1361
3	0,025	28	0,1409
4	0,0317	29	0,1459
5	0,0388	30	0,1513
6	0,0463	31	0,1532
7	0,0534	32	0,1567
8	0,0613	33	0,1606
9	0,0664	34	0,164
10	0,0725	35	0,1676
11	0,0779	36	0,1722
12	0,0837	37	0,1787
13	0,0877	38	0,1826
14	0,0914	39	0,1876
15	0,0936	40	0,1915
16	0,0957	41	0,1978
17	0,0983	42	0,2009
18	0,1006	43	0,2067
19	0,1032	44	0,2109
20	0,1057	45	0,2119
21	0,108	46	0,2129
22	0,1114	47	0,214
23	0,1182	48	0,2151
24	0,1229	49	0,2161
25	0,1271	50	0,2174

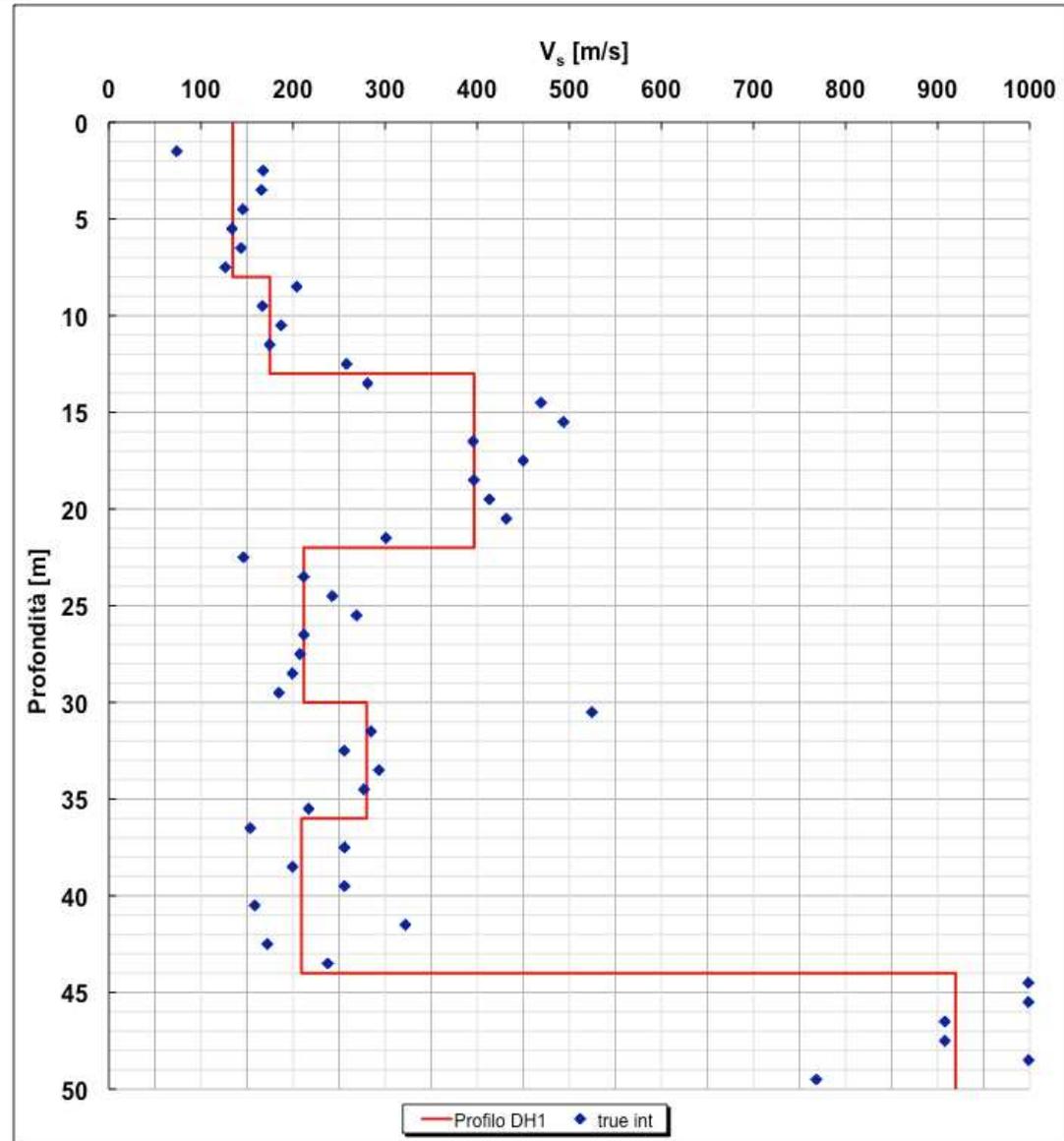
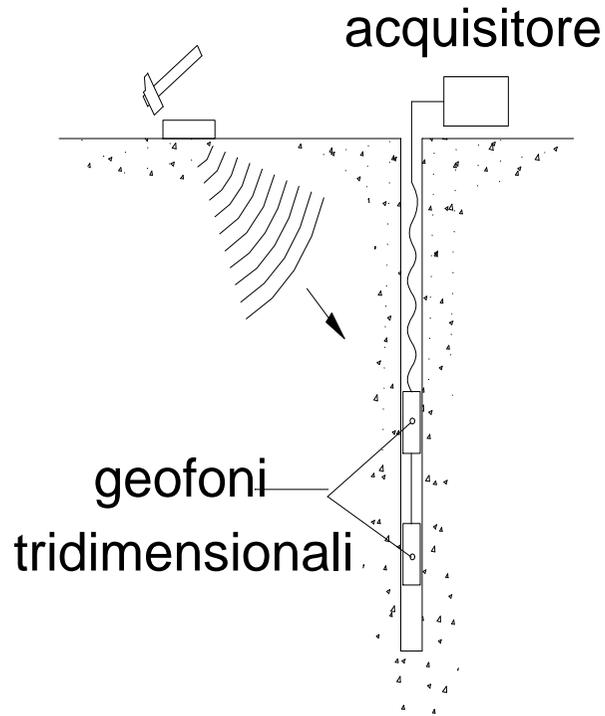
Interpretazione Dromocrone

$$V_{s,30} = \frac{30}{\frac{8}{135} + \frac{5}{170} + \frac{9}{400} + \frac{8}{230}} = 202 \text{ m/s}$$

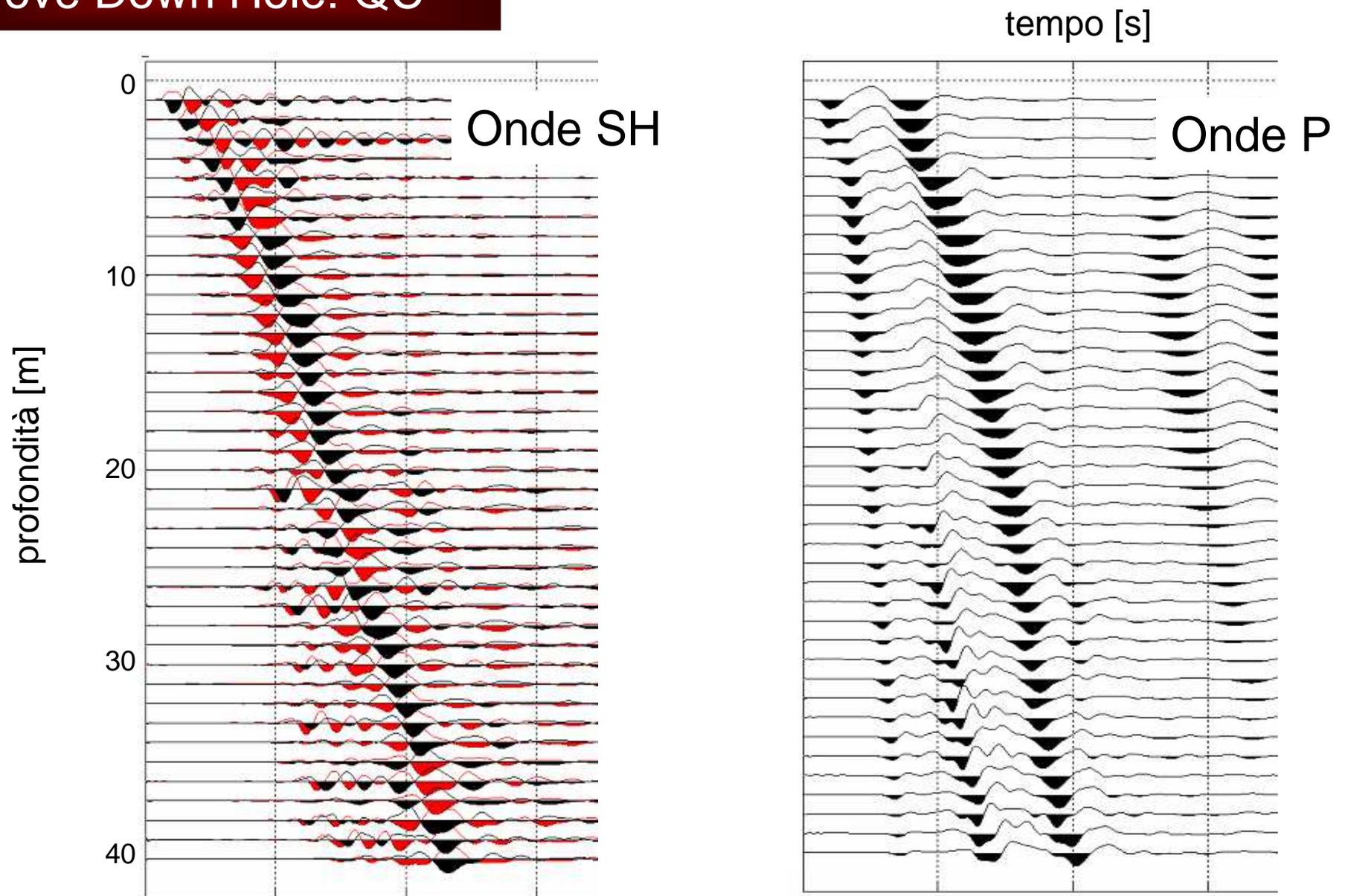


Interpretazione True Interval

Due ricevitori (true interval)



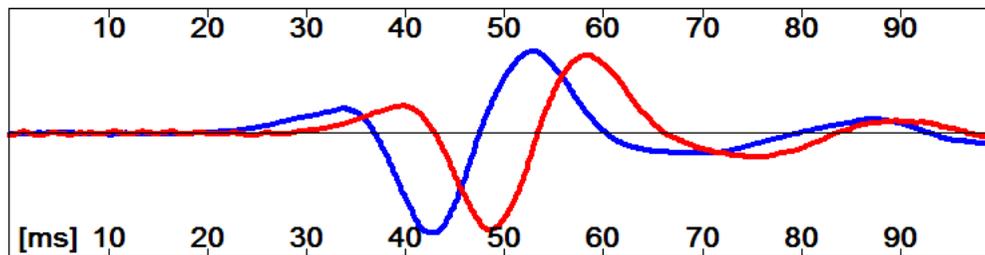
Prove Down Hole: QC



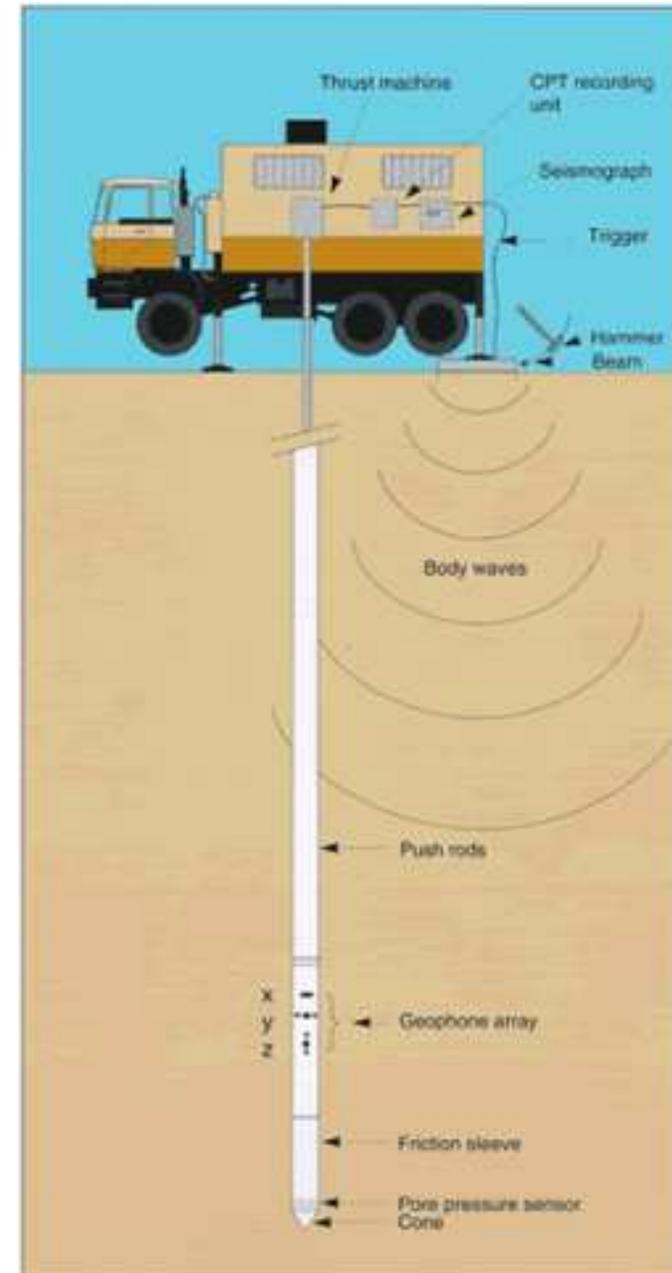
Cono sismico (SCPT)
Dilatometro sismico (SDMT)

- molto efficiente (no fori sondaggio)
- ottimo accoppiamento geofono-terreno (niente rivestimento)
- possibile eseguire prova SCPT in *modalità CHT* usando due coni
- stesse limitazioni CPT/DMT

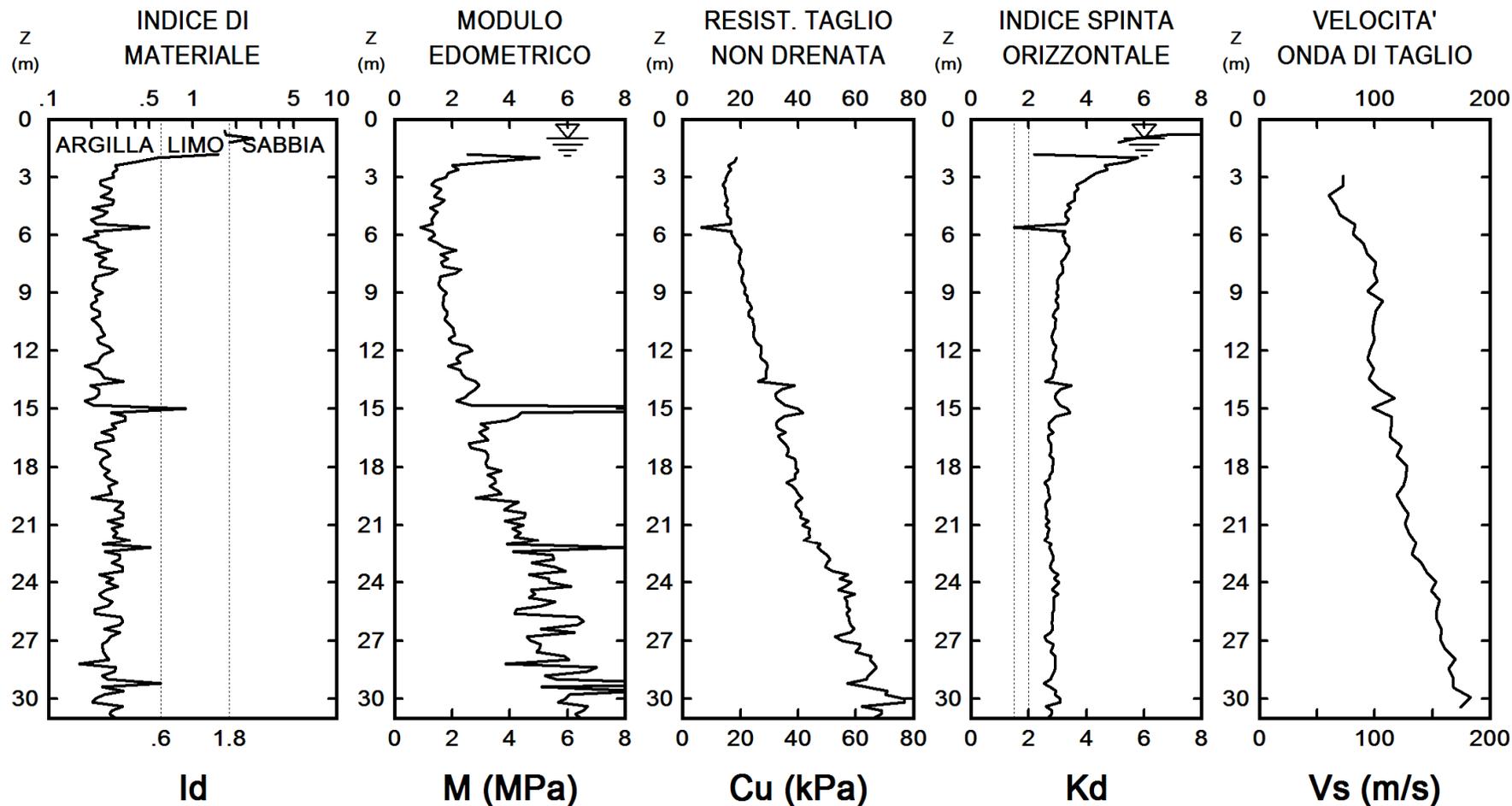
SDMT: trasmissione del segnale digitalizzato



(Marchetti et al., 2006)



Dilatometro sismico (SDMT)



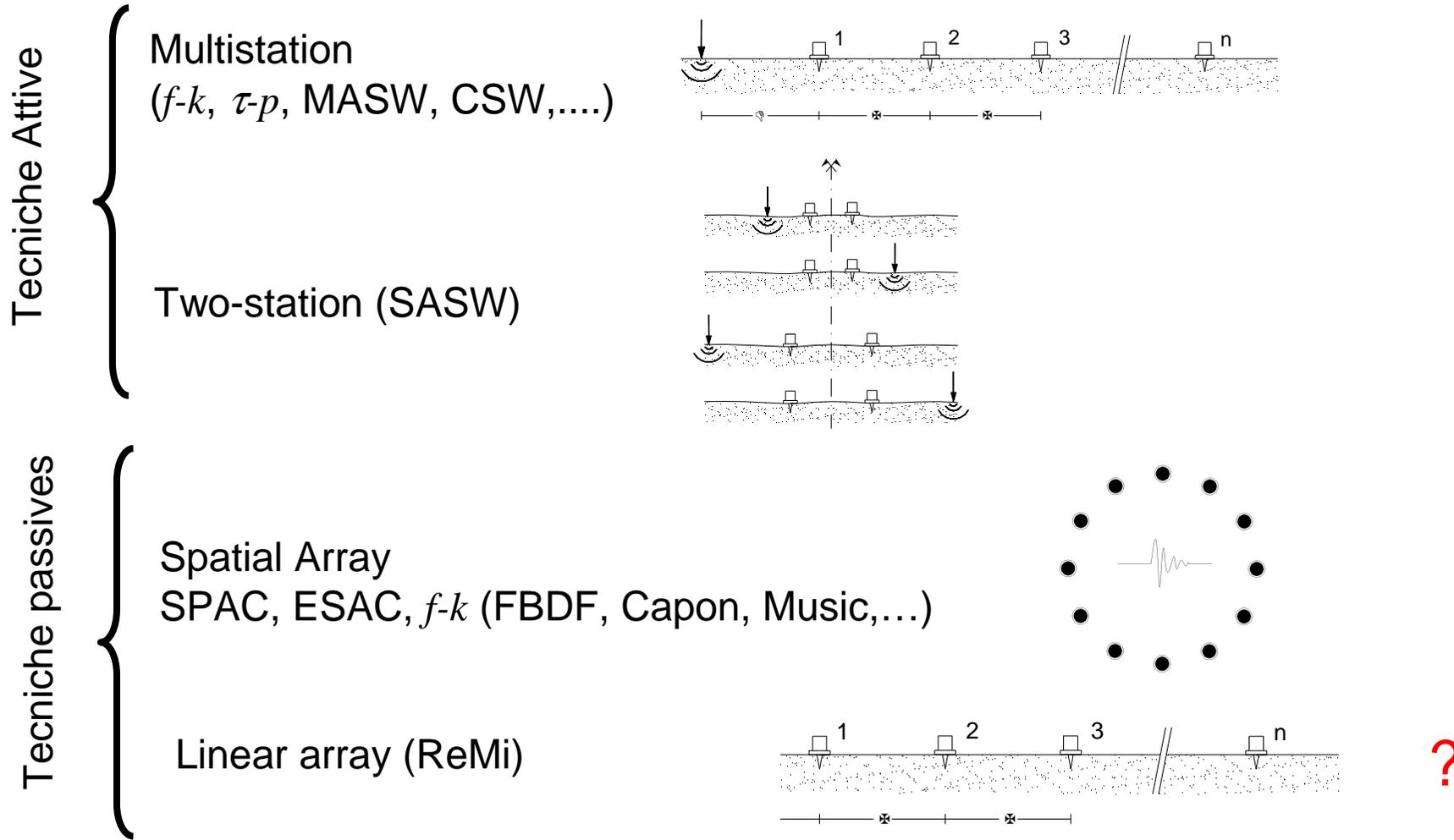
(Marchetti et al., 2006)

