



A.P.C. A.P.C.
Corso di formazione A.P.C.

**INDAGINI GEOFISICHE
NELLE NTC 2008**
dalla
sismologia moderna
alla
moderna sismica applicata

Cenni teorici e principi di buona tecnica per l'esecuzione di indagini MASW e D.H. – Procedure di campo, caratteristiche degli strumenti di misura e dei sensori – interpretazione dati, case history, correlazioni litostratigrafiche e con N_{spt} per la determinazione delle V_{s30}

Ancona - 30 settembre 2010



*Dott. Geol. Gianni Napoleone
Dott. Geol. Dario Gattini*

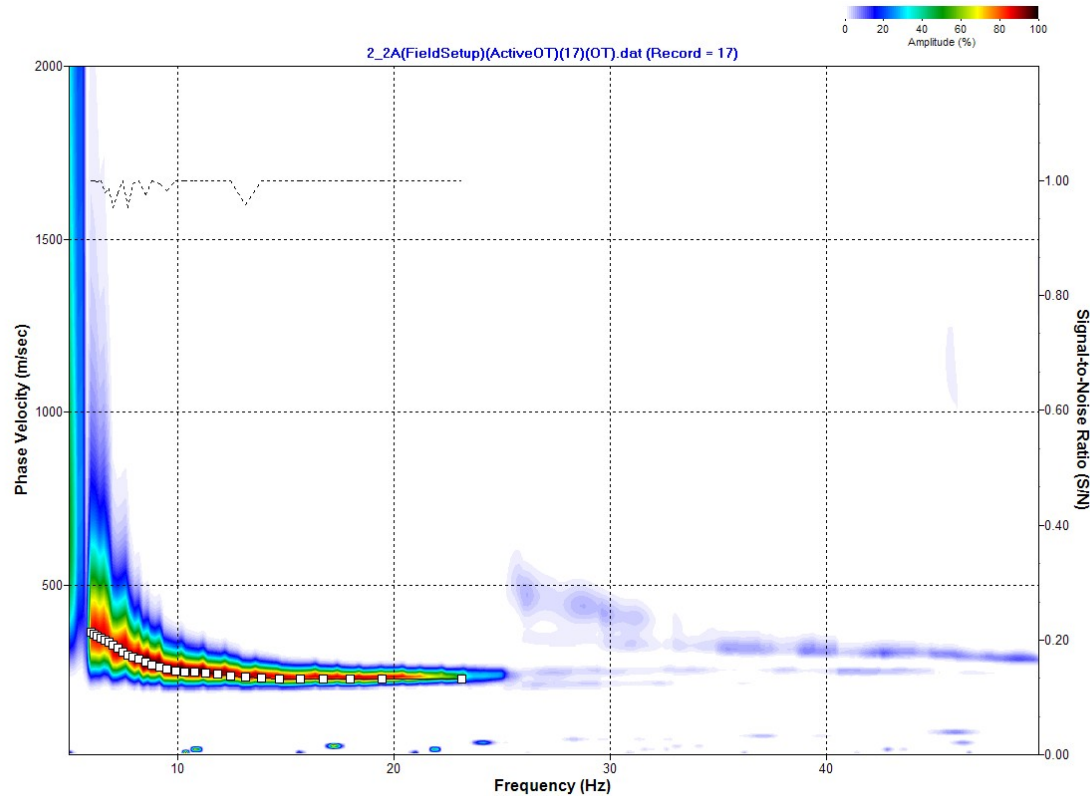
Indagini MASW

Le MASW attive furono pubblicate in Geophysics (Park et al. 1999). In Italia vennero introdotte alcuni anni dopo ed ebbero notevole impulso con l'OPCM 3274/03. Le tecniche MASW, DH – CH sono descritte nei quaderni pubblicati da ASTM americani (vol.33 issue2 march 2010 ; vol.27 issue6 november 2004).

Il metodo MASW (Multichannel Analysis Surface Wave) individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs basandosi sulla misura di onde superficiali. Il contributo delle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh. Il metodo si basa sul fenomeno della dispersività delle O.R. cioè in un terreno stratificato eterogeneo, onde con diversa lunghezza d'onda λ si propagano con diverse velocità di fase v_R o, analogamente, la velocità di fase delle O.R. dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva del fenomeno consente alle onde a bassa frequenza di raggiungere gli strati più profondi, nei quali invece le onde a frequenza più alta si attenuano rapidamente. Nelle MASW attive si ottengono velocità di fase (sintetizzate dalla curva di dispersione apparente) comprese nel range 5 – 70 Hz in grado di dare informazioni nei primi 30-50 m di profondità, in funzione della rigidità del suolo.



Indagini MASW



Alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, la velocità di fase tende asintoticamente alla velocità dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità. La curva di dispersione (sperimentale) ottenuta dalla misura delle onde di Rayleigh, funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo, viene utilizzata per un processo inverso che conduce al profilo di velocità di Vs

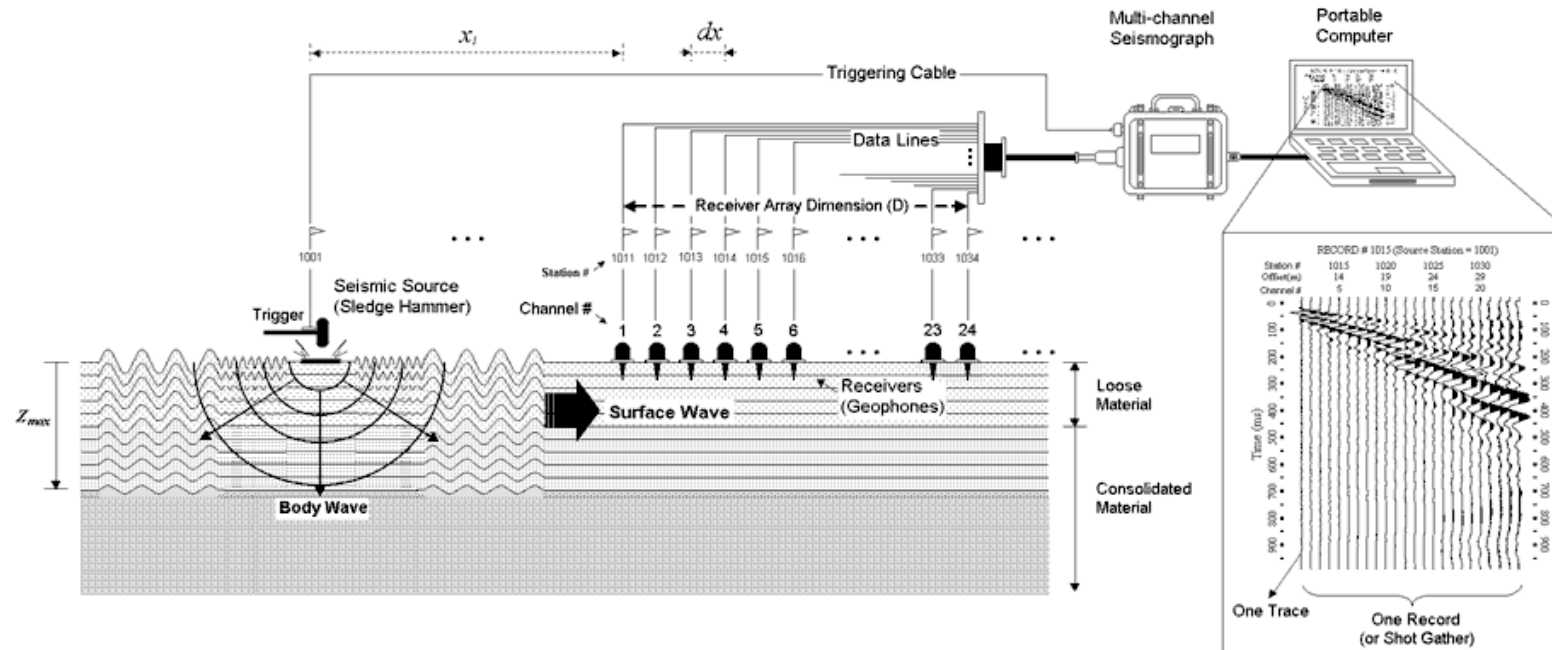
La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo, è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda. Né deriva che, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione, e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

La curva di dispersione apparente derivante dalla sovrapposizione delle curve relative ai vari modi di vibrazione, per i limiti indotti dal campionamento non necessariamente coincide con singoli modi nei diversi intervalli di frequenza campionati.

Indagini MASW

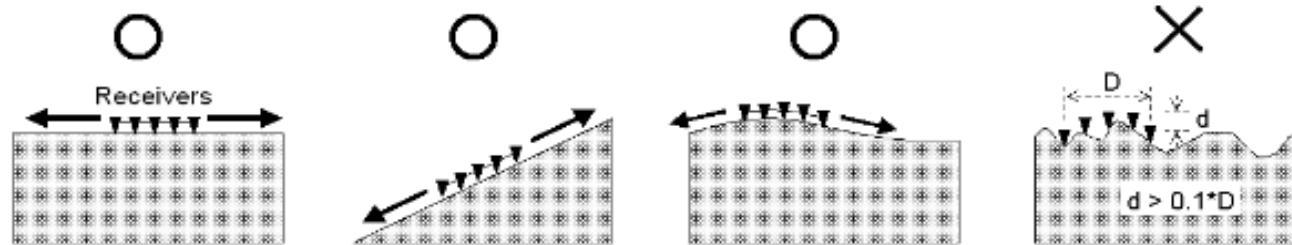
Un rilievo MASW attivo con onde superficiali può essere suddiviso in tre fasi:

1. Acquisizione di campagna
2. Processing
3. Inversione



Procedure di acquisizione

Condizioni morfologiche: Da preferire terreno pianeggiante dove le onde di Rayleigh si generano senza interferenze. Negli altri casi a condizione che lo stendimento interessi la medesima situazione morfologica. Da escludere variazioni di pendenza con $d > 0,1D$



Nel caso di substrati stratificati con strati inclinati, lo stendimento geofonico viene posizionato con direzione perpendicolare alla linea di massima pendenza (immersione).

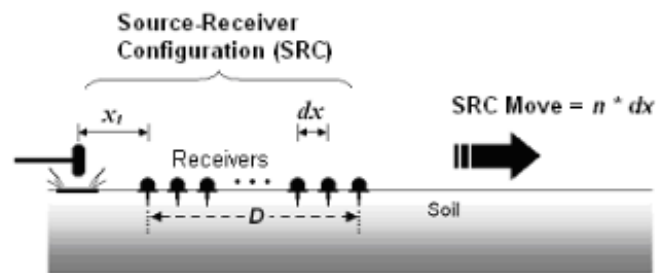
Procedure di acquisizione

Dimensionamento del dispositivo

- Lunghezza dello stendimento : La lunghezza D dello stendimento è proporzionale alla lunghezza d'onda λ_{\max} che si vuole analizzare e quindi alla massima profondità di investigazione

$$D \approx \lambda_{\max} \approx Z_{\max}$$

Active MASW



- Spaziatura geofonica : La spaziatura geofonica dx è in relazione alla lunghezza d'onda λ_{\min} risolvibile per gli strati superficiali

$$dx \approx \lambda_{\min} \approx Z_{\min}$$

La lunghezza D dello stendimento è limitata dalla sorgente sismica che si vuole utilizzare.

