

nuove norme tecniche per le costruzioni D.M. 14/01/2008  
e circolare 02/02/2009 n. 617

difficoltà applicative ed esempi di progettazione geotecnica

## *L'indagine geofisica nelle NTC2008*

Pregi e difetti delle tipologie di indagine  
per la determinazione del Vs30

Dott. Geol. GIANFRANCO CENSINI

OGT n.299

EAGE – Geophysical Division M1987-093

GEORISORSE ITALIA SAS

# *Metodologie di indagine sismica*

***Sulla tipologia delle indagini geofisiche per la misura delle Vs le NTC 2008 non danno indicazioni particolari, citando soltanto, al punto C7.11.3.1.1. della circolare esplicativa, a titolo di esempio ed in maniera non esaustiva, prove Cross-hole, prove Down-hole, prove SASW, prove dilatometriche sismiche, prove penetrometriche sismiche, ecc.***

nuove norme tecniche per le costruzioni D.M. 14/01/2008  
e circolare 02/02/2009 n. 617

difficoltà applicative ed esempi di progettazione geotecnica

## *L'indagine geofisica nelle NTC2008*

**Pregi** e **difetti** delle tipologie di indagine  
per la determinazione del Vs30

Dott. Geol. GIANFRANCO CENSINI

OGT n.299

EAGE – Geophysical Division M1987-093

GEORISORSE ITALIA SAS

## Pregi

cioè Affidabilità ed Applicabilità

Non è da considerare un pregio l'economicità poiché nessun risparmio giustifica una informazione non attendibile

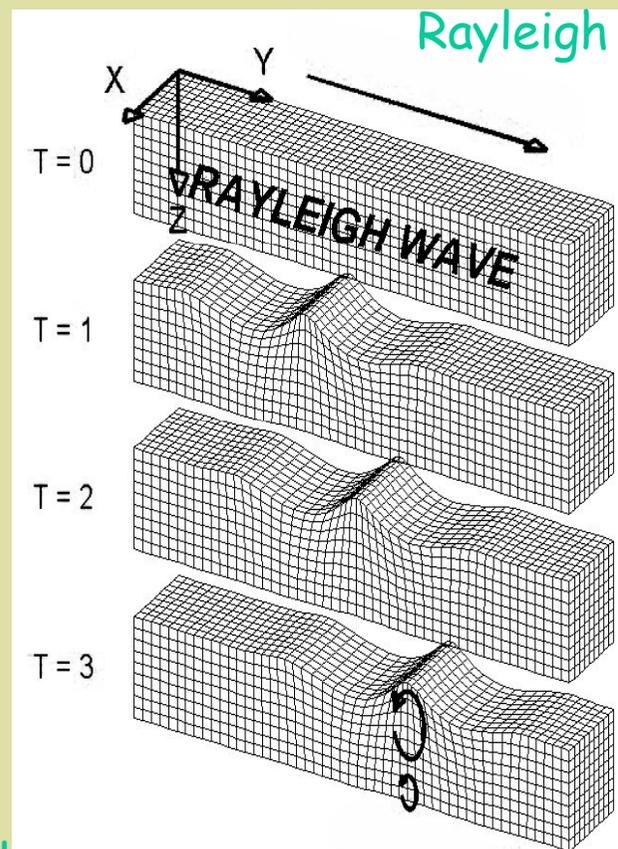
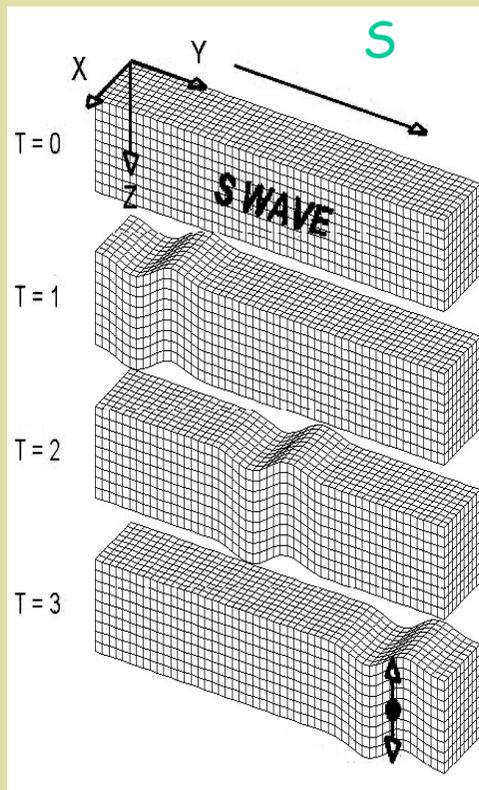
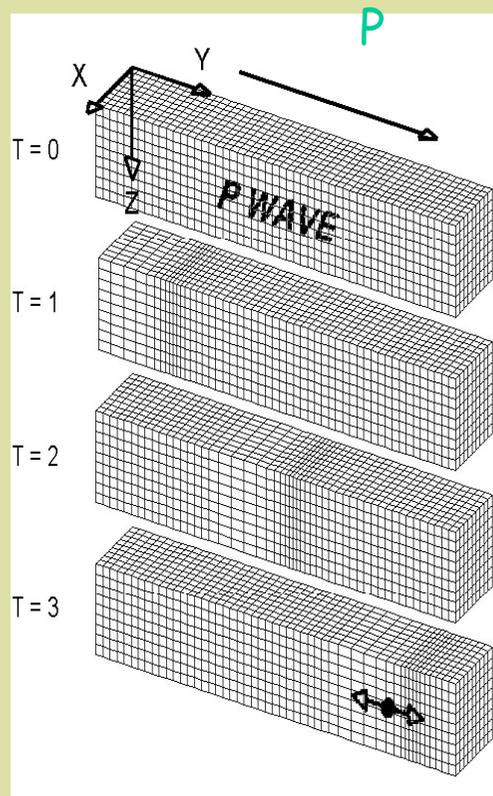
## Difetti

cioè scarsa attendibilità ed casualità dei risultati

Non è da considerare un difetto la difficoltà operativa e neppure l'elevato costo in quanto le prove giuste, in molti casi, possono aver un valore enorme per la sicurezza ed anche per il costo totale dell'opera

**I principali metodi di indagine sismica previsti dalle Istruzioni tecniche del Programma VEL della Regione Toscana e dagli “Indirizzi e criteri per la Microzonazione Sismica” sono**

- 1. Prospezioni sismiche a rifrazione con onde P e onde Sh***
- 2. Prospezioni sismiche in foro tipo downhole e crosshole***
- 3. Prospezioni sismiche con onde superficiali tipo MASW (Multichannel Analysis Surface Waves) attiva e passiva***
- 4. Prospezioni sismiche in foro di prova penetrometrica SCPT***
- 5. Misure di rumore sismico ambientale***

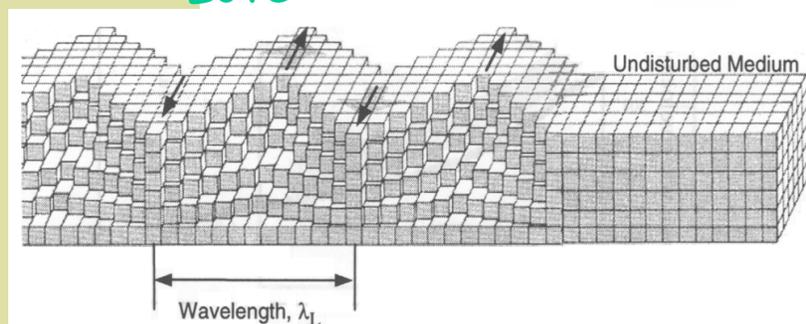


Onde elastiche:

Onde di volume (P ed S) si propagano in tutte le direzioni come una espansione sferica di una sollecitazione impulsiva.

Onde superficiali (Rayleigh, Love) si propagano parallelamente alla superficie libera con espansione circolare

Love



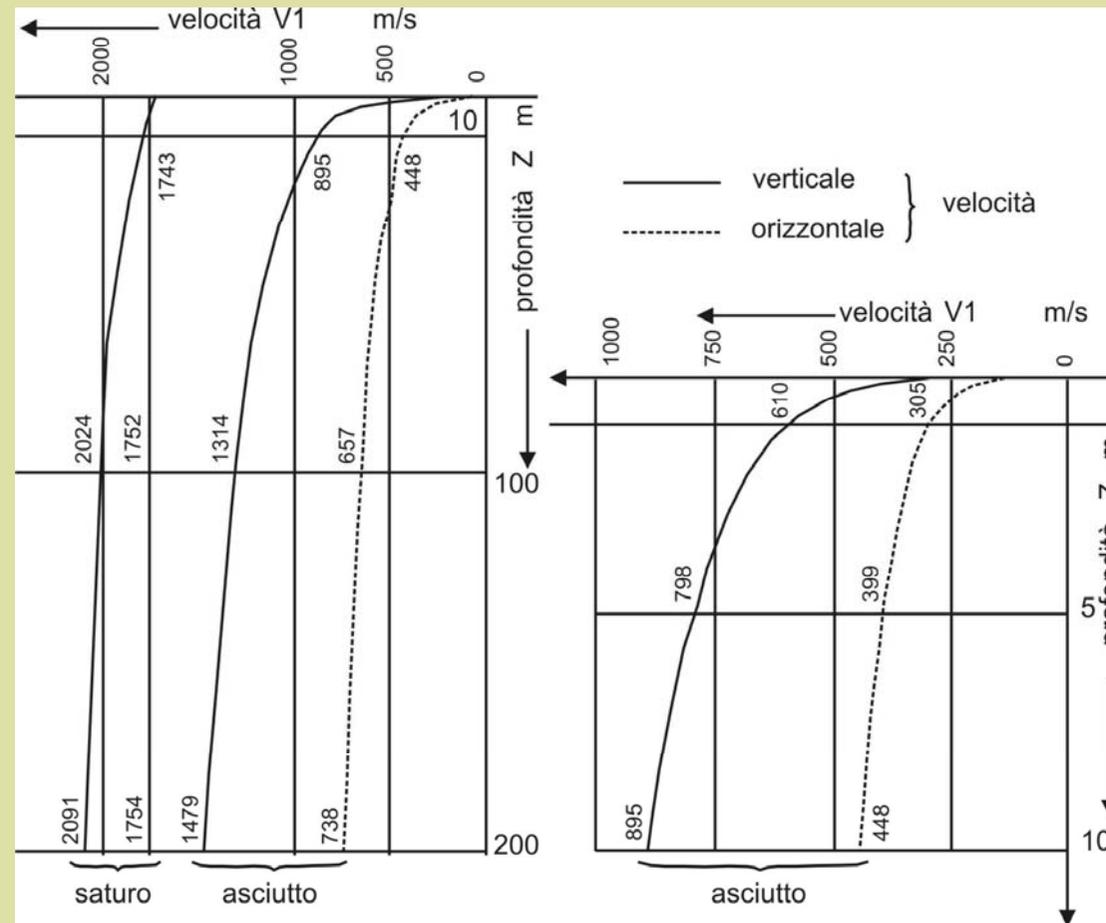
## Prospezioni sismiche a rifrazione

### Vantaggi della prospezione in onde SH

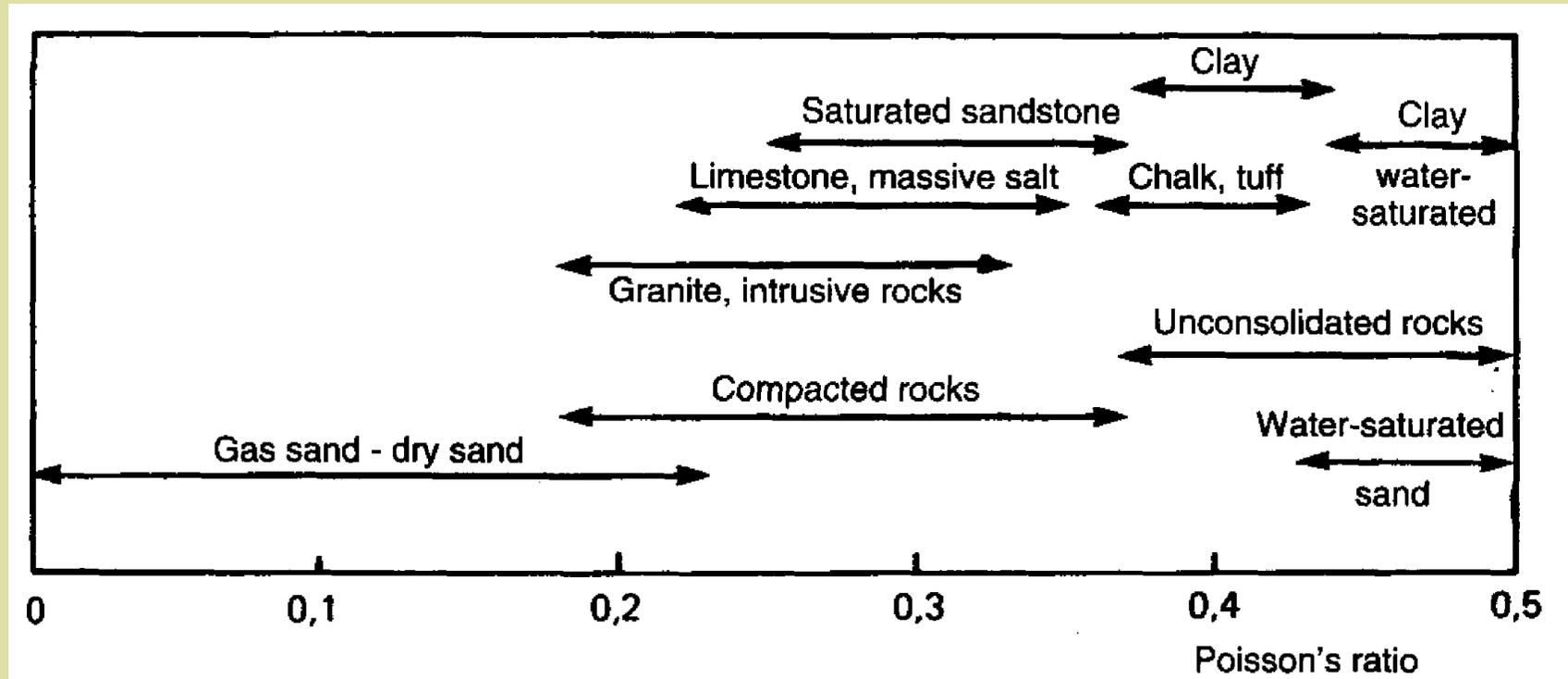
- a differenza delle onde longitudinali P e delle onde trasversali SV, non subiscono trasmutazioni (salvo in casi particolari), cioè durante la rifrazione e la riflessione di un'onda SH, su una superficie parallela al terreno, si producono solamente onde rifratte e riflesse SH;
- a parità di frequenza, le onde trasversali, a causa della loro velocità più bassa hanno, rispetto a quelle longitudinali, una minore lunghezza d'onda e conseguentemente una maggiore risoluzione;
- subiscono una minore attenuazione rispetto alle P nei mezzi porosi insaturi, in quanto correlate con la resistenza al taglio e non alla resistenza alla compressione dei terreni;
- sostanzialmente insensibili agli effetti della saturazione e della presenza di gas
- Il maggiore contrasto di Velocità tra i terreni superficiali e quelli profondi consente una maggiore profondità di indagine rispetto alle P

## Rapporto $V_p/V_s$ molto variabile nel caso di mezzi porosi e granulari

In mezzi granulari, la velocità di un'onda P può avere una variazione anche di oltre 1000 m/s passando da condizioni asciutte a condizioni di saturazione (Gassmann, 1951) inoltre si deve sottolineare che per saturazione si intende il 100% dei pori saturi in acqua, mentre già un livello del 99% porta ad una notevole diminuzione della velocità.



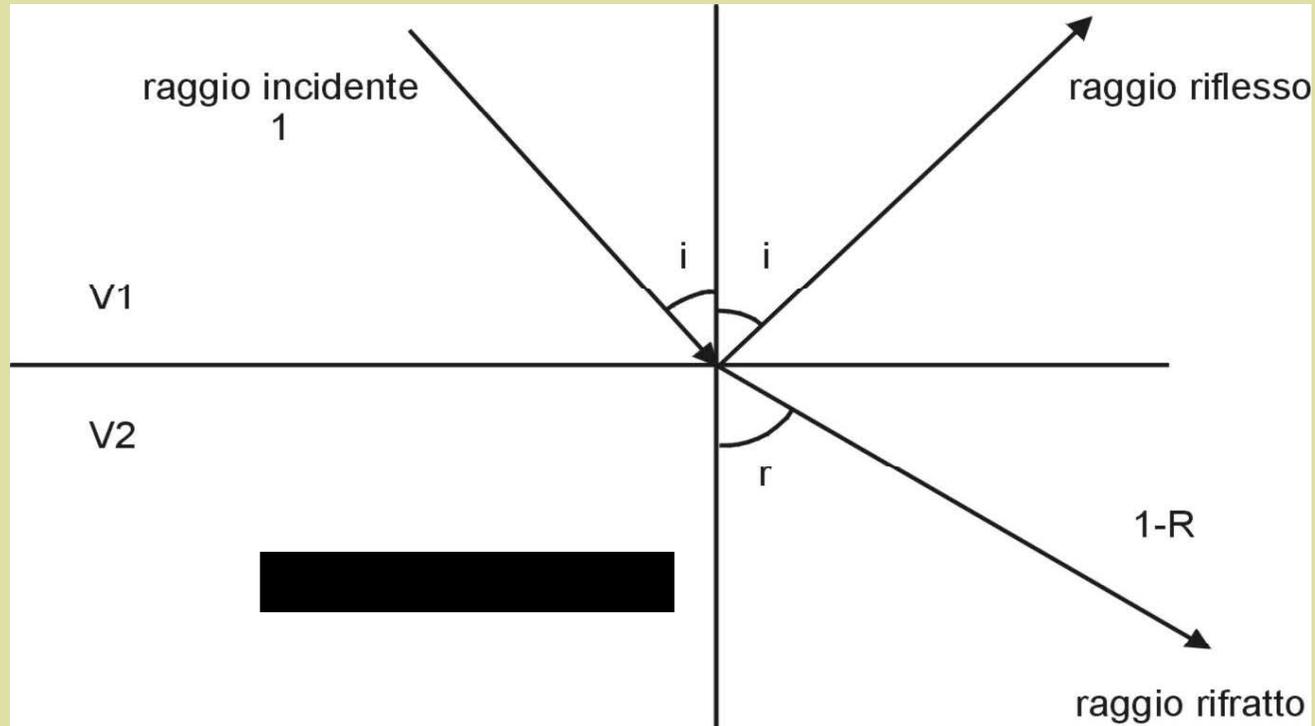
## Rapporto di Poisson



$$n = (1/2) [(V_p / V_s)^2 - 2] / [(V_p / V_s)^2 - 1]$$

Rapporto di Poisson molto variabile in mezzi porosi e granulari  
Nei mezzi porosi risulta stress-dipendente e assume un più esteso campo di valori e può addirittura arrivare a valori negativi (nell'areato)

## Legge di Snell



$$\sin i / \sin r = V_1 / V_2$$

$$i_c = \arcsin (V_1 / V_2)$$

$$R = (V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1) / (V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1)$$

## Strumentazione

L'apparecchiatura utilizzata per questo tipo di prova si compone delle seguenti parti:

- sistema sorgente (mazza, cannoncino industriale, massa battente, grave in caduta libera, esplosivo)
- sistema di ricezione (array geofonico 24÷48 canali o più)
- sistema di acquisizione dati (sismografo digitale 16-24 bit)
- trigger (sistema di sincronizzazione tra istante di energizzazione e sistema di registrazione)

## **Una buona strumentazione multicanale (24-48) deve consentire:**

### **Digitalizzazione a 16-24 bit:**

- Il segnale elettrico generato dai geofoni, generalmente trasduttori elettrodinamici, viene convertito da analogico a digitale, cioè si traduce in un valore numerico binario con una determinata risoluzione nel range di ammissibilità del segnale elettrico.
- Ad esempio un range di +/- 3V con una risoluzione di 16 bit permette di discriminare differenze di potenziale di  $(3 \times 2 / 65536) 0.091\text{mV}$ , 91 microVolt.
- Lo stesso range di tensione (+/- 3V) acquisito con un convertitore A/D a 24 bit, invece, permette di discriminare differenze di potenziale di 0.36 microVolt.
- Appare evidente che con un sistema a 24 bit si ha una tale estensione della dinamica della strumentazione che non è più necessario "settare" amplificatori o preamplificatori, come, invece era necessario con i vecchi sistemi ad 8bit ed in parte anche con quelli a 16 bit

### **Sommatoria del segnale**

Con i sistemi a 24bit anche lo stacking appare inutile ... se non c'è rumore di fondo. Infatti con i sistemi a bassa dinamica lo stacking portava ad un "rinforzo del segnale che, altrimenti risultava "a scalini", con i nuovi sismografi lo stacking può essere utile solo per attenuare il rumore di fondo che, statisticamente dovrebbe annullarsi sommando contributi sempre con fase diversa.