Metodi Geofisici

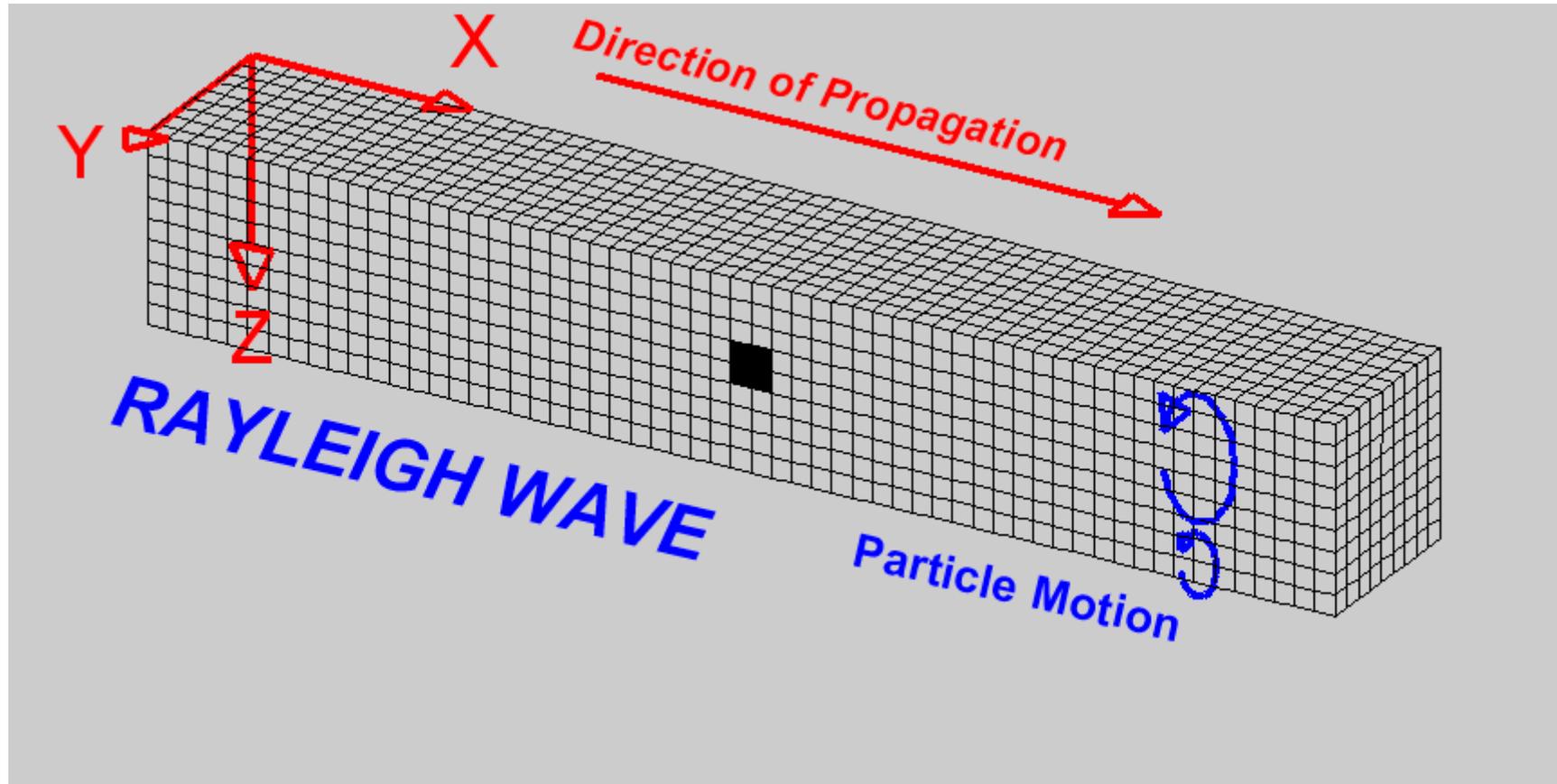
- Prove in foro
 - Prove Cross-hole
 - Prove Down-hole
 - In foro
 - SCPT-SDMT

- Prove dalla superficie
 - Prove sismica a rifrazione (onde SH)
 - Analisi delle onde superficiali
 - Metodi attivi (SASW, MASW)
 - Metodi passivi (fk, SPAC, ReMi, H/V)

Prove basate sulla propagazione di onde superficiali (SWM)

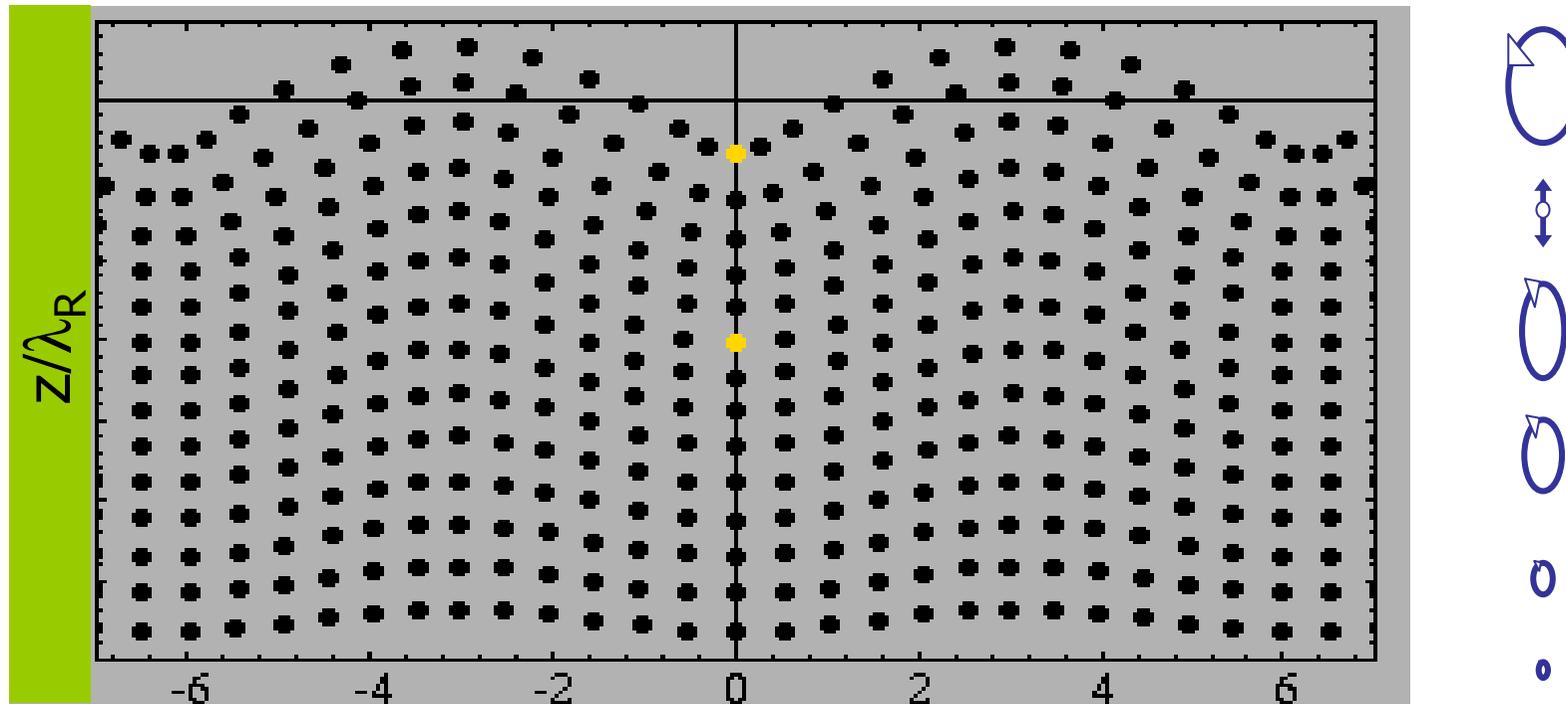


Onde R (Rayleigh)



Animation courtesy of Dr. Larry Braile, Purdue University

Onde di Rayleigh



$$\lambda_R = \frac{V_R}{f}$$

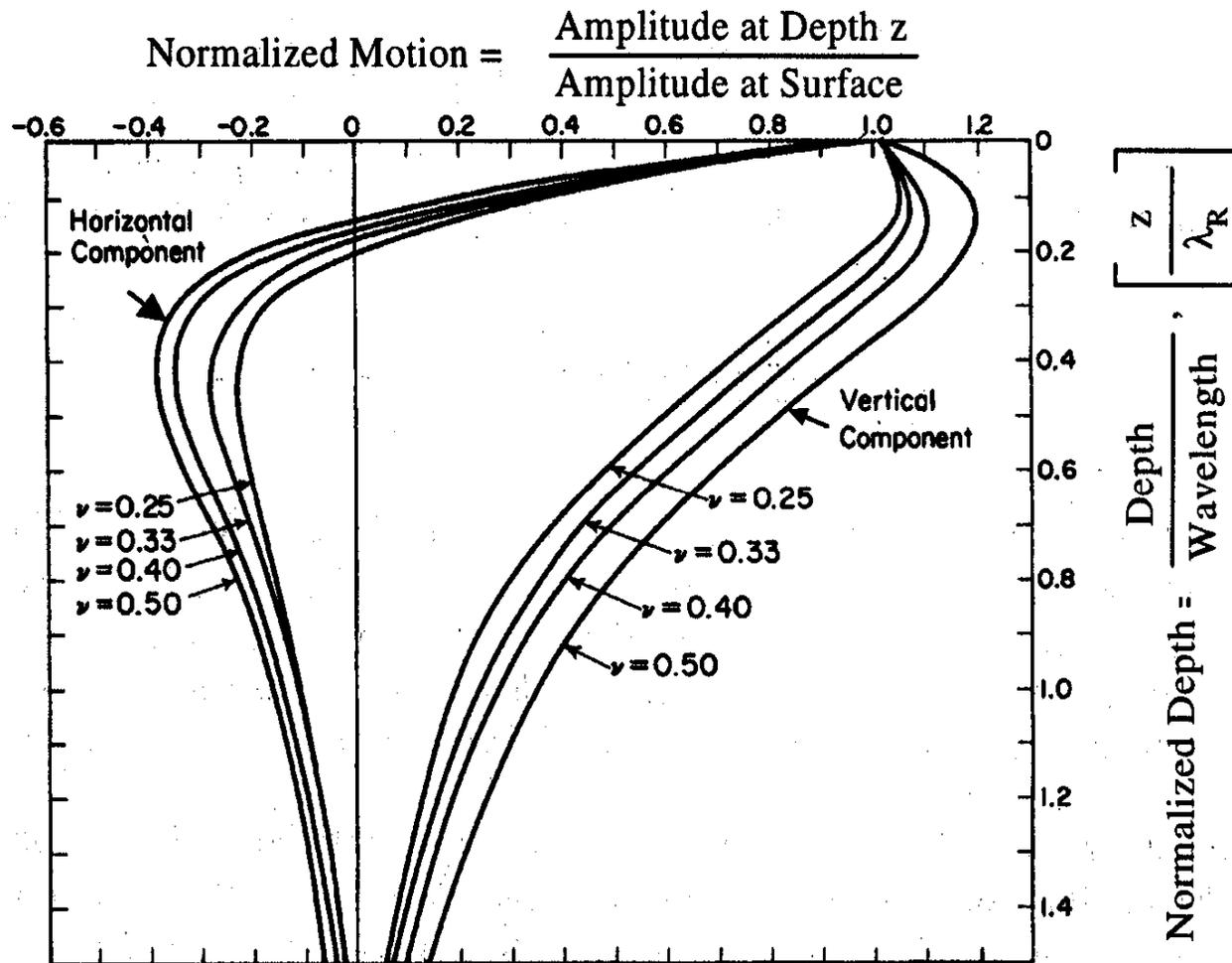


Direction of Propagation

Animation courtesy of Dr. Dan Russell,
Kettering University

Moto indotto dalle Onde di Rayleigh

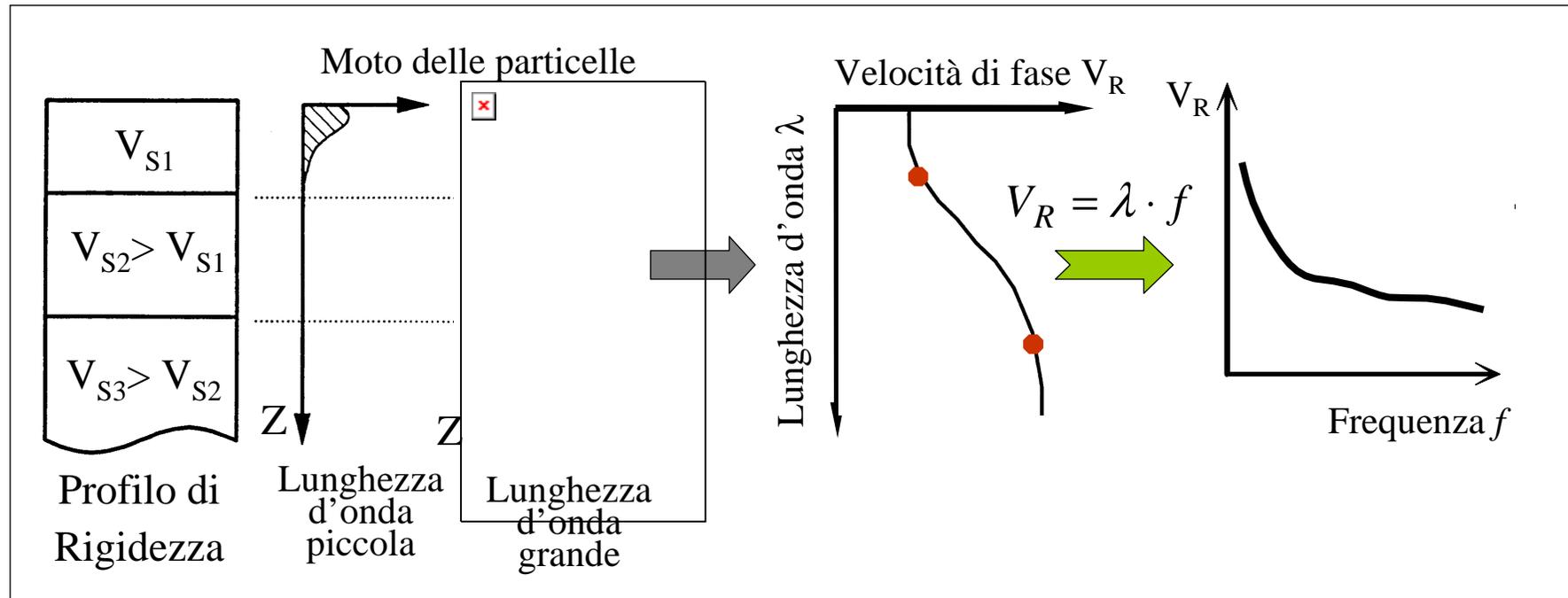
$$\lambda_R = \frac{V_R}{f}$$



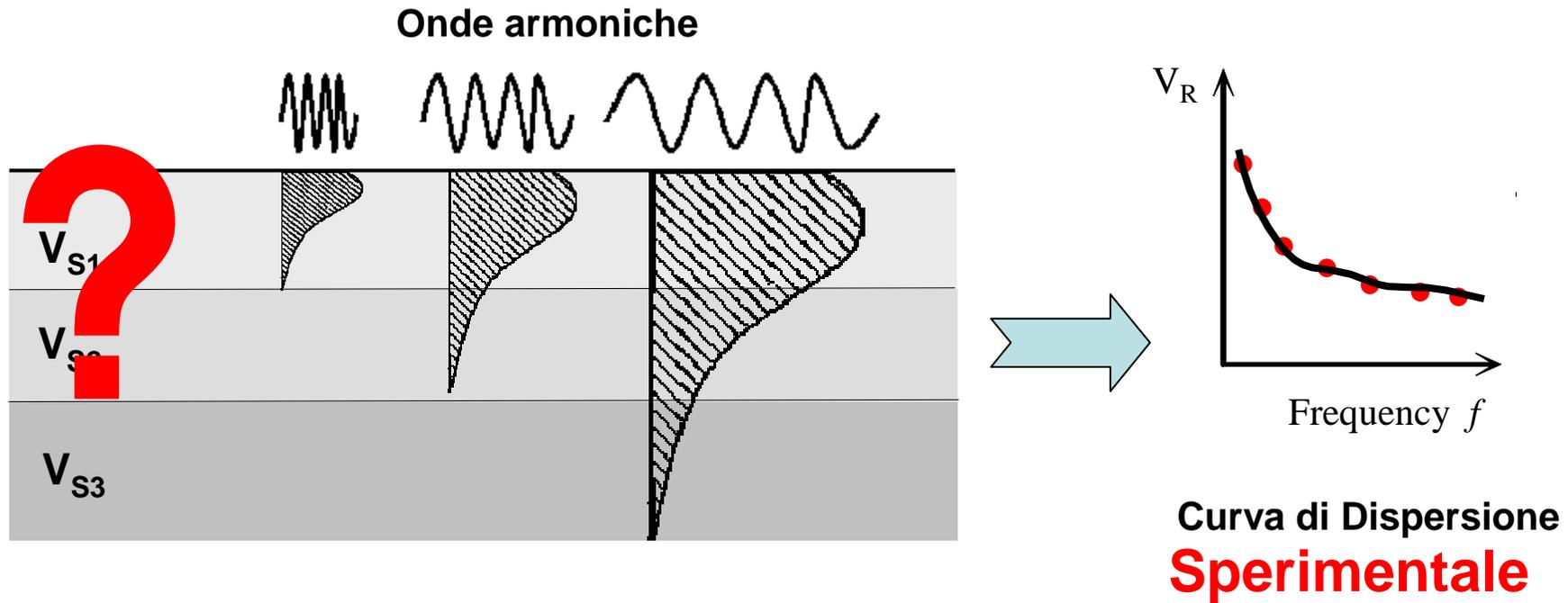
$$\lambda_R = \frac{V_R}{f}$$

(after Richart et al., 1970)

Dispersione geometrica



Dispersione geometrica



PROBLEMA INVERSO

Prove SASW: diagramma di flusso

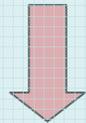
Acquisizione Dati

Campo di spostamenti in superficie



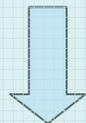
Analisi dei Segnali

Curva di dispersione delle onde di Rayleigh:
velocità di fase vs frequenza



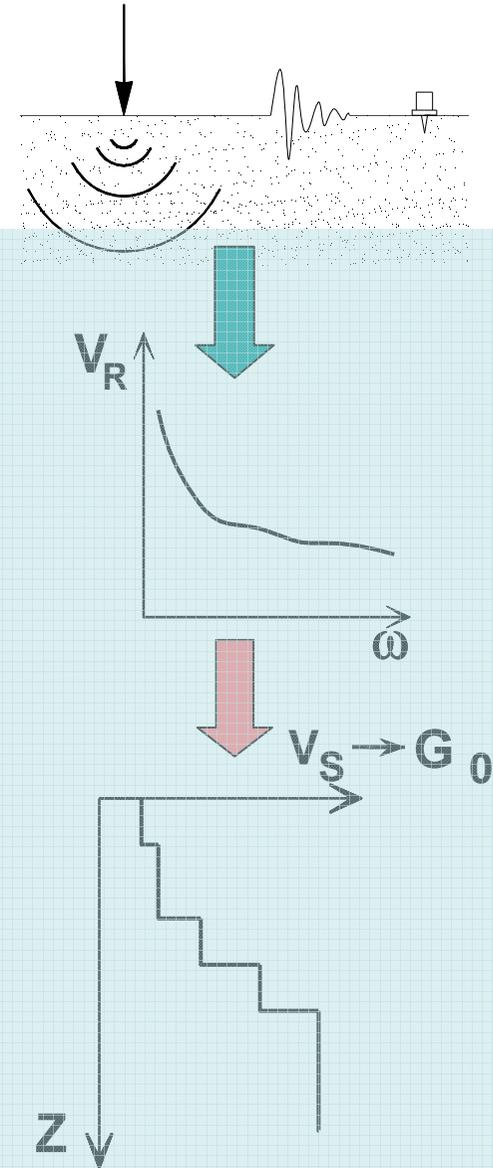
Processo di Inversione

Profilo di velocità delle onde di taglio

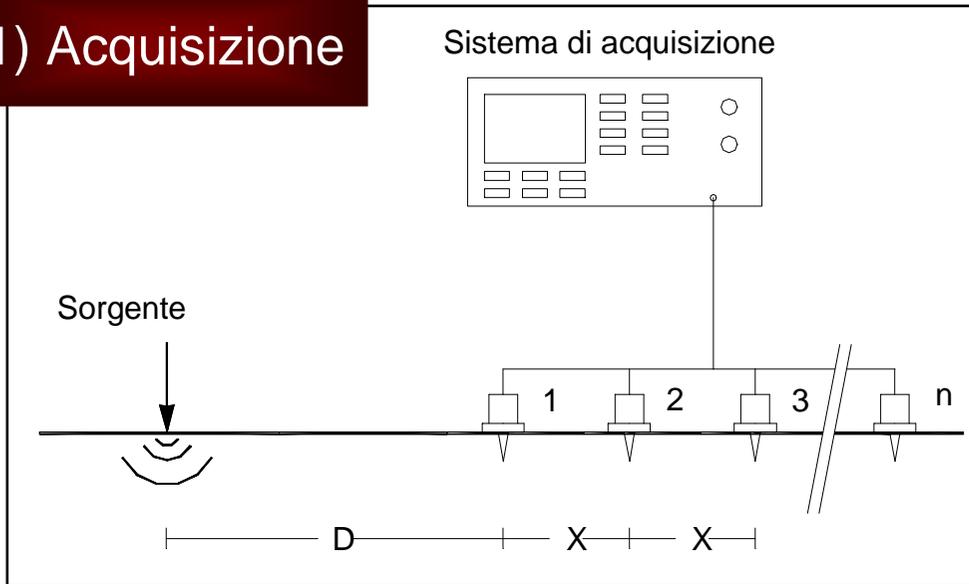


$$G_0 = \rho \cdot V_S^2$$

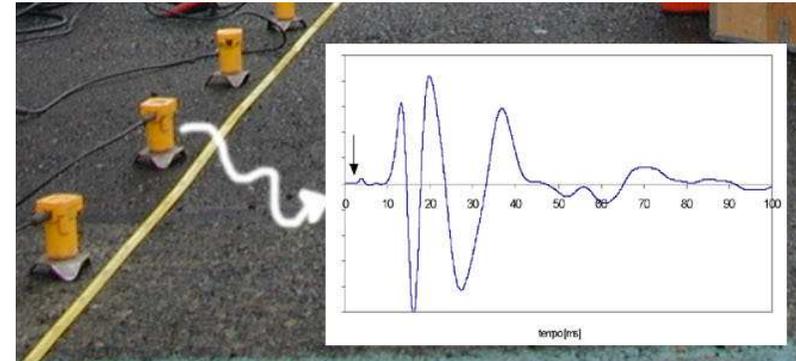
Modulo di rigidezza a taglio (G_0 vs profondità)