Procedure di acquisizione

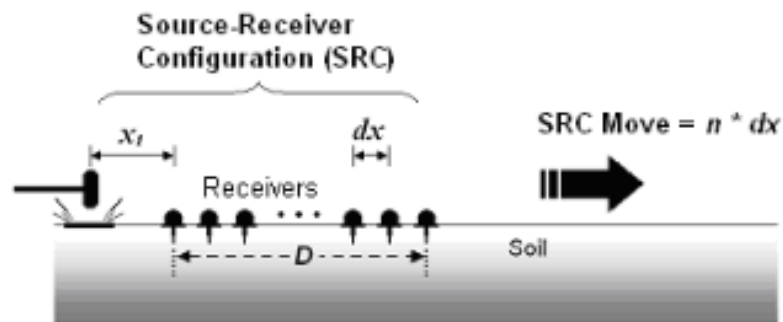
- Offset : Il valore della distanza di ofs. (x_1) è normalmente suggerito nel 20% della lunghezza dello stendimento D , pur essendo il suo valore ottimale non chiaramente indicato in letteratura.
Nella pratica si acquisisce con diversi ofs, multipli della spaziatura geofonica prescelta.

$$x_1 = 0,2 * D$$

$$x_1 = n * dx \text{ con } n = 1 \dots 6..$$

- Sorgente di energizzazione:
Mazza con piattello di battuta: Produce un buon treno d'onda di sufficiente energia e con contenuto spettrale minimo nell'ordine di 10 Hz
Bolide (grave): Produce maggiore energia e frequenze inferiori a 10 Hz In situazioni di elevato rumore (ambiente urbano) per incrementare il rapporto S/N si usa lo stacking

Active MASW



Procedure di acquisizione

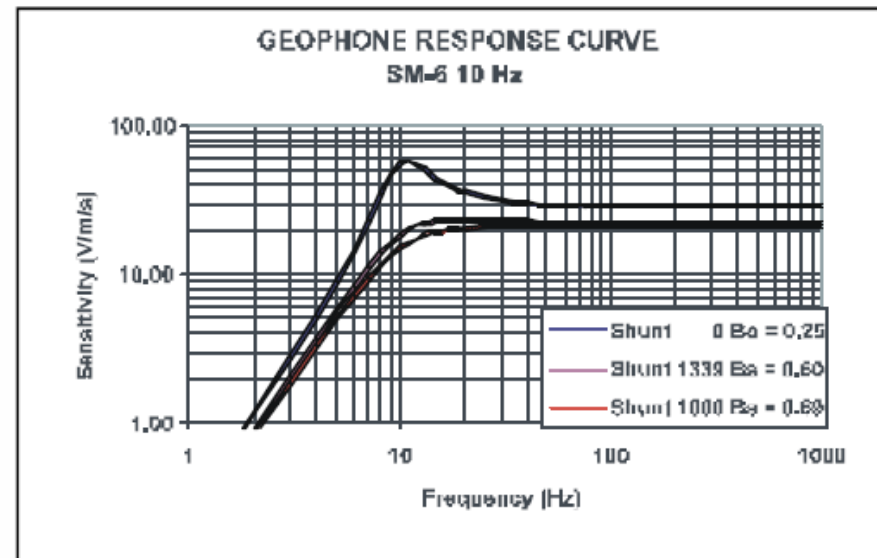
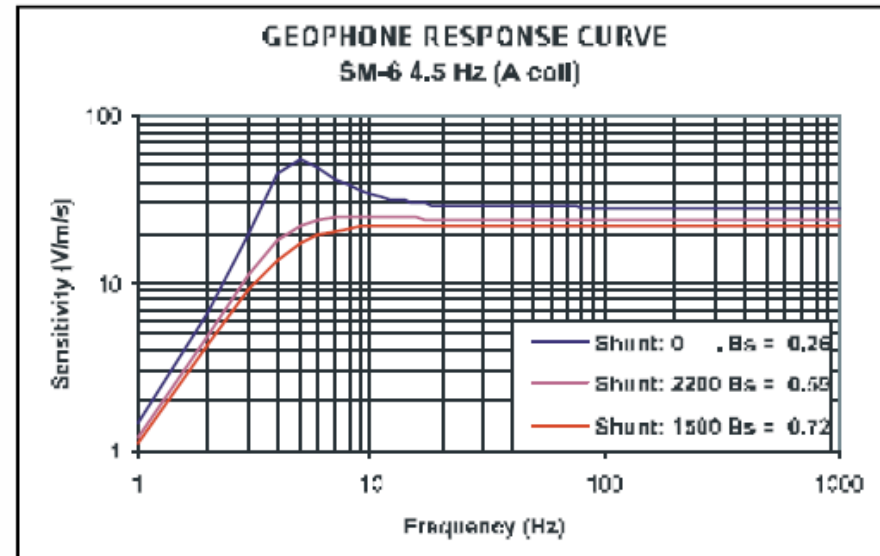
Geofoni

Scelta di geofoni di appropriata frequenza per il rilievo delle basse frequenze.

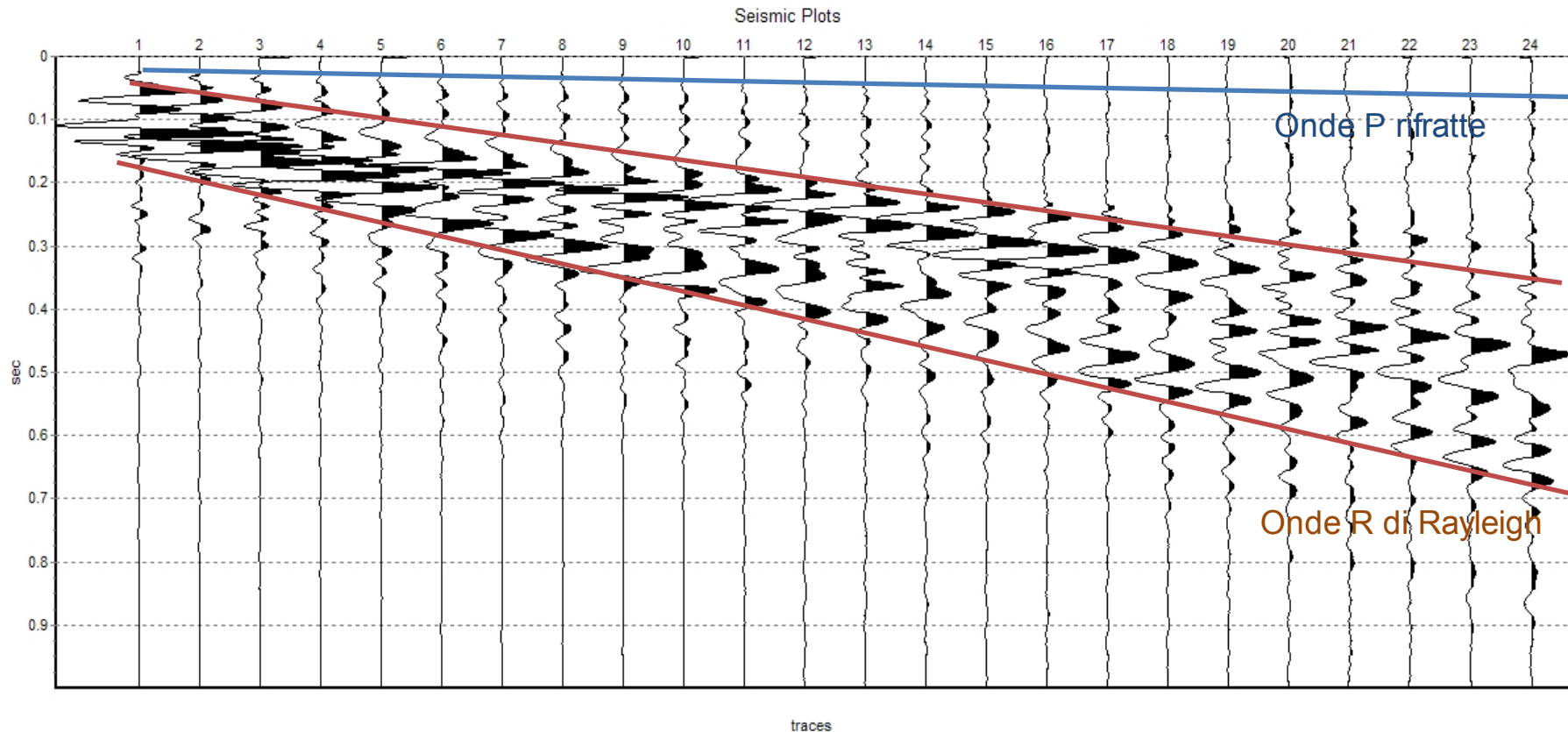
Es. geofoni a 4,5 Hz (consigliati) hanno sensibilità più elevata di circa 8 volte rispetto a geofoni a 10 Hz.

G4,5Hz : $S = 50 \text{ V/m/s @ 4,5 Hz}$

G10Hz : $S = 6 \text{ V/m/s @ 4,5 Hz}$

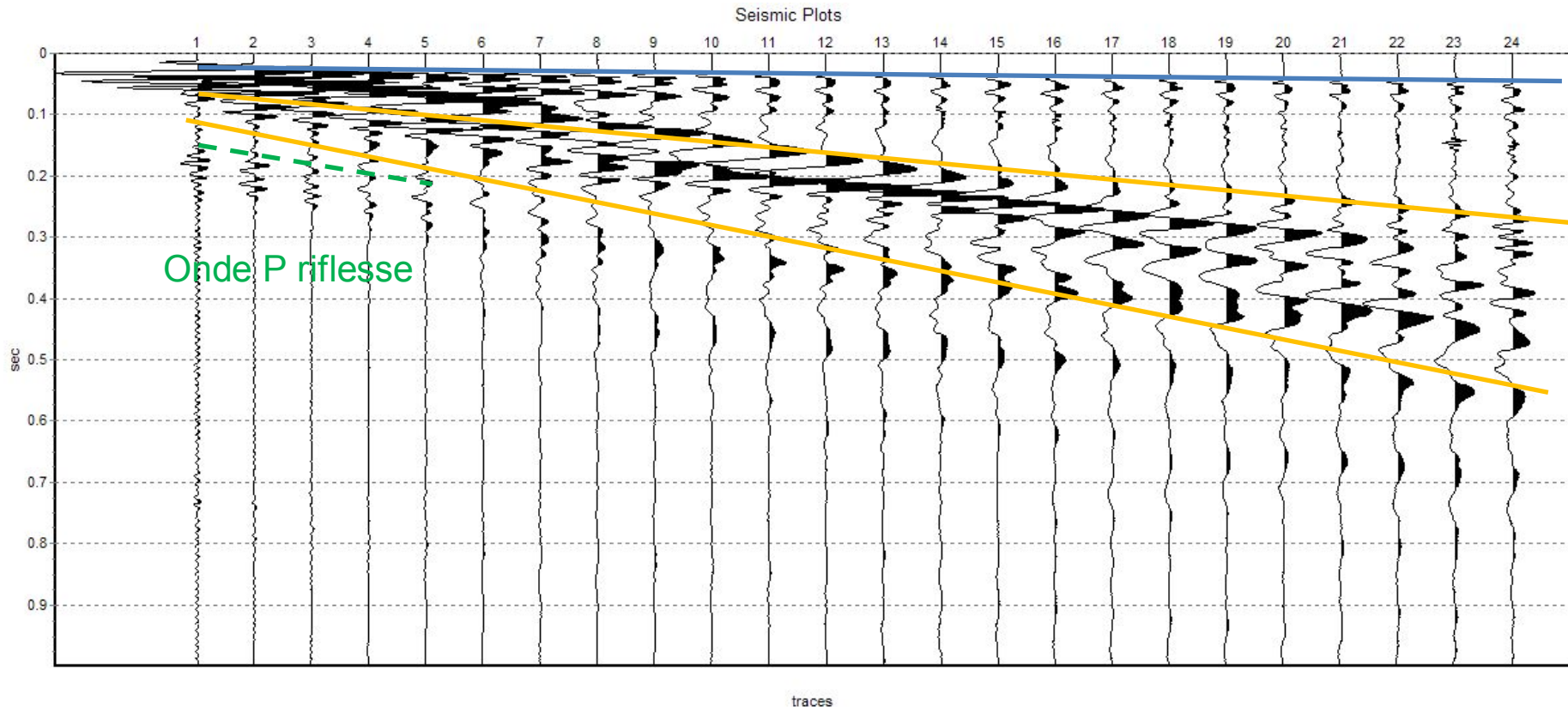


Esempio di sismogramma (Pesaro F. Foglia)