### **Filtraggio in acquisizione in uscita**

### **Inversione di polarità**

### **Stampa in campagna delle registrazioni**

### **TRA GLI ACCESSORI INDISPENSABILI SONO DA SEGNALARE I GEOFONI:**

Verticali, con frequenza propria di 4.5 Hz (MASW), 10Hz, 14 Hz

Orizzontali, con frequenza propria di 4.5÷10 Hz



OYO McSeis SX

24 canali a 16 bit

*Geofoni verticali da 14Hz, 10 Hz e 4,5 Hz*



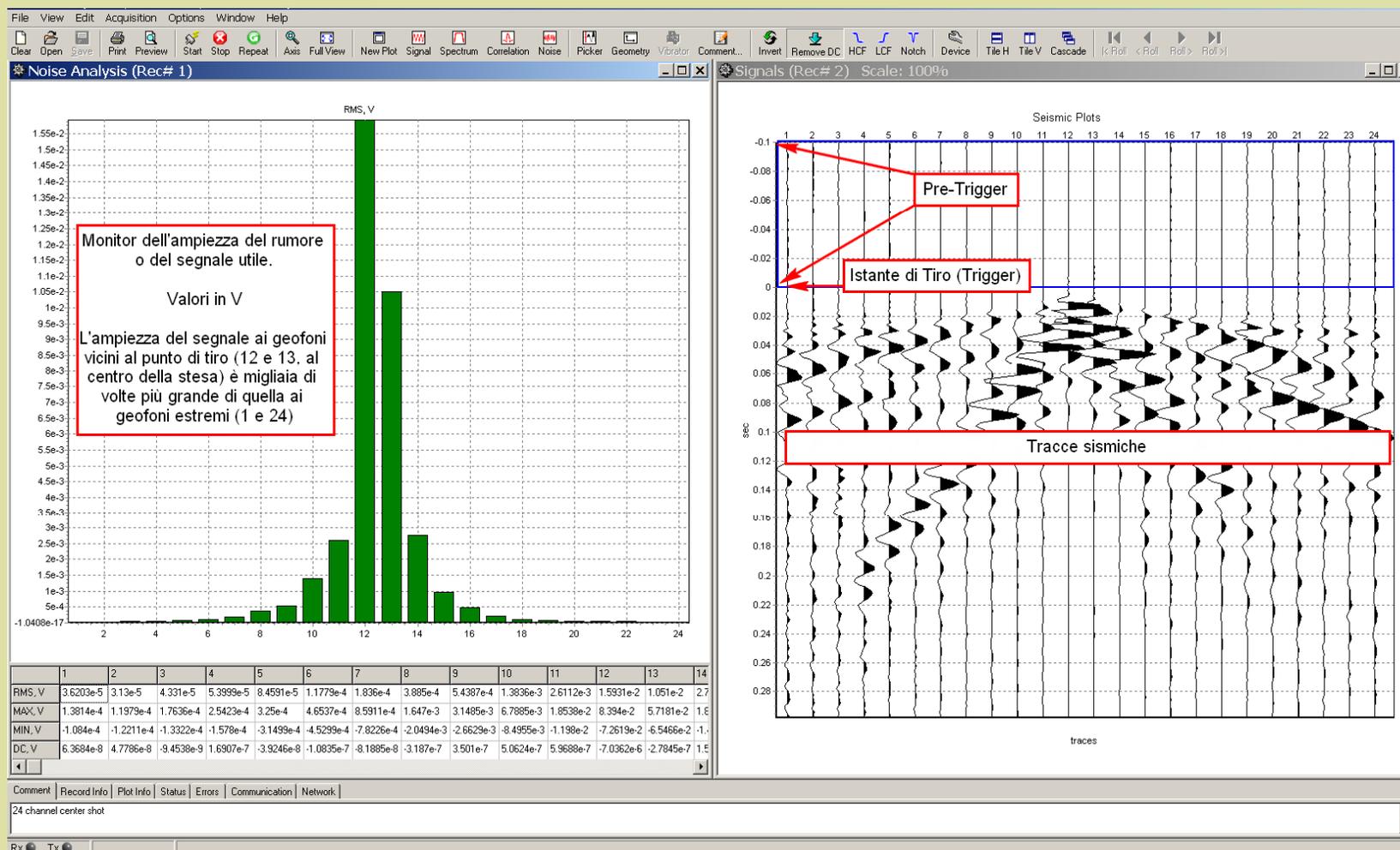
Seismic Source

DAQ-Link3 canali a 24 bit

Modulare fino a migliaia di canali

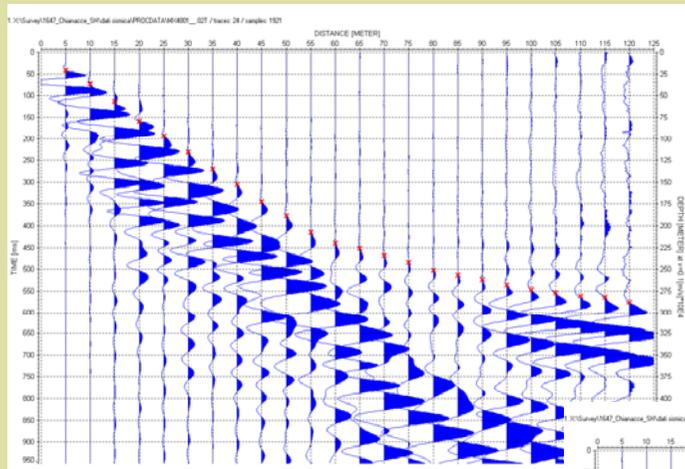
*Geofoni orizzontali da 10 Hz e 4,5 Hz*

## INFORMAZIONI DISPONIBILI DA UNA MODERNA STRUMENTAZIONE MULTICANALE

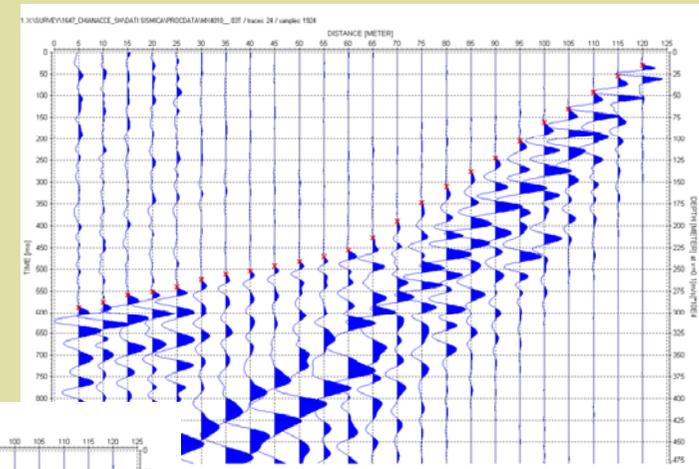




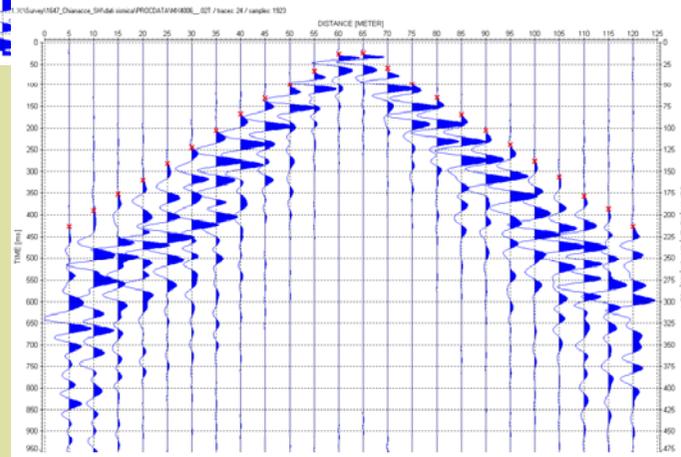
**A**



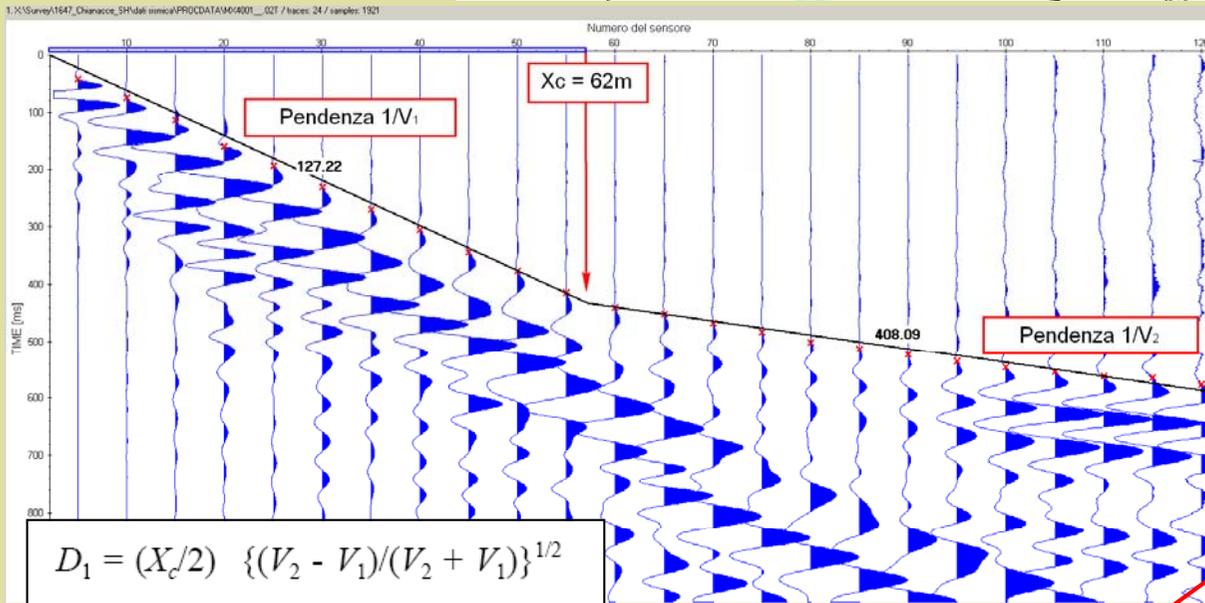
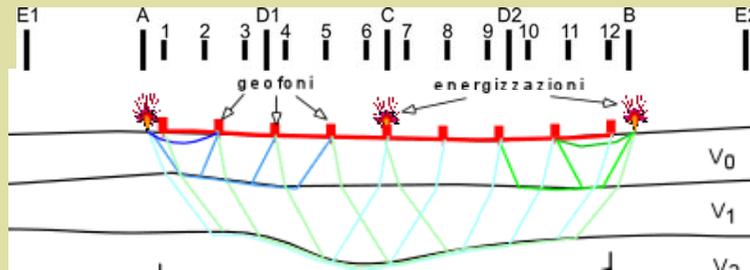
**B**



**C**



Scoppio A



$$D1 = (62/2) \times ((408-127) / (408+127))^{1/2}$$

$$D1 = 22.5 \text{ m}$$

$$V2/V1 = 3.2$$

$$Xc/D1 = 2.8$$

$$(VS30=153)$$

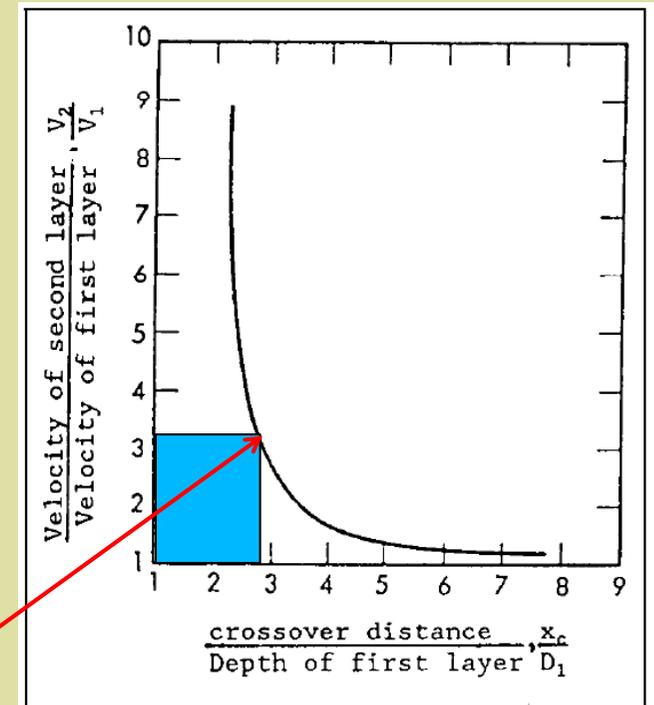
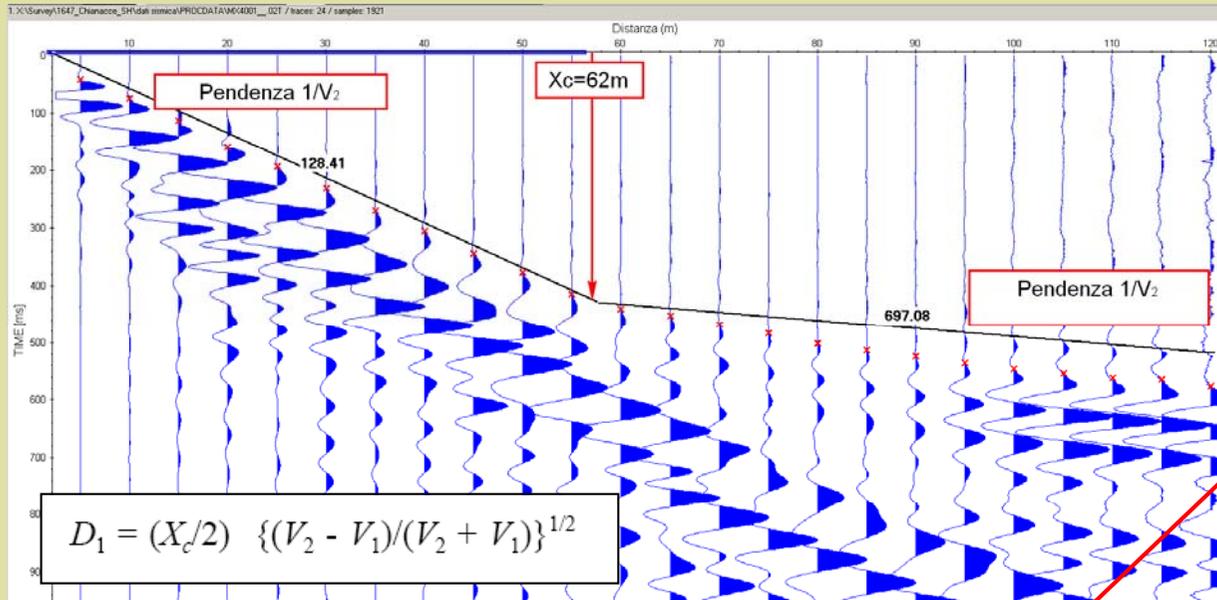
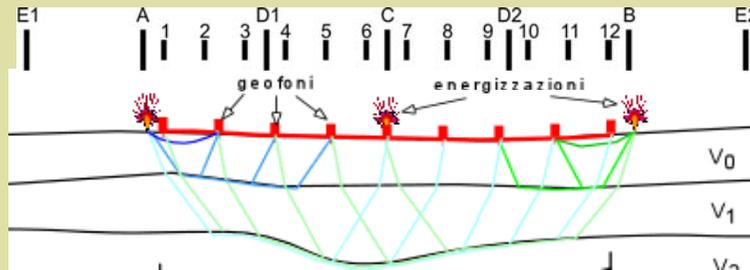


Figure 3-4. Plot of ratio of crossover distance to depth of first layer as a function of velocity contrast (Redpath 1973)

Scoppio A



$$D_1 = (62/2) \times ((697-128) / (697+128))^{1/2}$$

$$D_1 = 25.8 \text{ m}$$

$$V_2/V_1 = 5.4$$

$$X_c/D_1 = 2.4$$

$$(VS30 = 145)$$

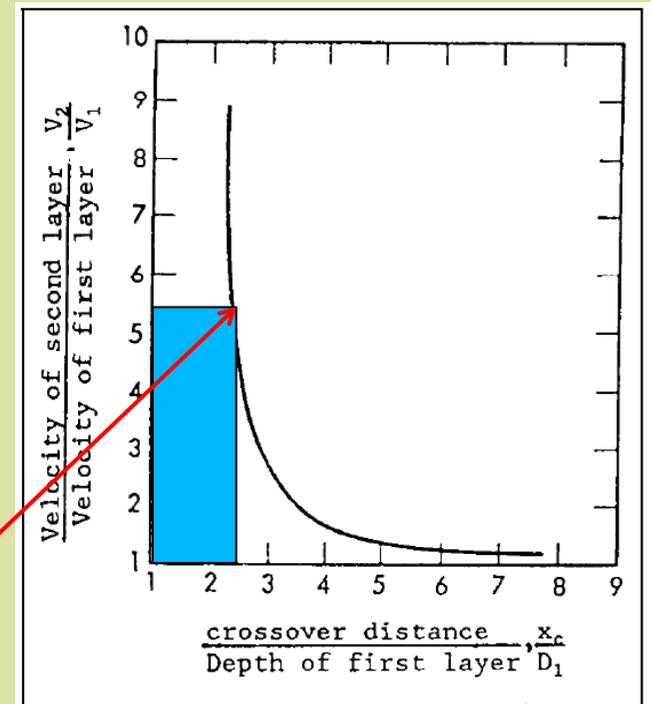


Figure 3-4. Plot of ratio of crossover distance to depth of first layer as a function of velocity contrast (Redpath 1973)

## Osservazioni sulla metodologia

**La profondità di indagine è confrontabile nella maggior parte dei contesti con la terza parte della distanza sorgente-ultimo geofono**

**Il numero di scoppi e la distanza tra i geofoni influenzano la risoluzione con cui velocità e geometria vengono descritte**

**Necessità di avere scoppi coniugati in tutte le metodologie interpretative**

**Necessità di avere scoppi esterni alla base sismica per alcune metodologie interpretative**

**Necessità di avere numerosi scoppi interni alla base sismica in caso di elaborazione tomografica  
(in genere uno scoppio ogni 3 geofoni)**