1) Acquisizione



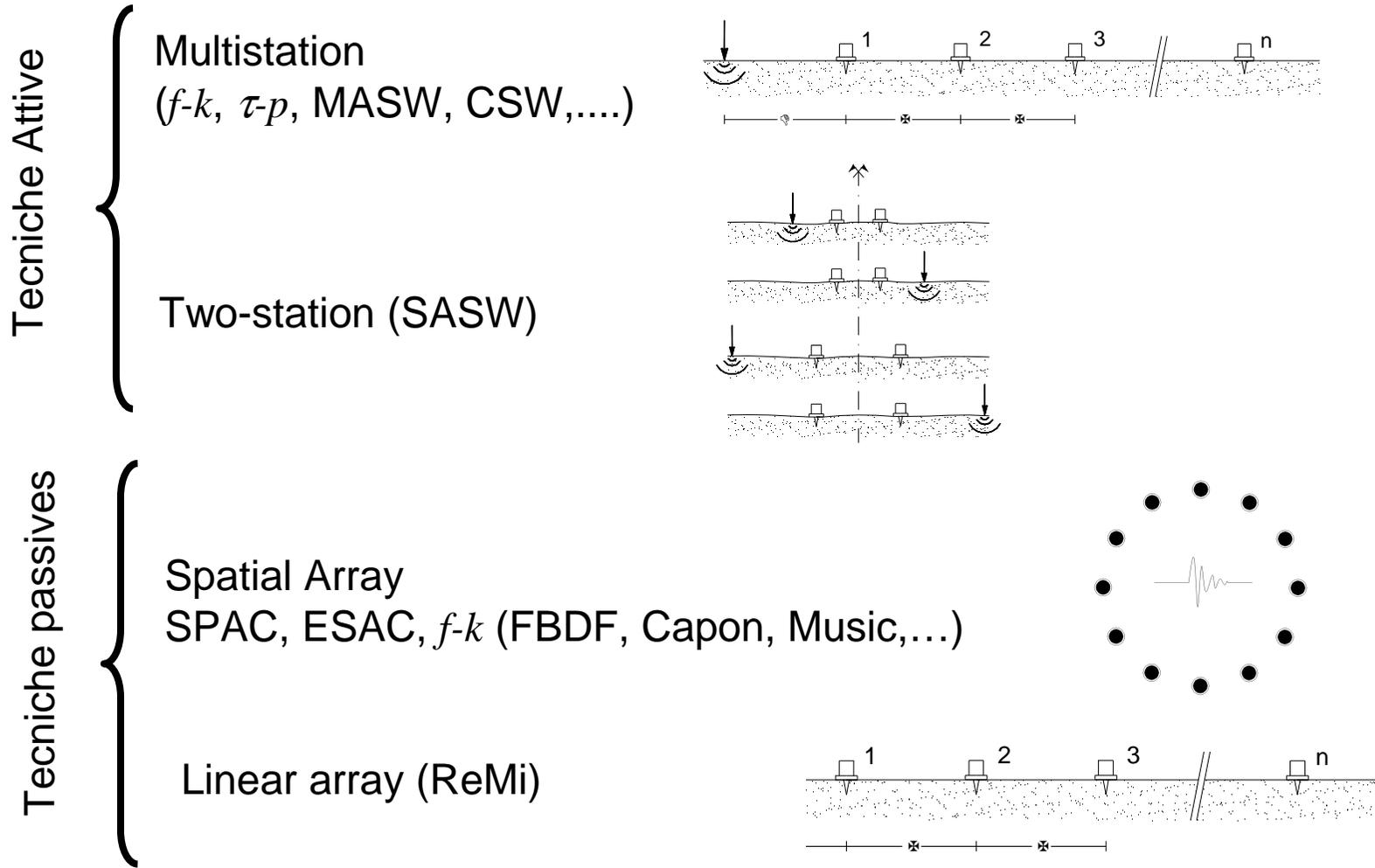
Ricevitori: geofoni (or accelerometri)



Sorgenti Sismiche: impulsive (caduta di un grave, mazza) or controllate (vibratore elettromeccanico)



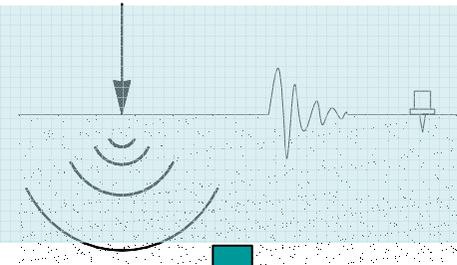
Prove basate sulla propagazione di onde superficiali (SWM)



Prove SASW: diagramma di flusso

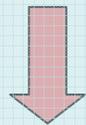
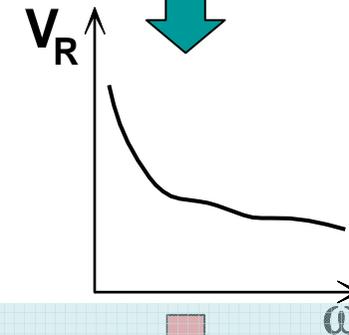
Acquisizione Dati

Campo di spostamenti in superficie



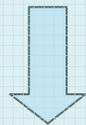
Analisi dei Segnali

Curva di dispersione delle onde di Rayleigh:
velocità di fase vs frequenza



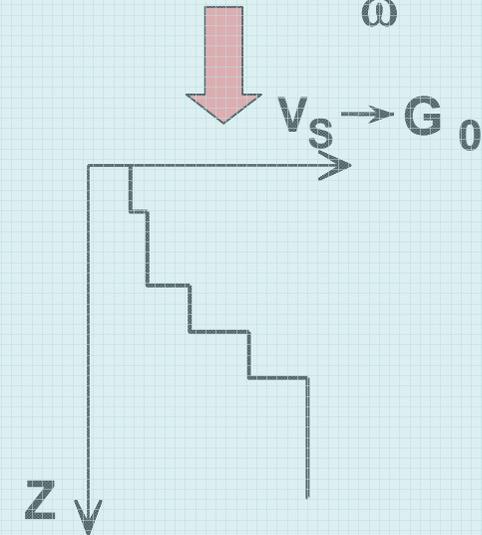
Processo di Inversione

Profilo di velocità delle onde di taglio

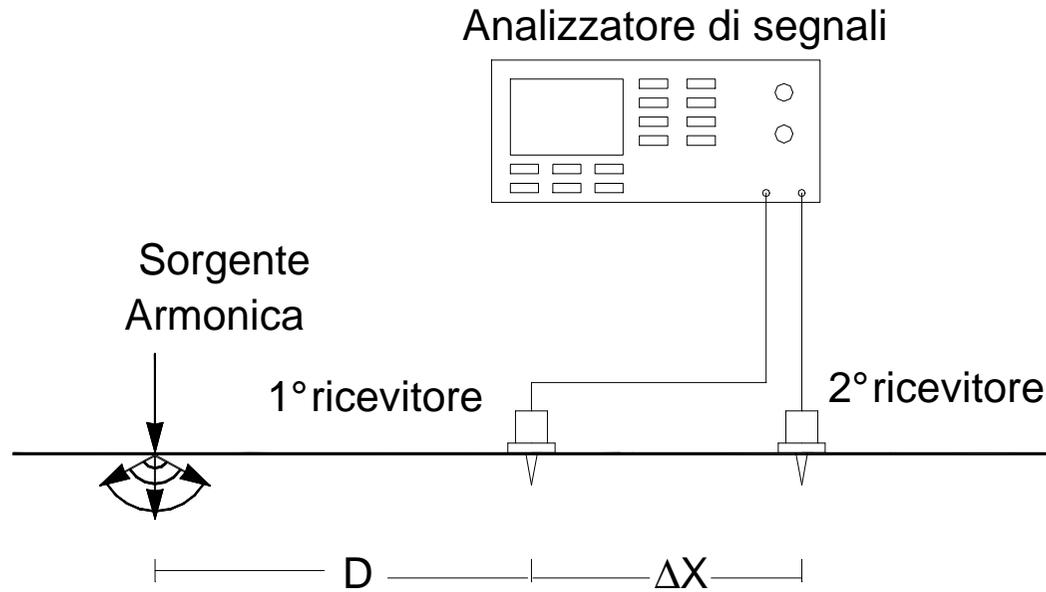


$$G_0 = \rho \cdot V_S^2$$

Modulo di rigidezza a taglio (G_0 vs profondità)



Metodo SASW (Spectral Analysis of Surface Waves)



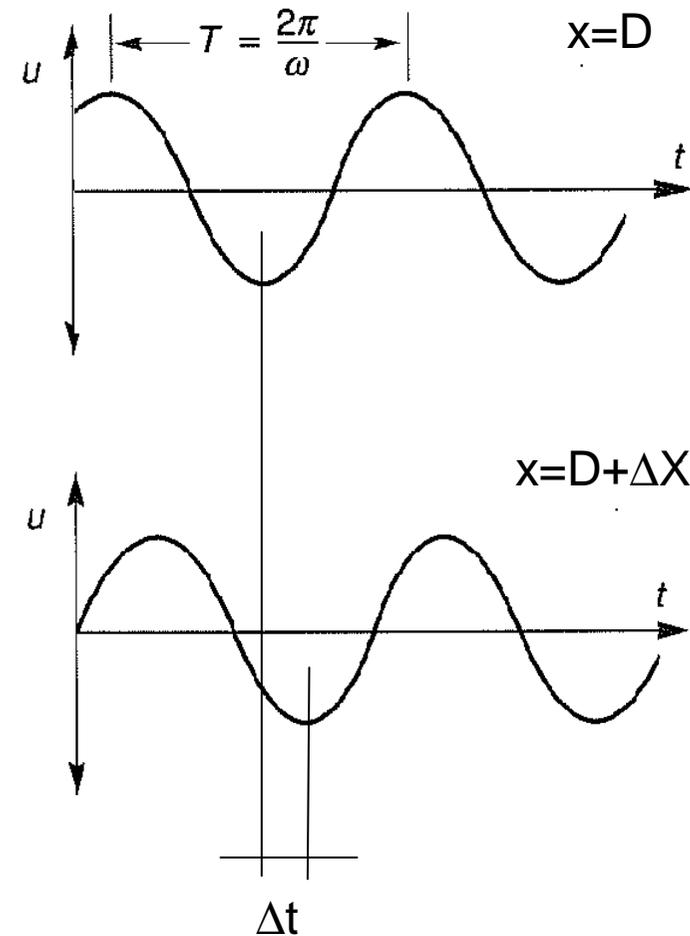
Tipicamente $D = \Delta X$

Onda armonica $\omega = 2\pi/T$

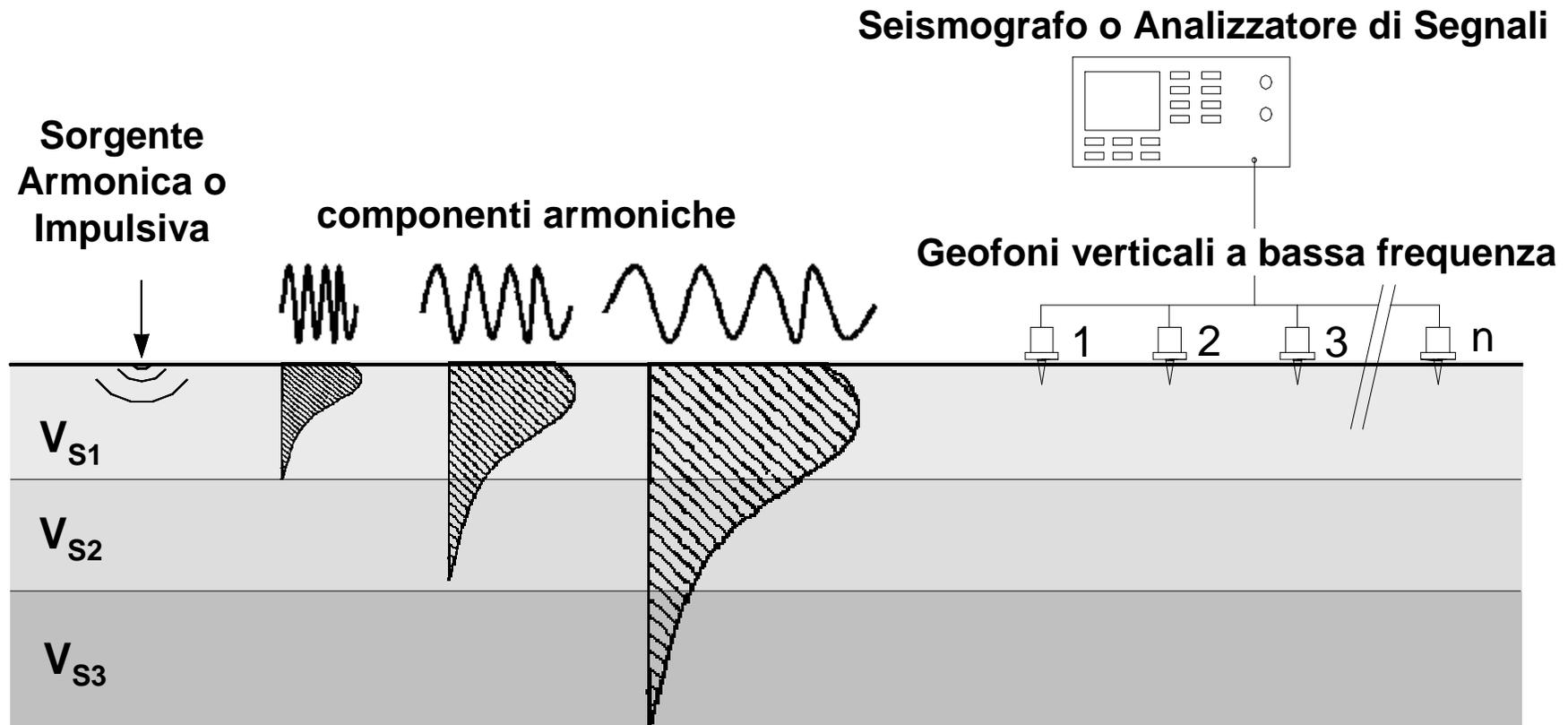
$$V_R(\omega) = \Delta X / \Delta t$$

NB: campo d'onda dominato da onde di Rayleigh (ragionevole per D sufficientemente grande)

(Nazarian & Stokoe, 1984)



Metodo MASW (Multistation Analysis of Surface Waves)

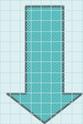


- profondità di indagine $\approx 1/2$ lunghezza stendimento
- risoluzione diminuisce con la profondità (difficile risolvere strati relativamente poco spessi)

Prove SASW: diagramma di flusso

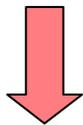
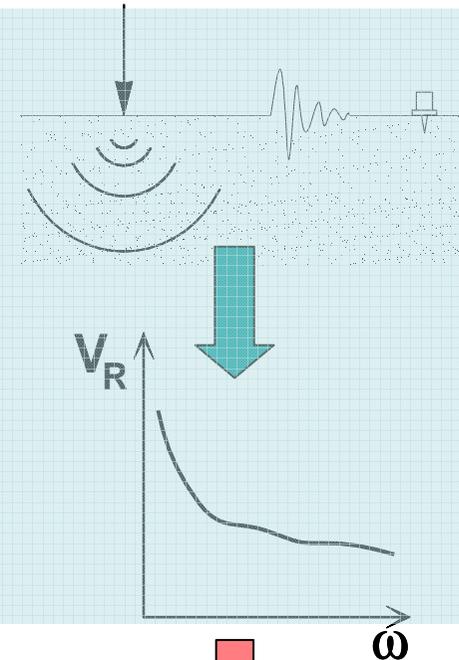
Acquisizione Dati

Campo di spostamenti in superficie



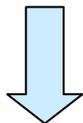
Analisi dei Segnali

Curva di dispersione delle onde di Rayleigh:
velocità di fase vs frequenza



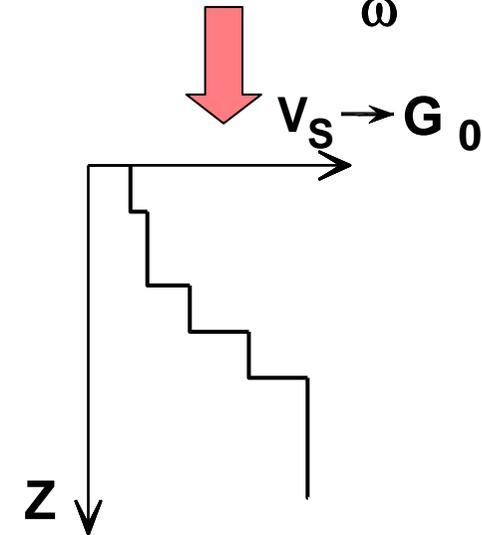
Processo di Inversione

Profilo di velocità delle onde di taglio



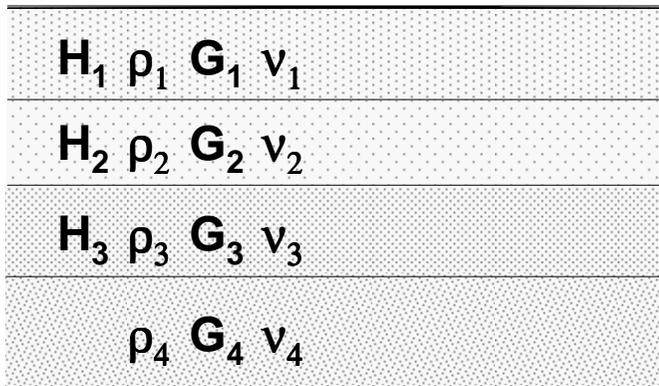
$$G_0 = \rho \cdot V_S^2$$

Modulo di rigidezza a taglio (G_0 vs profondità)



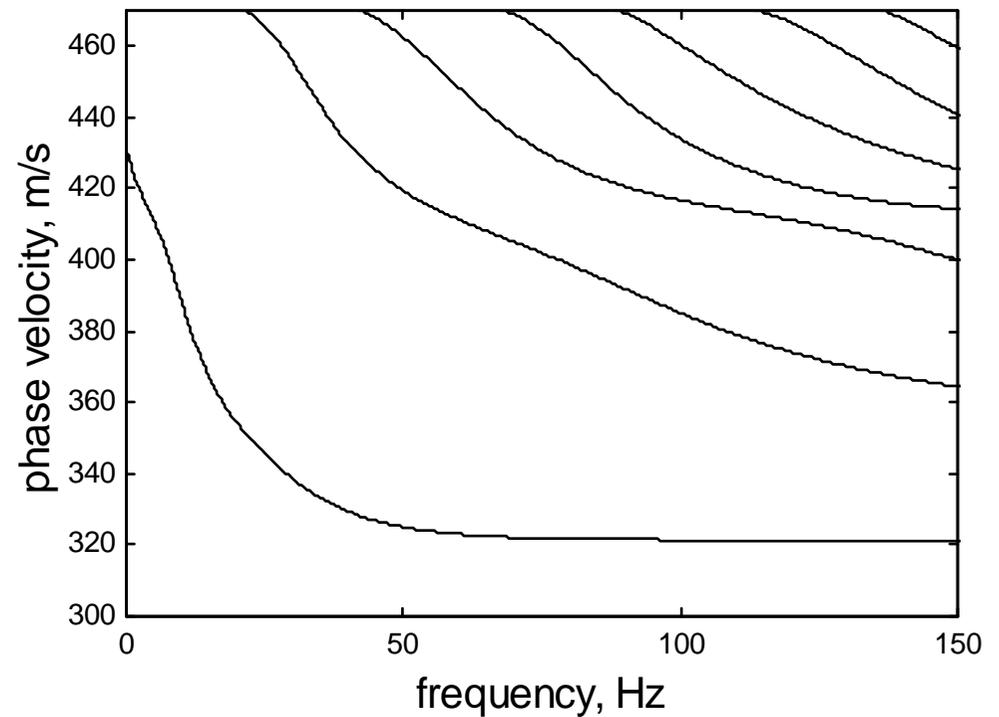
Problema diretto

Modello



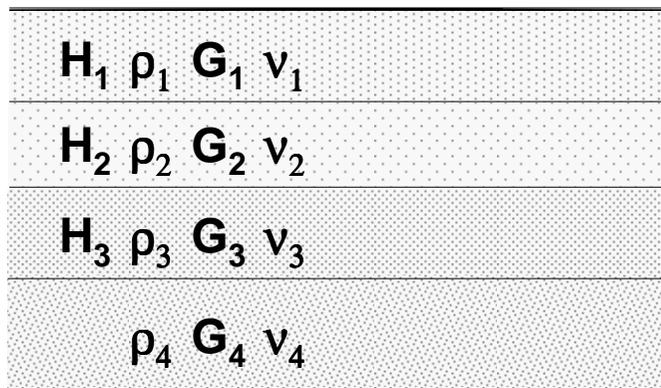
Strati piani e paralleli
omogenei lineari elastici

Soluzione del problema omogeneo
(autovettori = modi di vibrare)



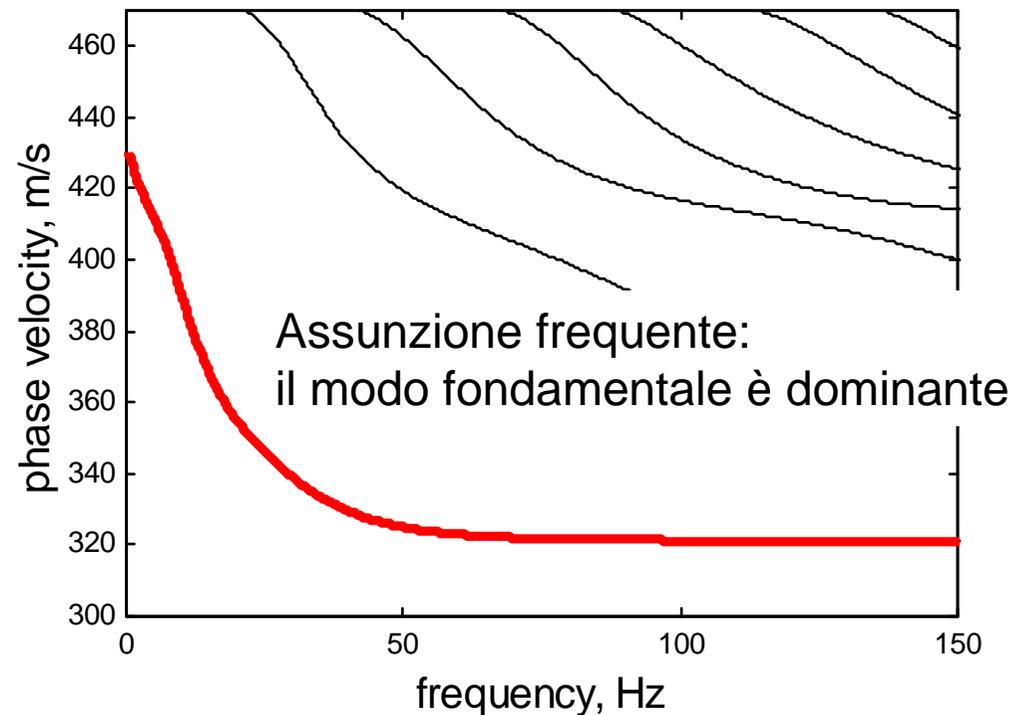
Problema diretto

Modello



Strati piani e paralleli
omogenei lineari elastici

Soluzione del problema omogeneo
(autovettori = modi di vibrare)



In presenza di una forzante: sovrapposizione modale

Per stratigrafie “semplici” (e.g. rigidità crescente gradualmente con la profondità)
il modo fondamentale è dominante ed i modi superiori possono essere trascurati

Ipotesi frequenti nell'interpretazione

- Mezzo stratificato orizzontalmente (assenza di variazioni laterali)
- Onde di Rayleigh dominano il campo d'onda (condizioni di "far field": i contributi delle onde di volume sono trascurabili)
- Il modo fondamentale è dominante

E' importante verificare che siano consistenti con la realtà

Le assunzioni possono essere rimosse (ma non è semplice)

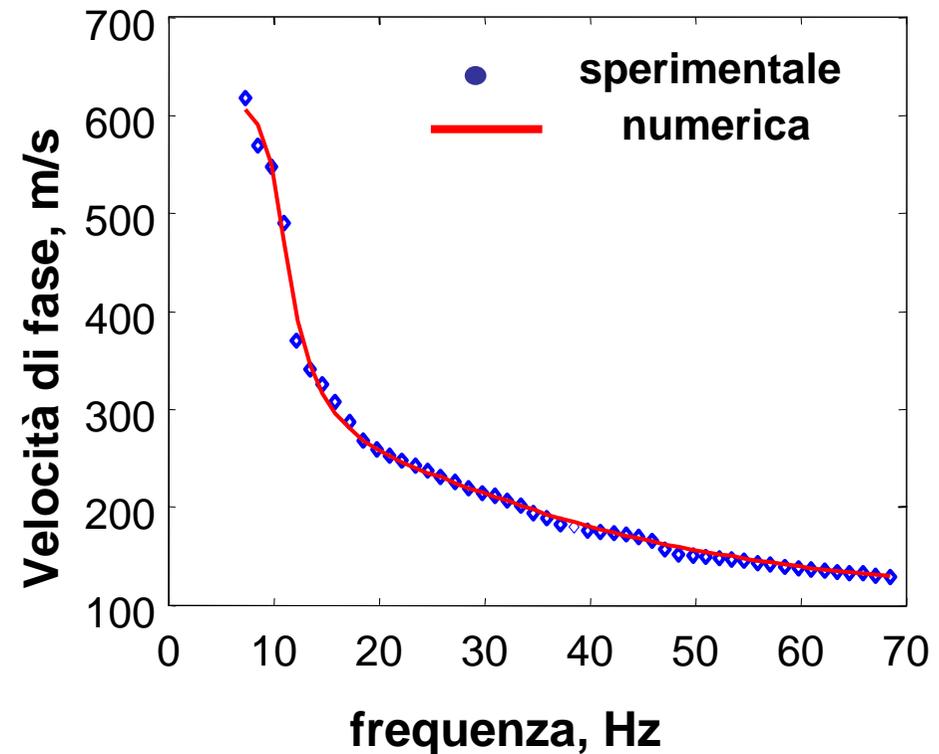
Il problema inverso

Obiettivo: trovare i parametri di modello tali da minimizzare la differenza tra curve di dispersione sperimentale e numerica