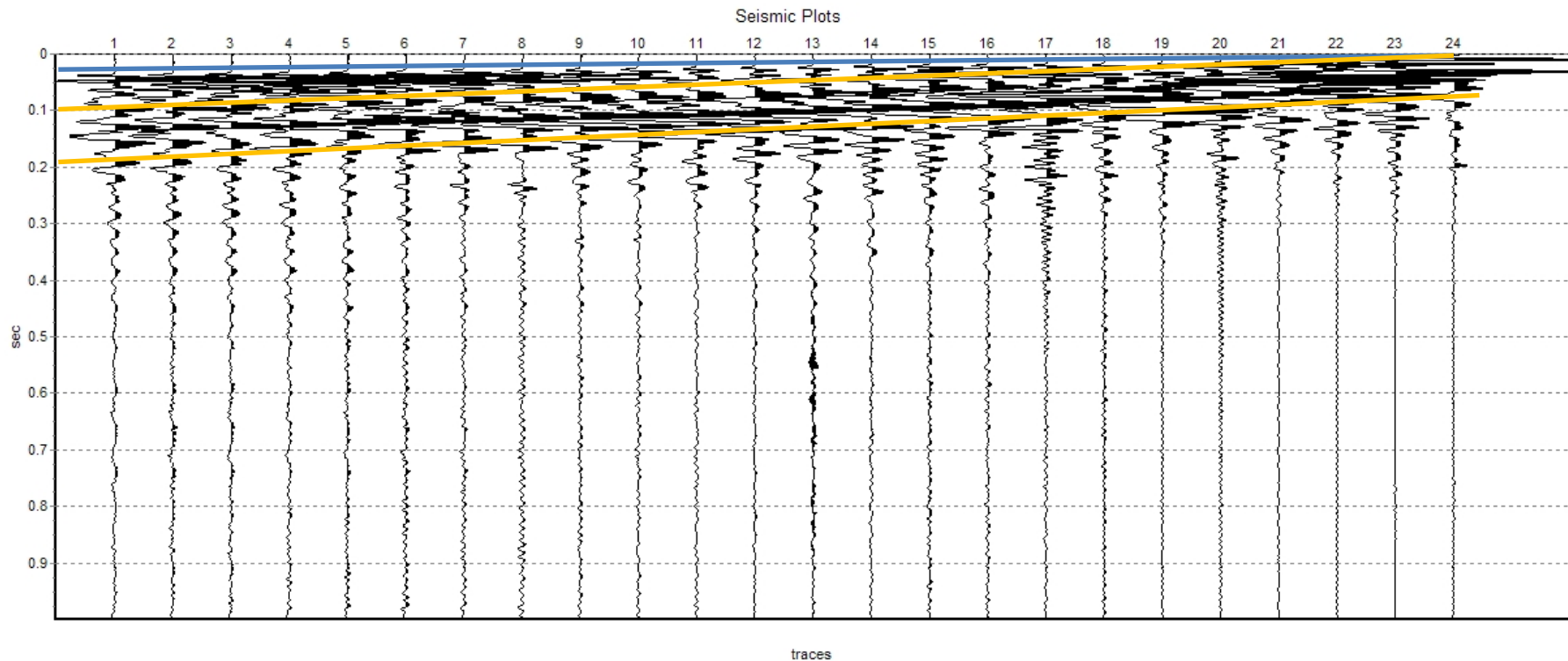
- Condizioni geologiche frequenti (es. piana alluvionale, versanti collinari) generano sismogrammi ben sviluppati e con buon contenuto spettrale. Una finestra di acquisizione $T = 1$ sec è in grado di contenere generalmente tutte le onde di superficie e di volume;
- Le onde di Rayleigh hanno maggiore ampiezza e quindi contenuto energetico rispetto alle onde P rifratte, ma velocità di propagazione nettamente più basse

Esempio di sismogramma (Villagrande di Mombaroccio)



- La presenza delle onde riflesse nei sismogrammi possono indicare substrati subaffioranti (es. versante collinare con depositi eluvio colluviali di modesto spessore ricoprenti argille del Pleist-Plioc. M)

Esempio di sismogramma (Piobbico)



- Condizioni geologiche particolari (es. di coltre detritica spessore 3 m su substrato roccioso subaffiorante, Scaglia Rossa) producono sismogrammi con minori informazioni spettrali.

Procedure di acquisizione

Parametri di registrazione

Table 1.1 Summary of Sample Data Parameters

Survey Type	Active MASW	Passive Remote MASW	Passive Remote MASW	Passive Roadside MASW
File Name(s)	"1000.dat" — "1009.dat"	"Passive-Cross.dat"	"Passive-Circular.dat"	"4000.dat" — "4009.dat"
Folder	"...\\Active\\"	"...\\PassiveRemote\\"	"...\\PassiveRemote\\"	"...\\PassiveRoadside\\"
Survey Purpose	2-D Vs Profiling	1-D Vs Profiling	1-D Vs Profiling	2-D Vs Profiling
Data Format	SEG-2	KGS	KGS	SEG-2
Acquisition	24 channel	48 channel	24 channel	48 channel
Source	12-lb Hammer	Traffic	Traffic	12-lb Hammer/Traffic
Receivers (Geophones)	4.5-Hz (spike coupling)	4.5-Hz (spike coupling)	4.5-Hz (spike coupling)	4.5-Hz (land streamer with 30 takeouts)
Receiver Array	Linear (roll along)	Cross (x-y)	Circular	Linear (roll along)
Array Dimension (D)	23 m	115 m	115 m	35 m
Receiver Spacing (dx)	1 m	5 m	15 m	1.2 m
Source Offset (x₁)	5 m	N/A	N/A	4.8 m
Receiver Array Move	5 dx (5 m)	0	0	4 dx (4.8 m)
Sampling Interval (dt)	0.25 ms	4 ms	4 ms	4 ms
Recording Time (T)	1 sec	20 sec	120 sec	120 sec
Record Numbers	1000 — 1009	2000 — 2009	3000 — 3009	4000 — 4009

Procedure di acquisizione

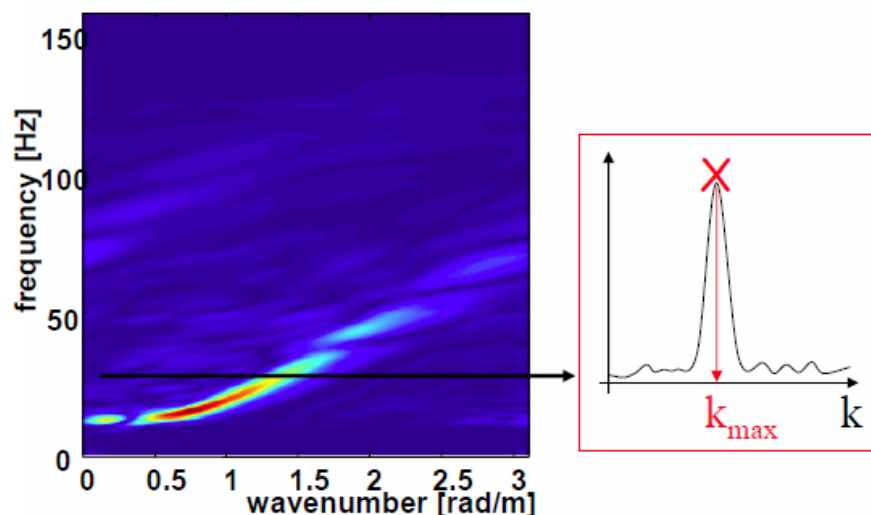
Sismografo :

- Digitale almeno a 24 canali con conversione A/D a 24 bit
- Range dinamico: 144 dB
- Banda passante: 0 – 15KHz
- Base rumore di fondo: 0,2 microvolt
- Precisione del trigger : +/- microsecondo su tutte le frequenze di campionamento
- Filtri digitali : taglia basso, taglia alto, notch 50 Hz
- Intervallo di campionamento : 0,00208 – 16,00 msec
- Frequenza di campionamento 48.000 – 64,5 campioni/sec



Processing

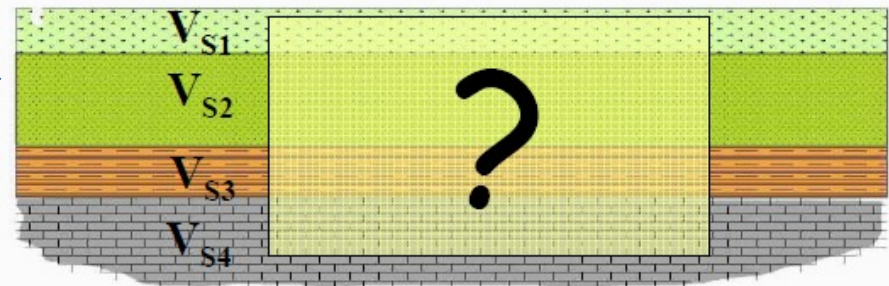
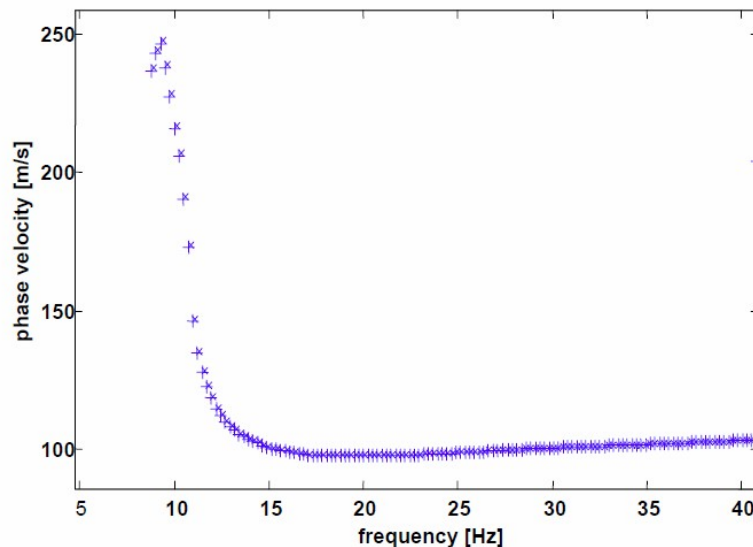
- I dati acquisiti vengono sottoposti ad una fase di *processing* che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito, ovvero, la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (il codice di calcolo utilizzato è SurfSeis® versione 2.0, - 3.0 Kansas University USA).
- Esistono diverse tecniche di *processing* per estrarre dai sismogrammi le caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda). I sismogrammi registrati vengono sottoposti a una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio x-t (spazio-tempo) al dominio f-k (frequenza-numero d'onda). Lo spettro f-k del segnale consente di ottenere una curva di dispersione per le onde di Rayleigh, nell'ipotesi che nell'intervallo di frequenze analizzato le onde che si propagano con il maggiore contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh, e che le caratteristiche del sito (monodimensionale e stratificato), siano tali da consentire la propagazione delle onde superficiali risaltandone il comportamento dispersivo. Si dimostra che la velocità delle onde di Rayleigh è associata ai massimi dello spettro f-k; si può ottenere facilmente una curva di dispersione. Per ogni frequenza si ricerca il numero d'onda k_{max} a cui corrisponde il massimo di energia e quindi si calcola il corrispondente valore di velocità V_R :



$$V_R(f) = 2\pi f/k$$

Inversione

- Riportando le coppie di valori (V_R, f) in un grafico, si ottiene la curva di dispersione utilizzabile nella successiva fase di inversione. La fase di inversione deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo, che viene di norma schematizzato come un mezzo (visco)-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati. Il processo di inversione è iterativo: si parte da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, con eventualmente informazioni note a priori riguardanti la stratigrafia. Il processo iterativo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione sintetica). Usualmente, algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati vengono utilizzati per automatizzare la procedura