## Metodi d'interpretazione

- tempo intercetto
- delay time (Barry K.M., 1967)
- Generalized Reciprocal Method – G.R.M. (Palmer, 1980)

## Vantaggi del GRM

- 1) Applicabile con morfologie di superficie e sepolte complesse
- 2) Evidenzia le variazioni di velocità laterali, oltre che in profondità
- 3) Fornisce informazioni su spessore e velocità sotto ciascun geofono

## Limiti del GRM

- 1) Necessita di arrivi diretti e reciproci (da destra e da sinistra) sotto ogni geofono (“ricoperture”), il che si traduce in un elevato numero di energizzazioni
- 2) Necessita di tiri esterni alla base sismica

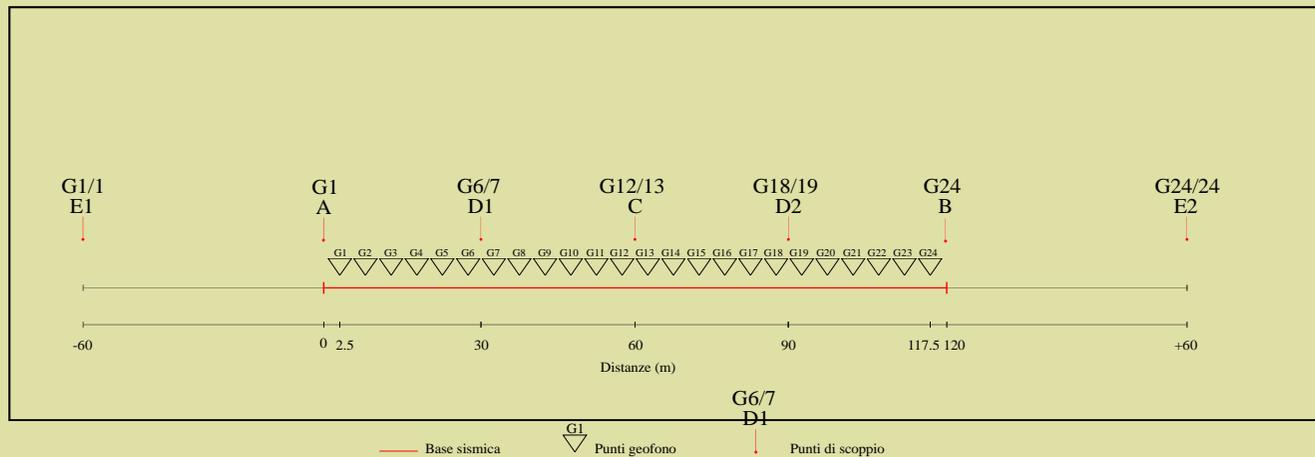
## Limiti della sismica a rifrazione

- un livello potrà essere evidenziato soltanto se la velocità di trasmissione delle onde longitudinali (o trasversali) in esso risulterà superiore a quella dei livelli soprastanti (effetto della inversione di velocità);
- un livello di spessore limitato rispetto al passo dei geofoni e alla sua profondità può non risultare rilevabile;
- un livello di velocità intermedia compreso tra uno strato sovrastante a velocità minore ed uno sottostante a velocità sensibilmente maggiore può non risultare rilevabile perché mascherato dagli "arrivi" dallo strato sottostante (effetto dello strato nascosto e "zona oscura");

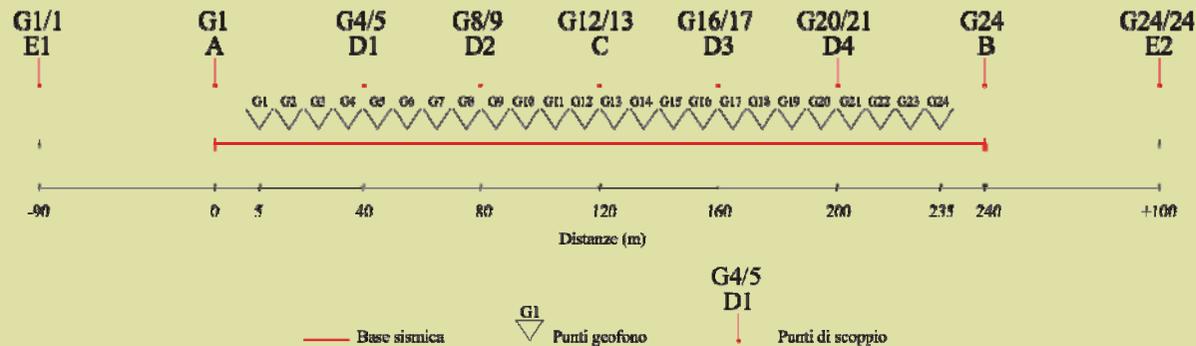
## Limiti della sismica a rifrazione

- aumentando la spaziatura tra i geofoni aumenta la profondità di investigazione, ma può ovviamente ridursi la precisione nella determinazione della profondità dei limiti di passaggio tra i diversi livelli individuati. In presenza di successioni di livelli con velocità (crescenti) di poco differenti tra loro, orizzonti a velocità intermedia con potenza sino anche ad 1/3 del passo adottato possono non essere evidenziati. Il limite tra due orizzonti può quindi in realtà passare "attraverso" un terzo intermedio non evidenziabile;
- analogamente, incrementi graduali di velocità con la profondità danno origine a dromocrone che consentono più schemi interpretativi. Il possibile errore può essere più contenuto potendo disporre di sondaggi di taratura e "cercando" sulle dromocrone delle basi sismiche i livelli che abbiano velocità il più possibile simili a quelle ottenute con le tarature.

**Sismica a rifrazione:**  
**schema di acquisizione standard minimo per linea da**  
**120 m**  
**passo intergeofonico  $i = 5$  m**  
**7 registrazioni per linea di cui 5 interne alla base e 2**  
**esterne**



**Sismica a rifrazione:  
schema di acquisizione standard per linea da 240 m  
passo intergeofonico  $i = 10$  m  
9 registrazioni per linea di cui 7 interne alla base e  
2 esterne**



## Fondamentale è ottenere buone registrazioni!

- 1) Curare accoppiamento geofoni con il terreno (soprattutto nei terreni granulari asciutti, o detritici, l'accoppiamento tra sensori e terreno è uno dei problemi principali a cui si può ovviare, ad esempio, scavando una piccola fossetta e ricoprendo il geofono, dopo averlo infisso sul fondo, con il terreno stesso)
- 2) Avere a disposizione fonti energetiche adeguate alla situazione geologico-stratigrafica, alla lunghezza della linea (e cioè alla profondità di indagine richiesta), al rumore di fondo
- 3) Avere a disposizione un sistema di acquisizione che consenta il monitoraggio in tempo reale ed in continuo del rumore di fondo al fine di sfruttare i momenti di minor rumore ambientale

**E' sempre raccomandata (IT VEL) l'esecuzione  
della prospezione sismica a rifrazione  
sia in onde P sia in onde SH**

- 1) Facilitazione dell'interpretazione stratigrafica dal confronto delle dromocrone in P ed Sh**
- 2) Stima dei moduli elastici dinamici del terreno**
- 3) Presenza o meno di falda acquifera, terreni saturi**

## Energizzazione onde P



Mazza da 10 kg



Cannoncino  
industriale cal. 8



Maglio da 150 kg

## Energizzazione in onde SH



Fossetta scavata nel terreno con piastre laterali



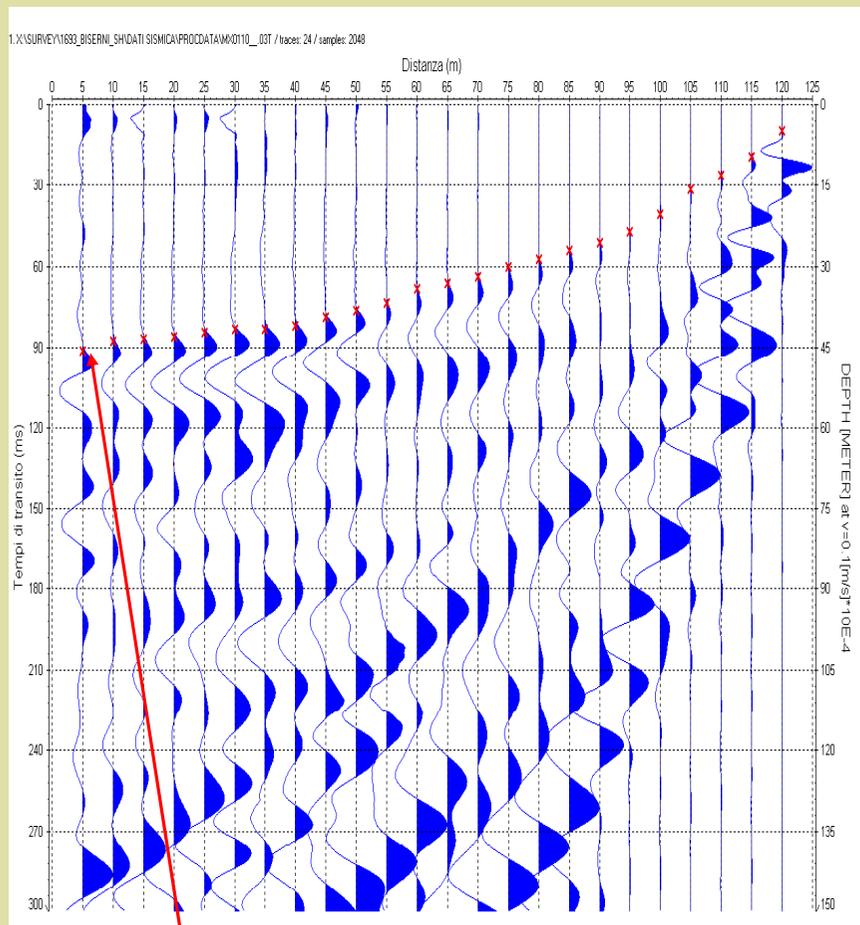
Doppio pendolo su penetrometro cingolato (GEOPROVE SAS Lucca)



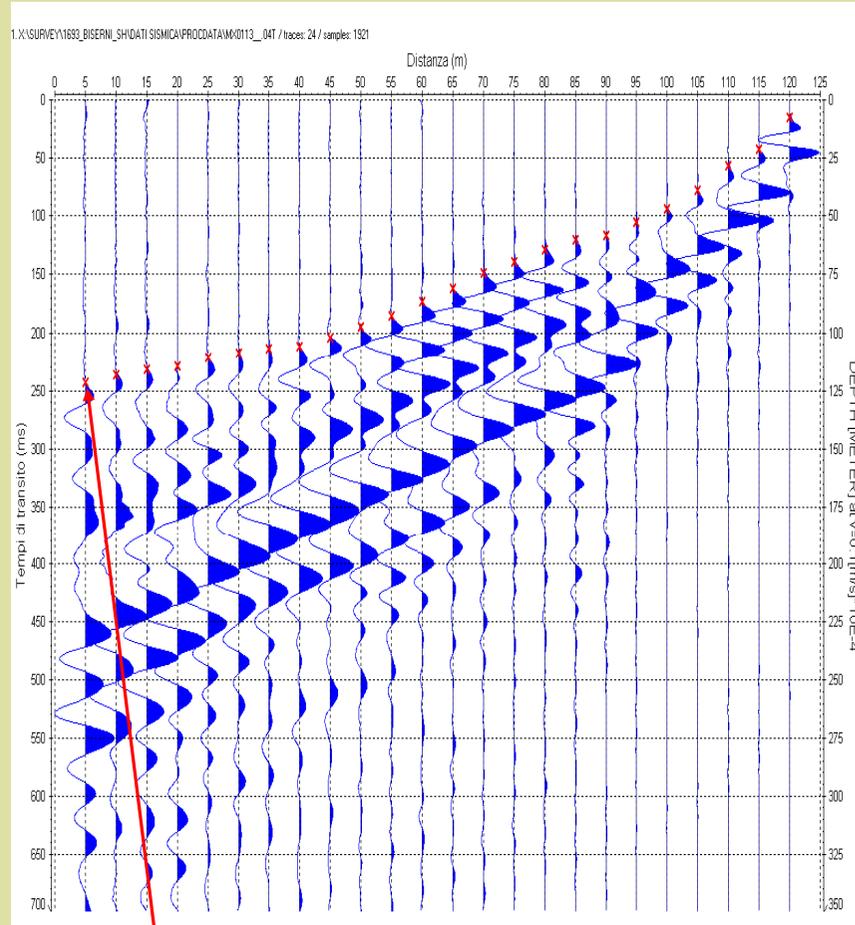
Pendolo da 20 kg con impatto su trave zavorrata da autocarro

Firenze 22/10/2010

## Esempio di buone registrazioni in onde P e onde SH

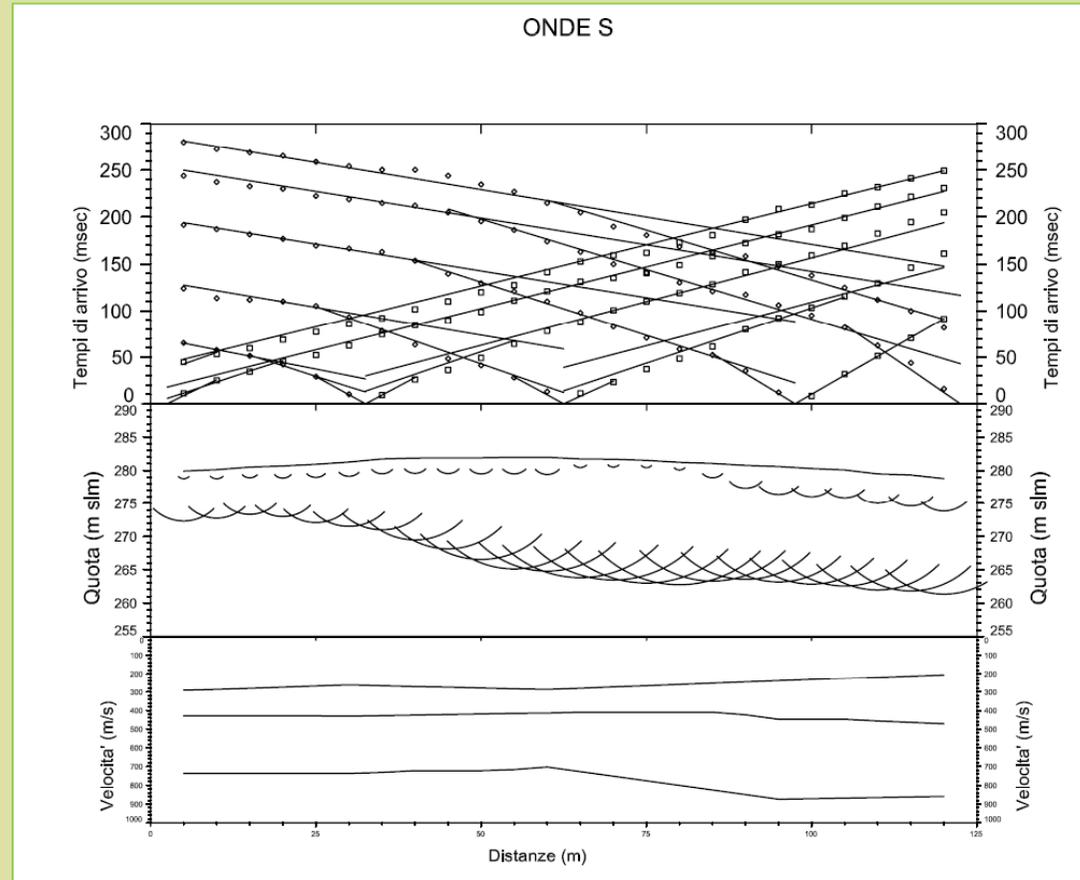


Tempo primo arrivo onde P = 91 msec

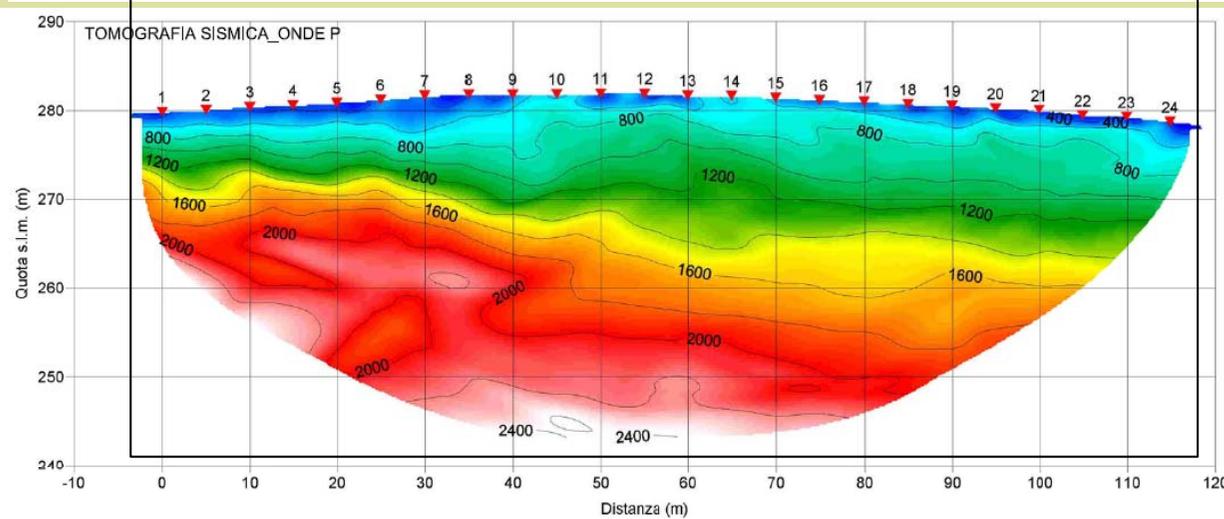
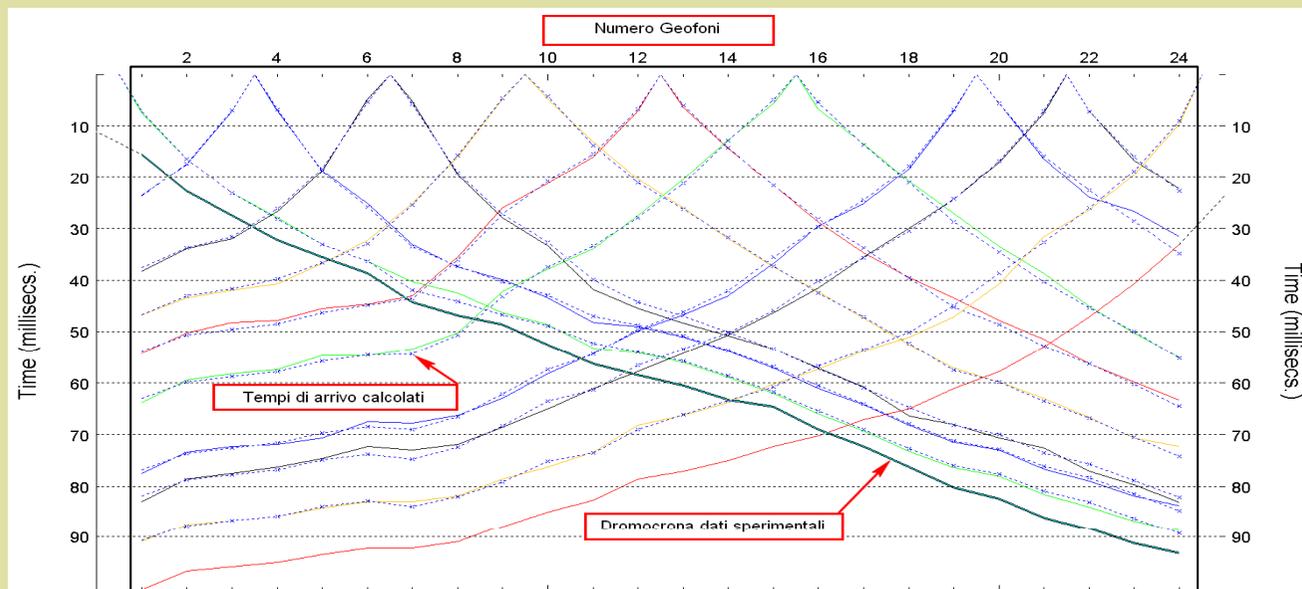