$H_1 =? V_{s_1}=?$
$H_2 =? V_{s_2}=?$
$H_3 =? V_{s_3}=?$
$V_{s_\infty}=?$

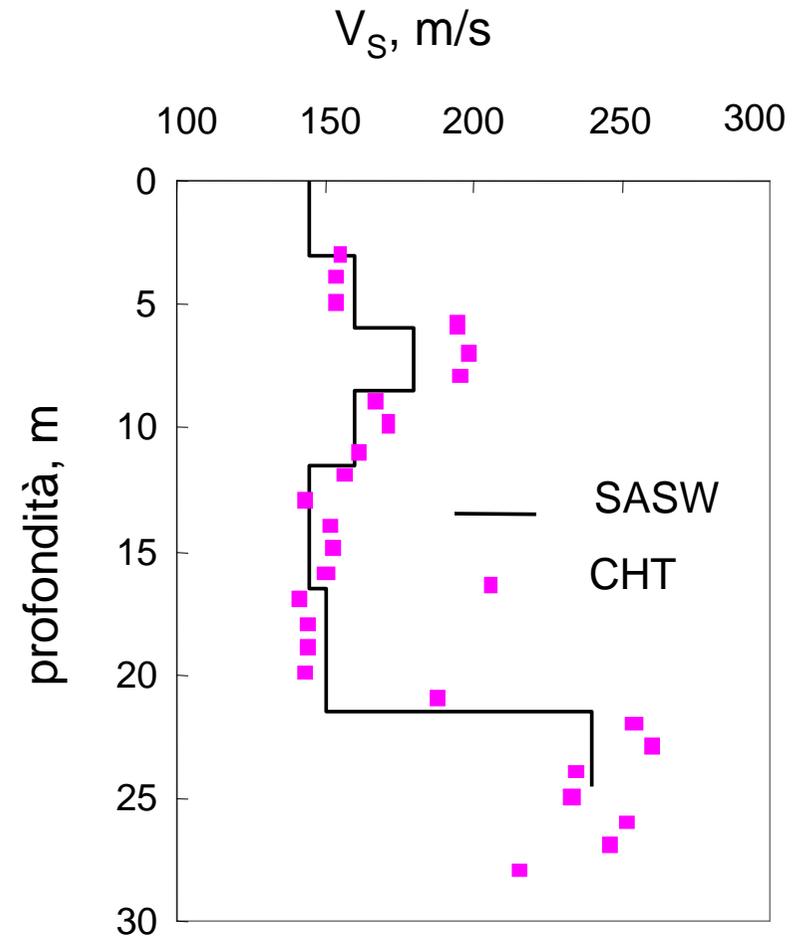
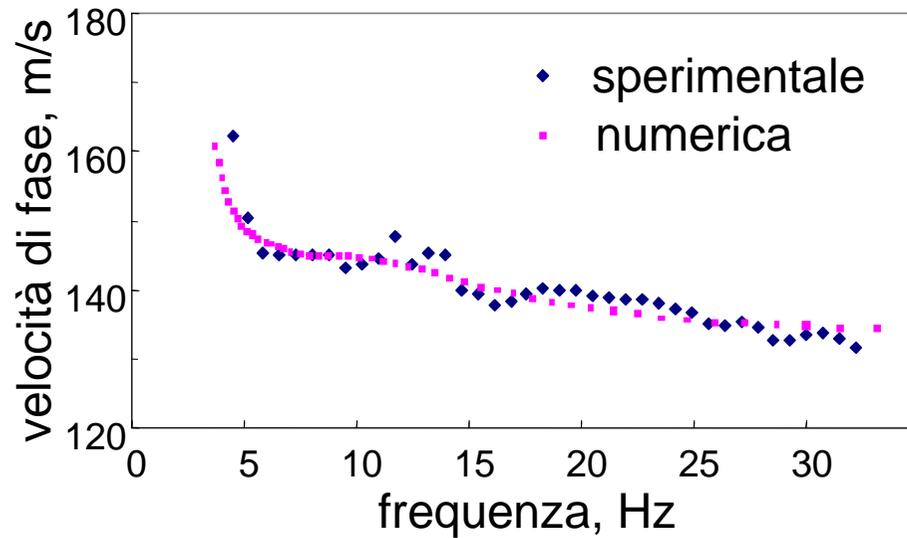
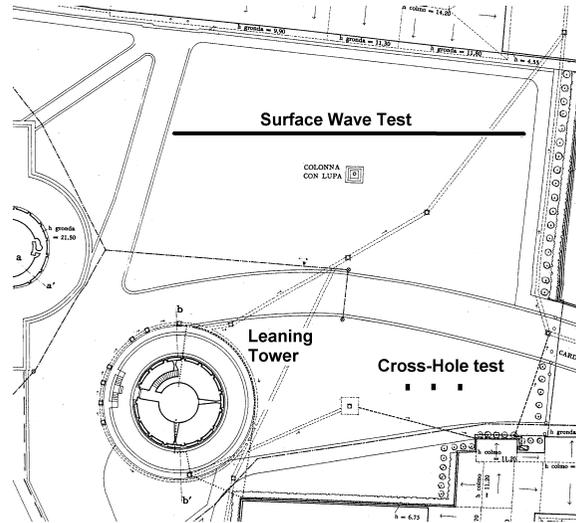
Tipicamente v_i e ρ_i sono fissate a priori

H_i e V_{s_i} sono i parametri di modello incogniti



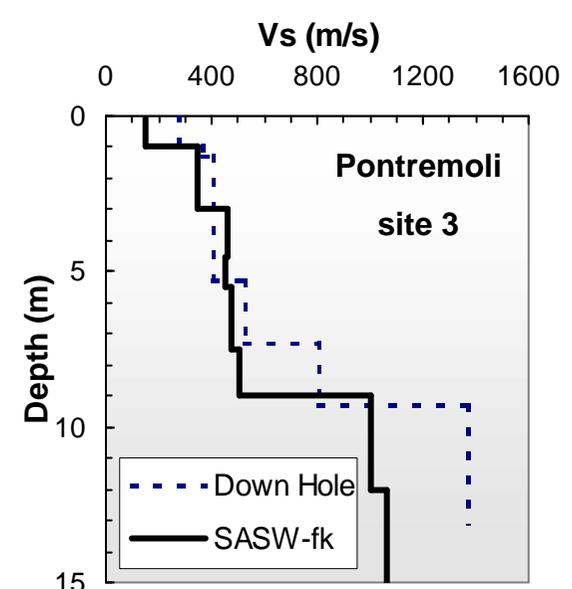
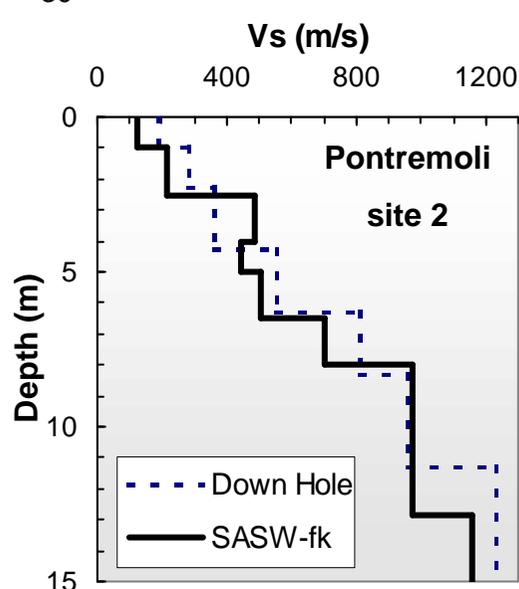
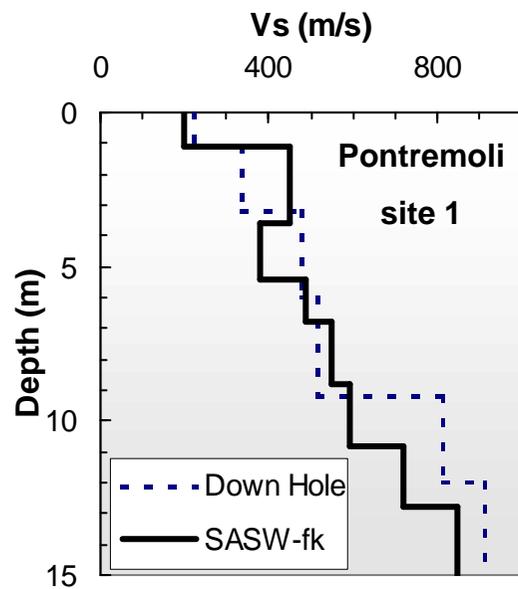
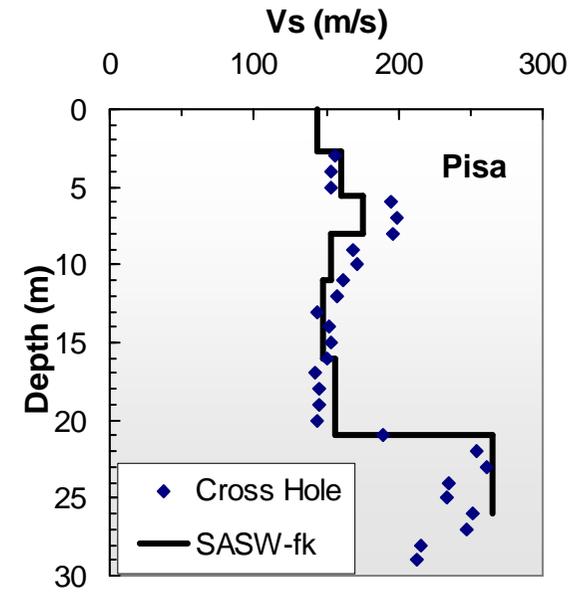
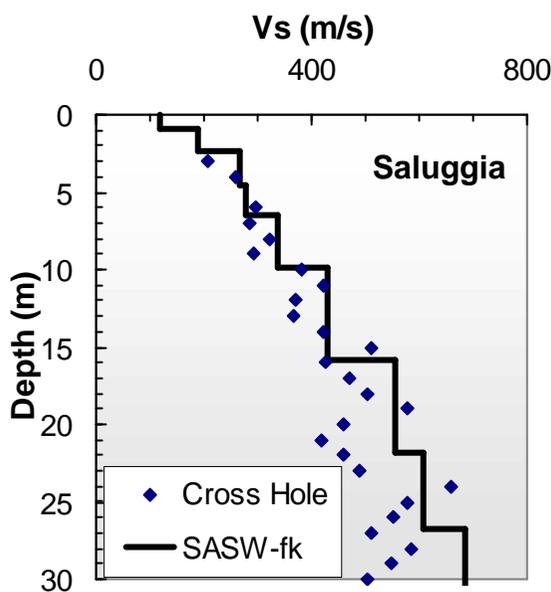
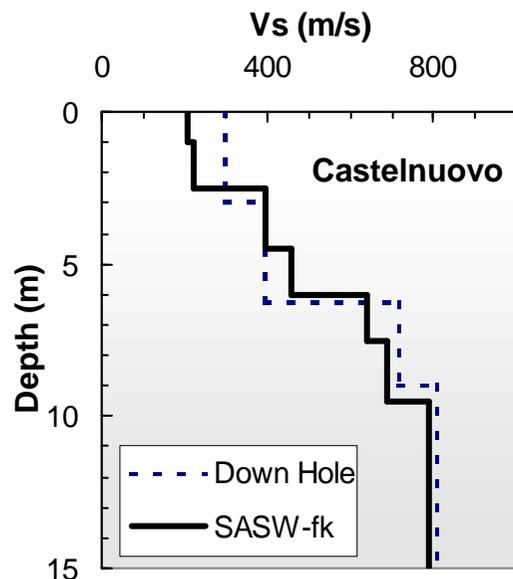
ATT: I problemi inversi sono malposti e malcondizionati → la soluzione non è unica

Casi di Studio: Pisa

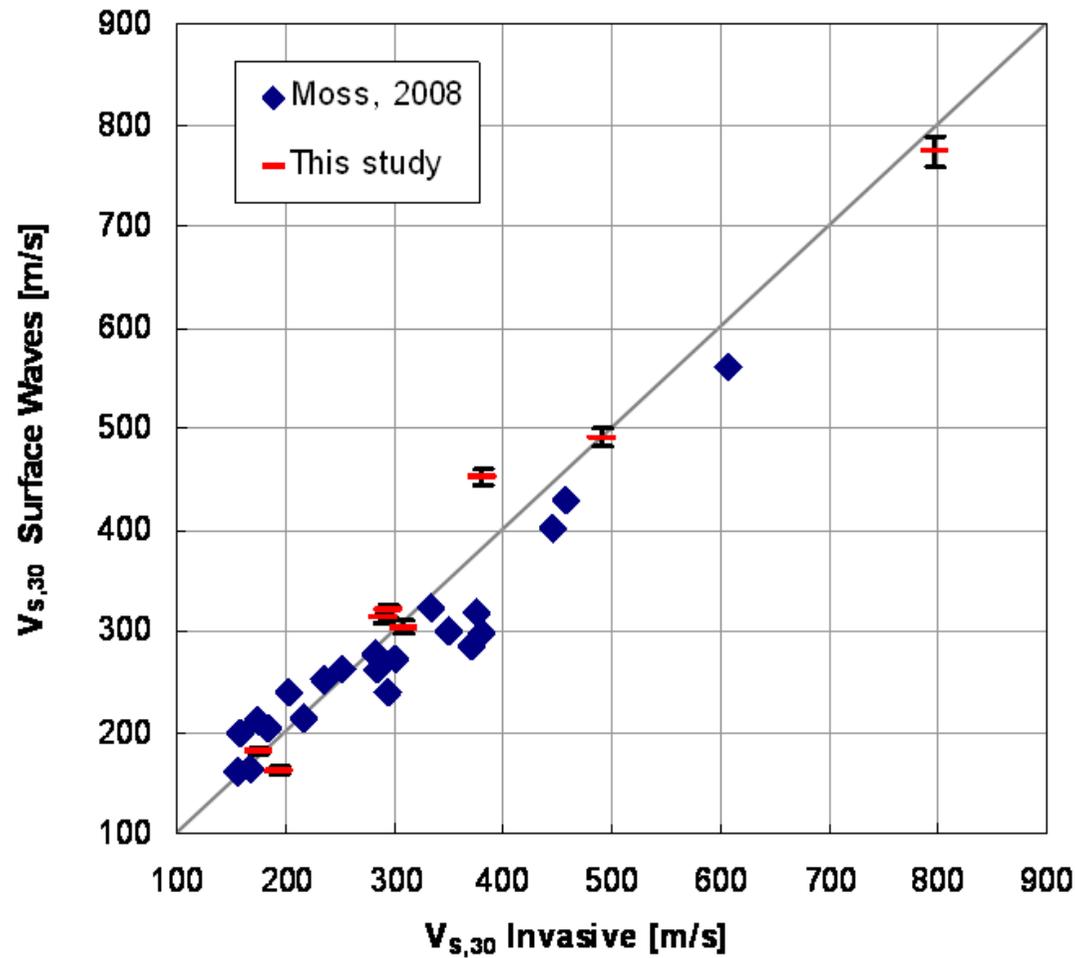


(Foti, 2003)

Confronti con prove in foro



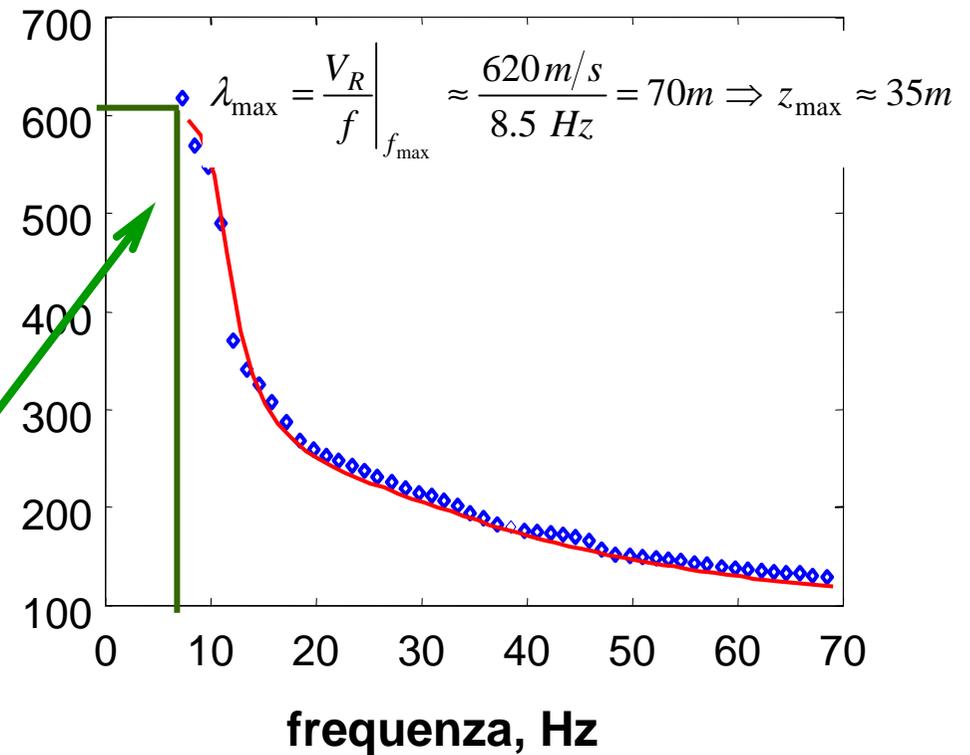
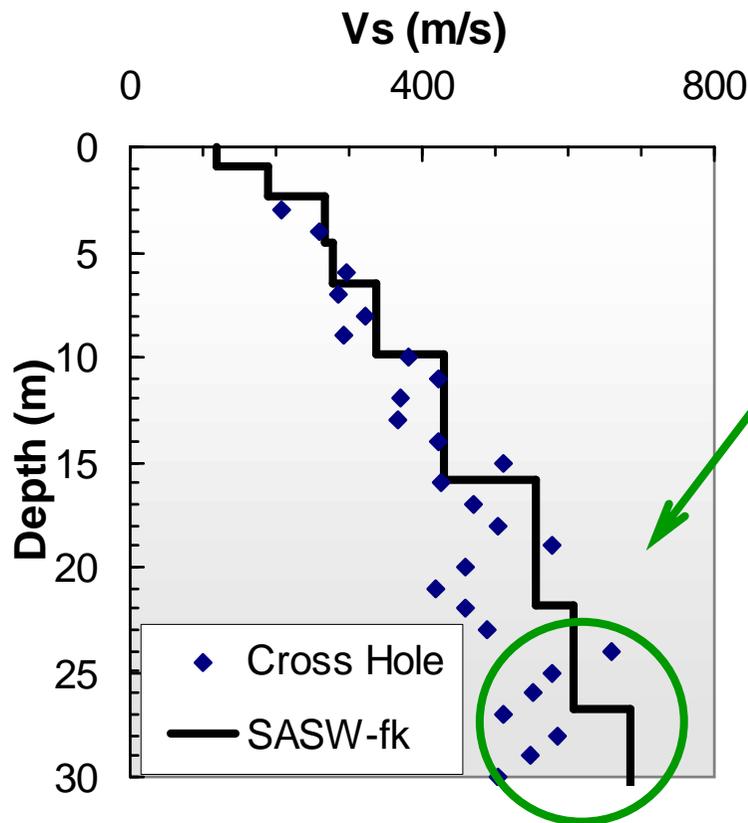
Accuratezza ed incertezza della stima di $V_{s,30}$



(Comina et al., 2010)

Profondità di indagine

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

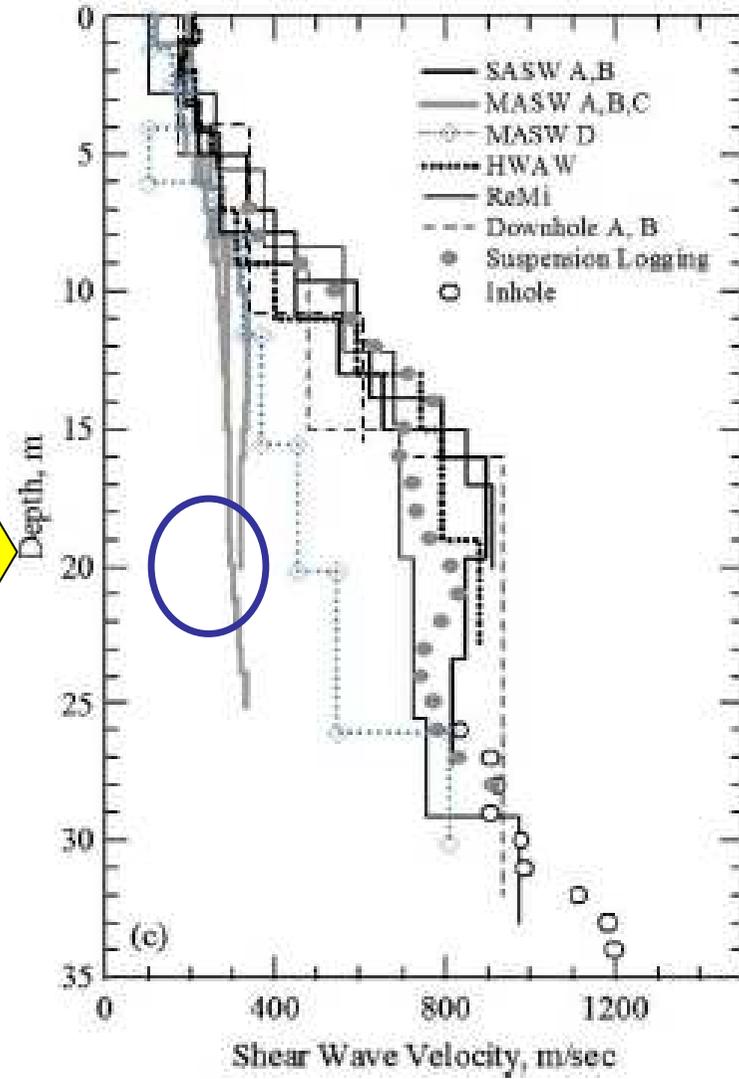
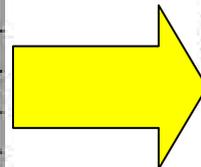
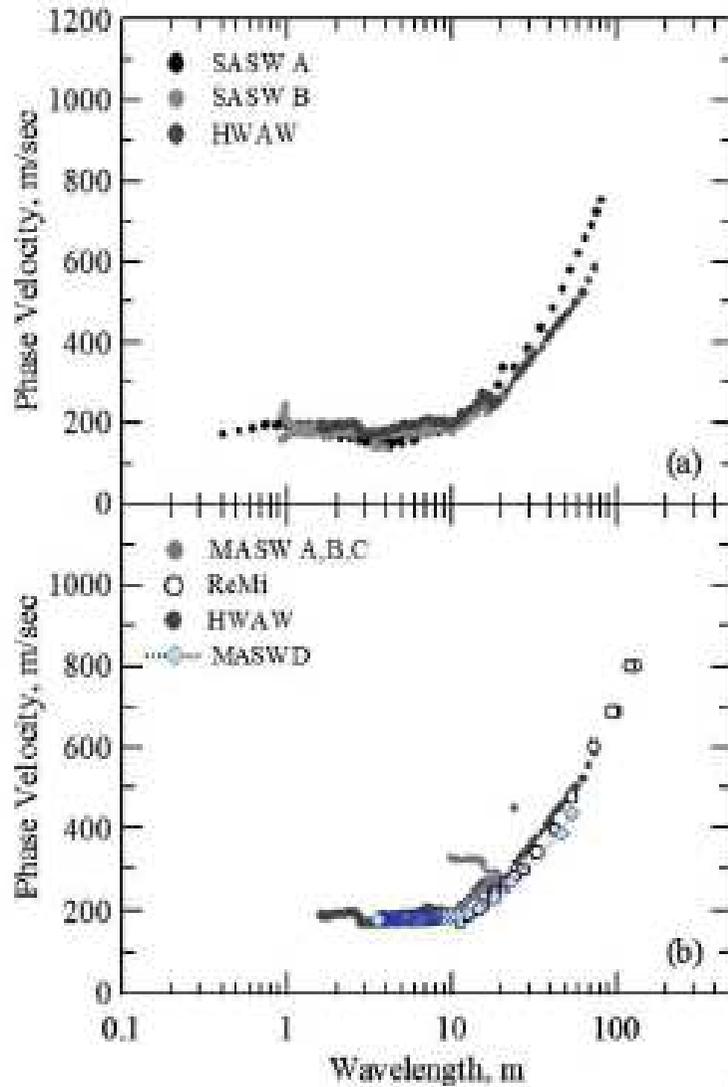