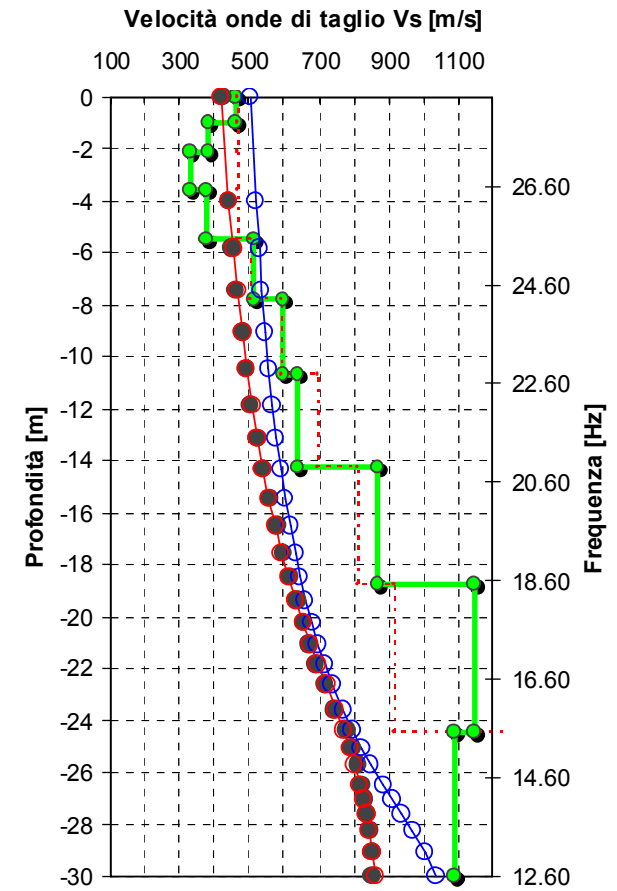
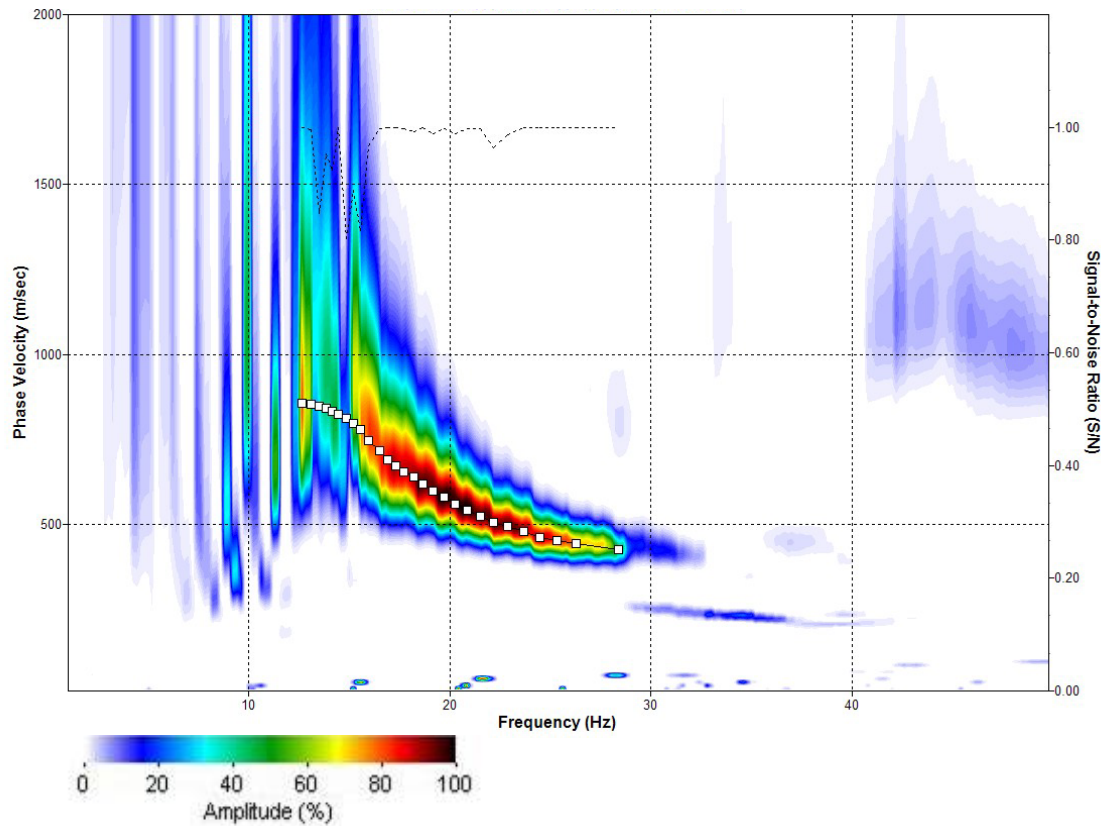


Inversione

es. Loc. Strada del Boncio (PU)

Curva di dispersione e modello di velocità Onde Vs

Curva di dispersione



—●— INVERTED Vs INITIAL Model ● MEASURED
—○— INITIAL —○— FINAL

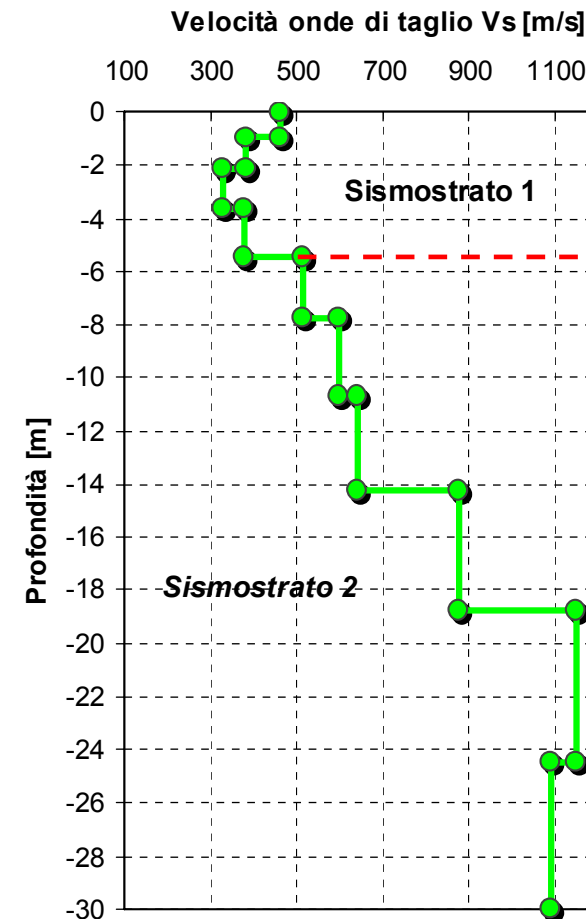
Correlazione tra profilo verticale di velocità e N_{spt} e C_u

Profondità (m)	N_{spt}	C_u (kg/cm ²)
0-1,60	5	0,31
1,60-3,60	11	0,69
3,60-4,60	38	2,38
>4,60	> 50	

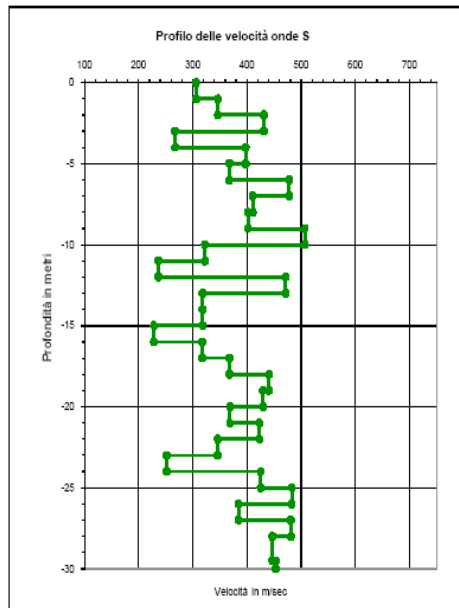
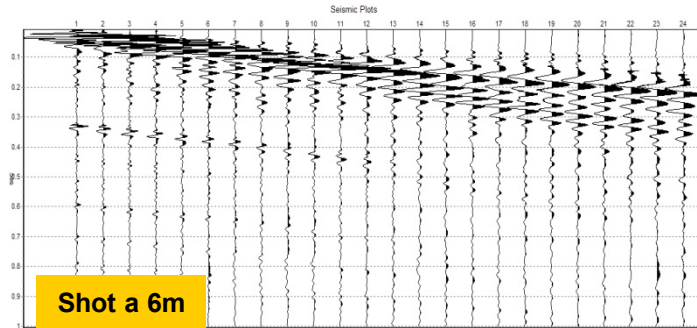
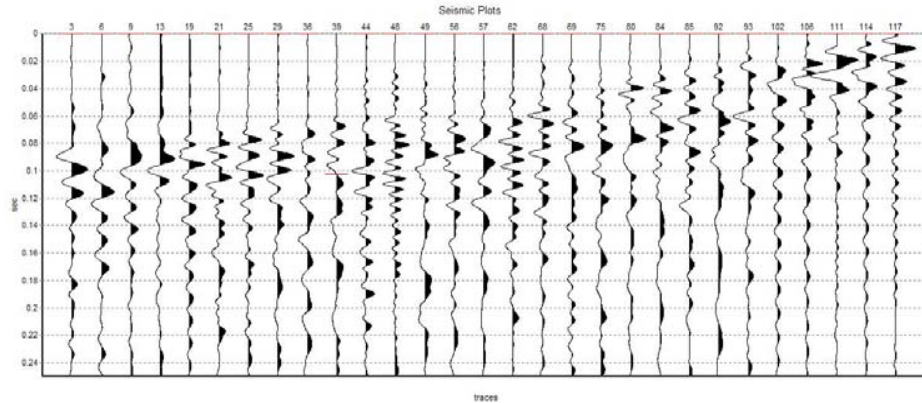
$$N_{spt, 30} = \frac{\sum_{t=1, M} h t}{\sum_{t=1, M} \frac{h t}{N_{spt, t}}} = 8,70 \longrightarrow \text{Suolo D}$$

$$C_{u, 30} = \frac{\sum_{t=1, K} h t}{\sum_{t=1, K} \frac{h t}{C_{u, t}}} = 52,9 \text{ Kpa} \longrightarrow \text{Suolo D}$$

$$V_{S_{30}} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}} = 671 \text{ m/s} \longrightarrow \text{Suolo B}$$



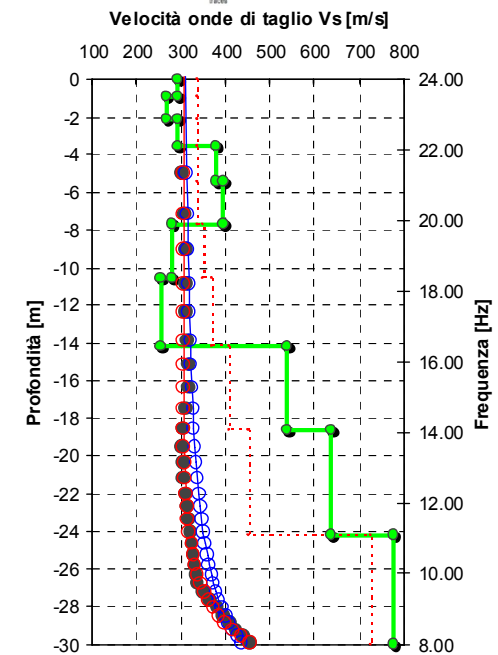
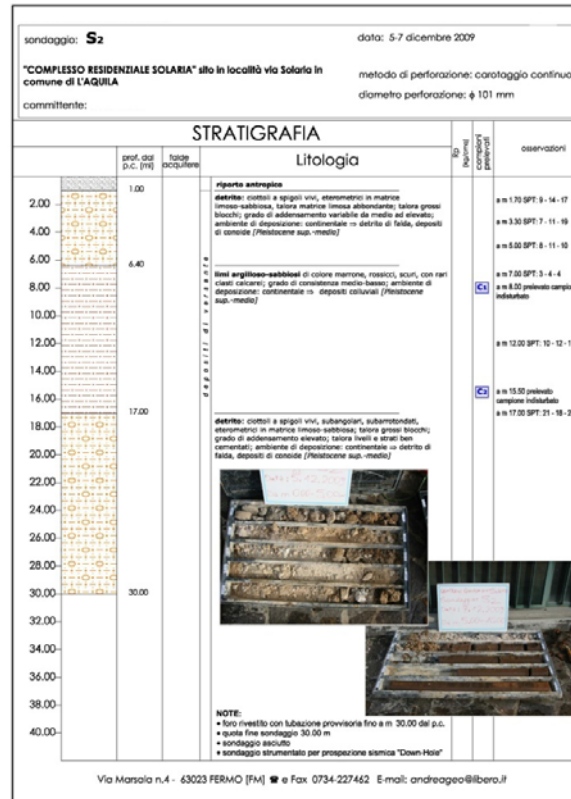
Correlazione tra D.H. e M.A.S.W.