Tempo primo arrivo onde Sh = 245 msec

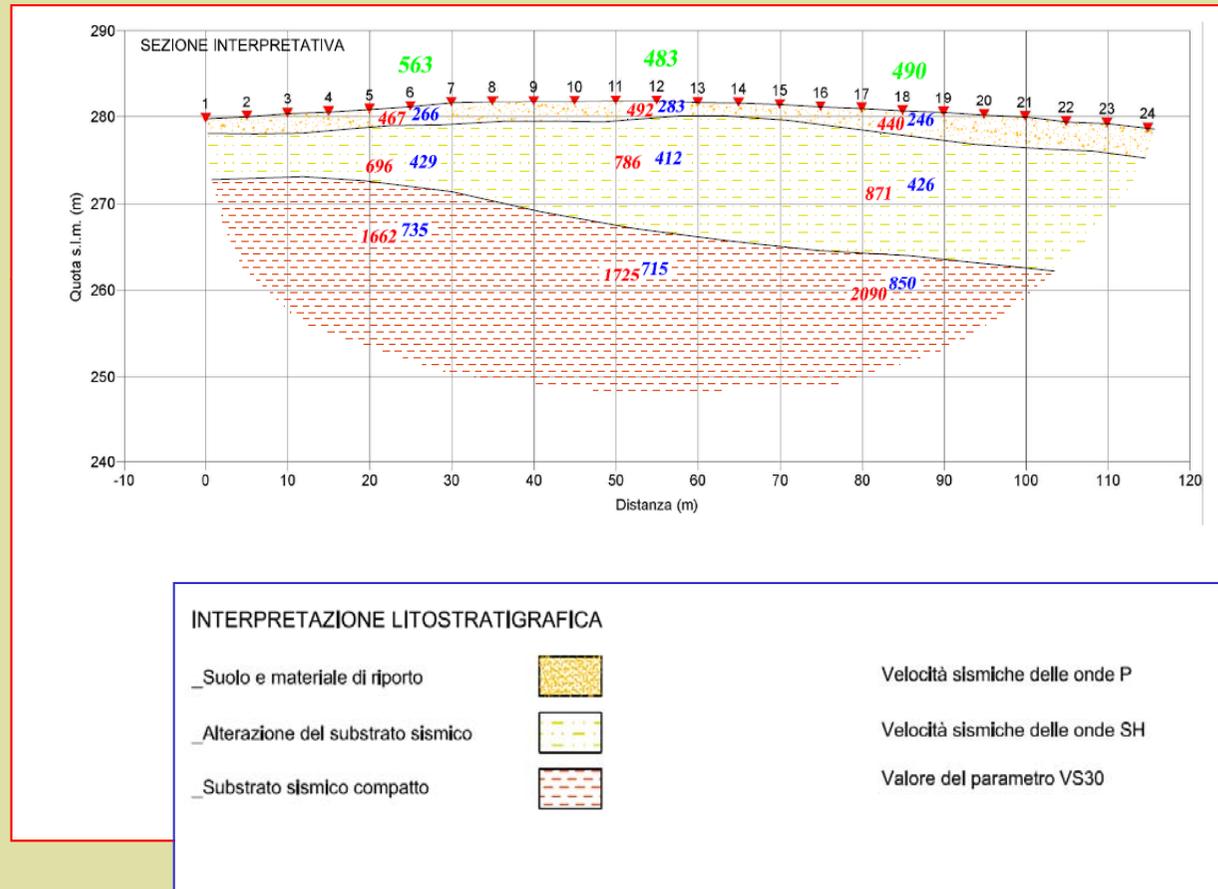
## Elaborazione GRM (Generalized reciprocal Method)



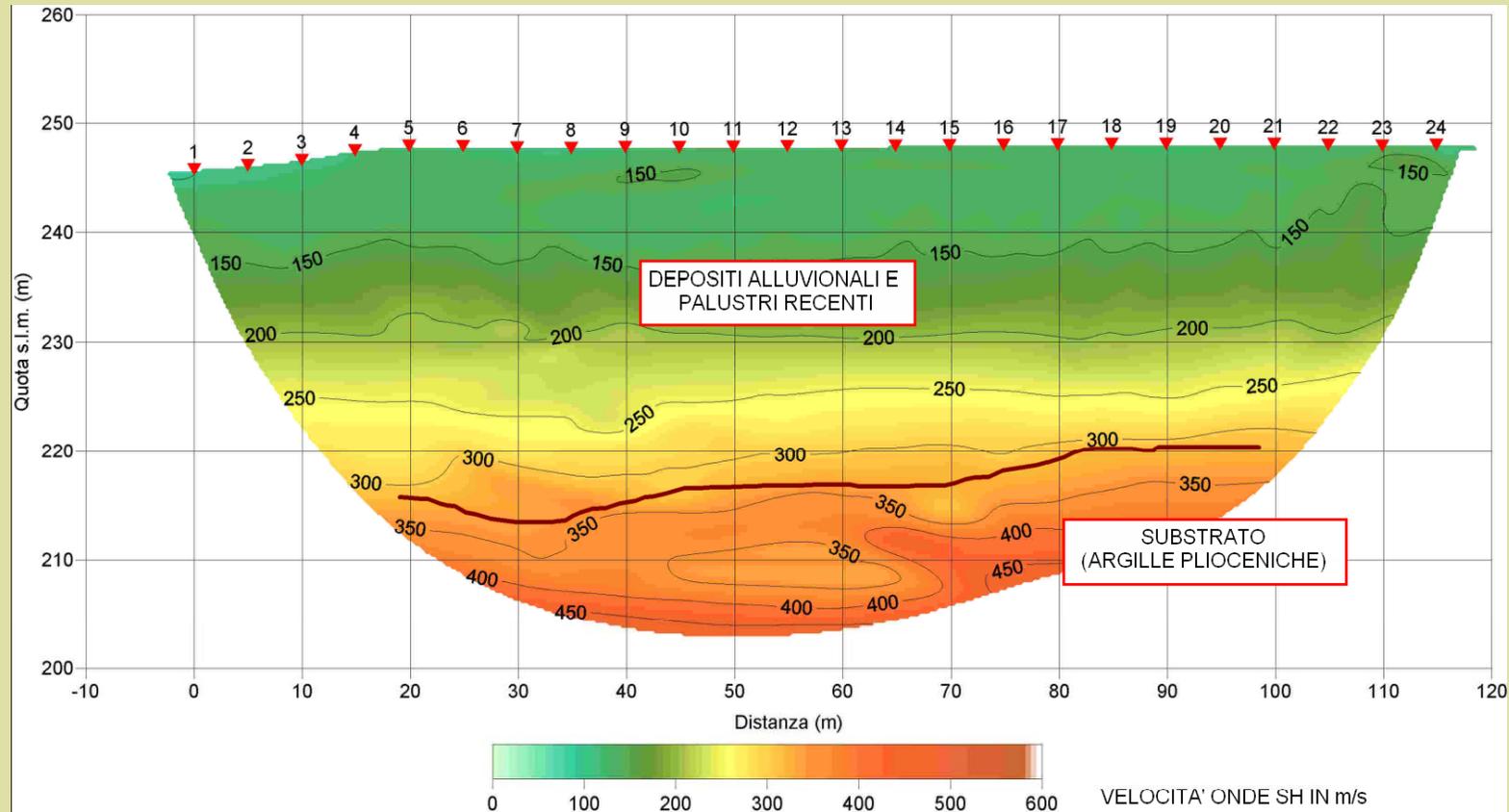
## Elaborazione tomografica (Rayfract etc.)



## INTERPRETAZIONE STRATIGRAFICA E CALCOLO VS30

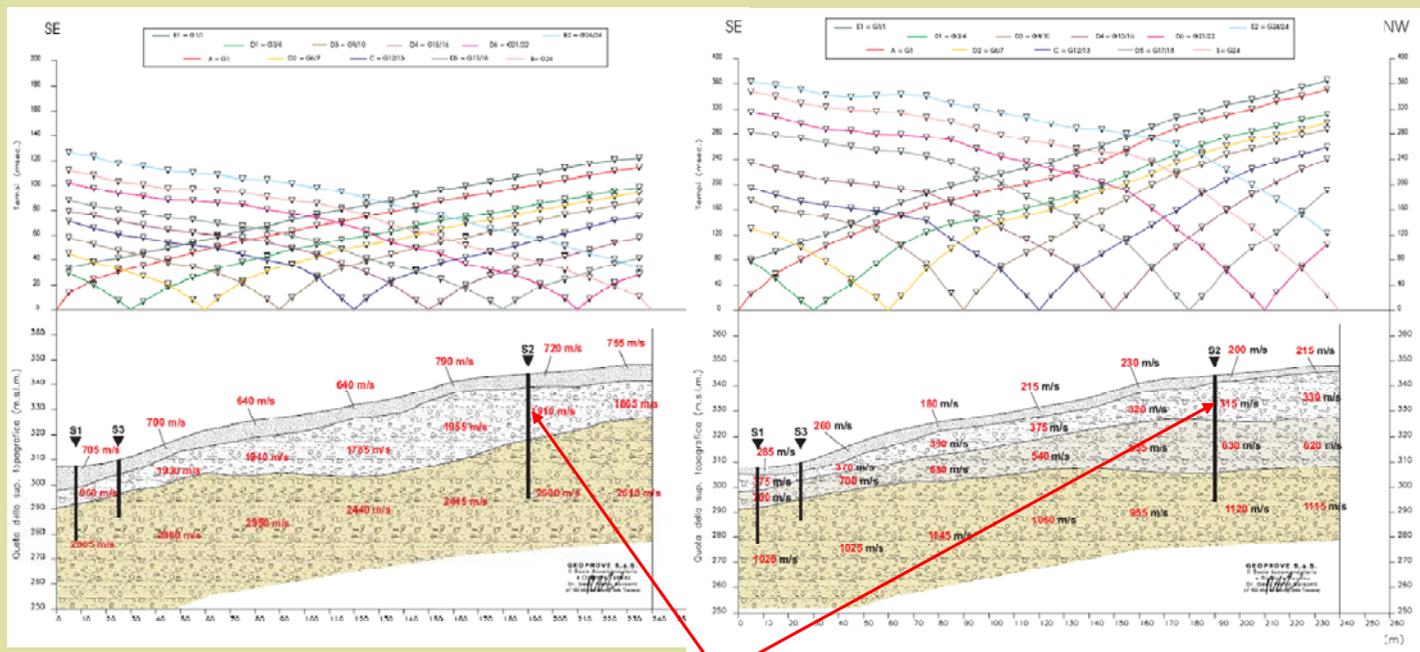


## SISMICA ONDE Sh - ELABORAZIONE TOMOGRAFICA



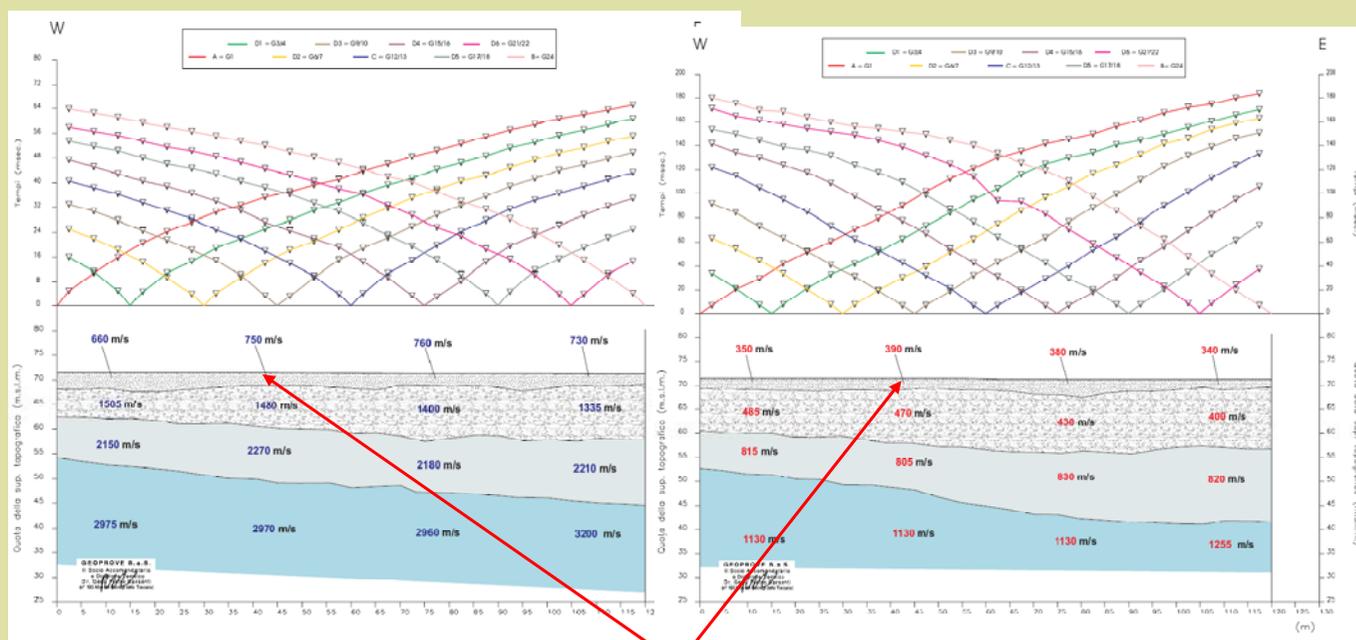
**Depositi terrazzati ct<sub>mg</sub> e depositi fluviolacustri del Bacino di Castelnuovo di Garfagnana**

(da *Categorie di sottosuolo e indagini sismiche: casi particolari di categorie S1 o S2*  
Dott. Geol. P. Barzanti, 2010)



Profondità da m a m	Vp	Vs	Vp/Vs	Rapporto Poisson	Densità Gamma (kg/dmc)	Modulo di taglio G (kg/cmq)	Modulo di Young E (kg/cmq)
0-5	720	200	3,600	0,46	1,90	775	2.259
5-18	1910	315	6,063	0,49	2,00	2.023	6.012
18-26	1910	630	3,032	0,44	2,05	8.294	23.870
26-40	2600	630	4,127	0,47	2,10	8.496	24.959
>40	2600	1120	2,321	0,39	2,10	26.853	74.440

**Depositi alluvionali attuali e recenti su bedrock calcareo marnoso (Pistoia)**  
(da Categorie di sottosuolo e indagini sismiche: casi particolari di categorie S1 o S2  
Dott. Geol. P. Barzanti, 2010)



Profondità da m a m	Vp	Vs	Vp/Vs	Rapporto Poisson	Densità Gamma (kg/dmc)	Modulo di taglio G (kg/cmq)	Modulo di Young E (kg/cmq)
0-3	750	390	1,923	0,31	1,90	2.946	7.746
3-12	1480	470	3,149	0,44	2,00	4.504	13.006
12-22	2270	805	2,820	0,43	2,30	15.193	43.394
>22	2970	1130	2,628	0,42	2,50	32.541	92.114

## Prospezioni downhole

### Schema di acquisizione prova downhole (Con sismografo a 12 canali)

Canale 1 attivo con geofono V-s (superiore) per la battuta V (verticale);  
Canale 2 attivo con geofono V-i (inferiore) per la battuta V;

Canale 3 attivo con geofono H1-s per la battuta S (sinistra) H (orizzontale);  
Canale 4 attivo con geofono H1-i per la battuta SH;

Canale 5 attivo con geofono H2-s per la battuta SH;  
Canale 6 attivo con geofono H2-i per la battuta SH;

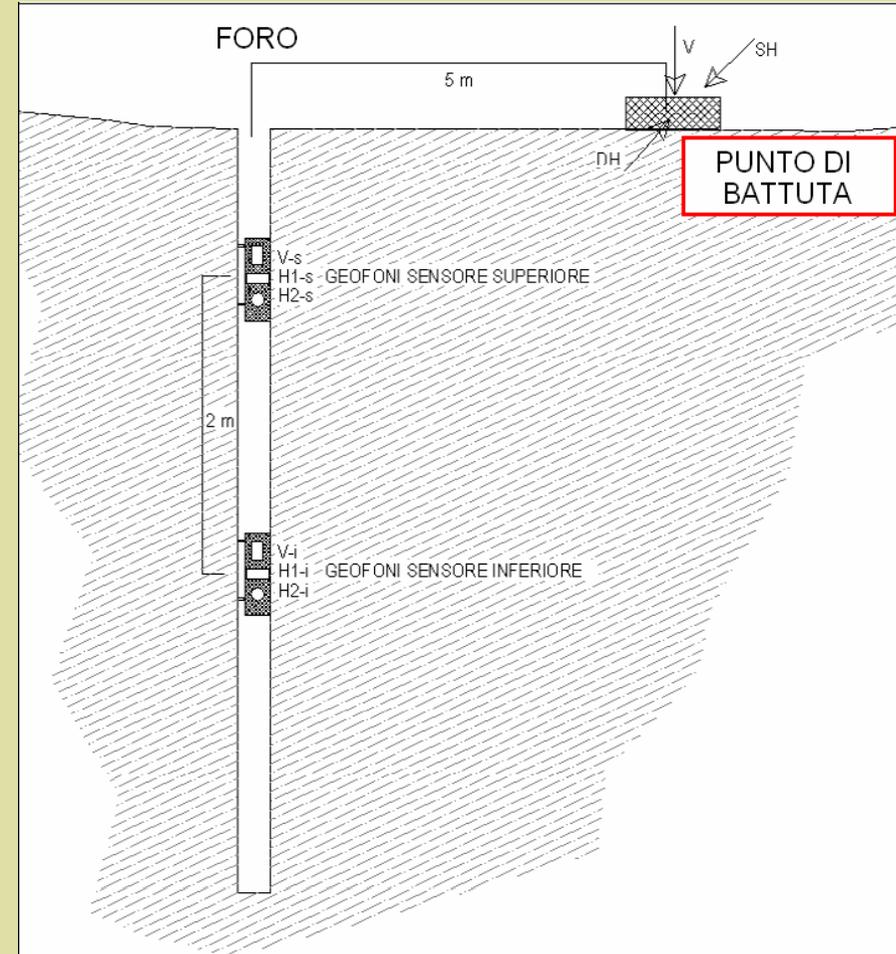
Canale 7 attivo con geofono H1-s per la battuta D (destra) H (orizzontale);  
Canale 8 attivo con geofono H1-i per la battuta DH;

Canale 9 attivo con geofono H2-s per la battuta DH;  
Canale 10 attivo con geofono H2-i per la battuta DH;

Canale 11 attivo con geofono H1-i per la battuta SH e con polarità invertita  
sommatoria della battuta DH;

Canale 12 attivo con geofono H2-i per la battuta SH e con polarità invertita  
sommatoria della battuta DH;

(Schema GEORISORSE ITALIA – Permette di avere in un solo file SEG2 tutti i dati  
acquisiti con il gruppo di geofoni posti ad una determinata profondità)