Necessità di sorgenti pesanti (alta energia) per indagini profonde

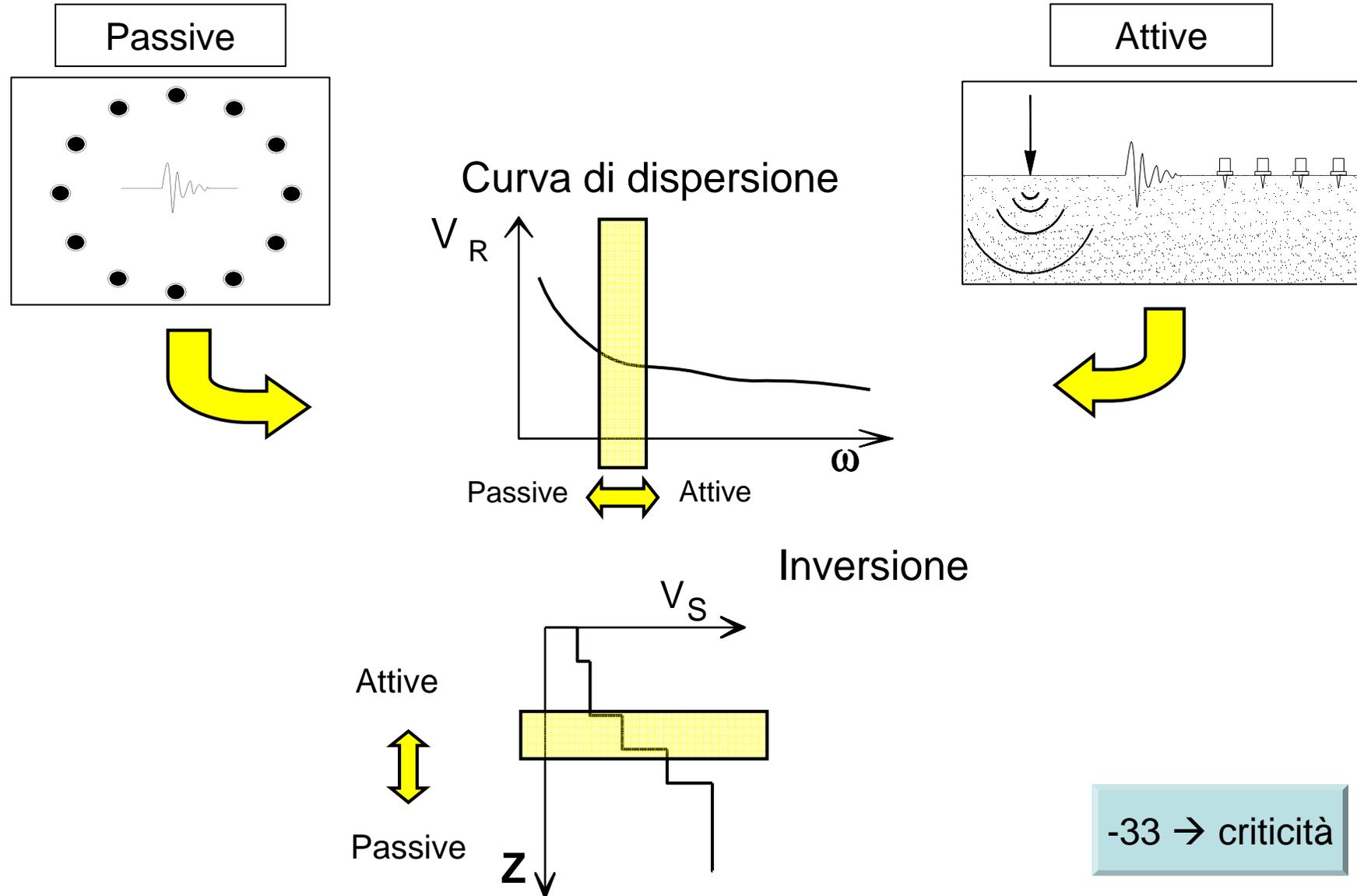
Blind test - Corea

-7 → correlazioni

[Kim et al. 2012]

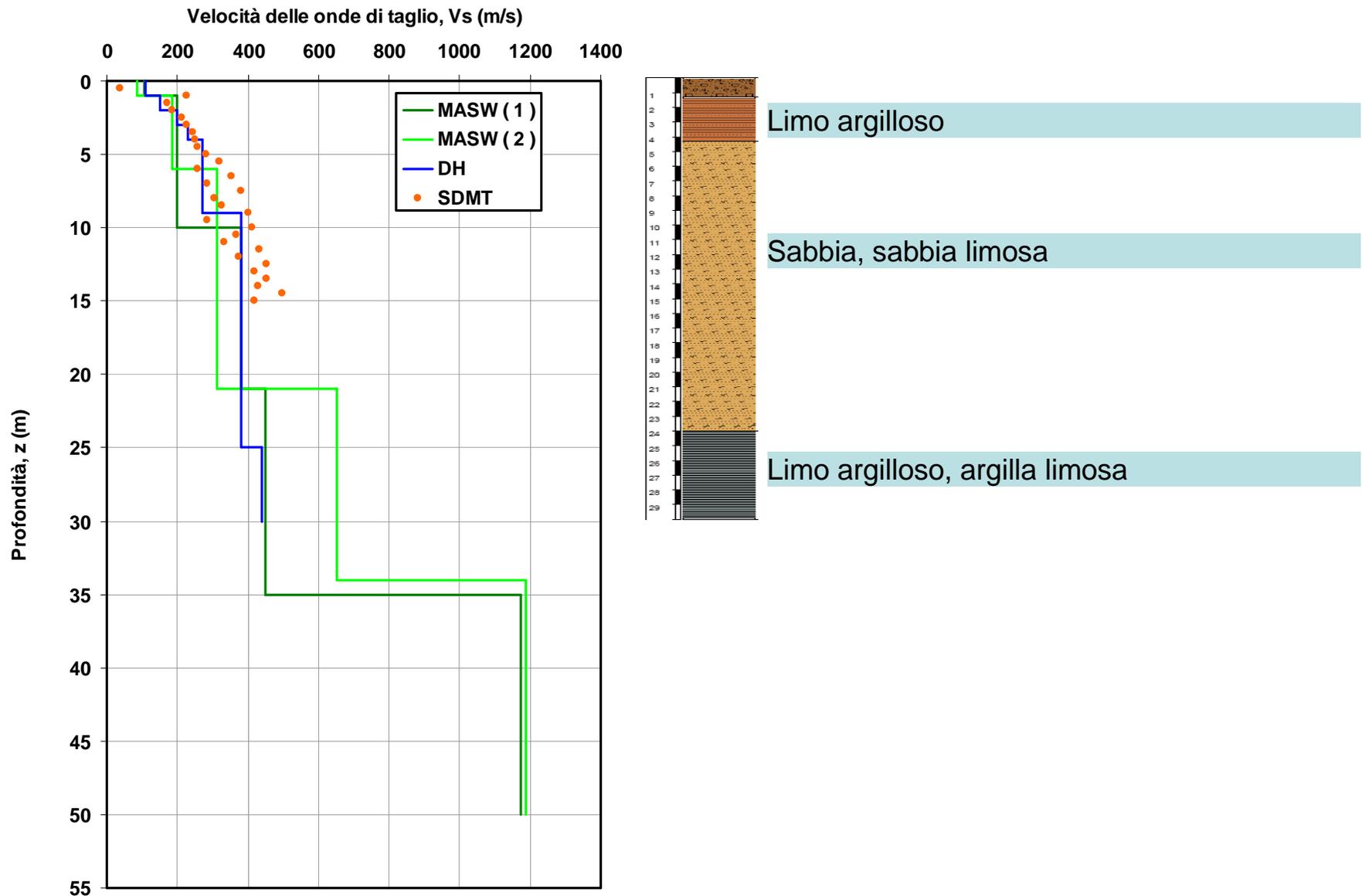


Integrazione Active-Passive



-33 → criticità

PIANOLA – Sondaggio e prove DH - SDMT (maggio 2009)



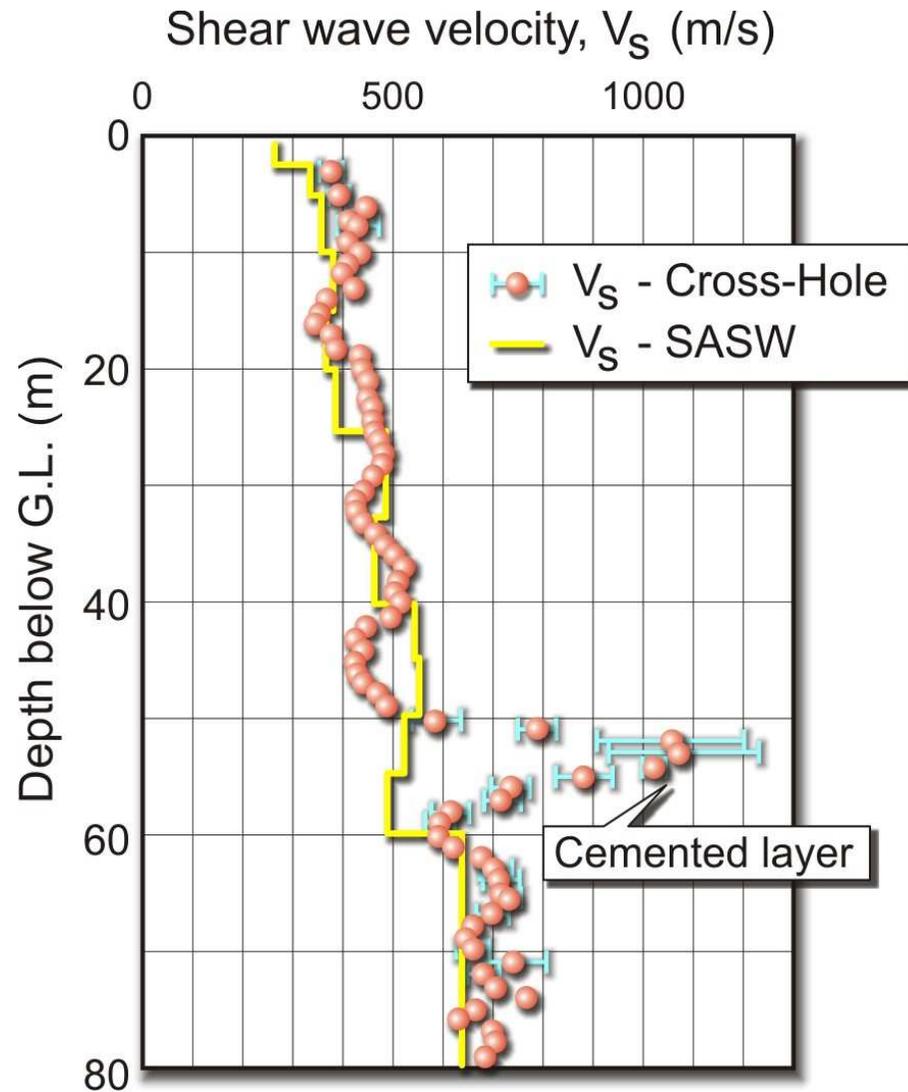
Alcuni aspetti critici nelle prove per onde superficiali

- Risoluzione spaziale (profondità)
- Ipotesi a priori sui parametri di modello
- Non unicità della soluzione
- Influenza dei modi superiori

H/V

end

Risoluzione spaziale delle prove SWM



Prove nelle Ghiaie di Messina
(Ponte sullo Stretto di Messina –
Blocco di ancoraggio lato Sicilia)

(Jamiolkowski et al., 2008)

Alcuni aspetti critici nelle prove per onde superficiali

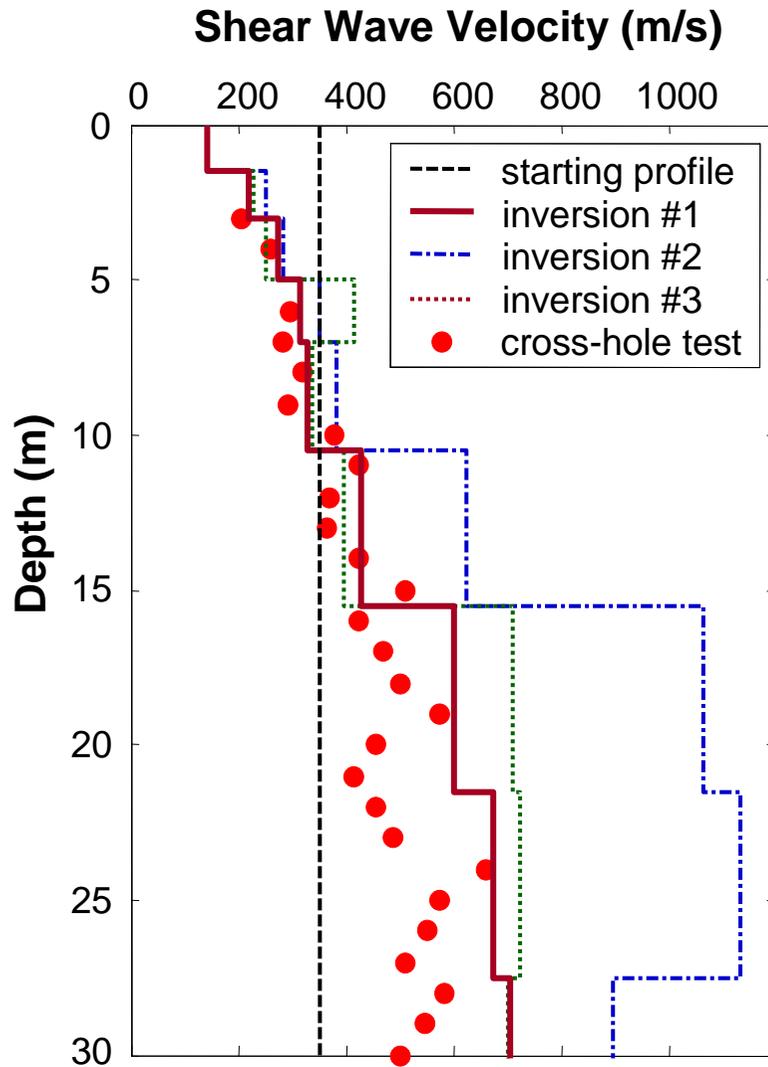
- Risoluzione spaziale (profondità)
- Ipotesi a priori sui parametri di modello
- Non unicità della soluzione
- Influenza dei modi superiori

Influenza della falda

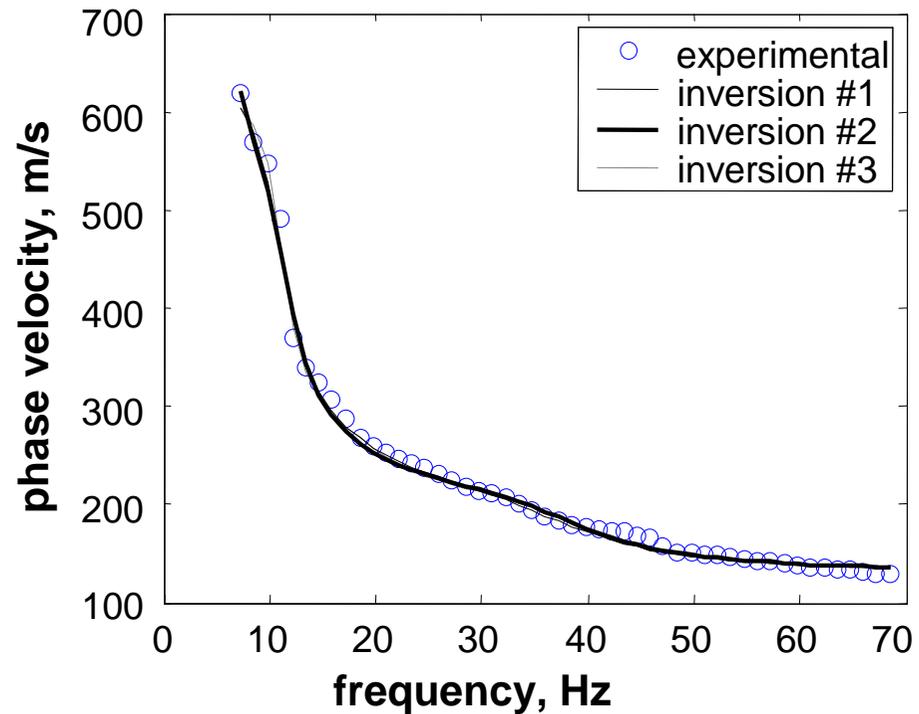
	Dry Soil	Sat Soil	
Poisson Ratio ν	0.1 ÷ 0.3	≈ 0.49	Undrained behavior at low frequency ($f < 100\text{Hz}$) → no volumetric strain
Soil Density	1.2 ÷ 2.0	1.8 ÷ 2.3	Weight of water filling the voids

Incertezze derivanti dalla posizione della falda: esempio

(Foti and Strobbia, 2002)



Hp#1 Water table from P-wave refraction
Hp#2 No water table
Hp#3 Water table deeper than Hp #1

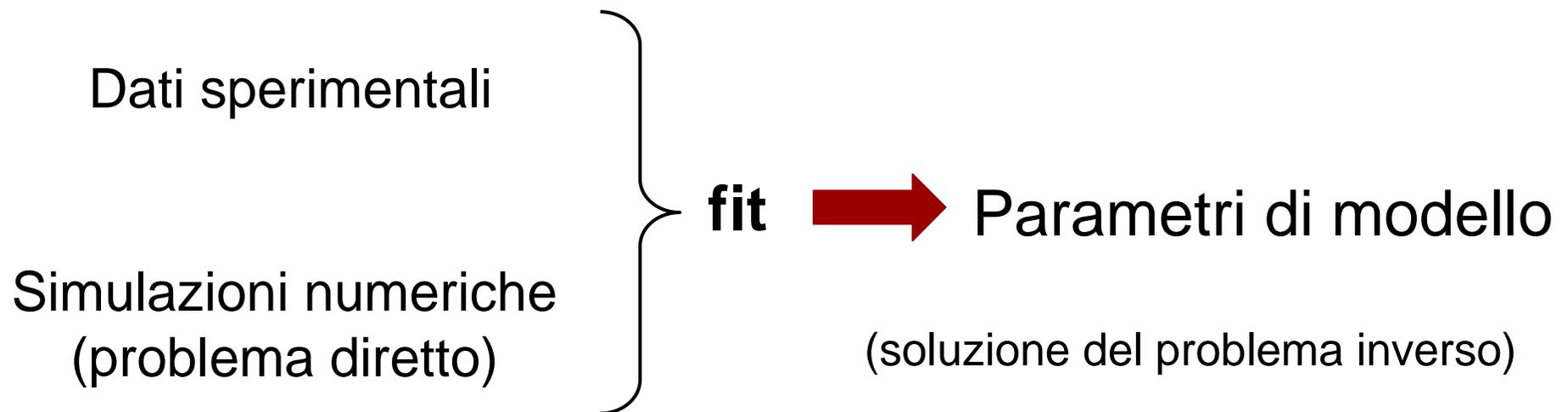


Alcuni aspetti critici nelle prove per onde superficiali

- Risoluzione spaziale (profondità)
- Ipotesi a priori sui parametri di modello
- **Non unicità della soluzione**
- Influenza dei modi superiori

Metodi inversi

Dalle misure lungo un contorno vogliono stimare le proprietà del mezzo



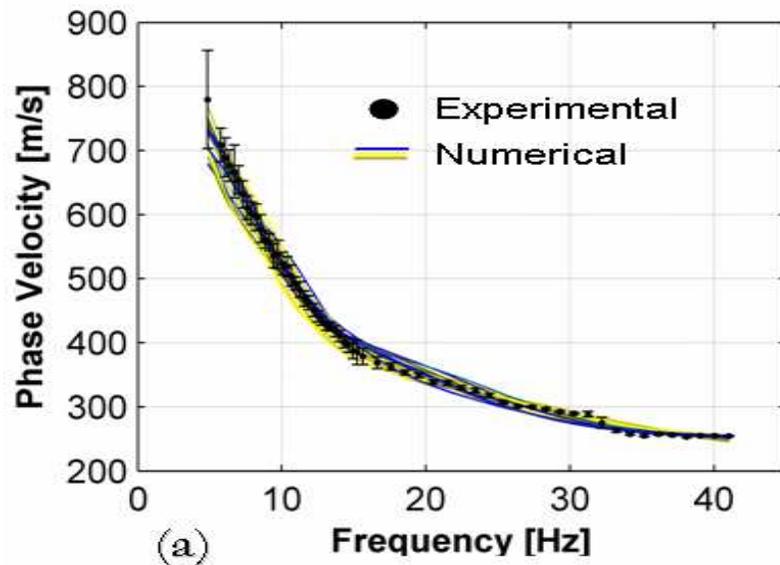
Non-unicità della soluzione

(diversi valori del gruppo di parametri di modello incogniti possono fornire risultati in buon accordo con il dato sperimentale → modelli equivalenti)