$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}} \quad V_{s30} = 387 \text{ m/s}$$

$$N_{spt, 30} = \frac{\sum_{t=1, M} h_t}{\sum_{t=1, M} \frac{h_t}{N_{spt, t}}} = 35,0$$

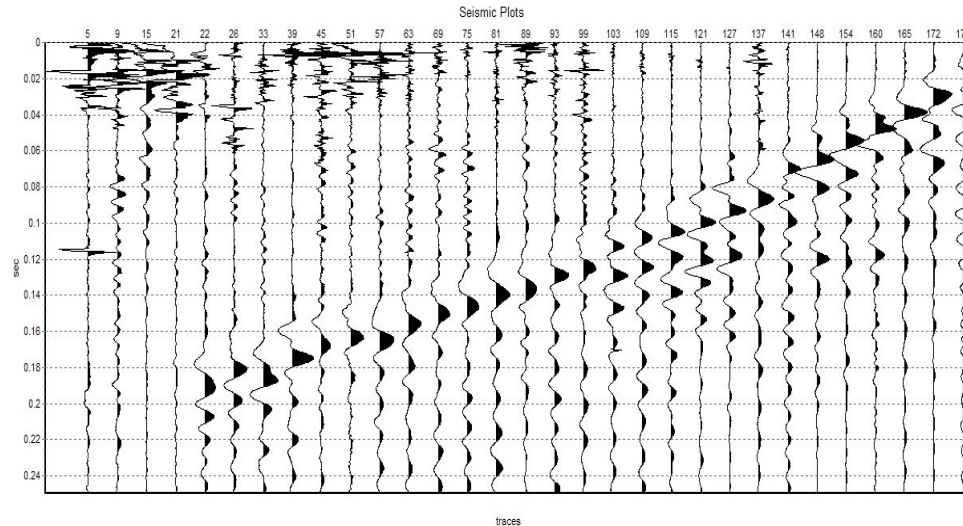
**Suolo
C**



$$V_{s30} = 415 \text{ m/s}$$

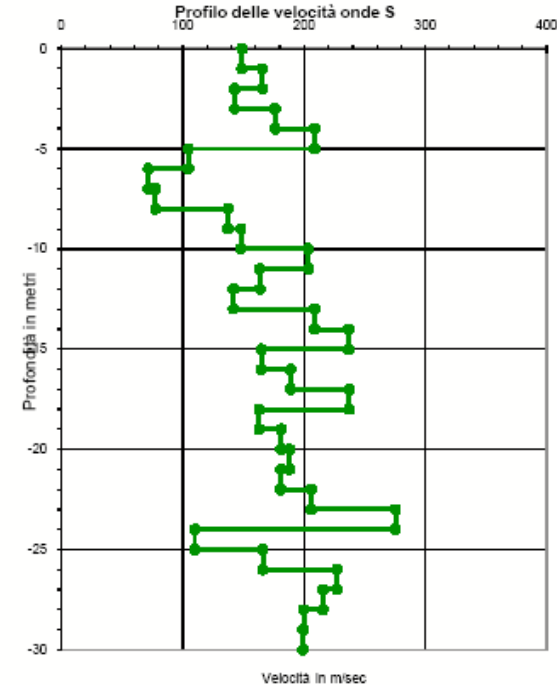
**Suolo
B**

Esempio D.H. Bellaria (RN)



Profondità (m)	Nspt
0-6,0	16
14,70-19,50	22
23,30-25,60	14
26,90-29,0	63

$$Nspt_{30} = \frac{\sum_{t=1, M} hl}{\sum_{t=1, M} \frac{hl}{Nspt_{t}}} = 19,22 \longrightarrow \text{Suolo C}$$

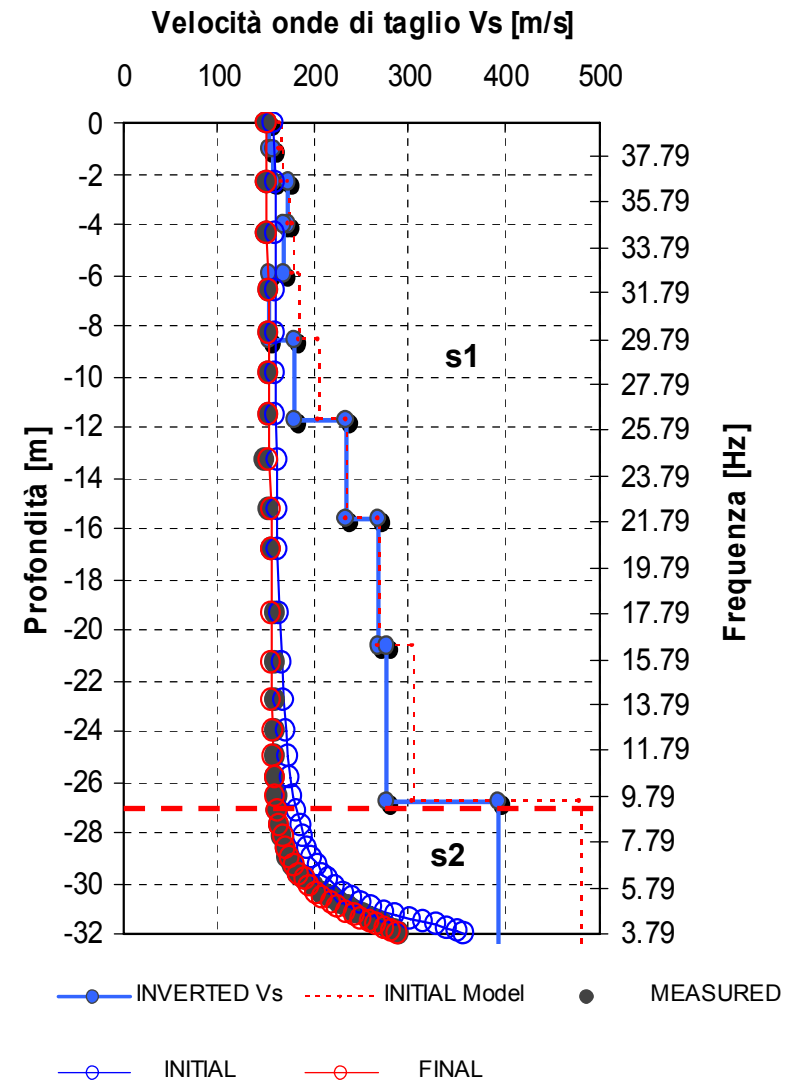
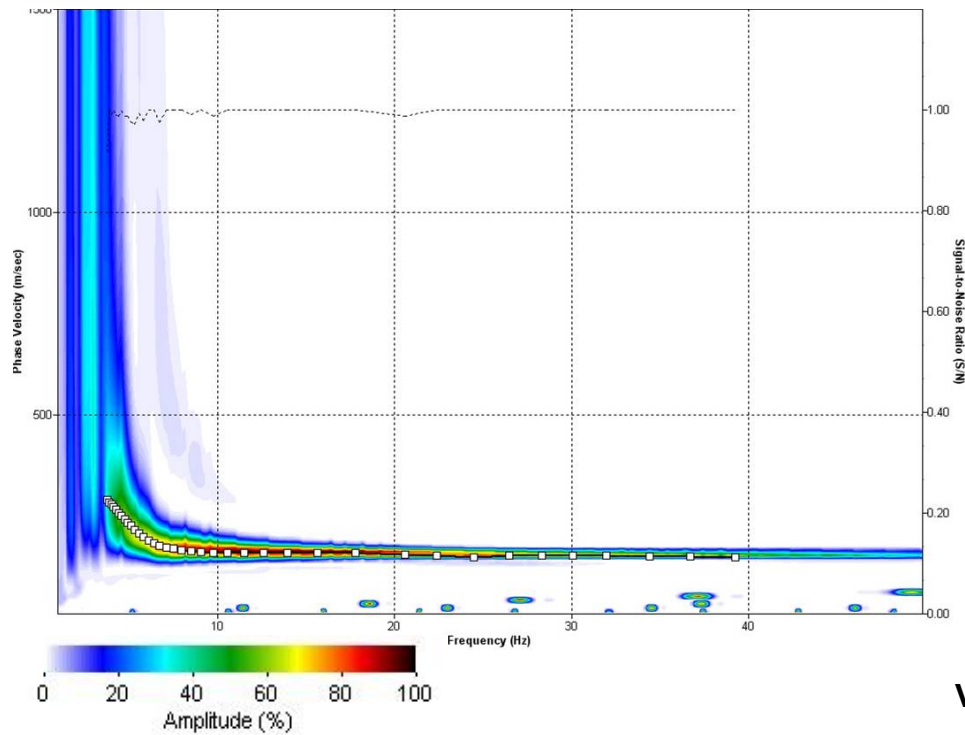
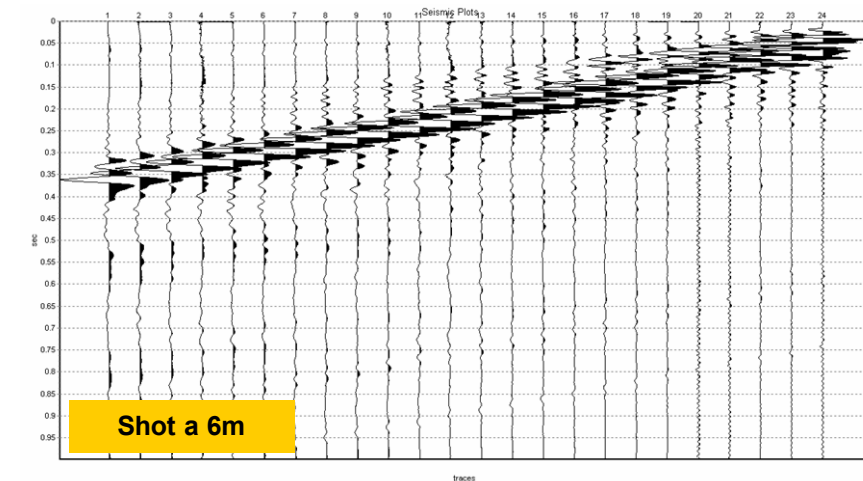


$$V_{S_{30}} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}} = 166 \text{ m/s}$$