## Prospezioni downhole

### *Esempio di sismogrammi relativi alla profondità di 28 m dal p.c. (con sismografo a 12 canali)*

Canale 1 attivo con geofono V-s (superiore) per la battuta V(verticale);  
Canale 2 attivo con geofono V-i (inferiore) per la battuta V;

Canale 3 attivo con geofono H1-s per la battuta S(sinistra)H(orizzontale);  
Canale 4 attivo con geofono H1-i per la battuta SH;

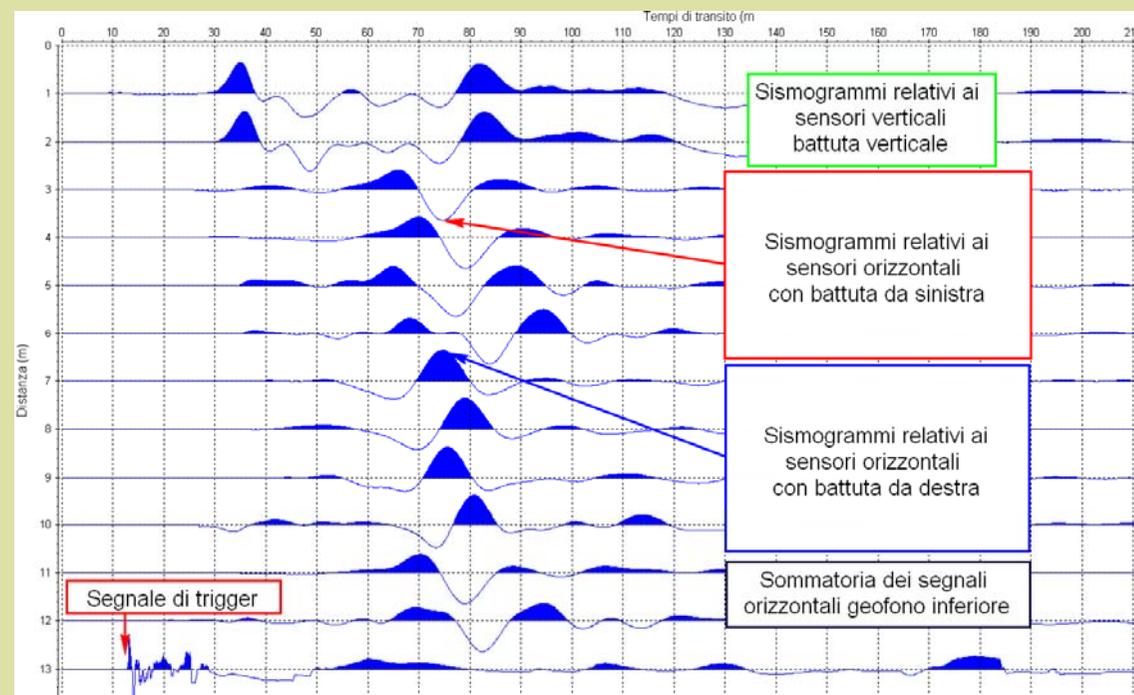
Canale 5 attivo con geofono H2-s per la battuta SH;  
Canale 6 attivo con geofono H2-i per la battuta SH;

Canale 7 attivo con geofono H1-s per la battuta D(destra)H(orizzontale);  
Canale 8 attivo con geofono H1-i per la battuta DH;

Canale 9 attivo con geofono H2-s per la battuta DH;  
Canale 10 attivo con geofono H2-i per la battuta DH;

Canale 11 attivo con geofono H1-i per la battuta SH e con polarità invertita  
sommatoria della battuta DH ;

Canale 12 attivo con geofono H2-i per la battuta SH e con polarità invertita  
sommatoria della battuta DH ;

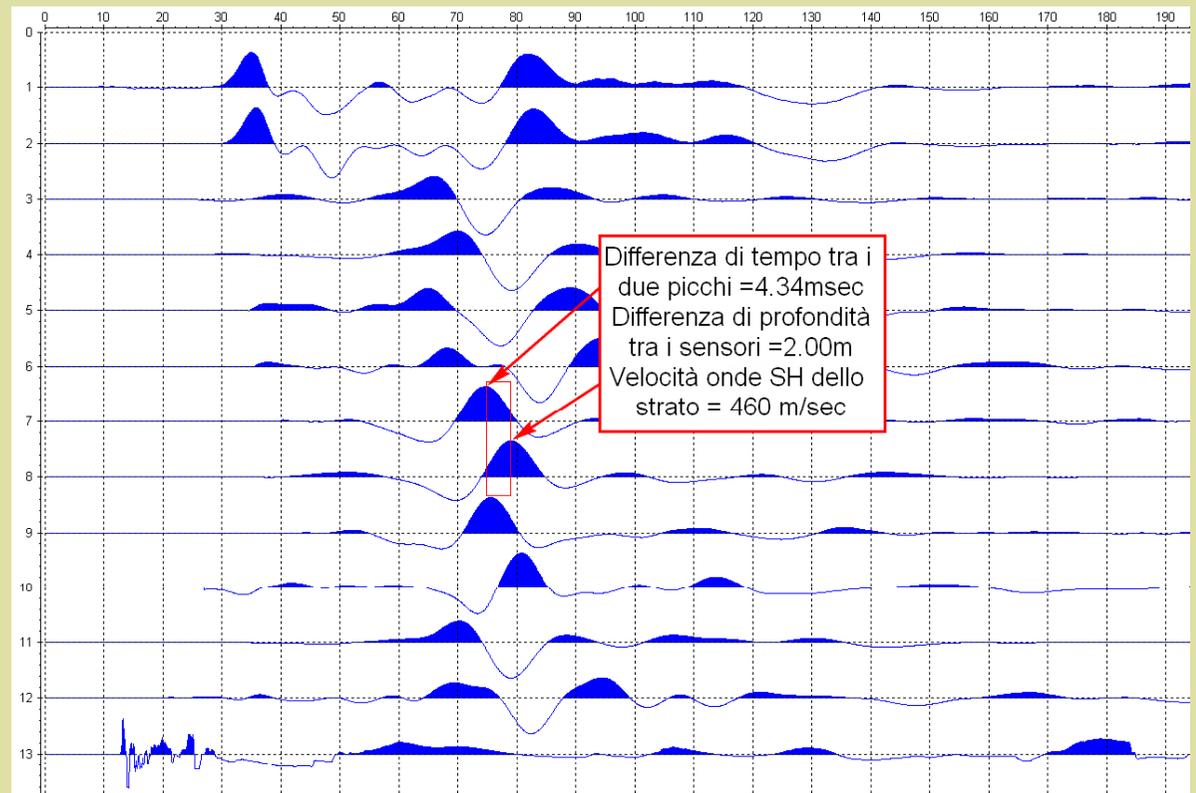


(Schema GEORISORSE ITALIA – Permette di avere in un solo file SEG2 tutti i dati acquisiti con il gruppo di geofoni posti ad una determinata profondità)

## Prospezioni downhole

### *Esempio di sismogrammi relativi alla profondità di 28 m dal p.c. (con sismografo a 12 canali)*

*In questo modo si possono controllare contemporaneamente tutti i sensori e fare una immediata valutazione della velocità dei terreni attraversati facendo un semplice calcolo della velocità (SH) di strato come differenza di tempo tra i picchi su due canali omologhi ma di sensori posti a differenti profondità (2m)*



## Strumentazione per downhole



*Geofoni  
tridirezionali*



*Particolare del martinetto pneumatico  
di ancoraggio*

*Aste guida del doppio  
geofono*



## **Importanza della corretta realizzazione del foro di sondaggio e della cementazione del tubo per la downhole**

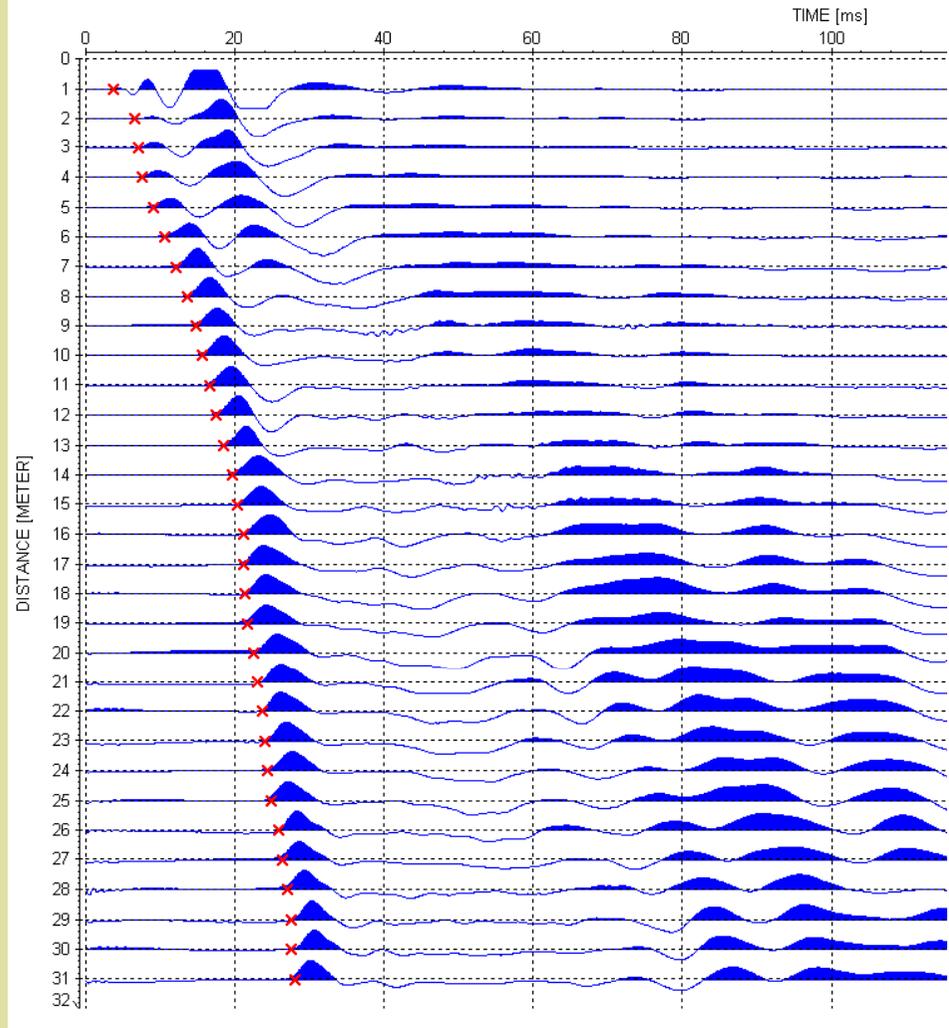
**La cementazione deve avvenire dal basso verso l'alto iniettando a pressione una miscela di acqua, cemento e bentonite nella proporzione di 450 g cemento Portland, 450 g bentonite, 2.8 kg acqua nel caso di depositi sciolti (vedi IT VEL)**

**Tra il completamento della cementazione e l'esecuzione della downhole devono trascorrere da un minimo di 3 - 4 ad almeno 6 - 7 giorni, in modo di consentire il consolidamento della boiaccia o, comunque, il rifluimento del terreno intorno al tubo**

**Importante avere anche una buona strumentazione  
multicanale che consenta:**

- 1) Digitalizzazione a 16-24 bit
- 2) Sommatoria del segnale
- 3) Filtraggio in acquisizione in uscita
- 4) Inversione di polarità
- 5) Stampa in campagna delle registrazioni

1. X:\Survey\1574-Siena\_Ospedale-DH\Dati Sismica\PROCDATA\MX0101\_\_22T / traces: 31 / samples: 3968



1. X:\Survey\1574-Siena\_Ospedale-DH\Dati Sismica\PROCDATA\MX0101\_\_44T / traces: 31 / samples: 3968

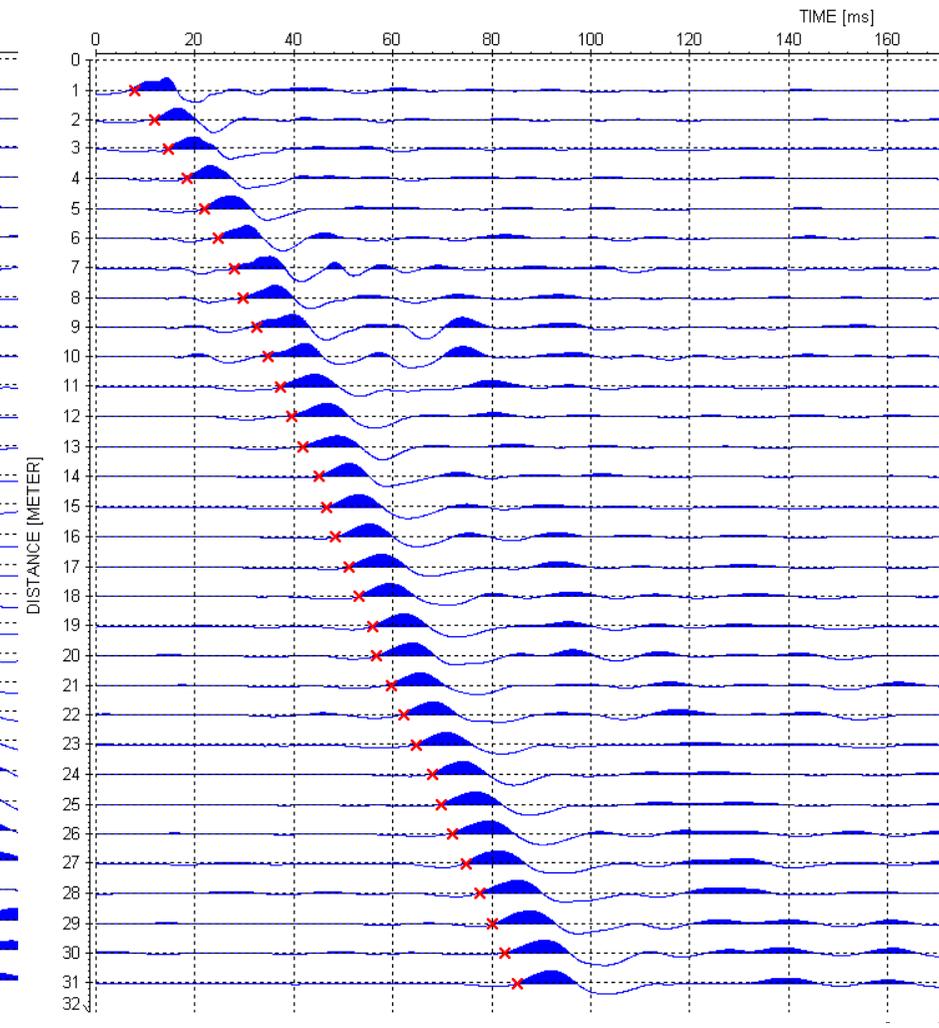
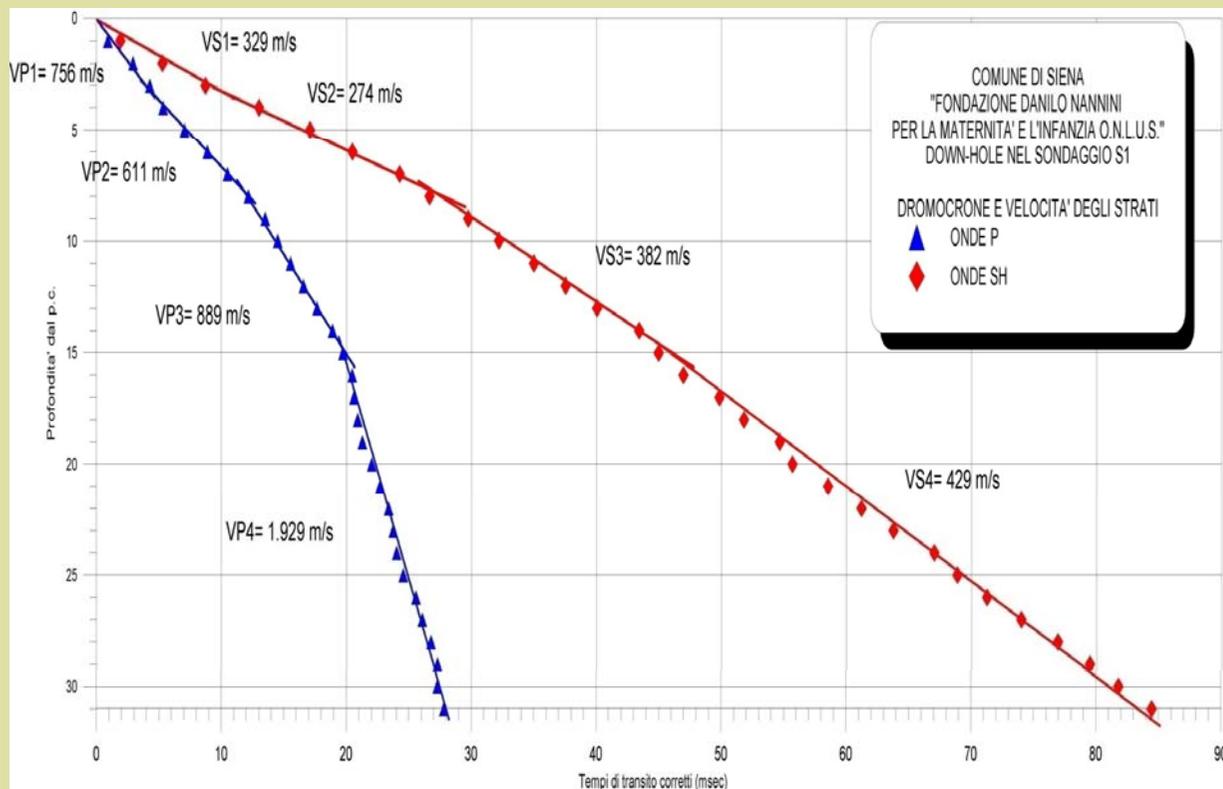
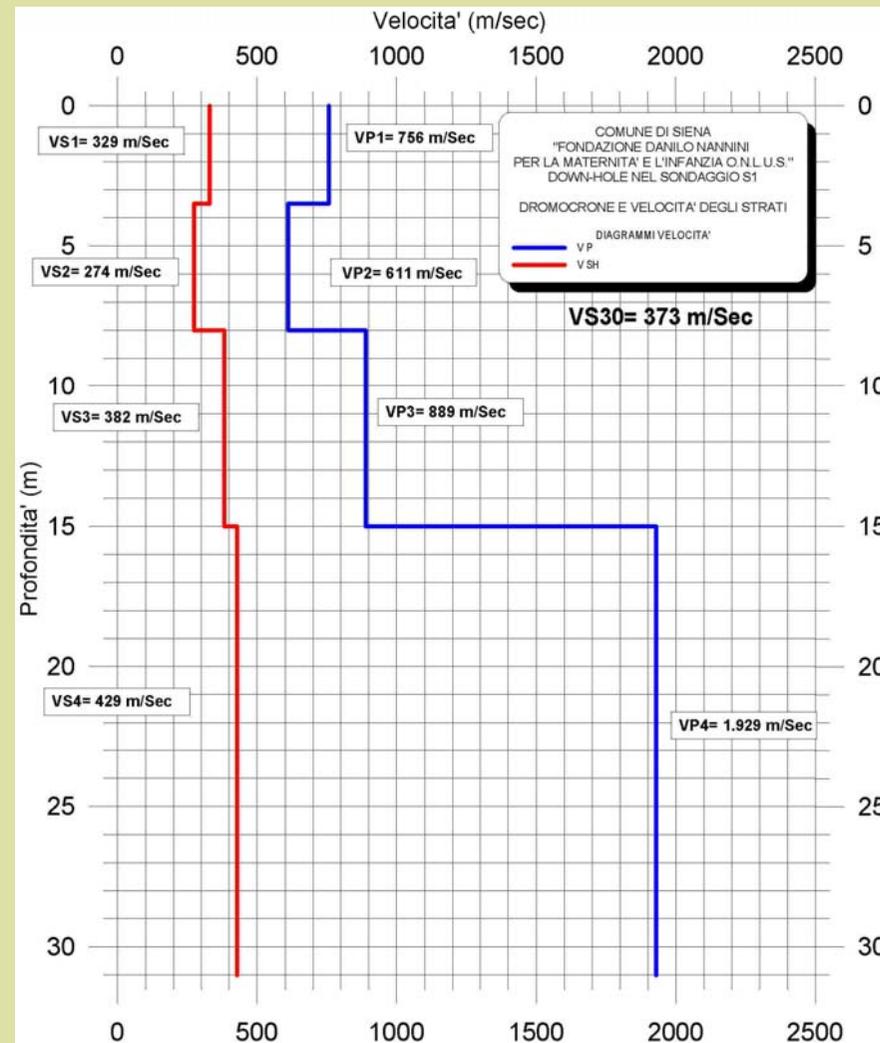