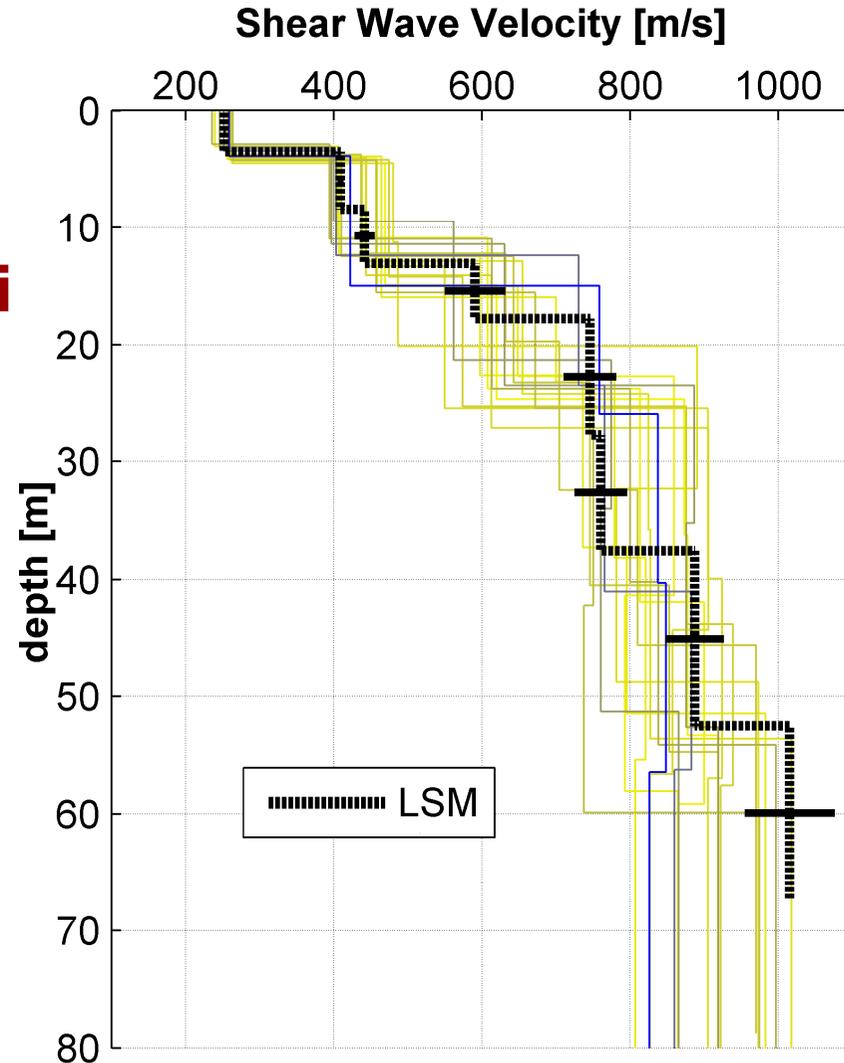
Non unicità della soluzione

Inversione con metodo Monte Carlo

Profili Equivalenti

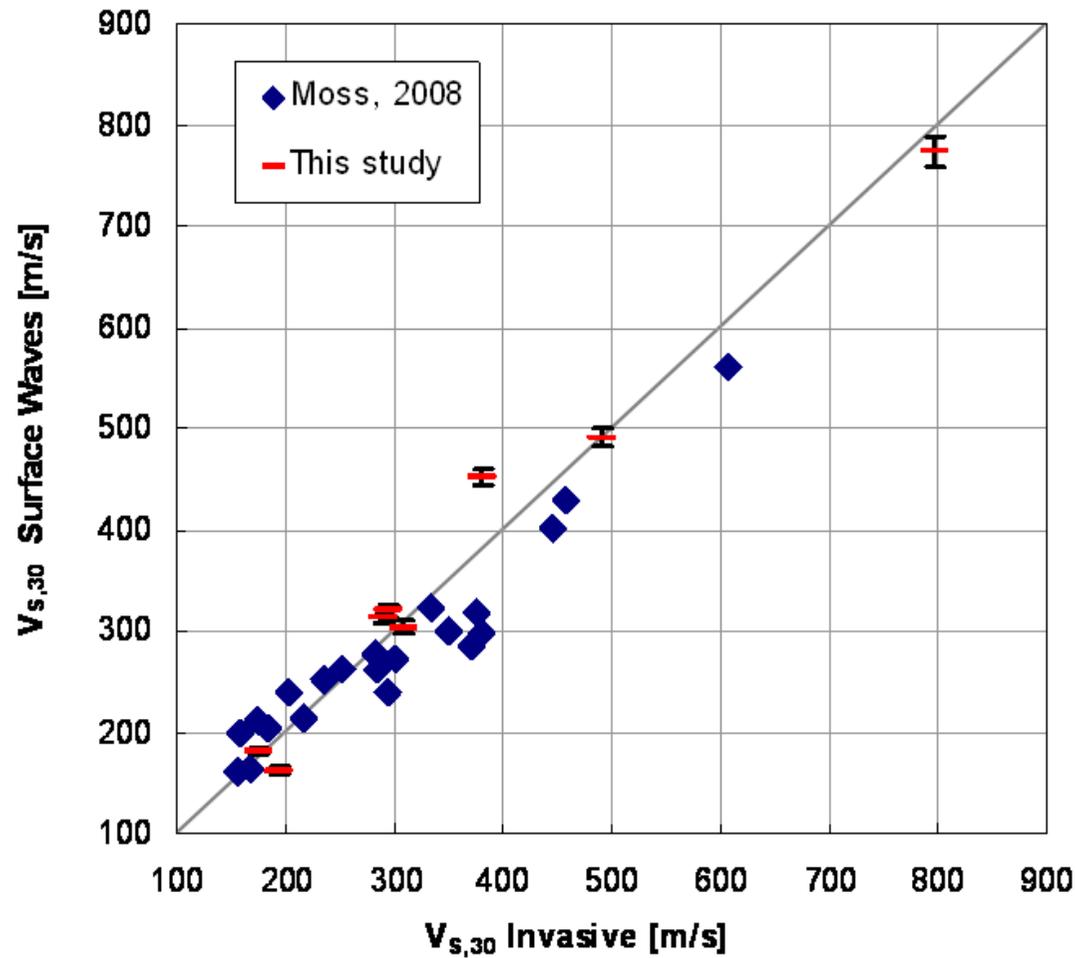


(Foti et al., 2007)



NB informazioni aggiuntive possono aiutare a condizionare meglio la soluzione (p.es. stratigrafia)

Accuratezza ed incertezza della stima di $V_{s,30}$

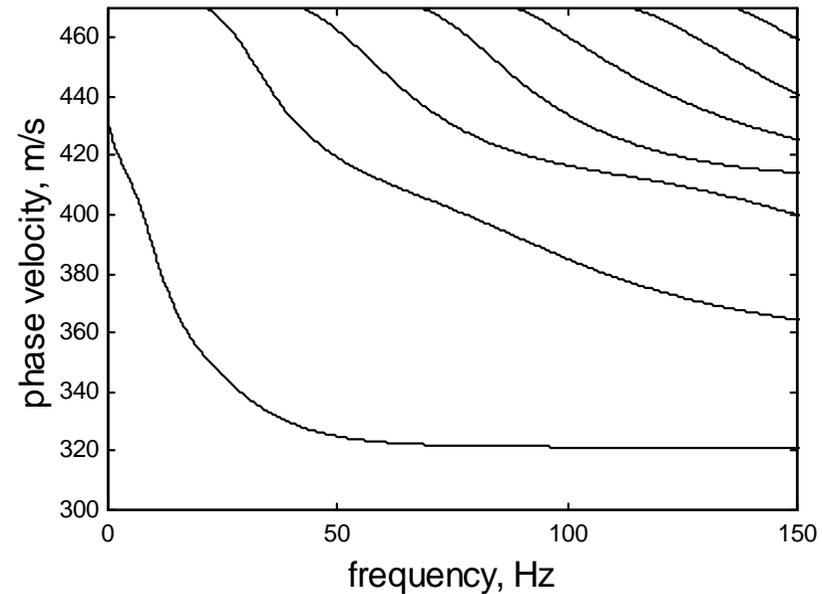
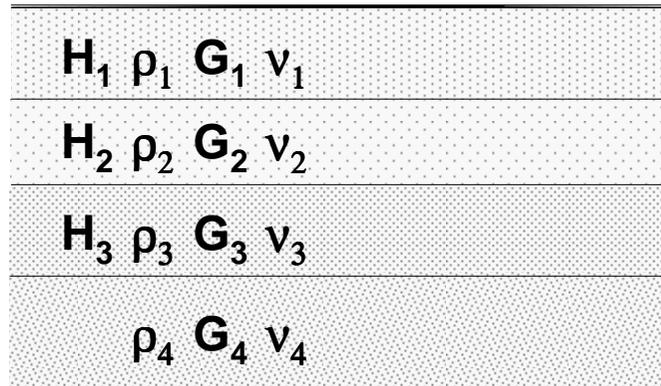


(Comina et al., 2010)

Alcuni aspetti critici nelle prove per onde superficiali

- Risoluzione spaziale (profondità)
- Ipotesi a priori sui parametri di modello
- Non unicità della soluzione
- Influenza dei modi superiori

Influenza dei modi superiori



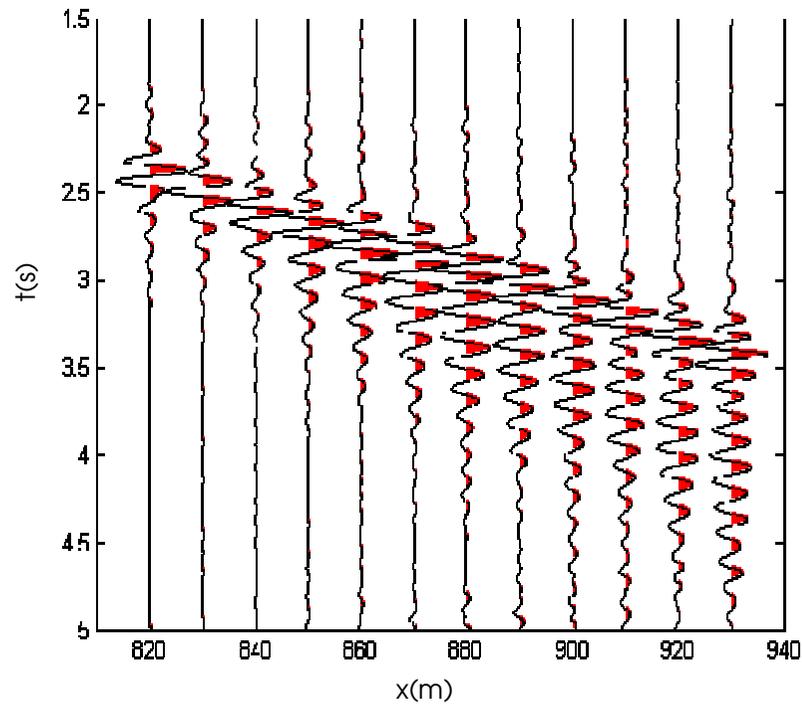
Modi superiori possono spesso essere rilevati nel dato sperimentale, ma è complicato includerli nell'inversione perchè non è semplice identificarli (numerazione)

Spesso il contributo dei modi superiori non è separabile da quello del modo fondamentale (curva apparente), soprattutto per stratigrafie con forti contrasti di impedenza o inversioni di velocità (rigido su soffice).

I modi superiori contengono comunque informazione ed il loro utilizzo può migliorare la soluzione

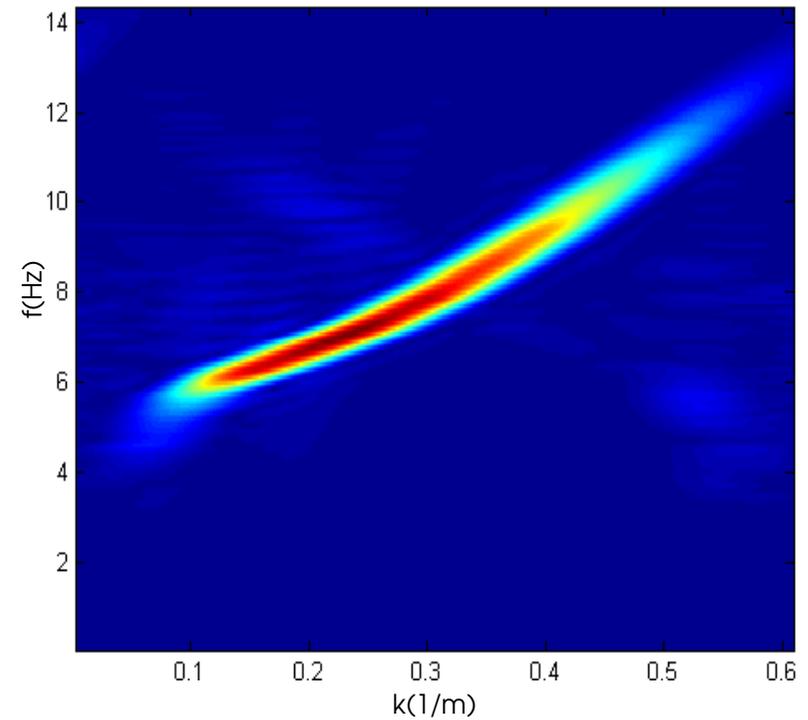
Rilevanza dei modi superiori

Esempio sintetico



Sismogramma

(Maraschini et al., 2010)

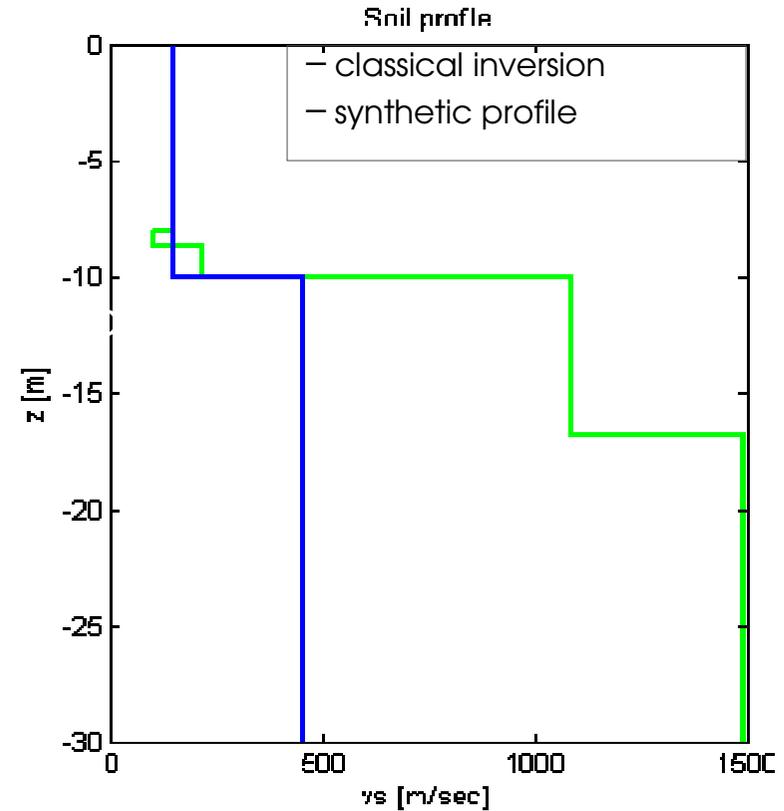
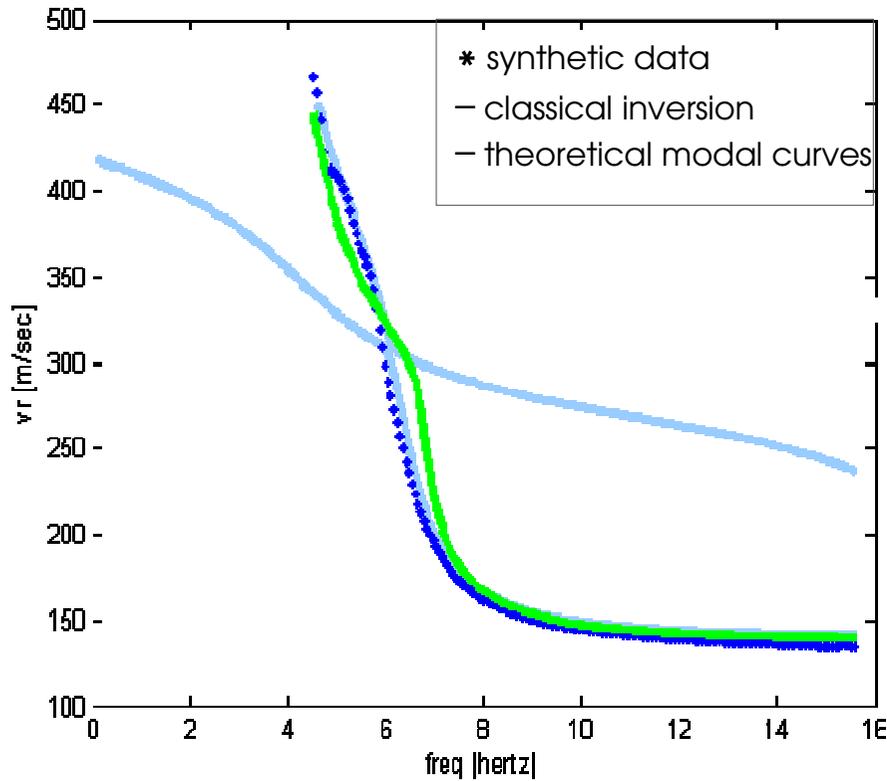


spettro fk

Rilevanza dei modi superiori

Dati sintetici: curva di dispersione apparente

inversione con solo il modo fondamentale

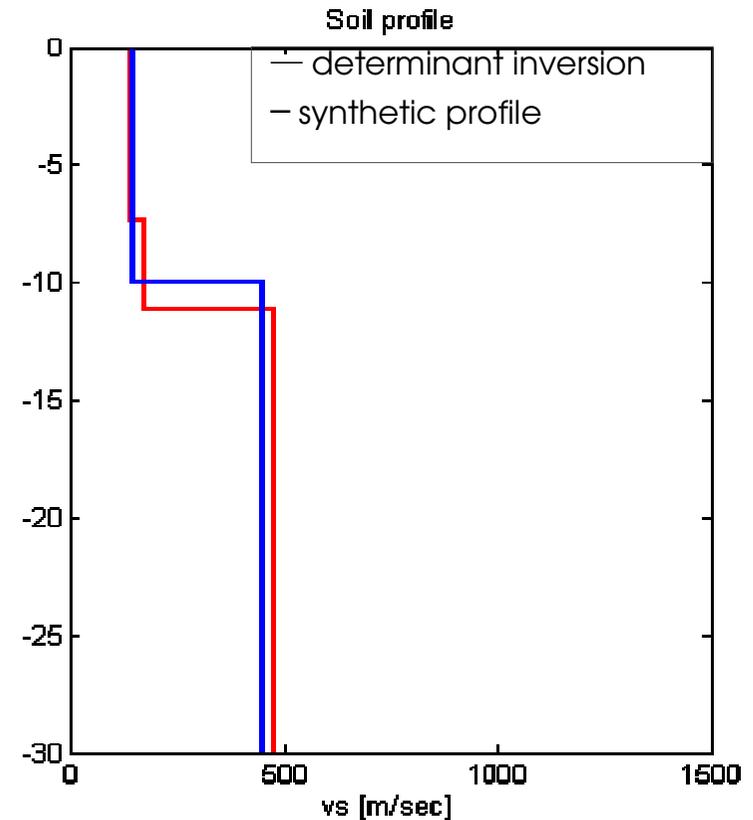
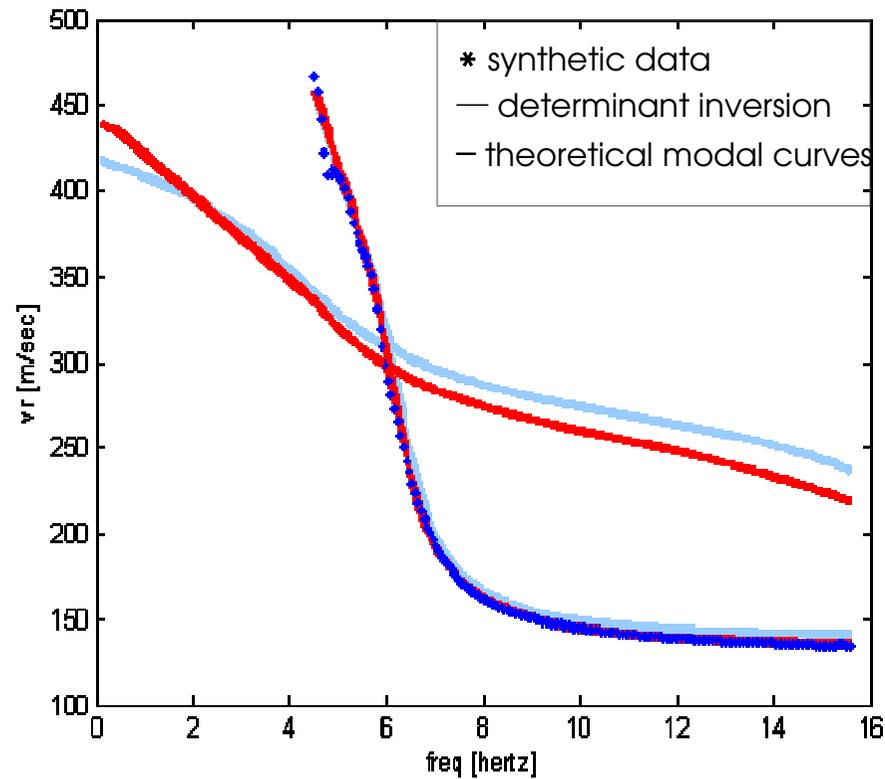


(Maraschini et al., 2010)