Suolo D

Esempio di acquisizione 1

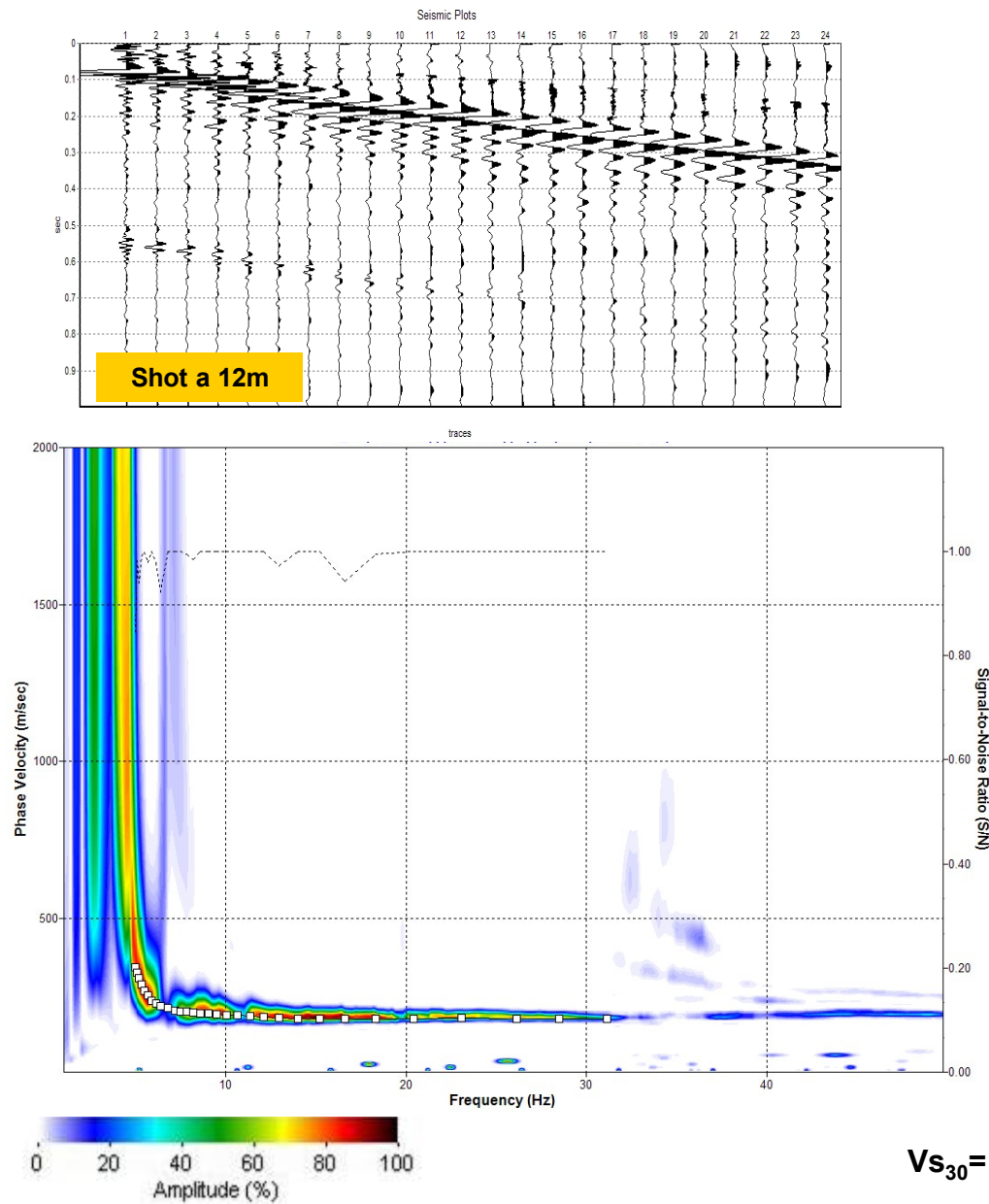
Area alluvionale



$V_{s30} = 220 \text{ m/s}$

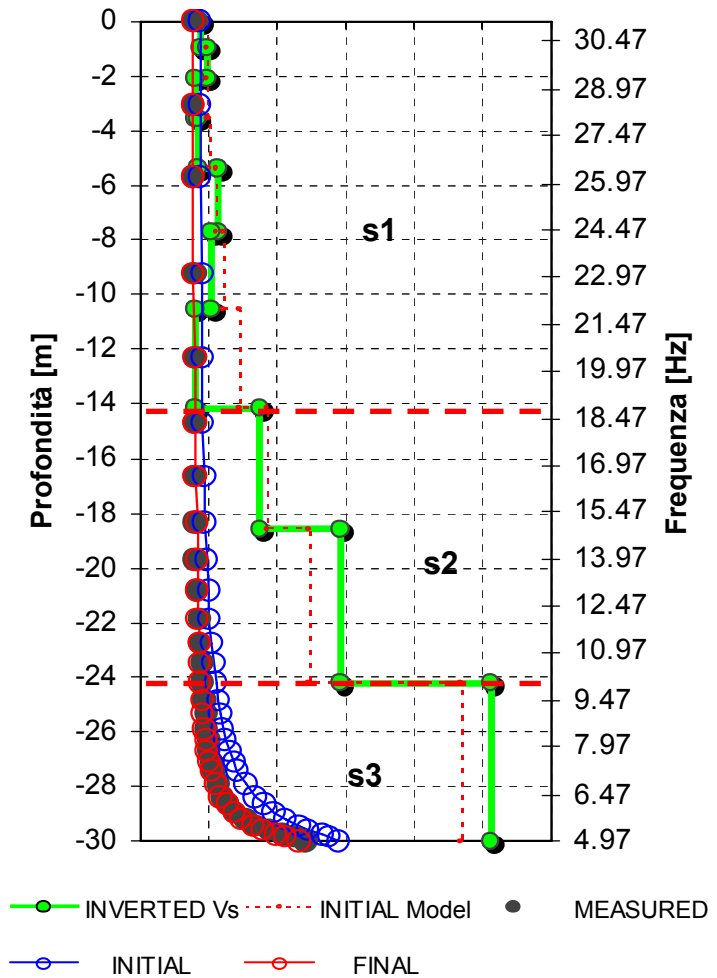
Esempio di acquisizione 2

Area alluvionale



Velocità onde di taglio V_s [m/s]

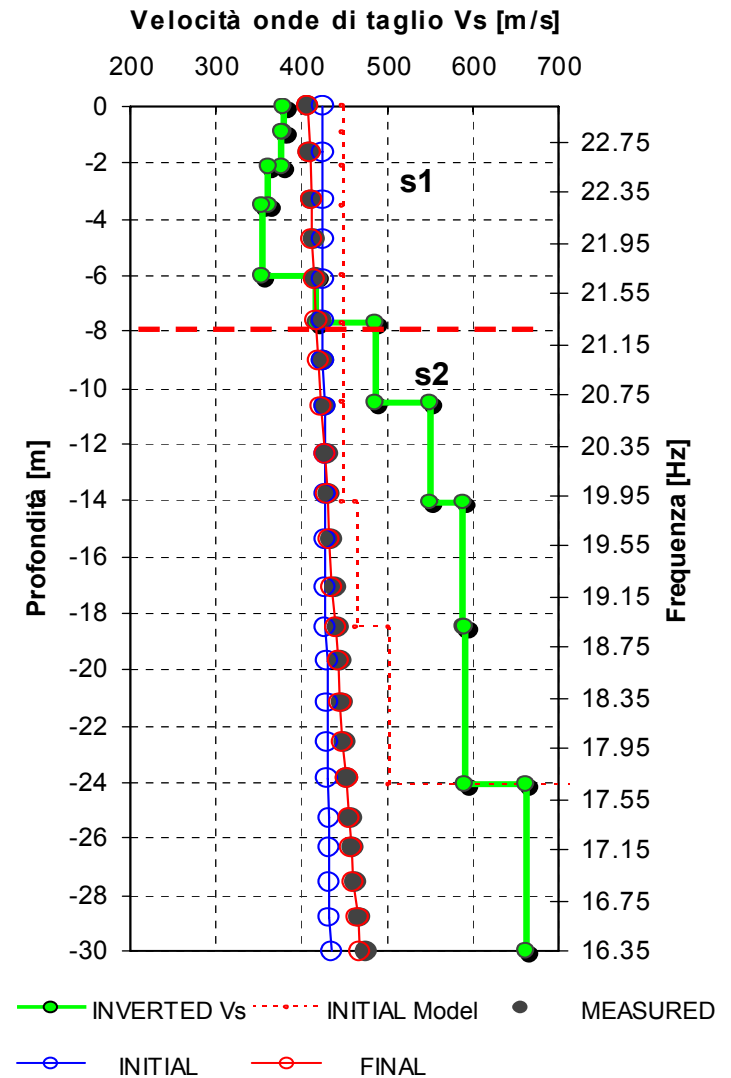
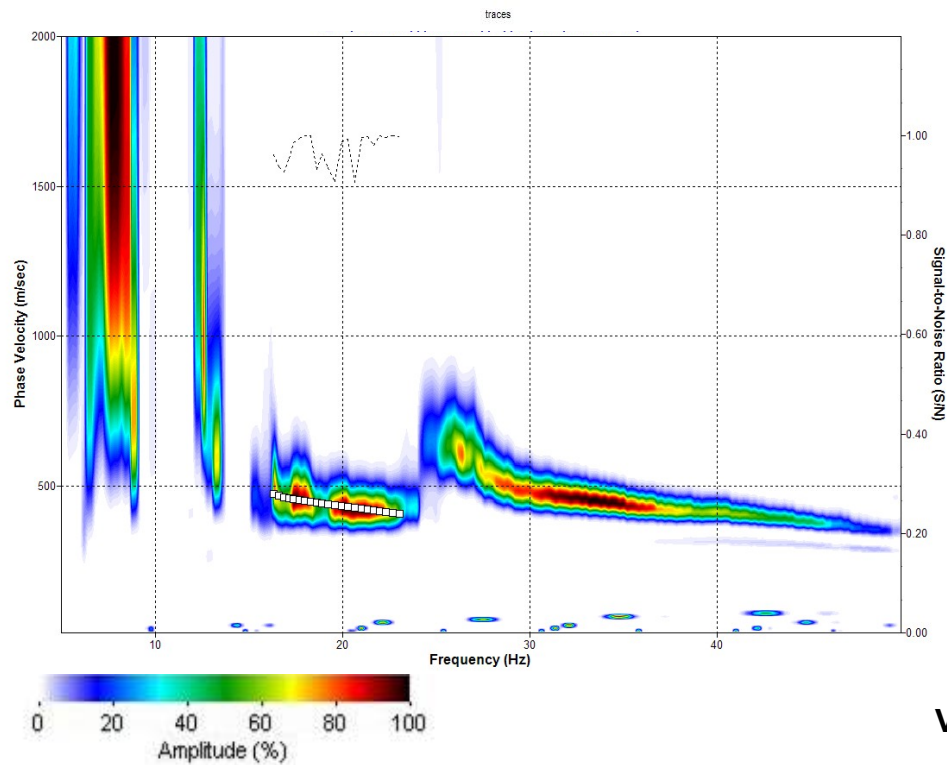
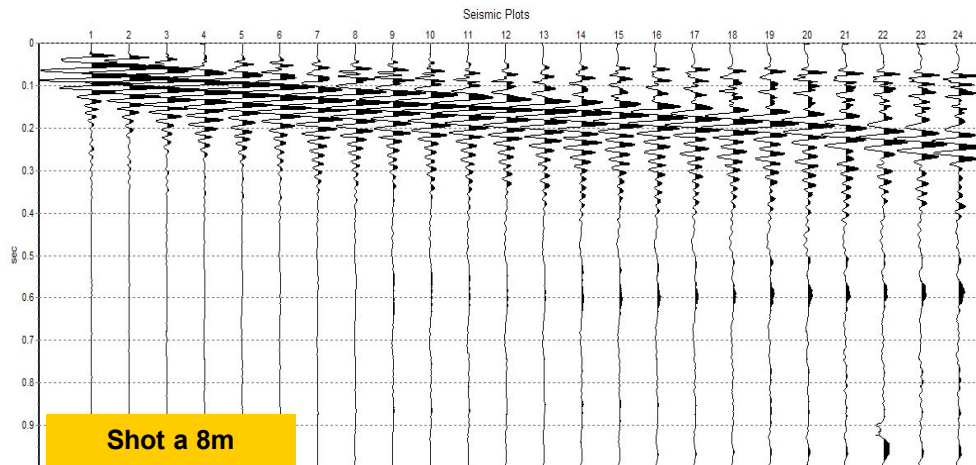
100 200 300 400 500 600 700



$V_{s30} = 265$ m/s

Esempio di acquisizione 3

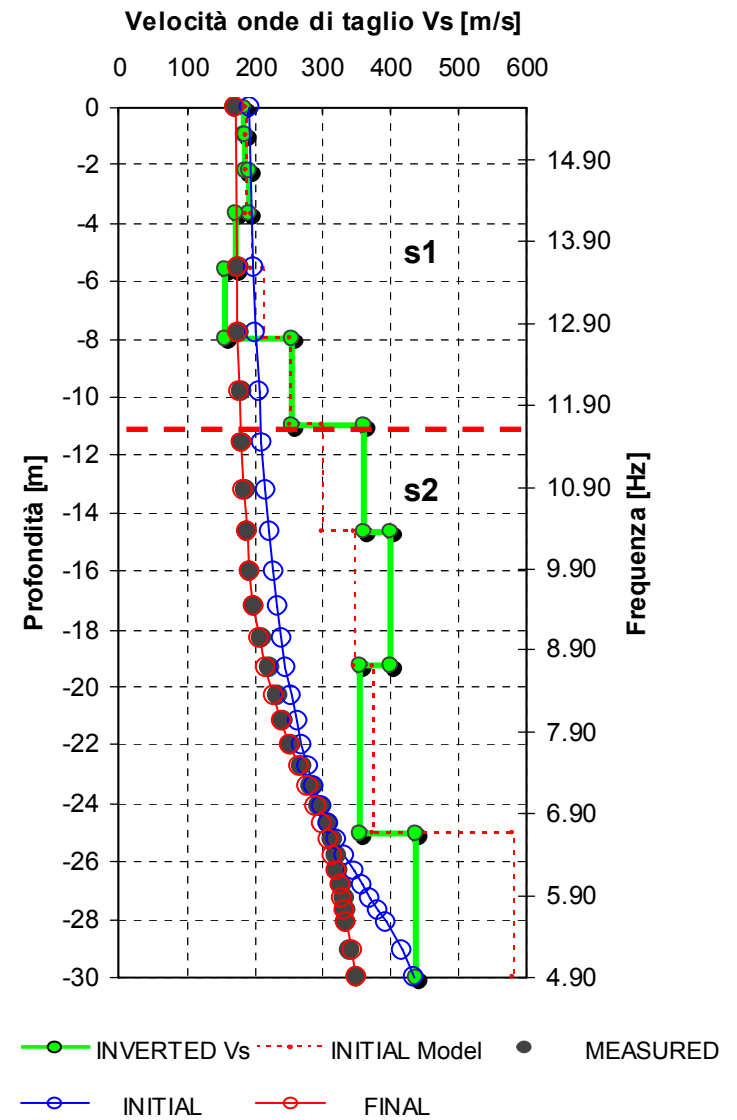
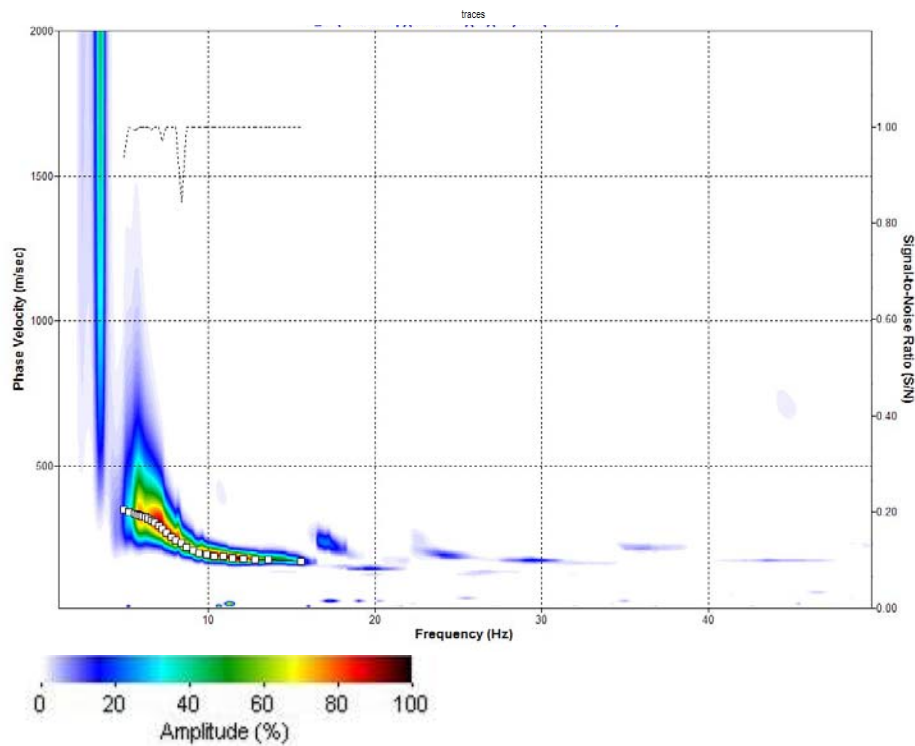
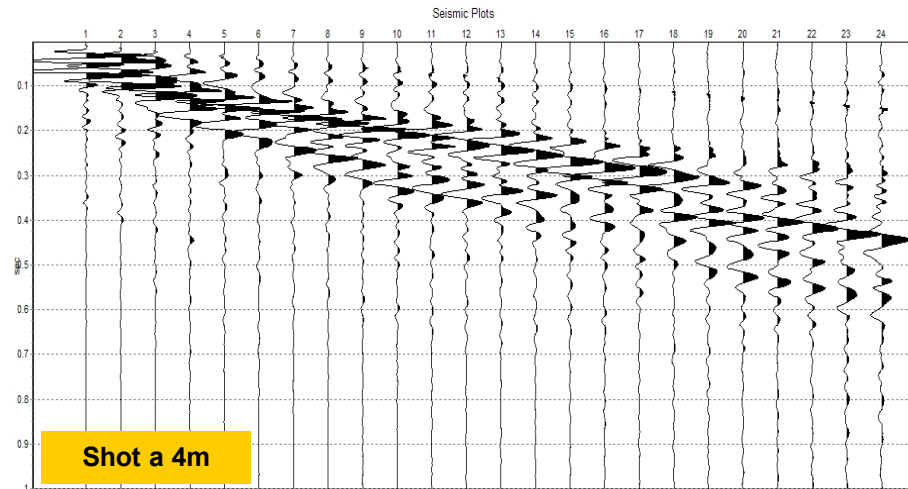
Area alluvionale