TABELLE DEI TEMPI DI ARRIVO MISURATI E CORRETTI DELLE ONDE P E DELLE ONDE SH;

PB	D <sub>batM</sub>	FC	TVPM	TVPC	TVSM	TVSC
1	4	0.24	3.78	0.81	7.91	1.92
2	4	0.45	6.55	2.03	11.82	5.29
3	4	0.60	7.14	3.32	14.53	8.72
4	4	0.71	7.56	4.75	18.41	13.02
5	4	0.78	9.03	6.03	21.89	17.10
6	4	0.83	10.66	7.41	24.62	20.48
7	4	0.87	12.09	9.04	27.95	24.27
8	4	0.89	13.60	10.51	29.79	26.64
9	4	0.91	14.78	12.12	32.55	29.74
10	4	0.93	15.62	13.10	34.68	32.20
11	4	0.94	16.54	13.89	37.23	34.99
12	4	0.95	17.46	14.82	39.56	37.53
13	4	0.96	18.47	16.69	41.89	40.04
14	4	0.96	19.65	17.60	45.14	43.41
15	4	0.97	20.40	18.66	46.54	44.97
16	4	0.97	21.10	19.88	48.40	46.96
17	4	0.97	21.16	20.43	51.20	49.84
18	4	0.98	21.41	20.82	53.06	51.80
19	4	0.98	21.75	20.87	55.85	54.65
20	4	0.98	22.46	22.02	56.78	55.68
21	4	0.98	23.09	22.93	59.57	58.52
22	4	0.98	23.76	22.80	62.19	61.19
23	4	0.99	24.10	23.16	64.71	63.76
24	4	0.99	24.35	23.85	67.95	67.03
25	4	0.99	24.85	23.88	69.75	68.87
26	4	0.99	25.86	25.39	72.07	71.24
27	4	0.99	26.36	26.12	74.79	73.98
28	4	0.99	27.04	26.43	77.69	76.91
29	4	0.99	27.54	26.95	80.21	79.46
30	4	0.99	27.54	26.63	82.54	81.81
31	4	0.99	28.04	26.65	85.17	84.47

PB	Profondità da boccapozzo (m)
D <sub>batM</sub>	Distanza tra punto di battuta e boccapozzo (m)
FC	Fattore di Correzione tra distanza obliqua e verticale
TVPM	Tempo di transito misurato delle onde P
TVPC	Tempo di transito corretto delle onde P
TVSM	Tempo di transito misurato delle onde SH
TVSC	Tempo di transito corretto delle onde SH





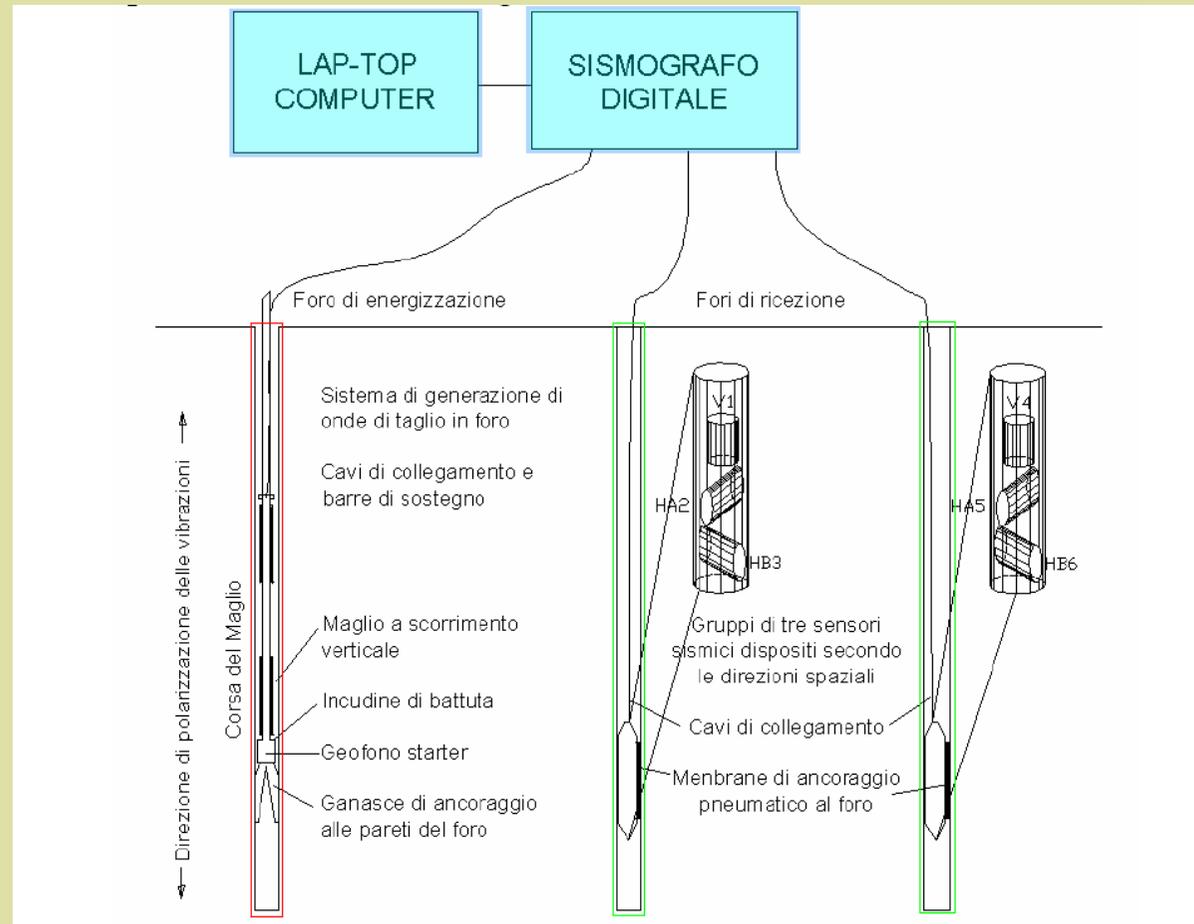
## Prospezioni cross-hole

### Schema di acquisizione prova cross-hole

Per ovviare ad uno dei principali problemi della misura (cioè l'esatta determinazione dell'istante di tiro, si può procedere con la realizzazione di 3 fori:

- Un foro di energizzazione
- Due di registrazione dei segnali.

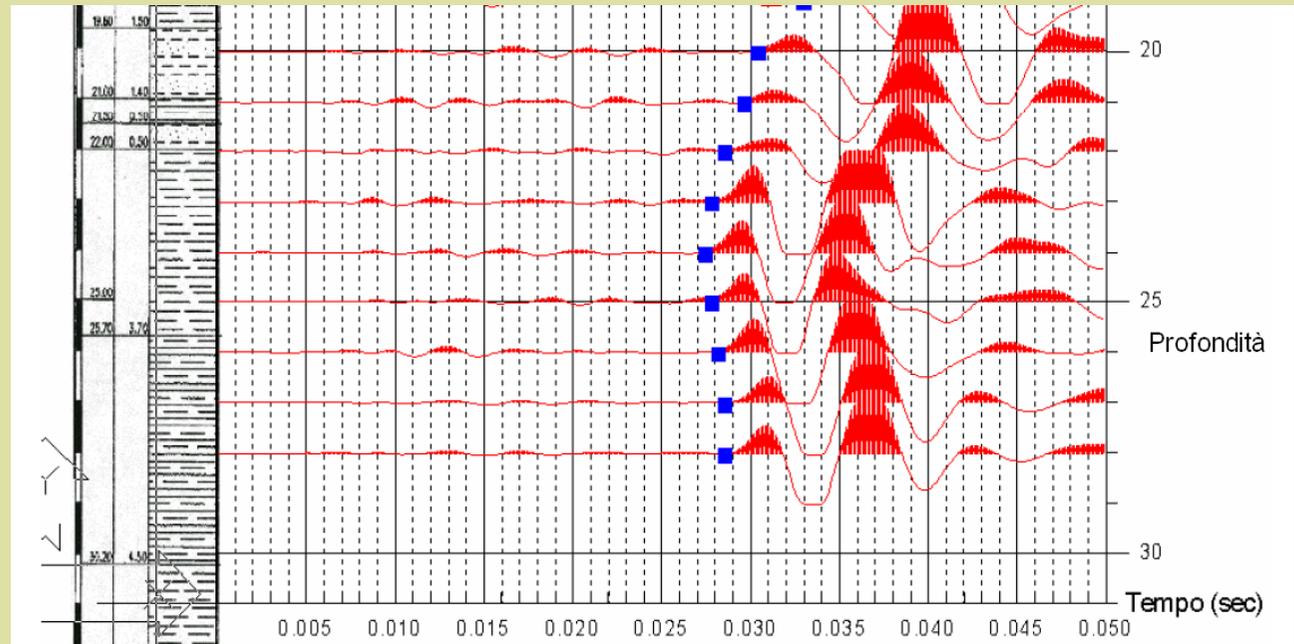
In questo modo si determinerà la differenza di tempo tra l'arrivo del segnale al foro più vicino ed al foro più lontano eliminando qualsiasi problema di triggering.



## *Esempio di registrazione di dati cross-hole*

*Oltre alla determinazione dell'istante di primo arrivo con precisione è necessario rilevare con esattezza la verticalità dei fori poiché gli errori sulla misura della distanza tra i fori hanno lo stesso peso di quelli sulla stima dei tempi di transito.*

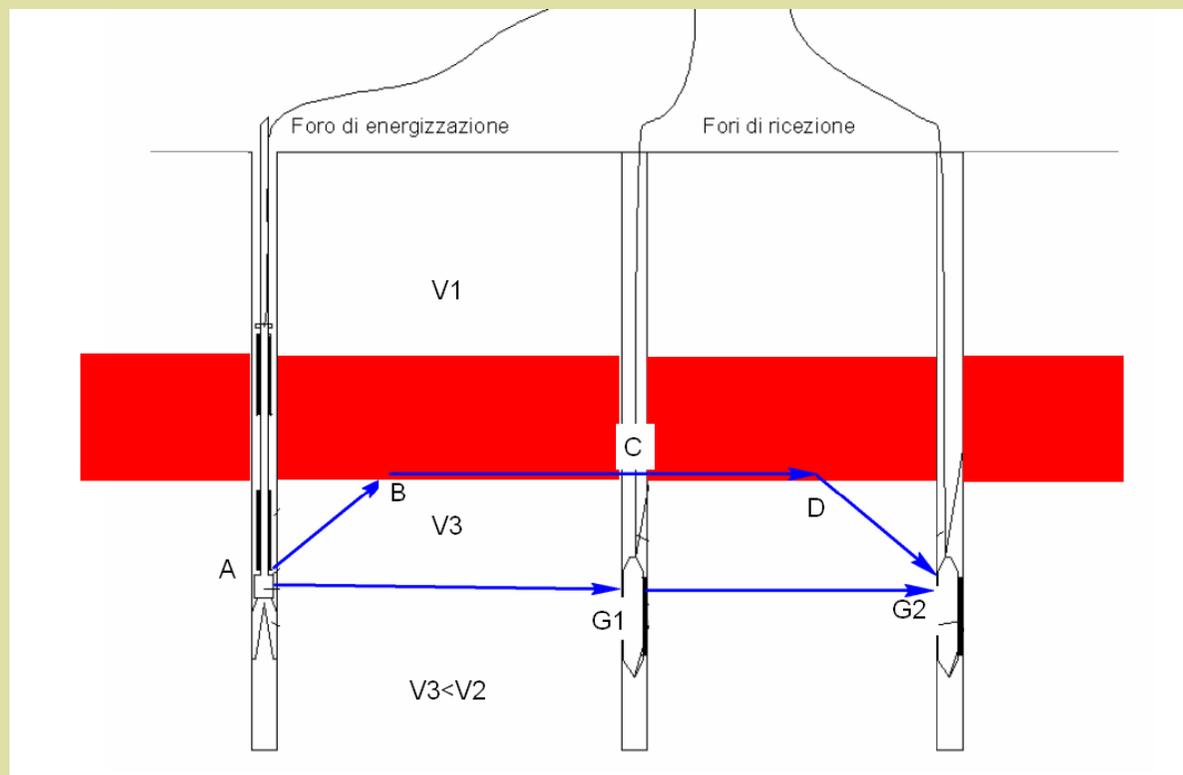
*La distanza tra i fori non può essere superiore a 5-7 m poiché altrimenti avranno una notevole influenza i fenomeni di rifrazione sugli strati più veloci se la velocità vera degli strati lenti risulterà molto falsata*



## *Esempio di registrazione di dati cross-hole*

*Oltre alla determinazione dell'istante di primo arrivo con precisione è necessario rilevare con esattezza la verticalità dei fori poiché gli errori sulla misura della distanza tra i fori hanno lo stesso peso di quelli sulla stima dei tempi di transito.*

*La distanza tra i fori non può essere superiore a 5-7 m poiché altrimenti avranno una notevole influenza i fenomeni di rifrazione sugli strati più veloci se la velocità vera degli strati lenti risulterà molto falsata. Cioè se la distanza tra G1 e G2 è molto grande il percorso C-D-G1, sebbene più lungo del percorso G1-G1, potrebbe risultare più veloce*



## **Le tecniche di indagine con onde superficiali di Rayleigh (Multichannel Analysis of Surface Waves )**

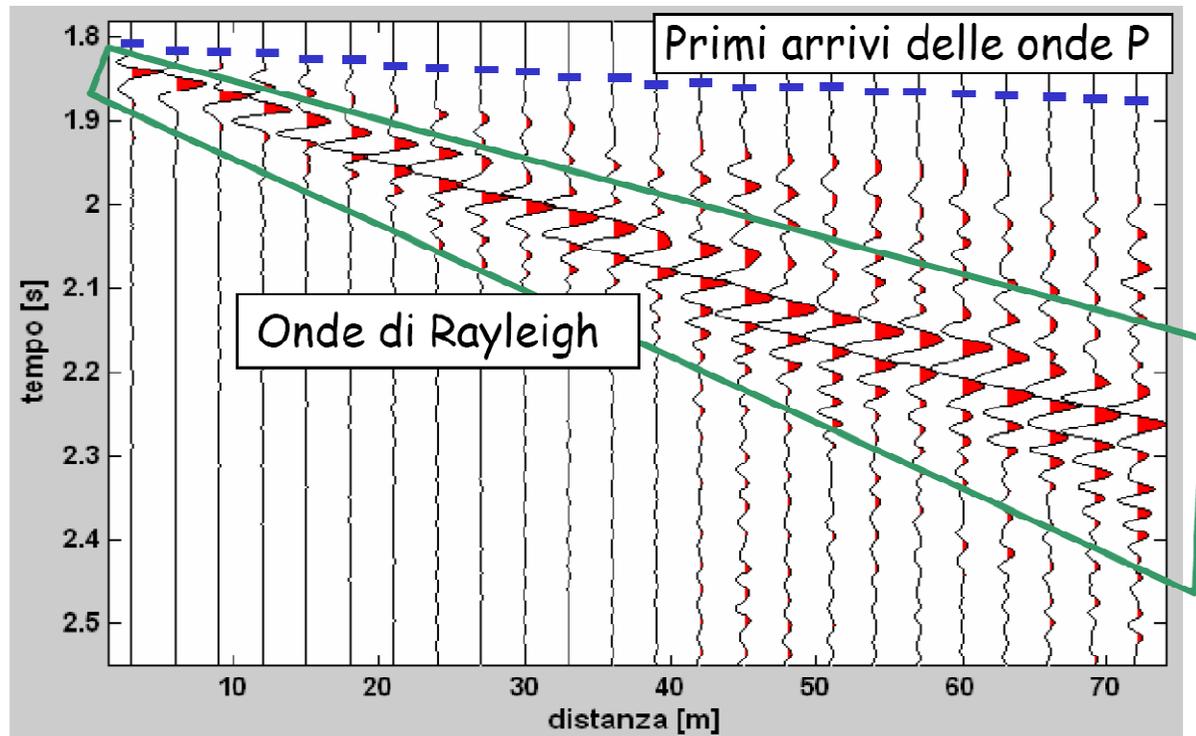
*Il metodo MASW è una tecnica di indagine sismica di recente introduzione (Parker, Miller e Xia - 1999) che, attraverso l'analisi di onde superficiali di tipo Rayleigh registrate contemporaneamente da 12 o più sensori (geofoni o accelerometri), mira ad ottenere profili Vsv-Z (velocità delle onde di taglio verticali – profondità)*

### ***MASW ATTIVE:***

***registrano le onde superficiali generate artificialmente mediante una sorgente di superficie***

### ***MASW PASSIVE:***

***registrano le onde superficiali contenute nel rumore sismico sia di origine antropica (traffico etc.) che naturale (moto ondoso, vento etc.)***



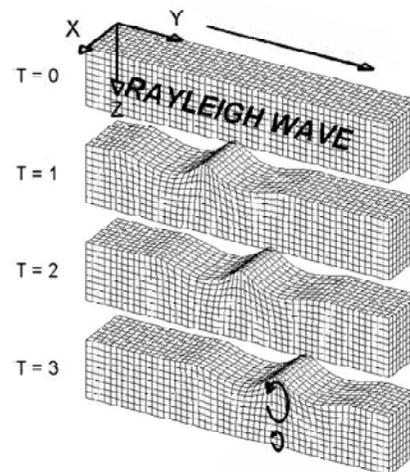
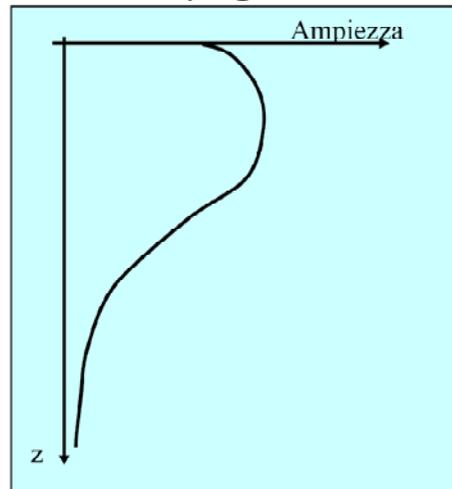
UNA SORGENTE VERTICALE IN SUPERFICIE GENERA MOLTE PIÙ ONDE SUPERFICIALI CHE DI VOLUME (R:67% - S:26% - P:7%), E L'ATTENUAZIONE È MINORE: QUINDI GENERALMENTE SONO IL FENOMENO CON PIÙ ENERGIA

da Ing. Claudio Strobbia – Eucenter Pavia 2004

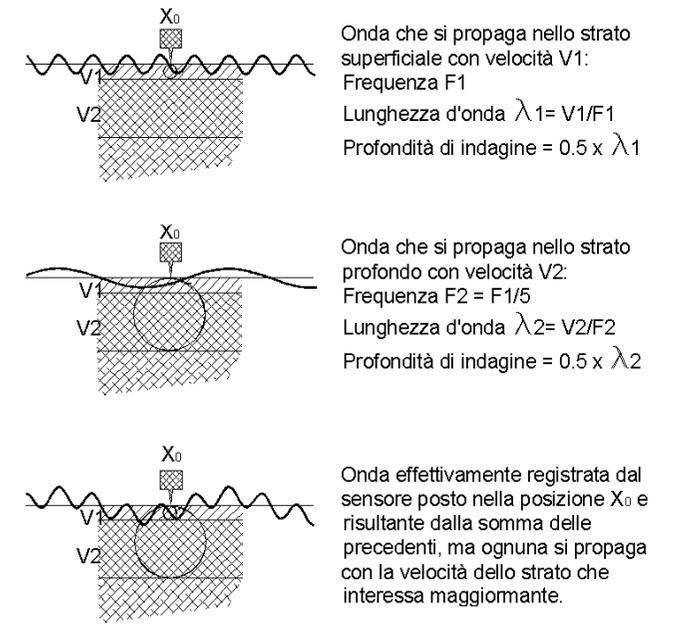
Firenze 22/10/2010

*In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase: la velocità di fase dipende dalla frequenza e tale dipendenza è esprimibile attraverso una curva di dispersione. La natura dispersiva di questo tipo di onde è correlabile con il fatto che onde ad alta frequenza (lunghezza d'onda corta) si propagano negli strati più superficiali di terreno mentre onde a bassa frequenza (lunghezza d'onda lunga) si propagano negli strati più profondi.*