Rilevanza dei modi superiori

Dati sintetici: curva di dispersione apparente

inversione multimodale con il metodo del determinante

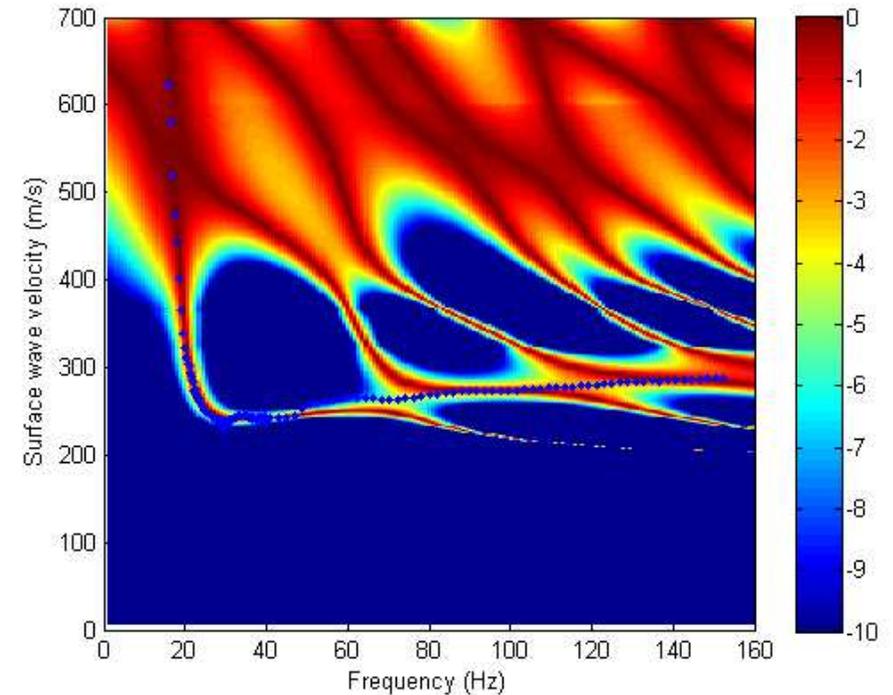
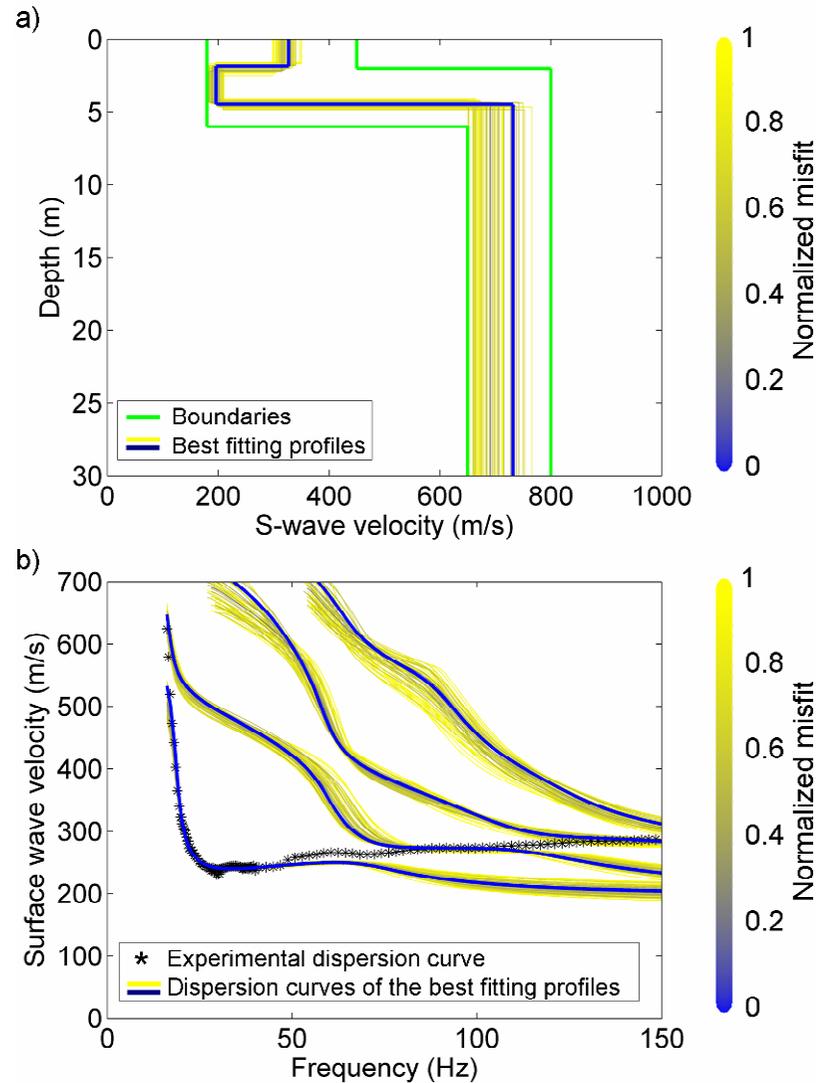


(Maraschini et al., 2010)

Influenza dei modi superiori: inversione multimodale

Metodo Montecarlo

Rete Accelerometrica Nazionale (RAN)
stazione di Sestri Levante

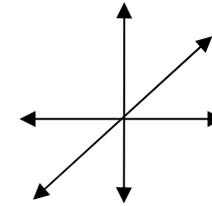


(Maraschini e Foti, 2010)

QC delle prove SWM

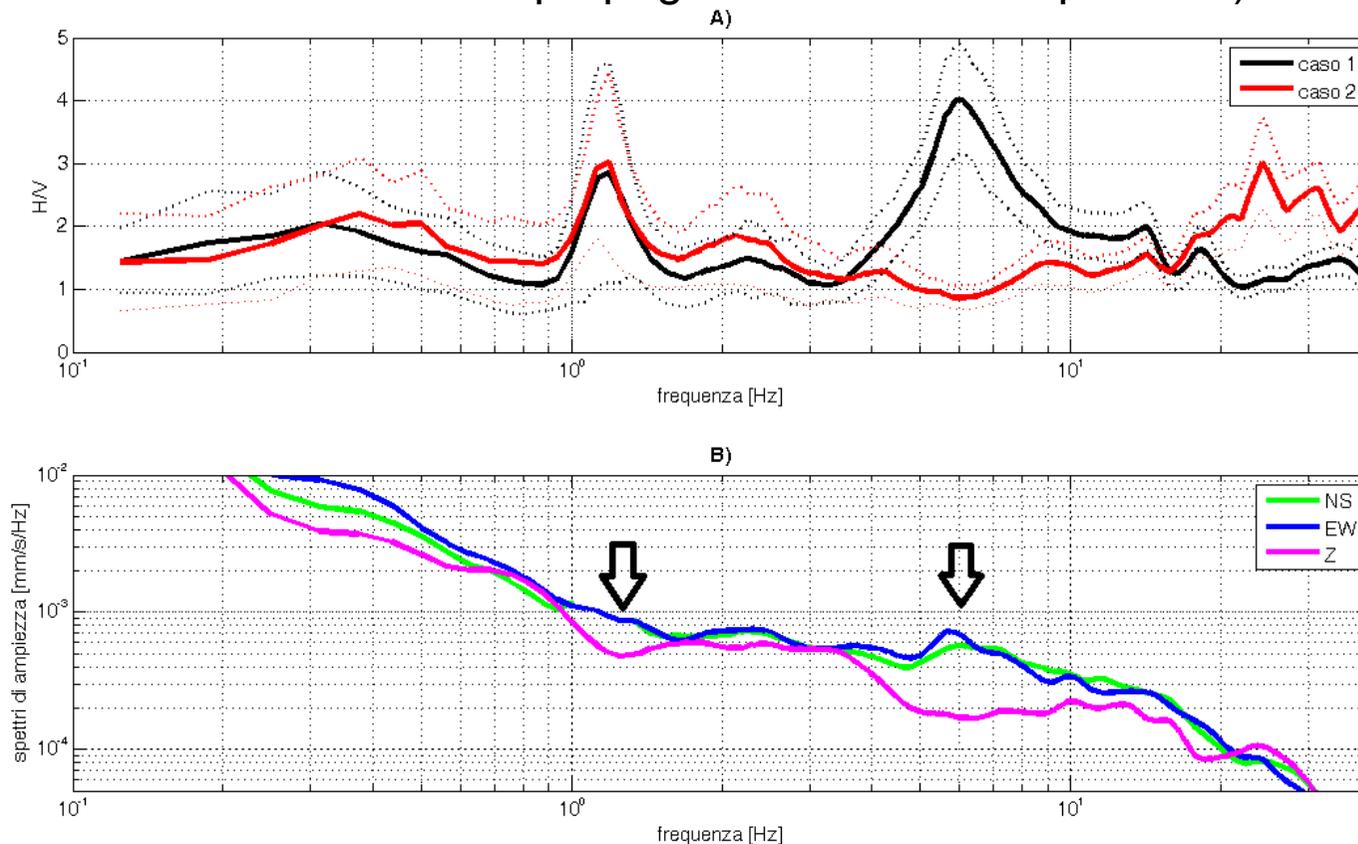
- Assenza marcate irregolarità topografiche e/o stratigrafiche
- Acquisizione
 - Preferire approcci multistation e array 2D per le passive
 - Frequenza naturale dei geofoni (max 4,5Hz)
 - Apertura totale-profondità ($z_{\max} \approx 1/2 L_{\text{stend}}$)
 - Qualità registrazioni
- Processing
 - Verifica dato sperimentale (panel fk)
- Inversione
 - Metodo di inversione (automatico)
 - Congruenza curva dispersione numerica-sperimentale
 - Congruenza profondità raggiunta – intervallo frequenze ($z_{\max} \approx 1/2 - 1/3 \lambda_{\max}$)
 - Modi superiori (se andamento irregolare)

Rapporto spettrale H/V (HVSR)

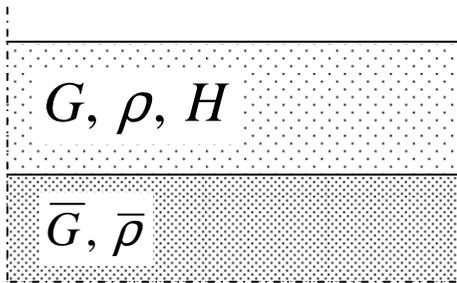
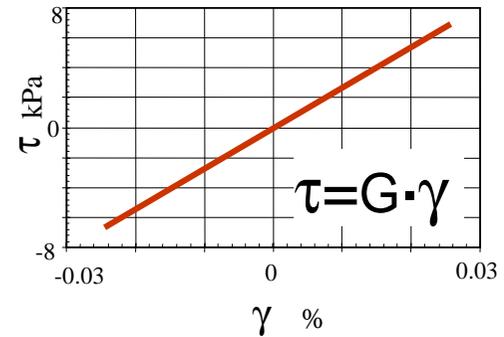


Misure di rumore (sensore 3 componenti)

Rapporto in frequenza tra componente verticale e componente orizzontale
(ellitticità del moto indotto dalla propagazione di onde superficiali)



Risposta sismica locale:
Modello 1D elastico lineare

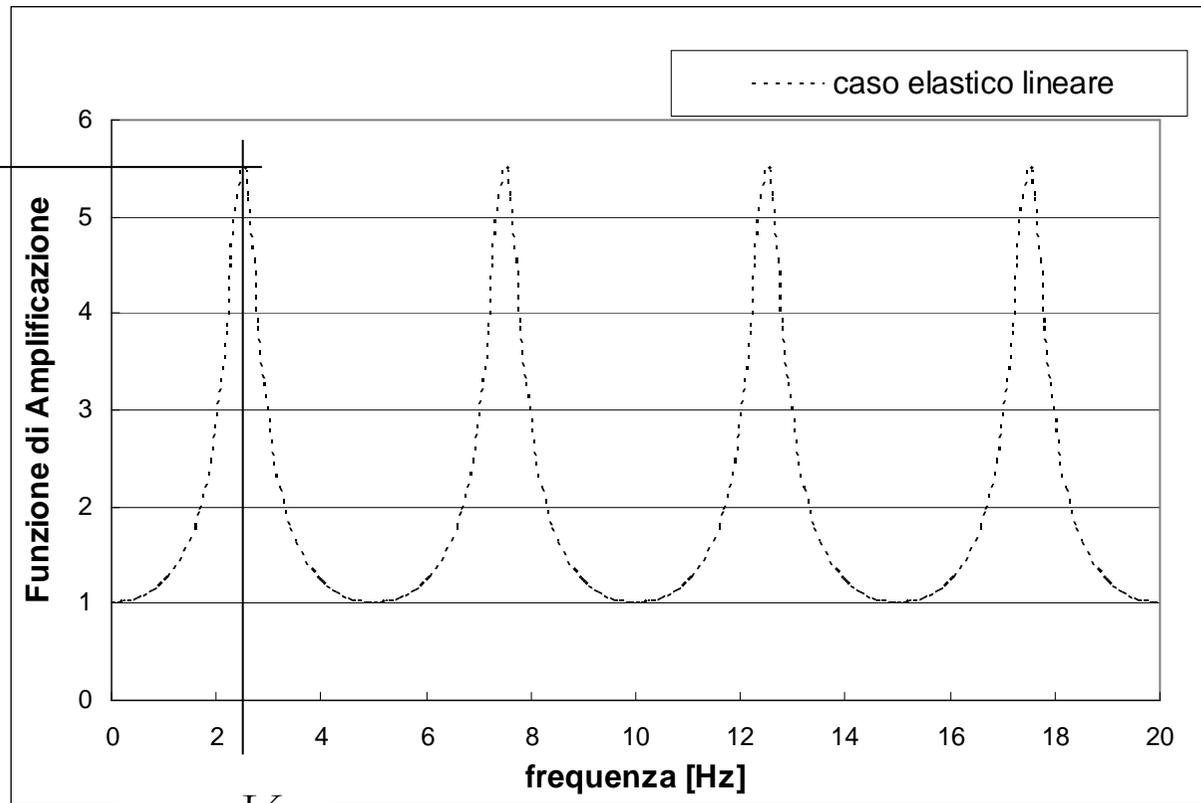


Onda S

$$\alpha_z = \frac{\rho V_s}{\bar{\rho} \bar{V}_s}$$

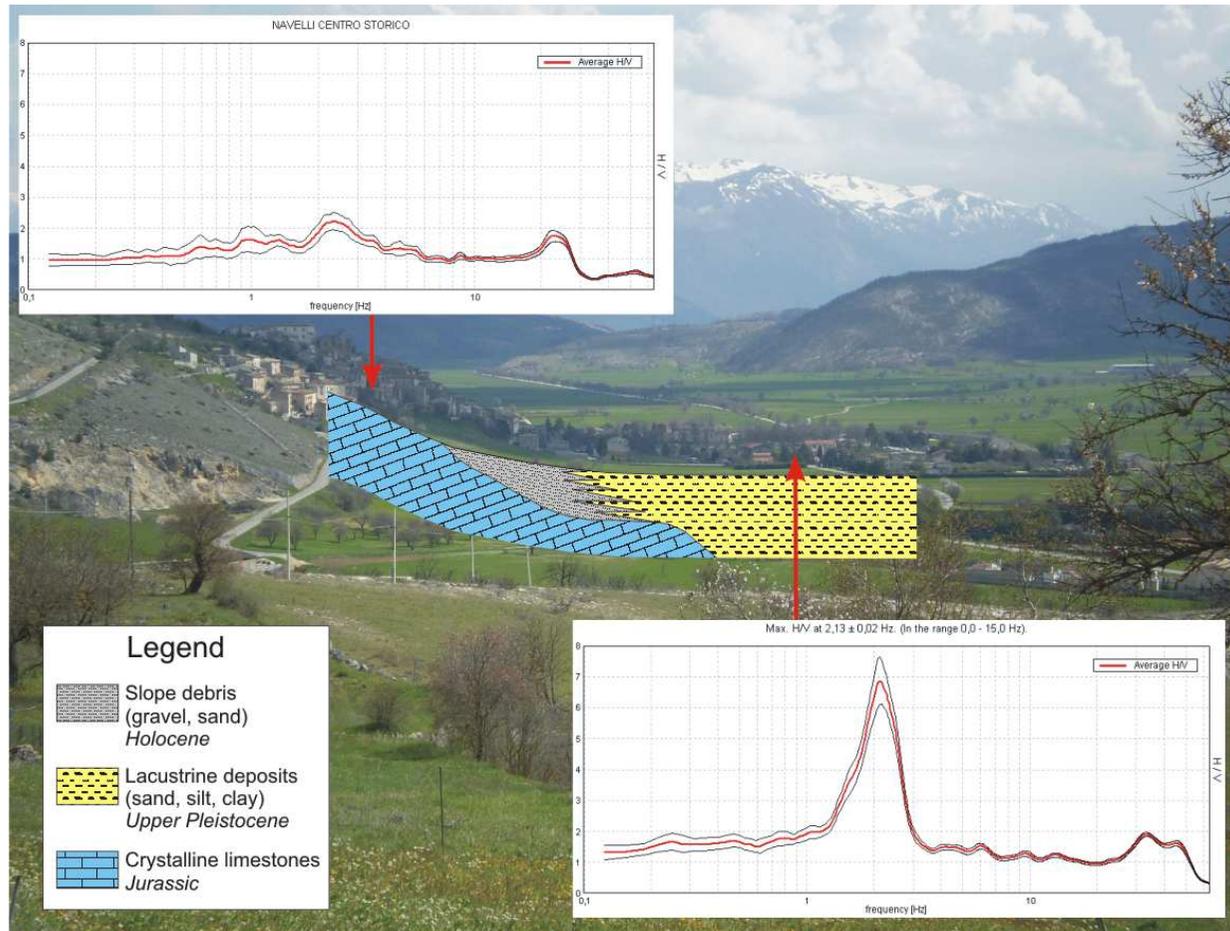
$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \bar{V}_s = \sqrt{\frac{\bar{G}}{\bar{\rho}}}$$

$$\frac{1}{\alpha_z}$$



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

Esempio: Navelli (L'Aquila)

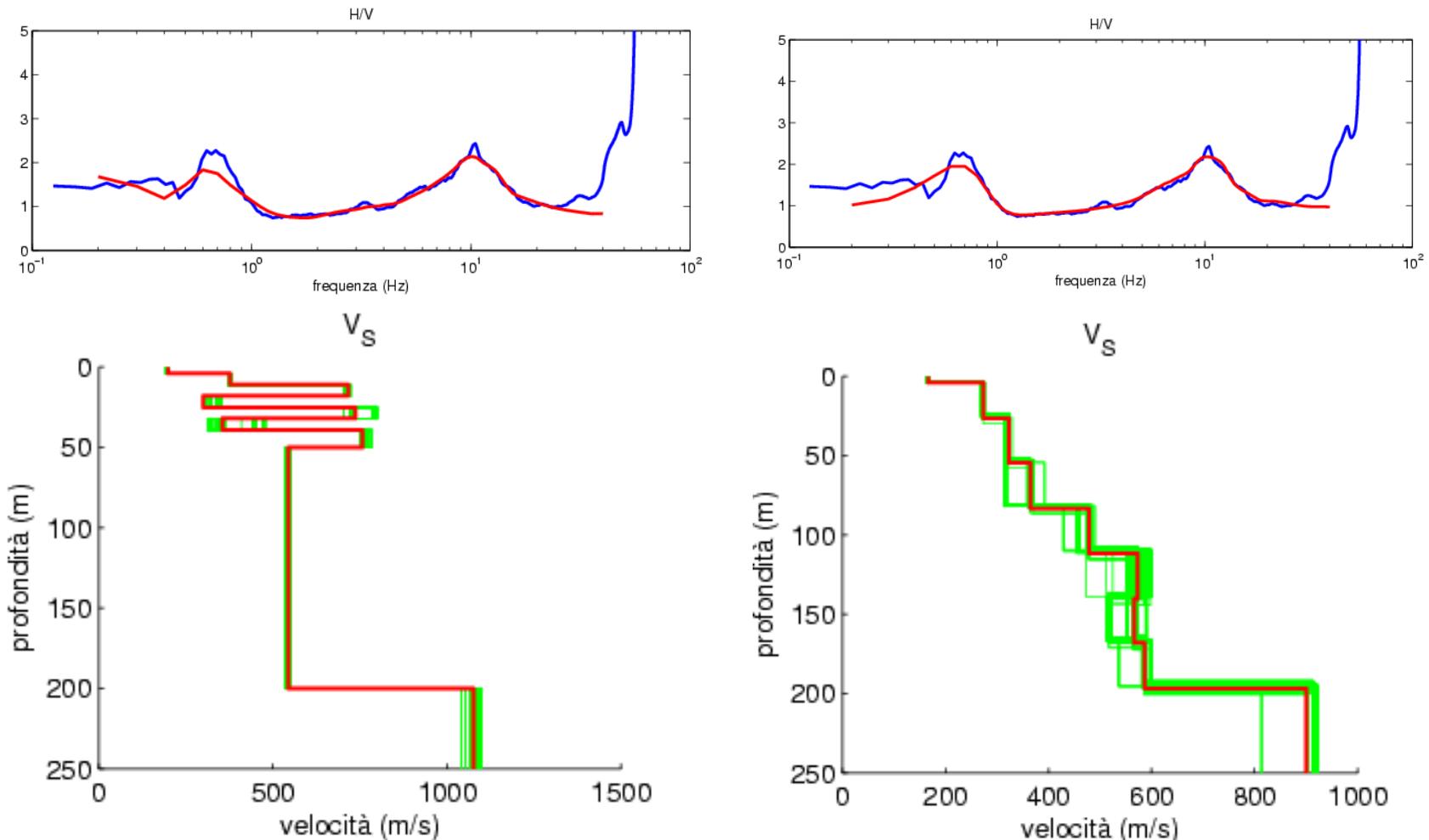


Chiara distinzione tra affioramento roccioso e deposito lacustre

(Albarelli, 2011)

Inversione H/V

Ricostruzione del campo d'onda associato ad una data stratigrafia. Tuttavia queste interpretazioni presentano una marcata molteplicità di soluzioni. Per esempio, ad una stessa curva HVSR possono corrispondere diversi possibili profili di velocità



(Albarelo, 2011)

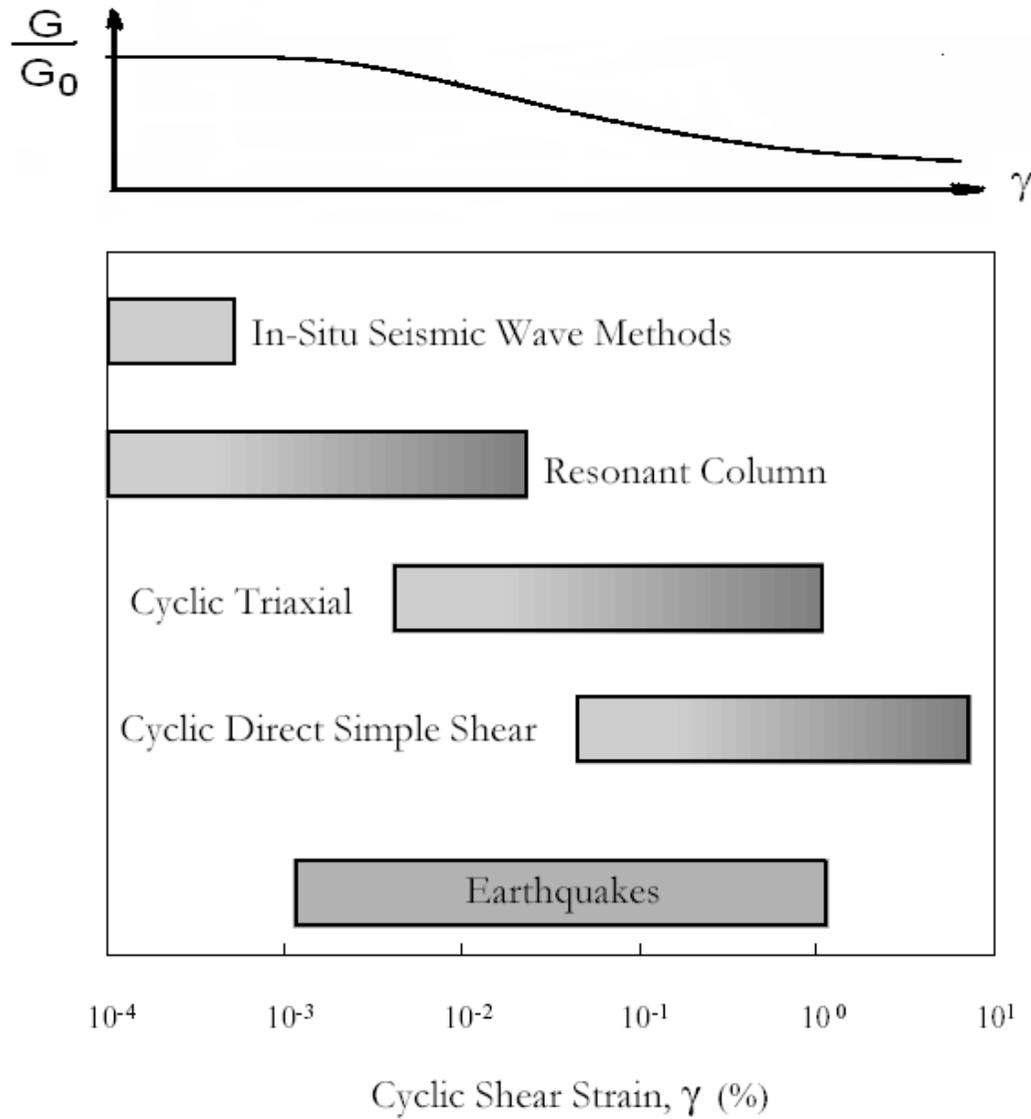
Commenti prove H/V

- Utili per:
 - Valutazione frequenza di risonanza
 - Informazioni aggiuntive per vincolare inversione SWM
 - Valutazione delle variazioni laterali
 - Validazione del modello geotecnico-sismico
 - Studi a scala territoriale
- Poco affidabili per:
 - Valutazione del profilo di V_S
 - Valutazione della $V_{S,30}$