$V_{s30} = 510$ m/s

Esempio di acquisizione 4

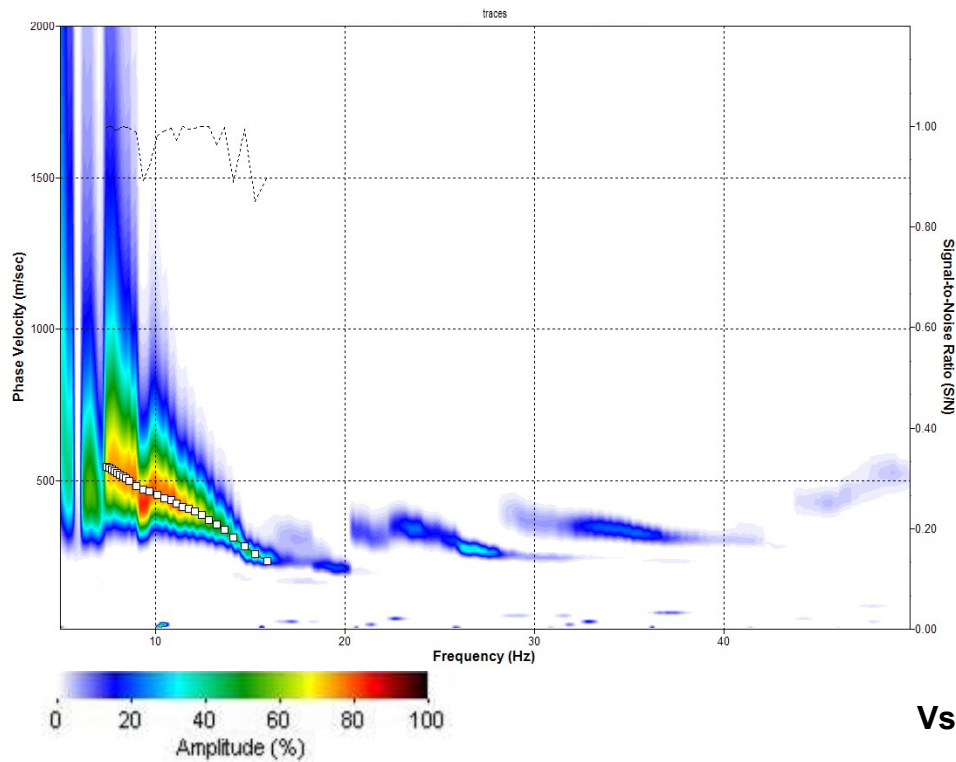
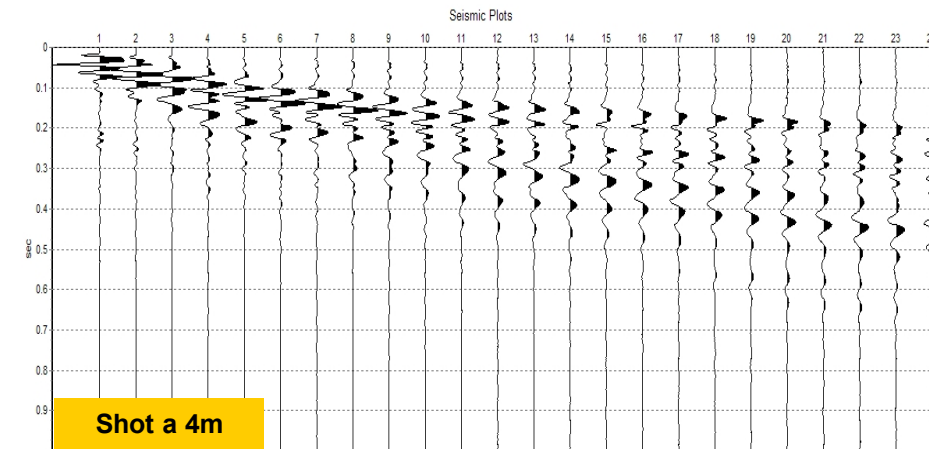
Area di versante



$V_{s30} = 280$ m/s

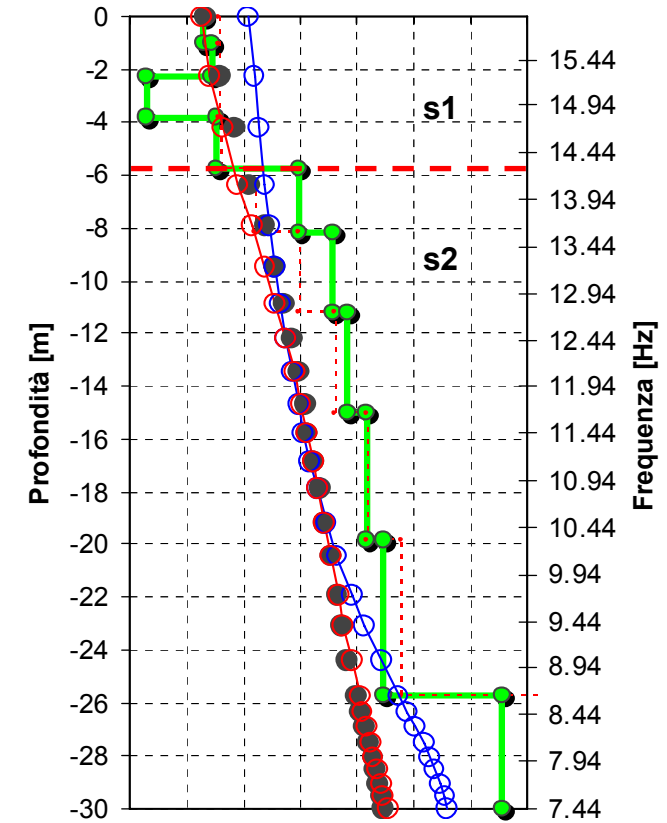
Esempio di acquisizione 5

Area di versante



Velocità onde di taglio Vs [m/s]

100 200 300 400 500 600 700 800

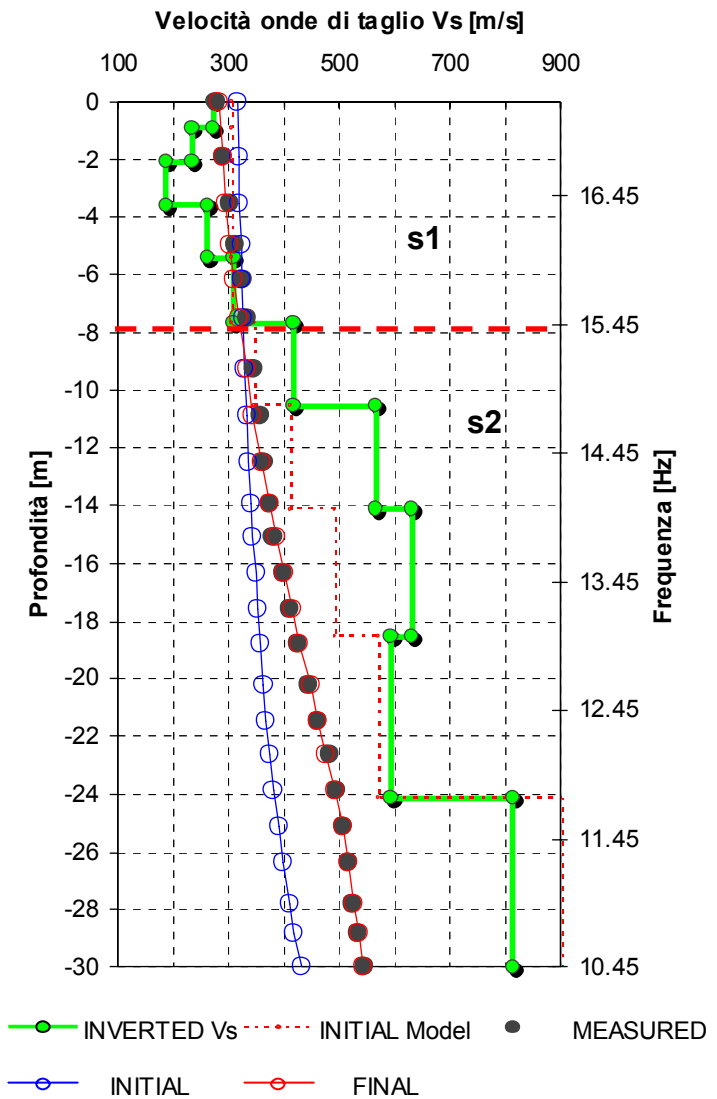
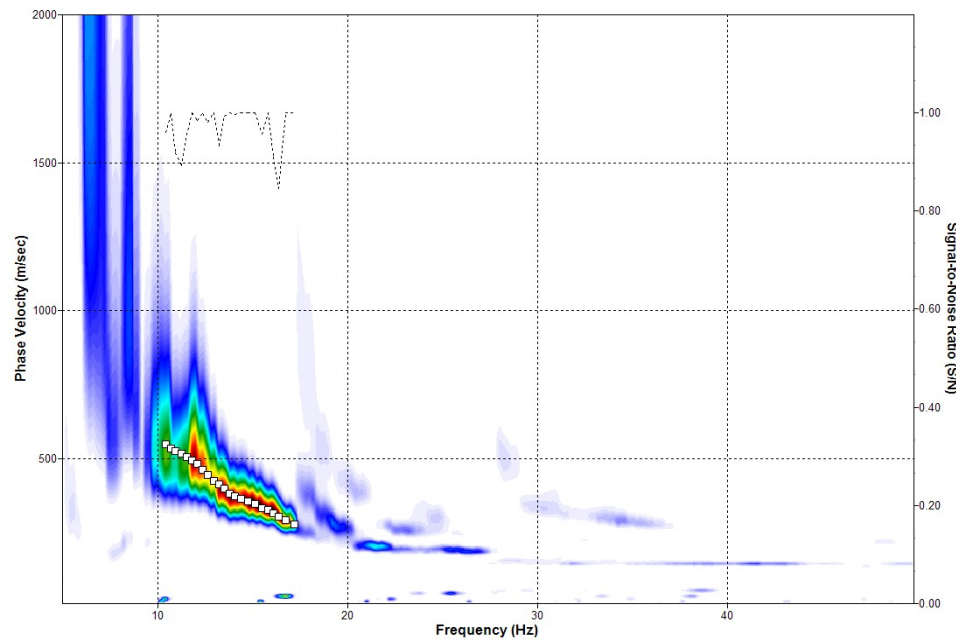
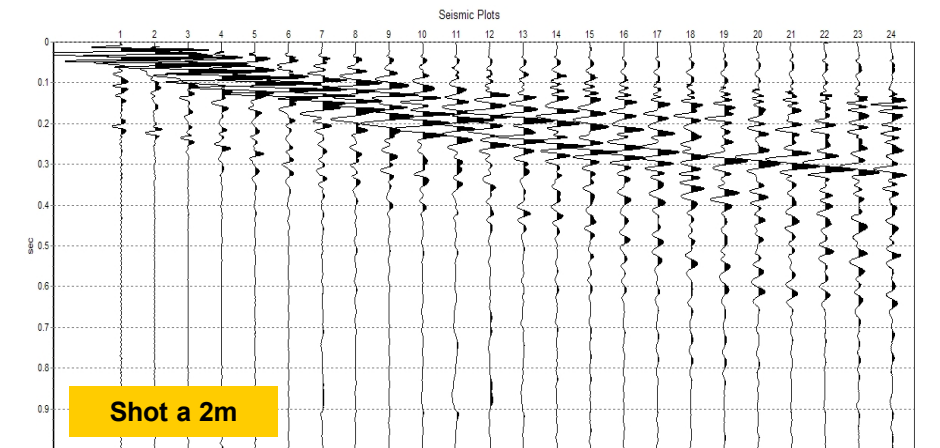