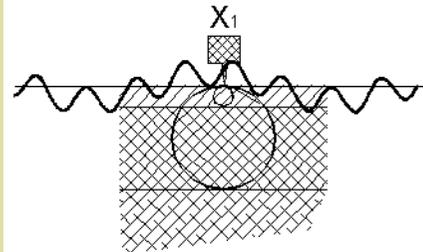
**Onde di Rayleigh: Attenuazione esponenziale con la profondità**



**La profondità che raggiungono dipende dalla lunghezza d'onda**



## **RELAZIONE TRA FREQUENZA, FASE E VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELLE ONDE SUPERFICIALI**



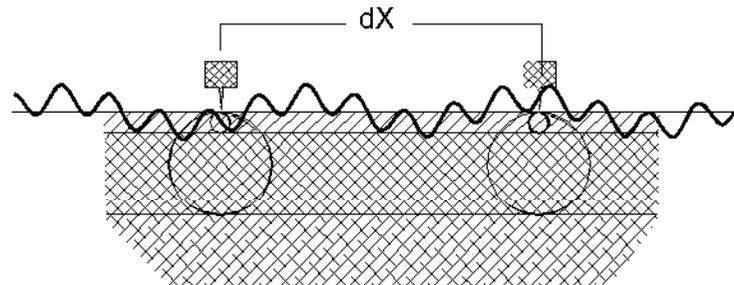
Un sensore posto ad una distanza diversa ( $X_1$ ) registrerà ancora la somma delle due componenti ma saranno diverse le rispettive fasi.

La differenza di fase ( $\Phi$ ), per ciascuna componente, tra il sensore in  $X_0$  e quello in posizione  $X_1$  ( $dX$ ) sarà pari a :  $V1 = dX / t(F1)$  dove  $t(F1)$  è lo spostamento di tempo corrispondente alla variazione di fase, cioè:

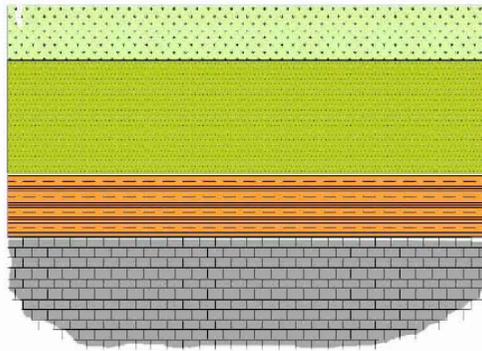
$$t(F1) = \Phi(F1) / (360^\circ / F1) \text{ pertanto,}$$

$$\Phi(F1) = t(F1) * (360 / F1), \text{ quindi la seguente equazione}$$

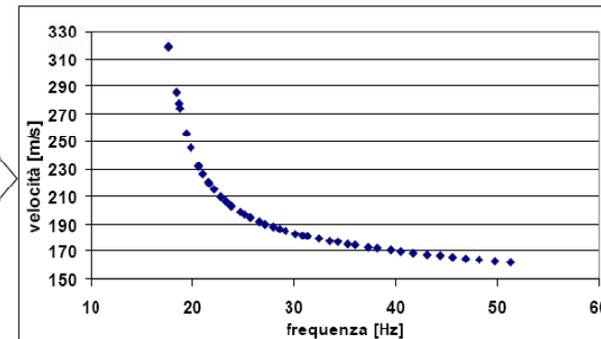
$\Phi(F1) = (dX / V1) * (360 / F1)$  dimostra che la differenza di fase per una data frequenza rilevata a due punti distanti  $dX$  dipende dalla rispettiva Velocità



**PROBLEMA DIRETTO**



**DA UN MODELLO SI PUÒ CALCOLARE  
LA CURVA DI DISPERSIONE TEORICA**



Esiste la soluzione del problema diretto:  
data una stratigrafia ( $V_s$  con la profondità) è possibile calcolare la curva di dispersione

**È quindi possibile effettuare il percorso inverso:  
dalla curva di dispersione misurata determinare il profilo di  $V_s$**

LA SOLUZIONE DEL PROBLEMA DIRETTO è praticabile solo con  
modello semplificato A STRATI, monodimensionale  
(Come nei SEV, le variazioni laterali non possono essere interpretate e possono ridurre l'affidabilità)

È quindi importante VERIFICARE che non ci siano eccessive variazioni  
laterali prima di invertire la curva di dispersione

da Ing. Claudio Strobbia – Eucenter Pavia 2004

Firenze 22/10/2010

*Acquisizione dati con sistema multicanale della  
GDS Instruments  
ed elaborazione in situ in tempo reale*



**GDS INSTRUMENTS LIMITED**

32 Murrell Green Business Park  
London Road, Hook  
Hampshire RG27 9GR

Tel: +44 1256 382450 Fax: +44 1256 382451

**Surface-Wave Test**

SASW test 2

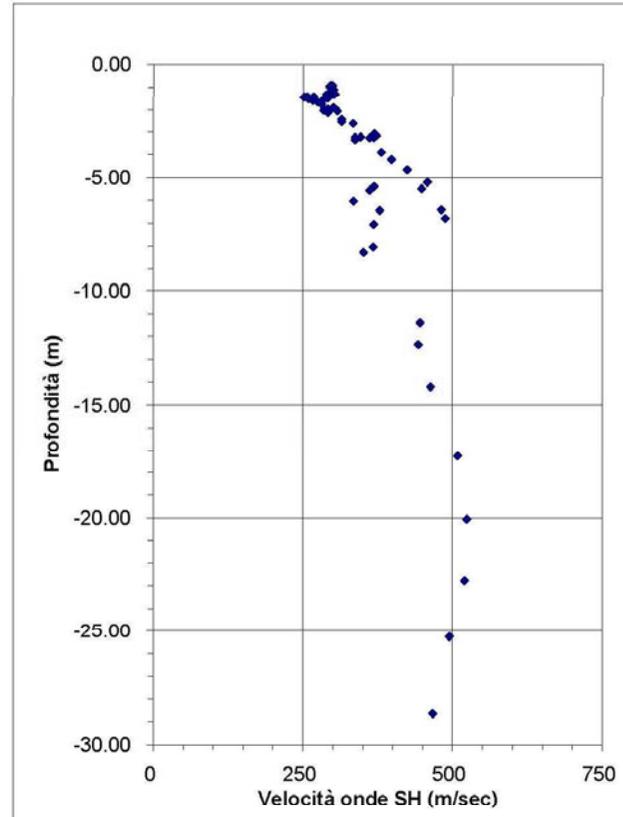
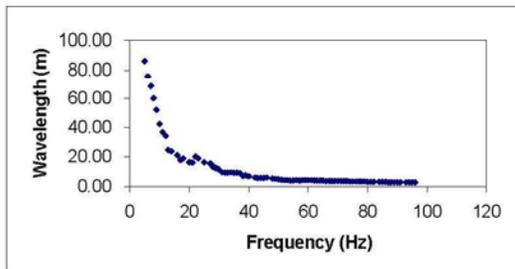
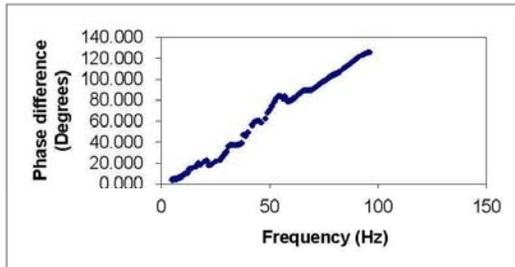
Date: 24 Nov. 2009

Site: Loc. Arcidosso Job: 1586/09

Grosseto (GR)

Survey Company GEORISORSE ITALIA SAS

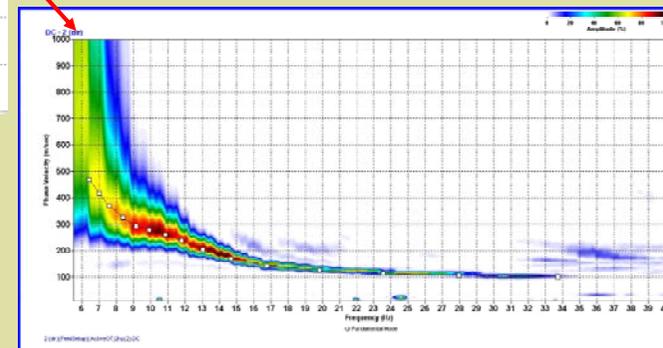
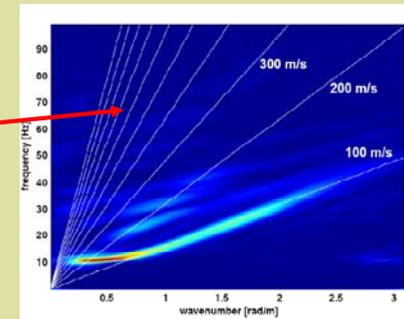
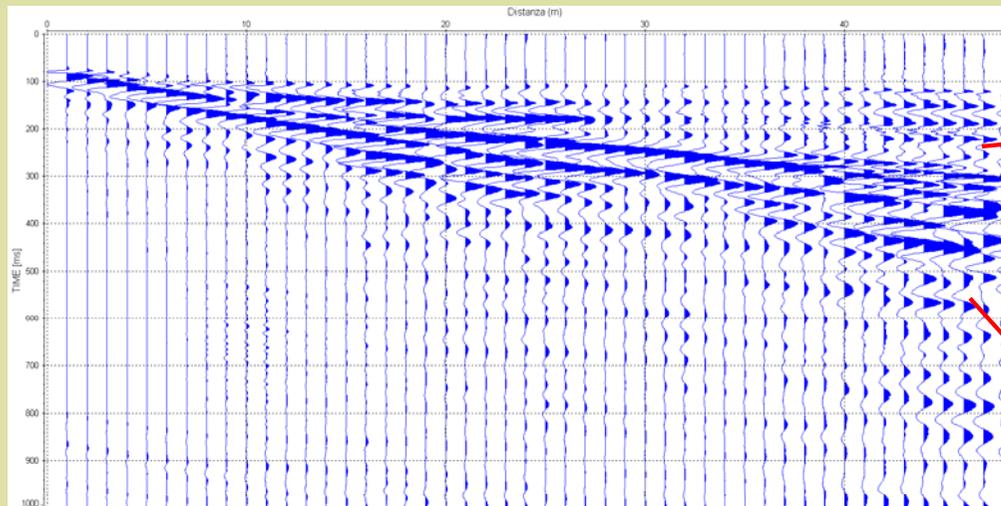
VS30  
440



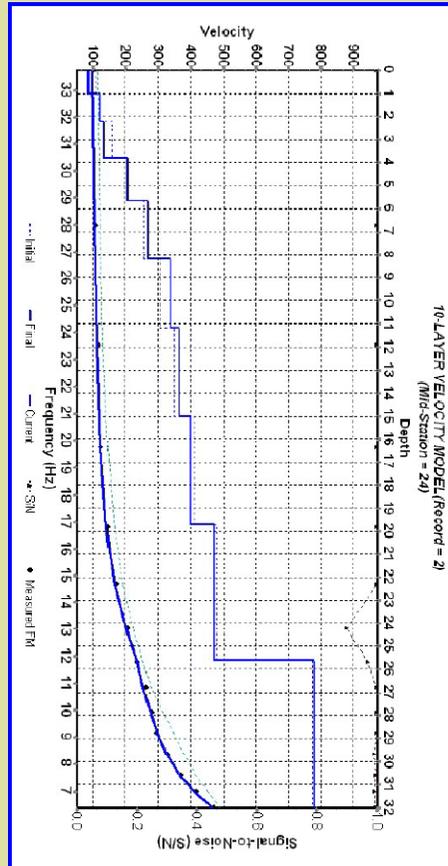
Firenze 22/10/2010

## *Acquisizione dati con sismografo da sismica a rifrazione ed elaborazione con software di inversione*

*Il processing dei dati permette di ottenere un'immagine di dispersione dove sono rappresentati, nel campo velocità di fase – frequenza oppure nel campo numero d'onda - frequenza, diversi modi delle onde di Rayleigh. L'analisi di queste immagini consente l'estrazione delle curve di dispersione dalla cui inversione si ottengono i profili di velocità delle onde Sv, una volta impostato il modello di riferimento stratigrafico, attraverso un processo iterativo che conduce al “best fitting” tra curva di dispersione teorica e curva di dispersione sperimentale*



*Profilo di velocità Vs*



**Attenzione ai valori del rapporto di Poisson utilizzato nell'elaborazione !**

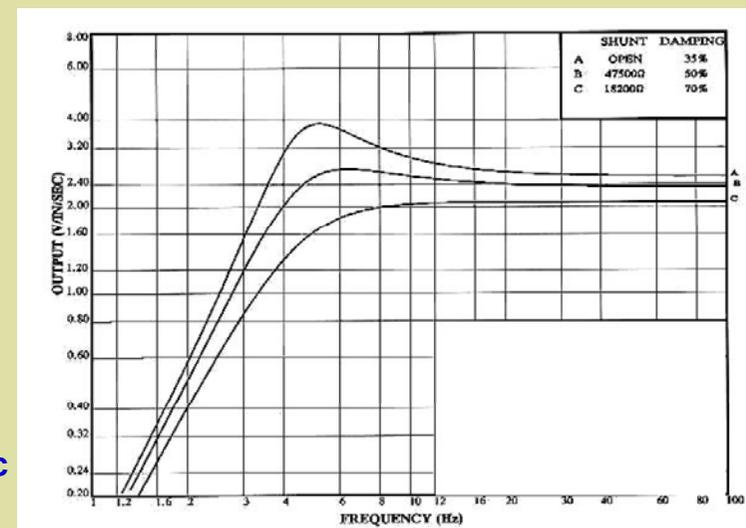
Layer	Bottom	Thickness	S-Vel (Vs)	P-Vel (Vp)	PDS Ratio
1	1.000	1.000	110	269	0.400
2	2.200	1.200	122	300	0.400
3	3.800	1.600	158	666	0.470
4	5.700	1.900	206	807	0.465
5	8.200	2.500	257	1279	0.479
6	11.200	3.000	304	1394	0.475
7	15.000	3.800	350	1634	0.476
8	19.700	4.700	410	1724	0.470
9	25.600	5.900	481	1989	0.469
10	Half Space	Infinity	774	2168	0.427

*Modello sismostratigrafico utilizzato per ricavare la curva di dispersione teorica*

*Nelle prospezione MASW attiva, quindi, è particolarmente importante l'uso di una sorgente di energia idonea a generare onde a bassa frequenza con  $\lambda$  paragonabili alla lunghezza dello stendimento, ossia alla profondità massima che vogliamo investigare. E' fondamentale, inoltre, adottare una distanza intergeofonica piccola (preferibilmente inferiore ai 2 metri) in modo da avere informazioni anche sulle porzioni di terreno più superficiali.*

*Per caratterizzare in profondità occorrono basse frequenze senza eccessivo abbattimento delle ampiezze e senza distorsione della fase: occorrono geofoni a bassa frequenza (es. 4,5 Hz o inferiori)*

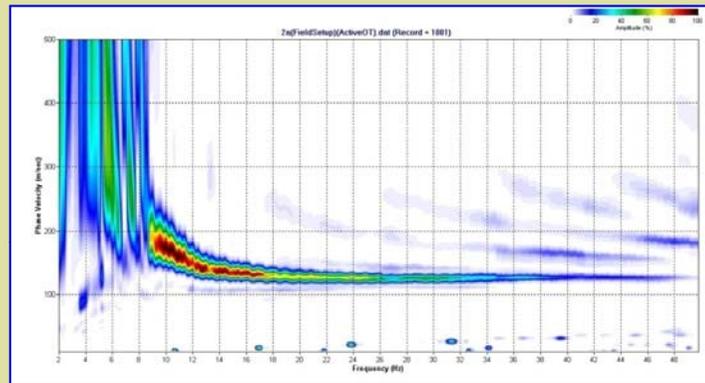
**Durata registrazione 2÷4 sec,  
frequenza di campionamento 0.5÷1 msec**



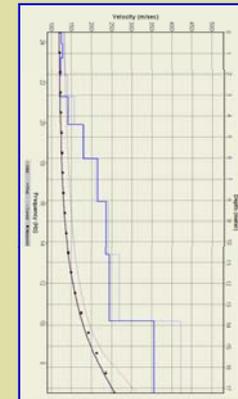
(da Categorie di sottosuolo e indagini sismiche: casi particolari di categorie S1 o S2  
Dott. Geol. P. Barzanti, 2010)

*Confronto MASW  $L = 48 M$   $i = 1 m$  in depositi sabbiosi costieri (categoria C)*

*mazza da 10 kg*

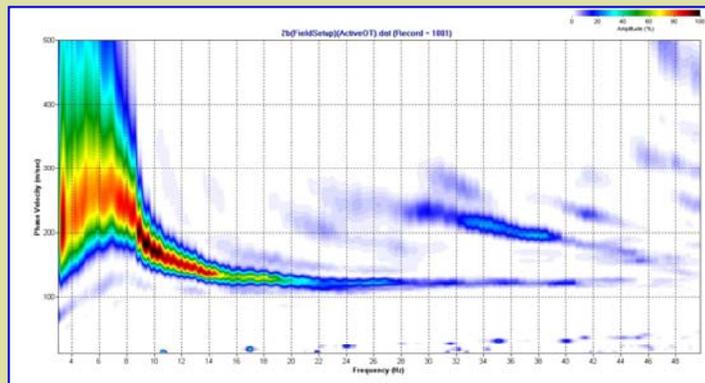


*Mazza 10 kg: frequenza minima 9 Hz*

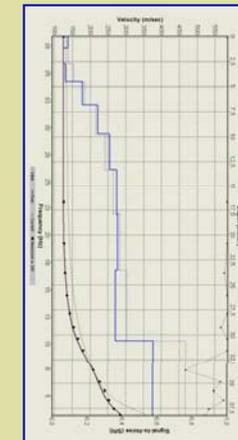


*Massima prof.  
raggiunta 17 m*

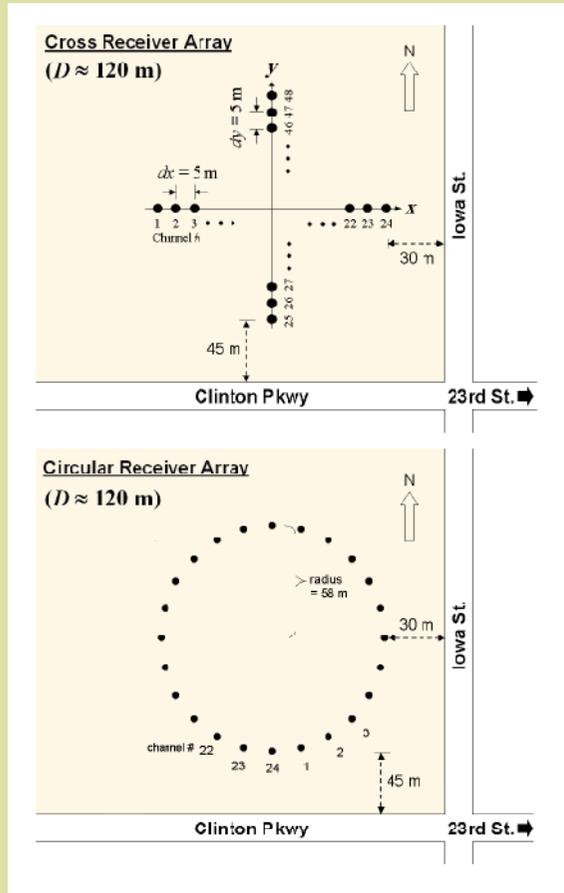
*maglio da 200 kg*



*Maglio 200 kg: frequenza minima 4÷5 Hz*



*Massima prof.  
raggiunta 38 m*



**MASW PASSIVE**  
registrano le onde superficiali  
contenute nel rumore sismico sia di  
origine antropica (traffico etc.) che  
naturale (moto ondoso, vento etc.)