Considerazioni conclusive

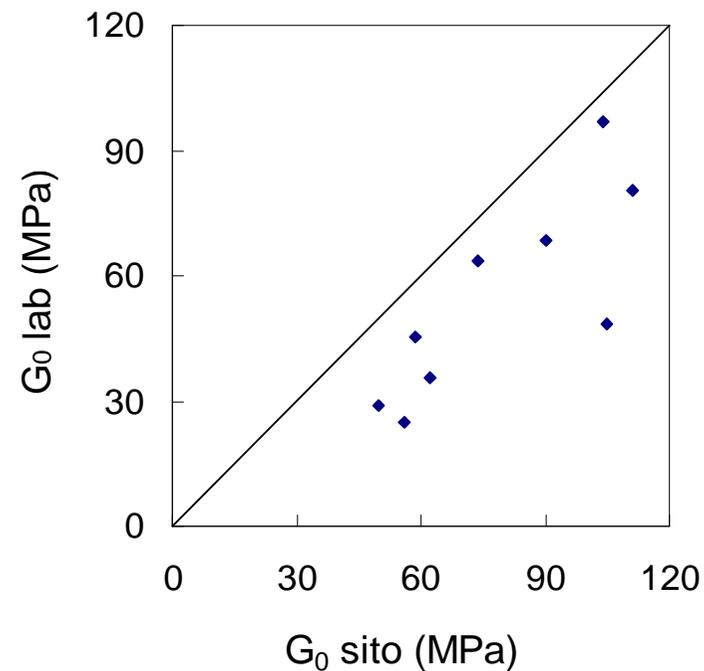
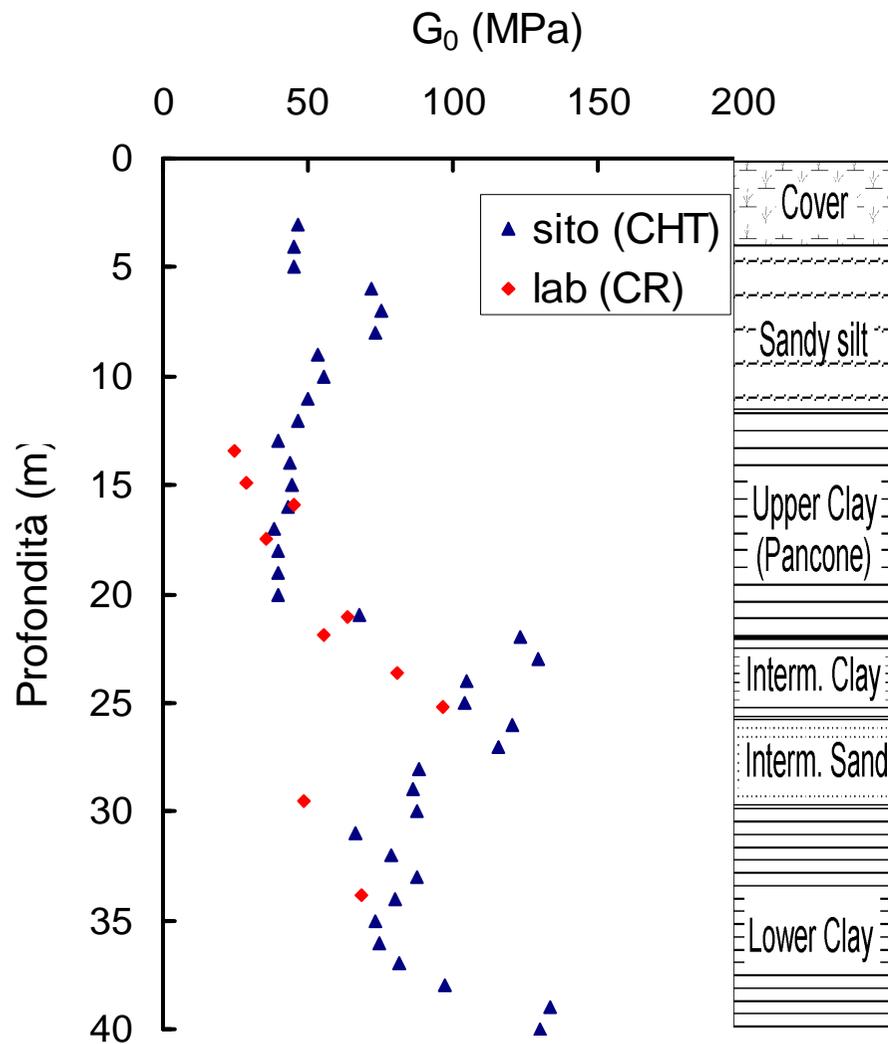
- Pianificazione delle indagini: Selezione dei metodi geofisici
 - Risoluzione
 - Accuratezza
 - Volumi di indagine
 - Limitazioni intrinseche
 - Costi
- Importanza del controllo di qualità
 - Strumentazione
 - Dati sperimentali
 - Procedure di interpretazione
 - Consistenza dei risultati con il sito
- Relazione con le prove in sito

Intervallo di deformazioni per diverse prove



(Ishihara, 1996)

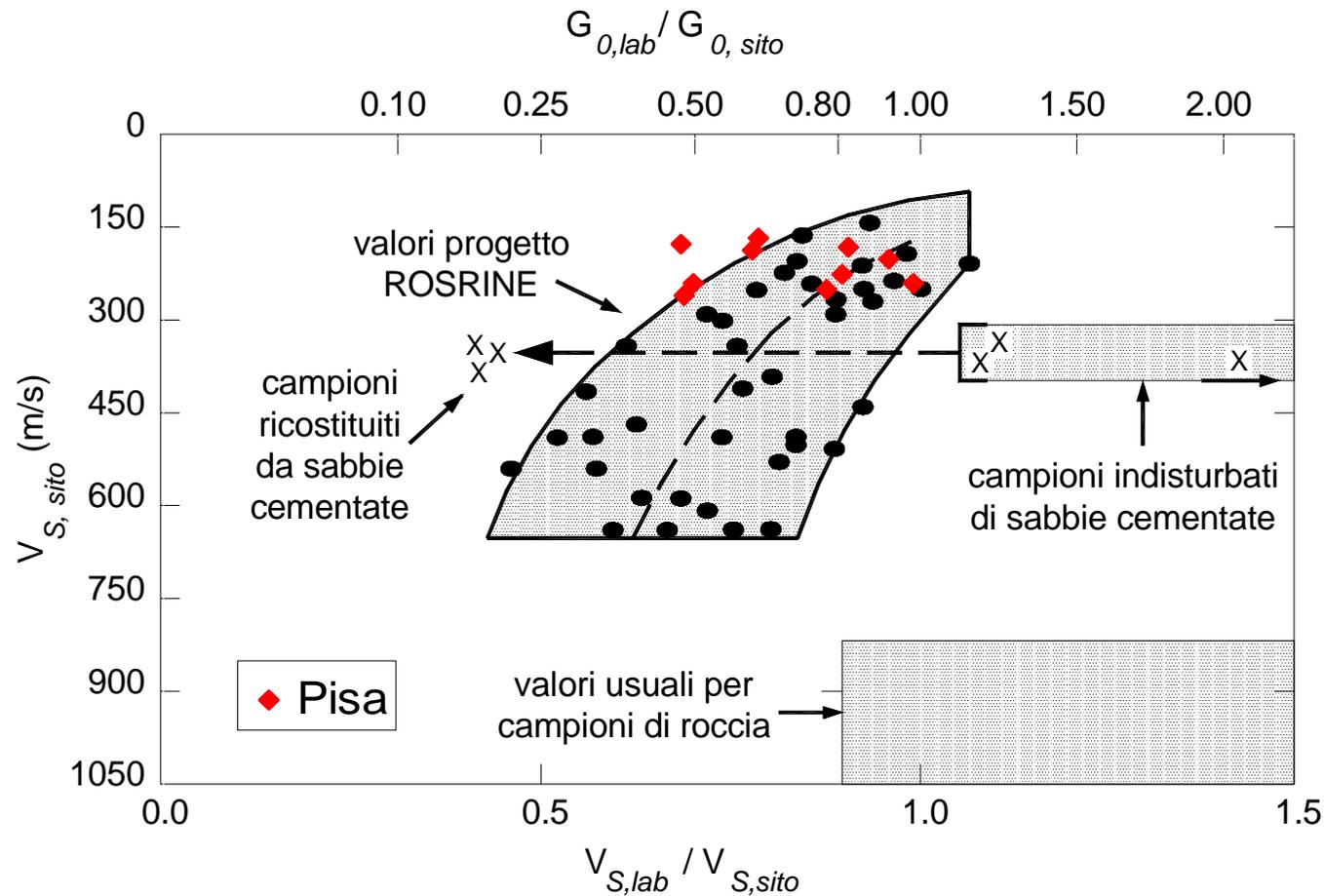
Sito-Lab (Pisa)



$$G_0 = \rho V_S^2$$

(prove Cross-Hole)

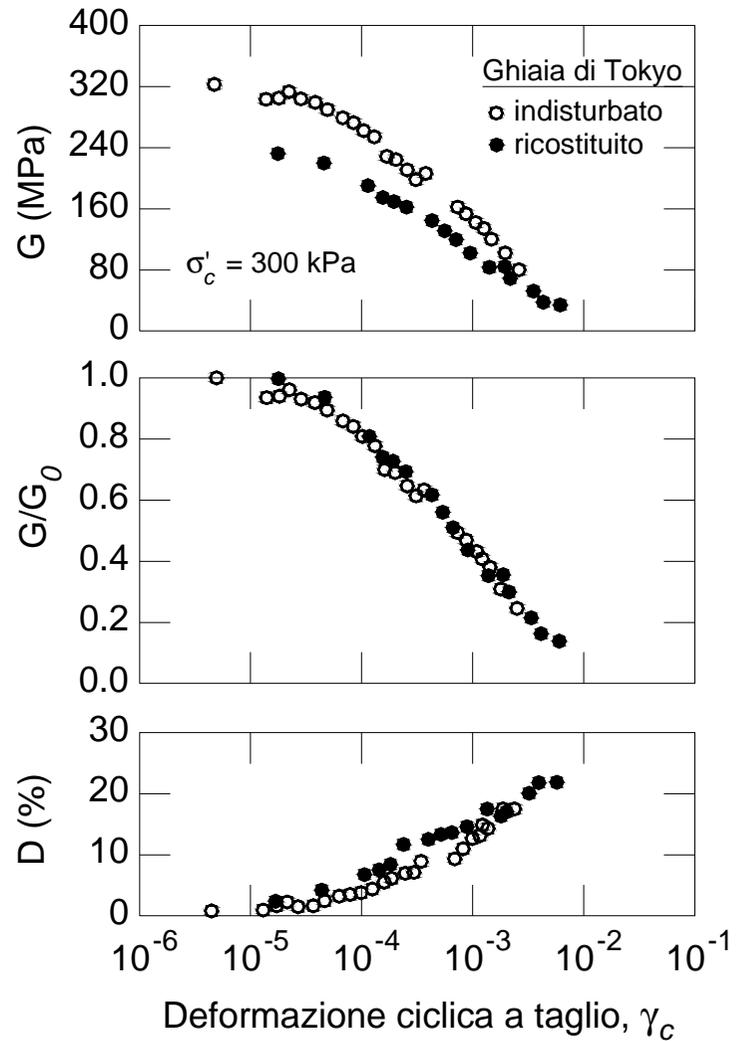
Confronto G_0 sito-lab



$$G_0 = \rho V_S^2$$

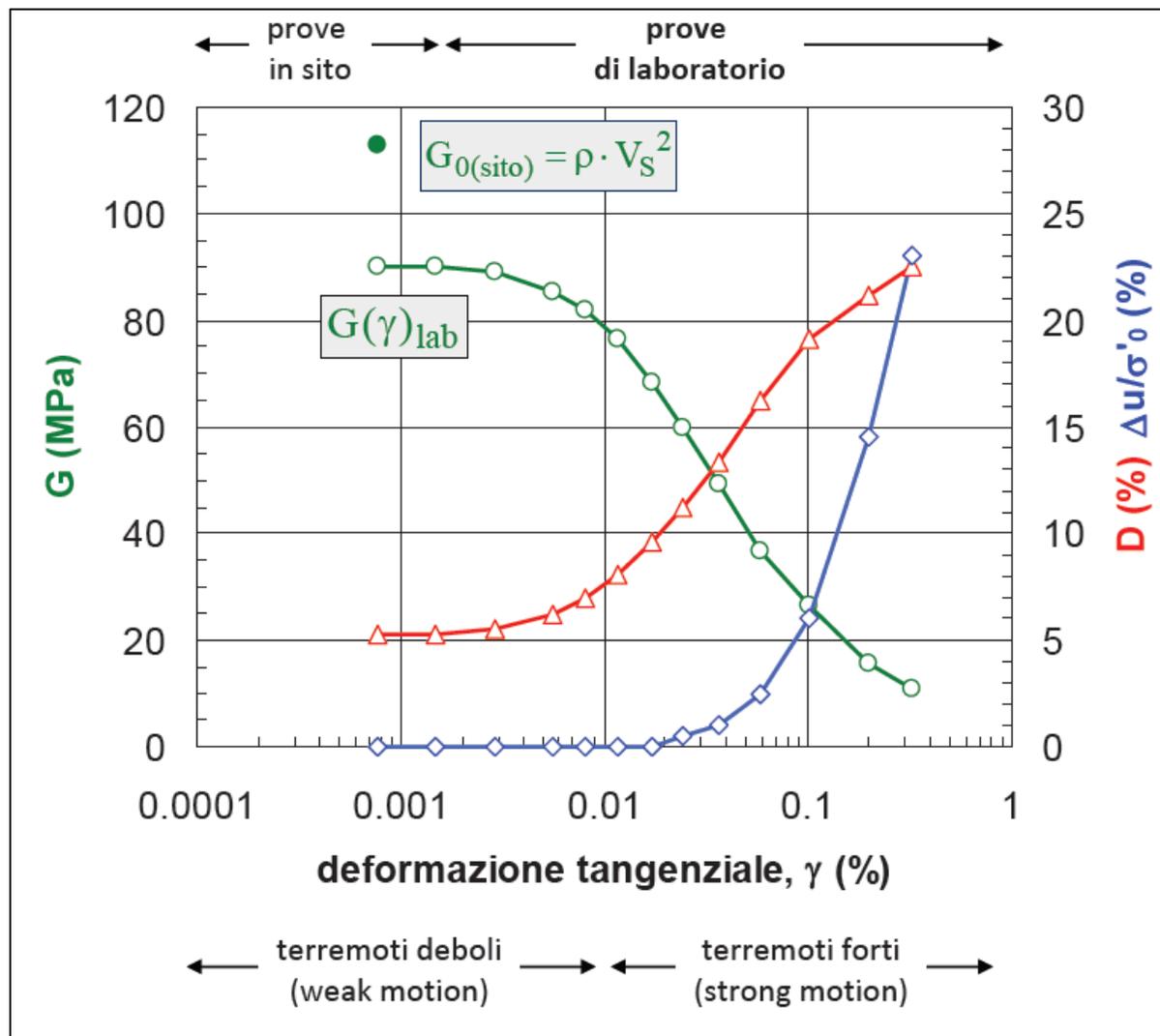
(Stokoe e Santamarina, 2000)

Curve di decadimento - Ghiaie



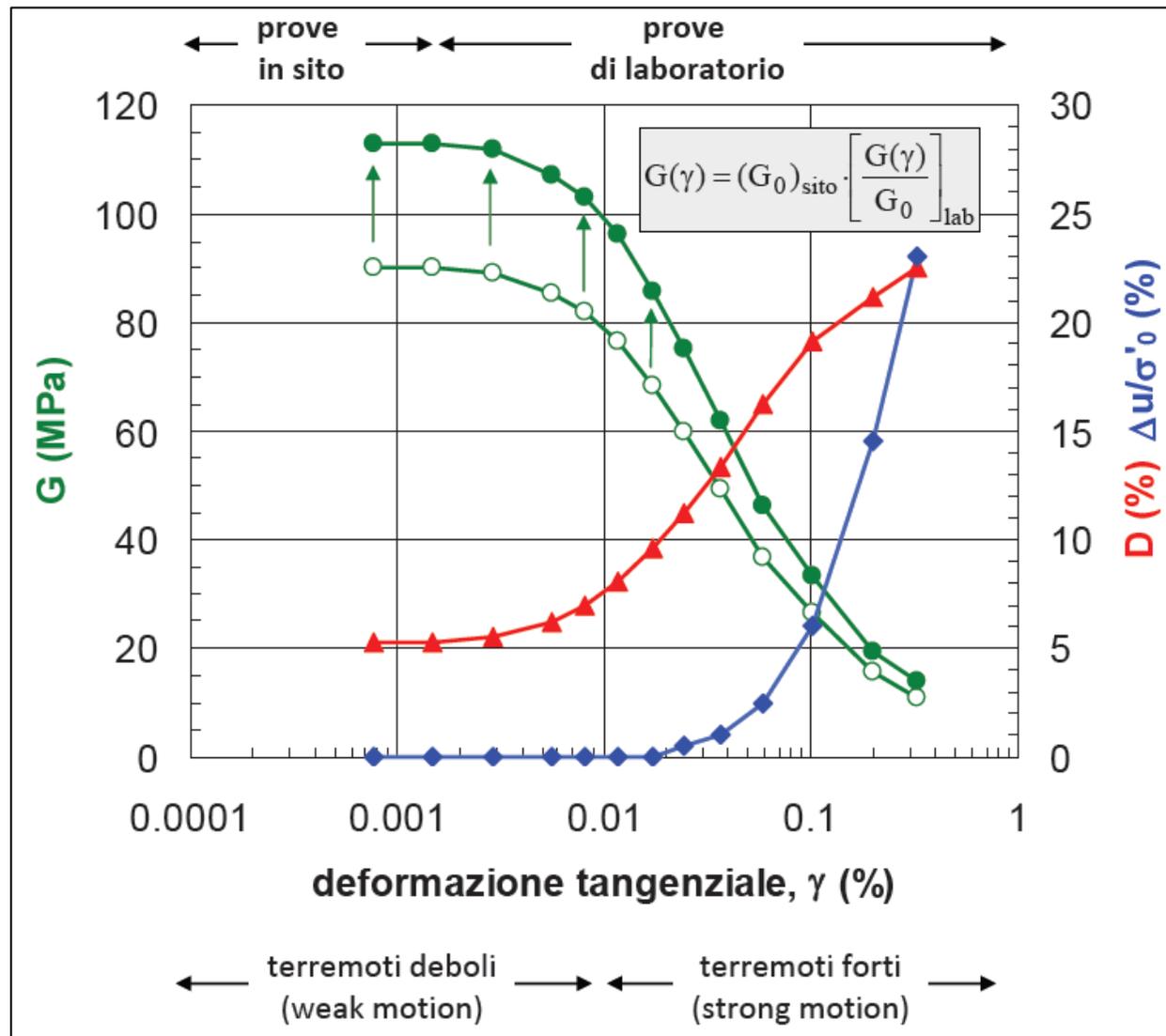
(Hatanata e Uchida, 1995)

Caratterizzazione da prove in sito e di laboratorio



(cortesia del Prof. Francesco Silvestri)

Caratterizzazione da prove in sito e di laboratorio



(cortesia del Prof. Francesco Silvestri)

Fine

Grazie per l'attenzione !

Approfondimenti sulle prove per onde superficiali (MASW & co.):

http://www.soilmech.polito.it/research/surface_waves

Riferimenti Bibliografici

- Foti S. [2007] "Prove sperimentali per la caratterizzazione geotecnica in zona sismica", Atti del Convegno Nazionale Il laboratorio nel mondo delle costruzioni: Evoluzione Storica e Normativa, Firenze, 21 Novembre 2005, supplemento a Quarry and Construction, n.230, Edizioni PEI, Parma, pp.121-134
- Foti S. [2008] "La caratterizzazione geotecnica per la progettazione in zona sismica", Atti delle Conferenze di Meccanica ed Ingegneria delle Rocce, MIR2008, Politecnico di Torino, Patron Ed., Bologna, pp. 71-100
- Foti S., Santucci de Magistris F., Silvestri F., Eva C. [2011] "Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva", supplemento a Ingegneria Sismica, 28 (2), Patron, Bologna, pag. 23-31
- Lai C.G., Foti S., Rota M. [2009] "Input sismico e stabilità geotecnica dei siti di costruzione", Collana di manuali di progettazione antisismica, vol. 6, IUSS Press, Pavia, 312 pp.
- AGI [2005] "Aspetti Geotecnici della progettazione in zona sismica – Linee Guida", Patron Editore, Bologna

Approfondimenti su metodi onde superficiali

Foti S., Parolai S., Albarello D., Picozzi M. (2011) "Application of Surface wave methods for seismic site characterization", *Survey in Geophysics*, 32 (6), 777-825, DOI: 10.1007/s10712-011-9134-2

Socco L.V., Foti S., Boiero D. (2010) "Surface wave analysis for building near surface velocity models: established approaches and new perspectives", *Geophysics*, SEG, 75, A83-A102

Foti S., 2000. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD dissertation, Politecnico di Torino, Italy

Okada, H., 2003. The Microtremor Survey Method. *Geophys*, Monograph Series, SEG, 129 pp.

Tokimatsu K., 1995 Geotechnical Site Characterisation using Surface Waves. *Proc. IS Tokyo 1995*, Balkema, 1333-1368

Stokoe K.H. II, Wright S.G., J.A. Bay, J.M. Roesset., 1994. Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geophysical Characterization of Sites*. R.D. Woods Ed.: 15-25.

Park C.B., Miller R.D., Xia J., 1999. Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics* 64: 800-808

Maraschini M., Ernst F., Foti S., Socco V. (2010) "A new misfit function for multimodal inversion of surface waves", *Geophysics*, 75 (4), 31-43

Maraschini M., Foti S. (2010) "A Monte Carlo multimodal inversion of surface waves", *Geophysical Journal Int.*, 182 (3), 1557-1566

Comina C., Foti S., Boiero D., Socco L.V. (2011) "Reliability of VS₃₀ evaluation from surface waves tests", *Journal of Geotechn. and Geoenviron. Eng.*, ASCE, 137(6), 579-586. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000452