—●— INVERTED Vs - - - - - INITIAL Model ● MEASURED
 —○— INITIAL —○— FINAL

$V_{s30} = 397 \text{ m/s}$

Esempio di acquisizione 6

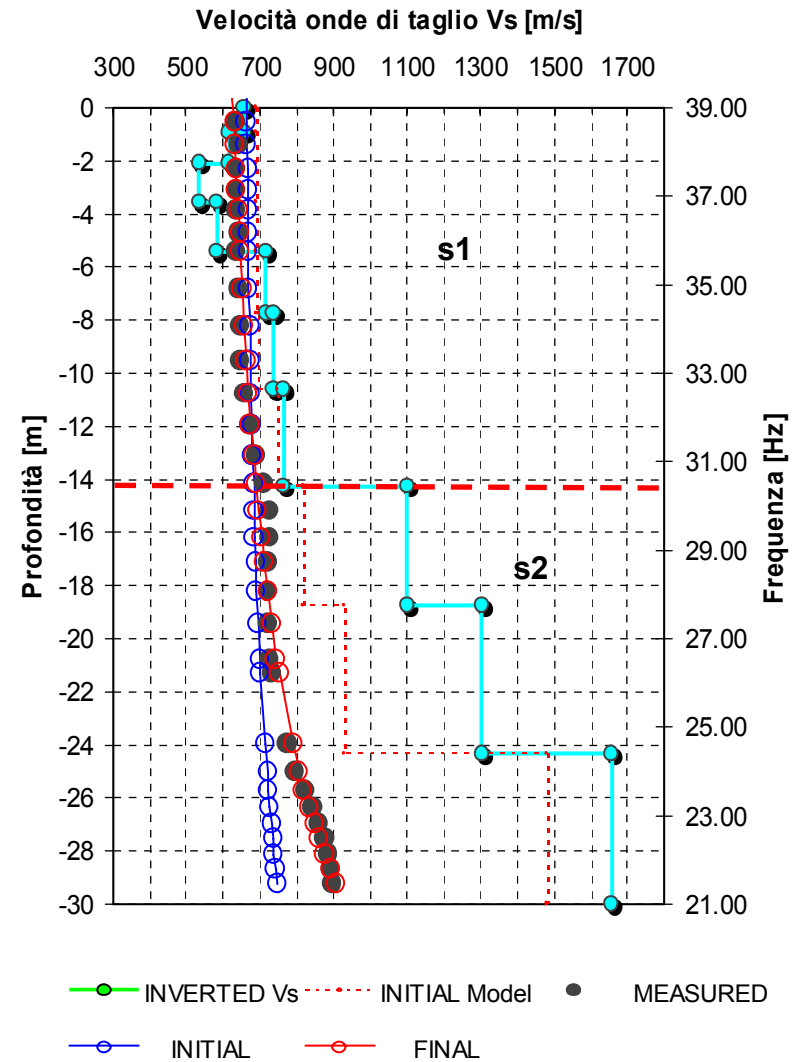
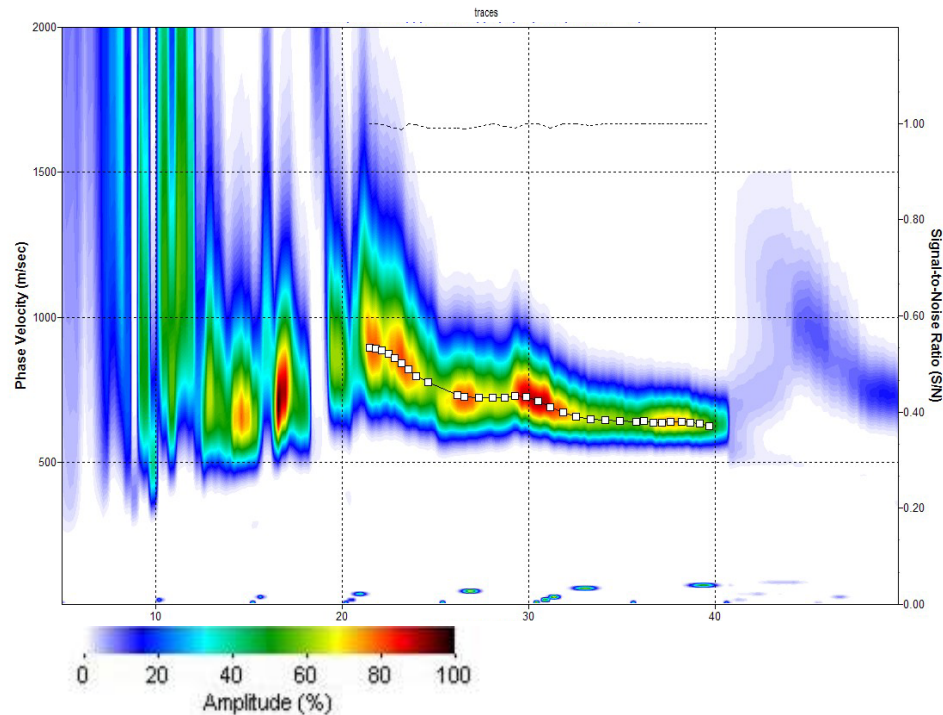
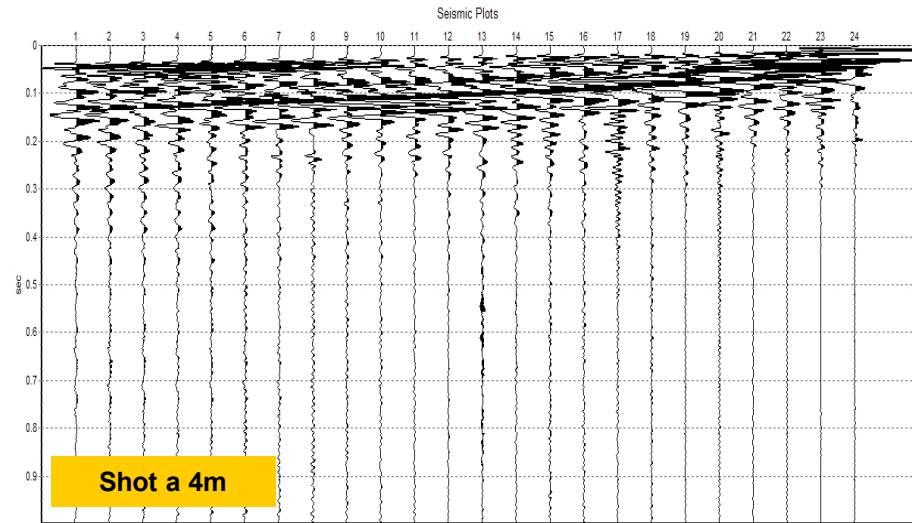
Substrato arenaceo



$V_{s30} = 447$ m/s

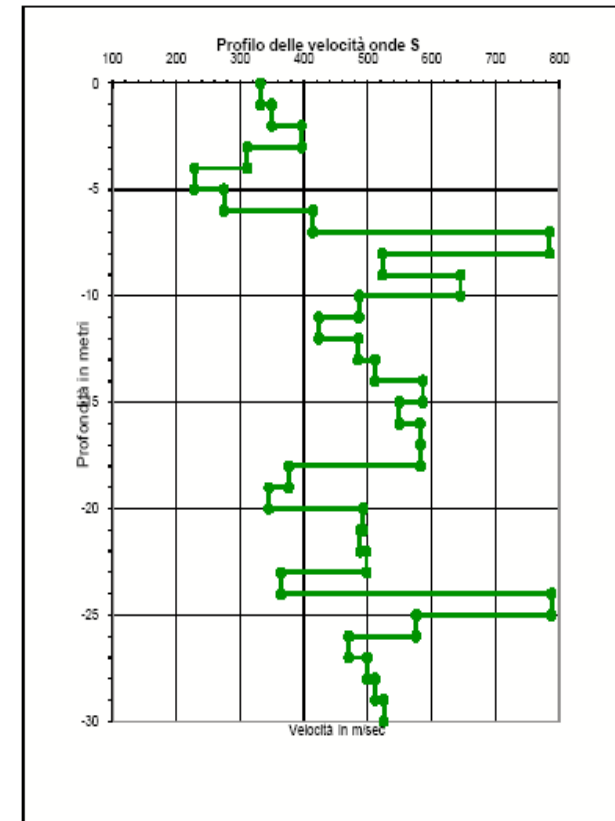
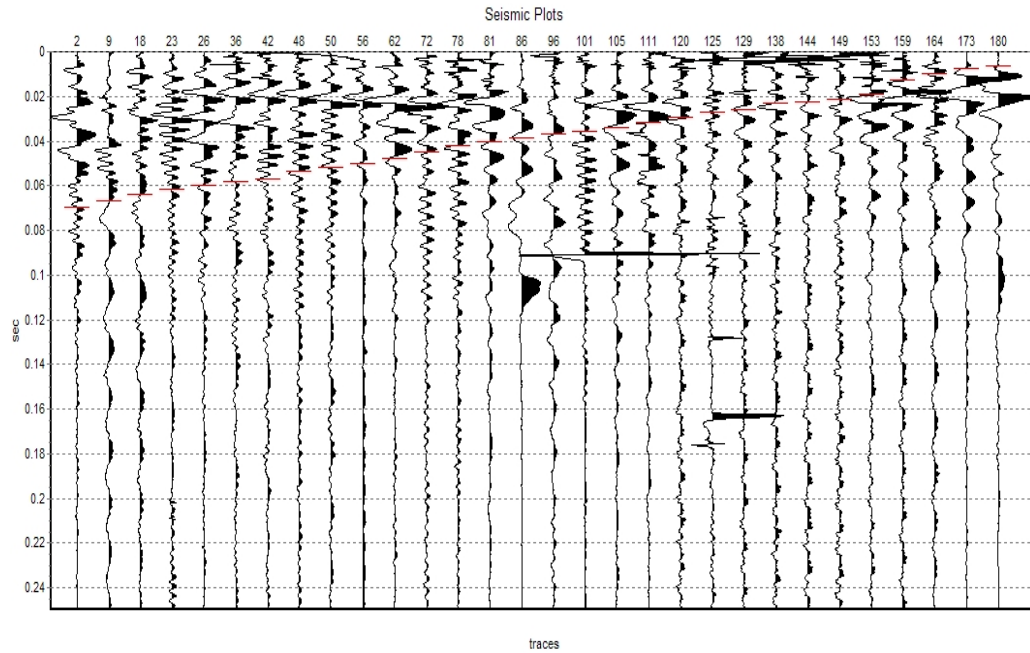
Esempio di acquisizione 7

Substrato calcareo



$V_{s30} = 912$ m/s

Esempio D.H. Provincia de L'Aquila



$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

$V_{s30} = 476 \text{ m/s}$ Categoria di suolo "B"