Nella MASW passiva sono  
necessari array bidimensionali  
arealmente impegnativi  
( $L \div D \geq 120$  m)

Durata registrazione 30÷60 sec,  
frequenza di campionamento 2÷4 msec

Combinando MASW ATTIVE E PASSIVE si  
ottiene un buon dettaglio superficiale e  
una maggiore profondità di indagine  
(50 m ed oltre)

### Vantaggi della metodologia MASW

- 1) Minore lunghezza dello stendimento rispetto alla prospezione sismica (a parità di profondità di progetto)
- 2) Possibilità di operare in ambienti con elevato rumore di fondo
- 3) Possibilità di individuare inversioni di velocità
- 4) Possibilità di investigare profondità ragguardevoli combinando Masw attiva e passiva (vedi esempi)

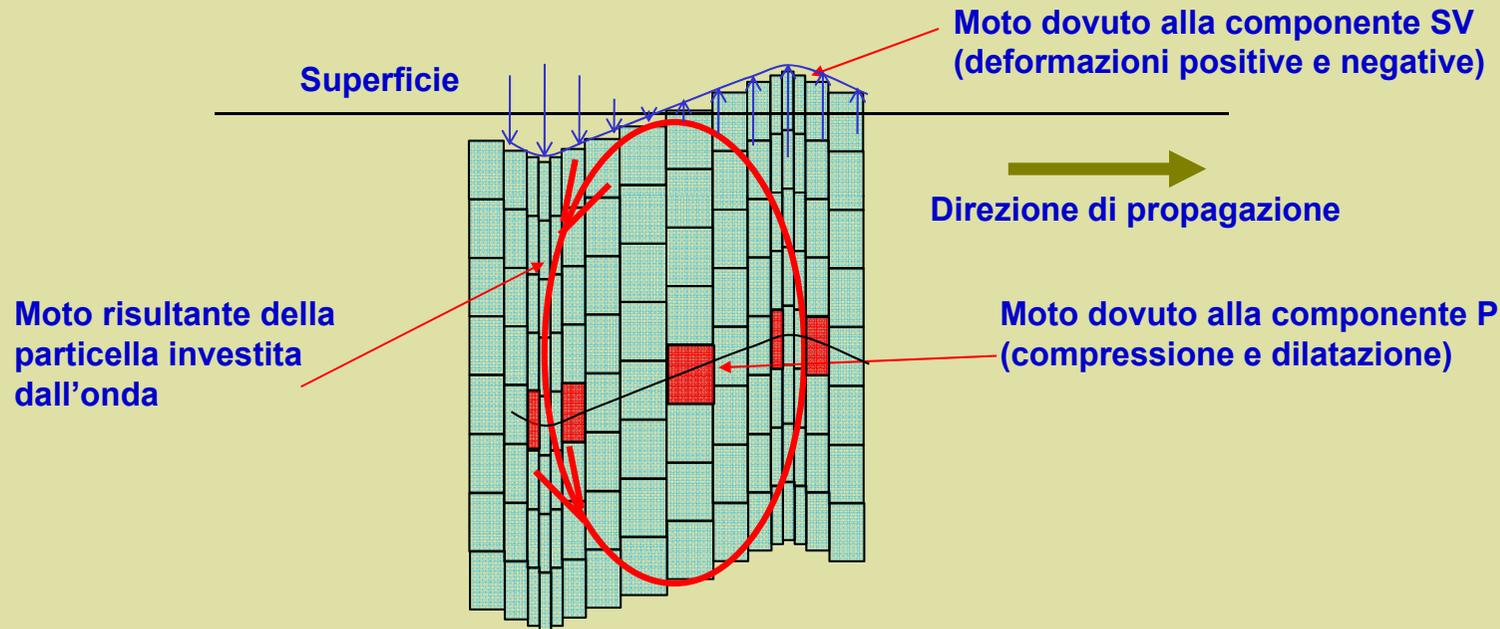
### Limiti della metodologia MASW

- 1) Sottosuolo a strati pian paralleli
- 2) Difficoltà interpretative in assenza di un preciso quadro di riferimento sismostratigrafico
- 3) Maggiore influenza dell'esperienza e capacità dell'interprete rispetto ad altre tecniche di indagine (rifrazione, downhole)
- 4) Pertanto **MINORE OGGETTIVITA' DEL RISULTATO SENZA POSSIBILITA' DI CONTESTAZIONE**

## MISURE DI RUMORE SISMICO AMBIENTALE A STAZIONE SINGOLA

In condizioni sismostratigrafiche opportune (contrasto di rigidità tra copertura e bedrock  $> 2.5$ , Parolai et Al, 2002) le misure passive effettuate con il metodo di Nakamura (H/V) secondo gli standards previsti negli “Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica” e in SESAME 2004, consentono di individuare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno e dare quindi **importanti indicazioni sul fenomeno della risonanza o in alternativa sullo spessore H delle coltri** (qualora si disponga di dati sufficientemente attendibili in merito alle velocità Vs delle coltri stesse), dato fondamentale per la corretta impostazione dell’analisi di risposta sismica locale.

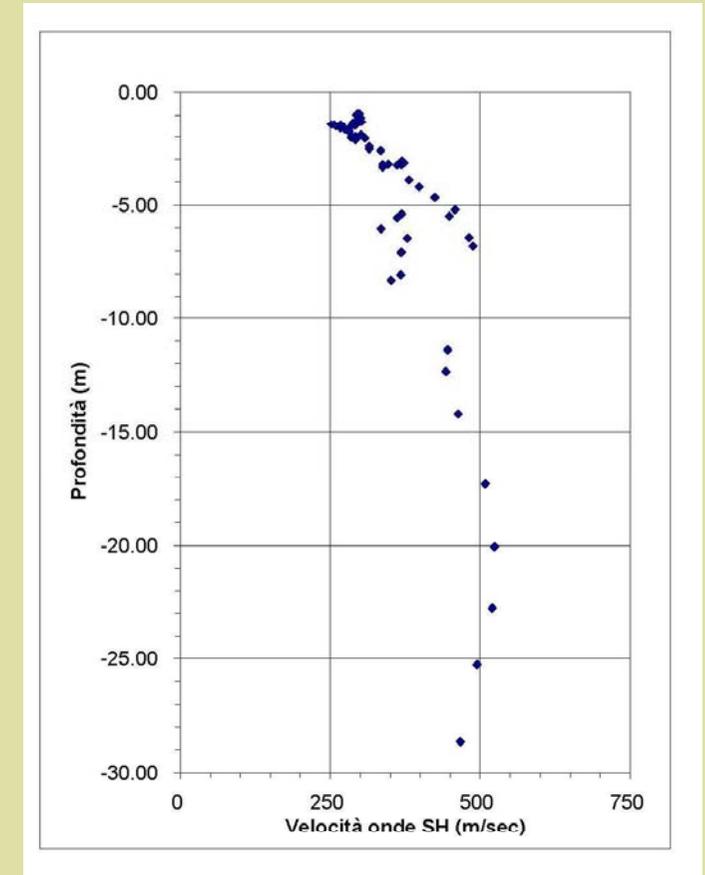
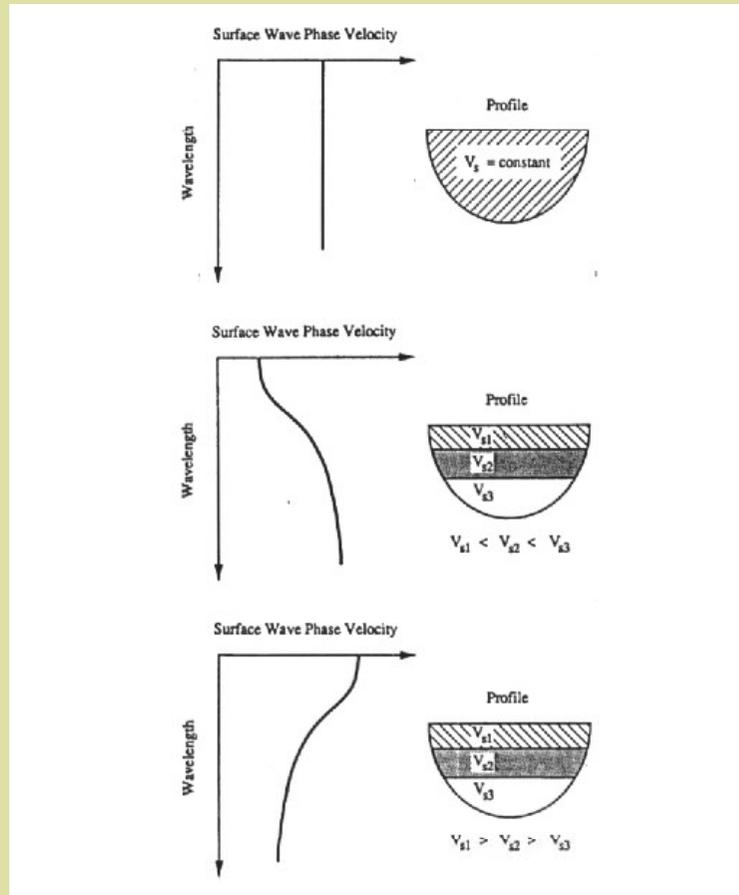
**Le onde di Rayleigh possono esser viste come la combinazione di onde di volume SV e P che viaggiano parallelamente alla superficie libera**



**Il rapporto esistente fra l'ampiezza della componente orizzontale e della componente verticale (H/V) del moto è detta Ellitticità**

Da Prof. Dario Albarello – 2004 (modificato)

## L'andamento della curva di dispersione ci fornisce informazioni sull'andamento in profondità della velocità delle onde P ed S

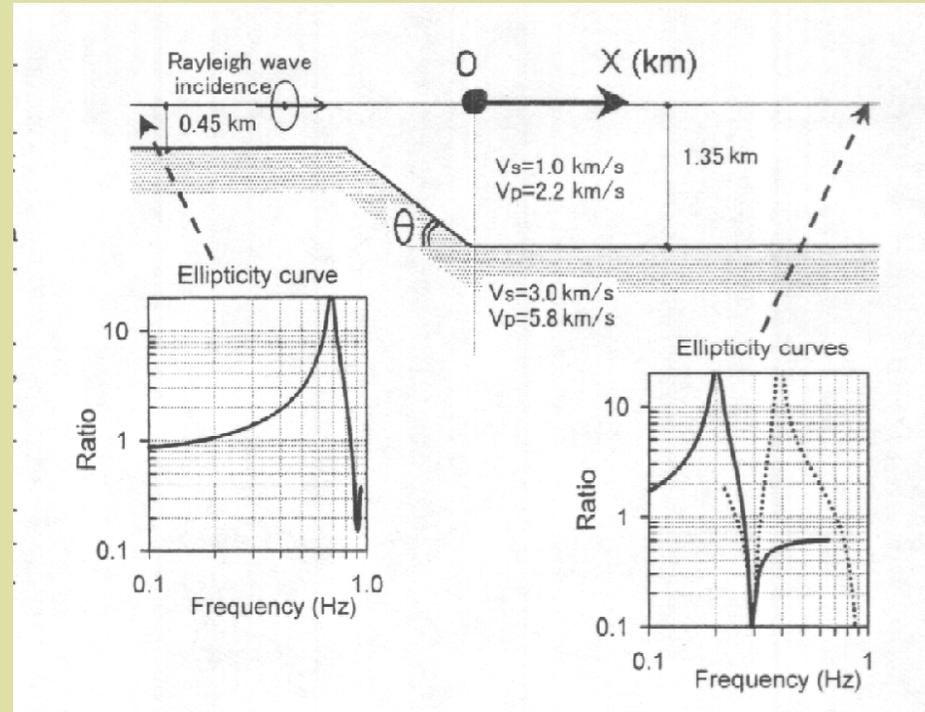


Da Prof. Dario Albarello – 2004

Esempio della diapositiva precedente

Firenze 22/10/2010

## Un altro fenomeno riguarda l'ellitticità delle onde di Rayleigh



In pratica, in corrispondenza del periodo fondamentale di risonanza per le onde S, la componente verticale del moto si annulla rendendo molto grande (infinito) il rapporto fra componente orizzontale del moto e componente verticale (H/V ratio)

Da Prof. Dario Albarello – 2004

**Sfruttando questa caratteristica, è possibile stimare il periodo fondamentale di risonanza delle onde S da misure di rumore sismico**

**Il metodo è detto HVSR  
(Horizontal vs. Vertical Spectral Ratios o metodo di Nakamura)**

**Il principio di funzionamento è assai semplice:**

**Se il rumore contiene onde di Rayleigh, il rapporto fra i valori medi delle componenti orizzontali del moto e quelle verticali in corrispondenza di un determinato periodo stima l'ellitticità dell'onda di Rayleigh**

**Il periodo per cui questo rapporto è massimo (virtualmente infinito) corrisponde al periodo di risonanza del sedimento**

Da Prof. Dario Albarello – 2004

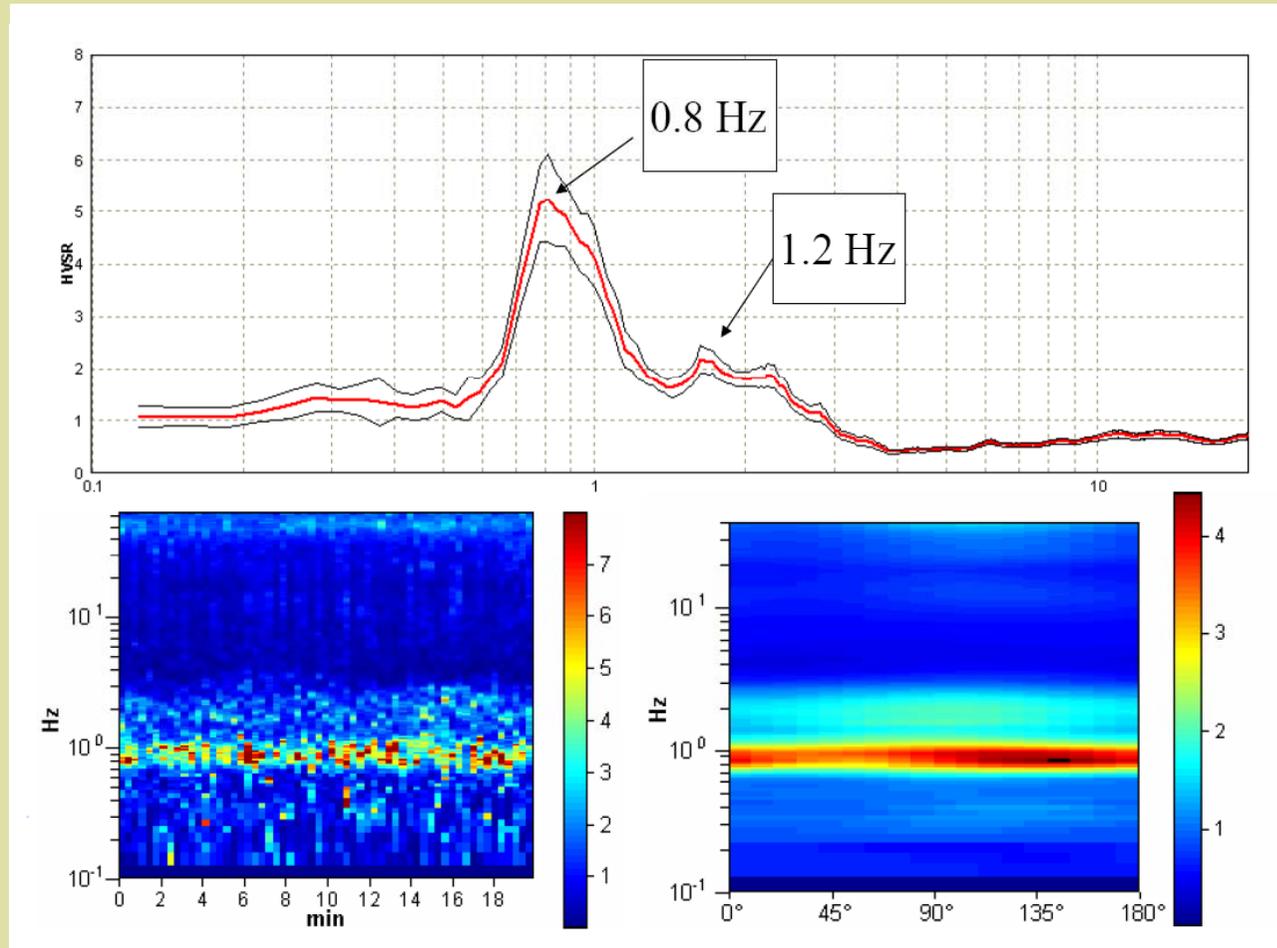
Firenze 22/10/2010

## Il Metodo HVSR

1. Il rumore sismico viene registrato nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo dell'ordine delle decine di minuti o più
2. Viene eseguita un'analisi spettrale del segnale nelle tre componenti
3. Per ciascun periodo viene stimato il rapporto fra le ampiezze spettrali del rumore sulla componente orizzontale e quello sulla componente verticale
4. Il periodo per il quale questo rapporto è massimo identifica il periodo o la frequenza fondamentale di risonanza dello strato sedimentario

$$T_1 = \frac{4H}{\hat{v}_s} \qquad v_1 = \frac{\hat{v}_s}{4H}$$

Da Prof. Dario Albarello – 2004



Da Prof. Dario Albarello – 2004

Firenze 22/10/2010

**Il periodo fondamentale di risonanza del sedimento dipende dallo spessore H del sedimento e dalla velocità “media”  $\hat{v}_s$  delle onde S nel sedimento**

$$T_1 = \frac{4H}{\hat{v}_s}$$
$$\hat{v}_s = \frac{4H}{T_1}$$
$$H = \frac{\hat{v}_s T_1}{4}$$

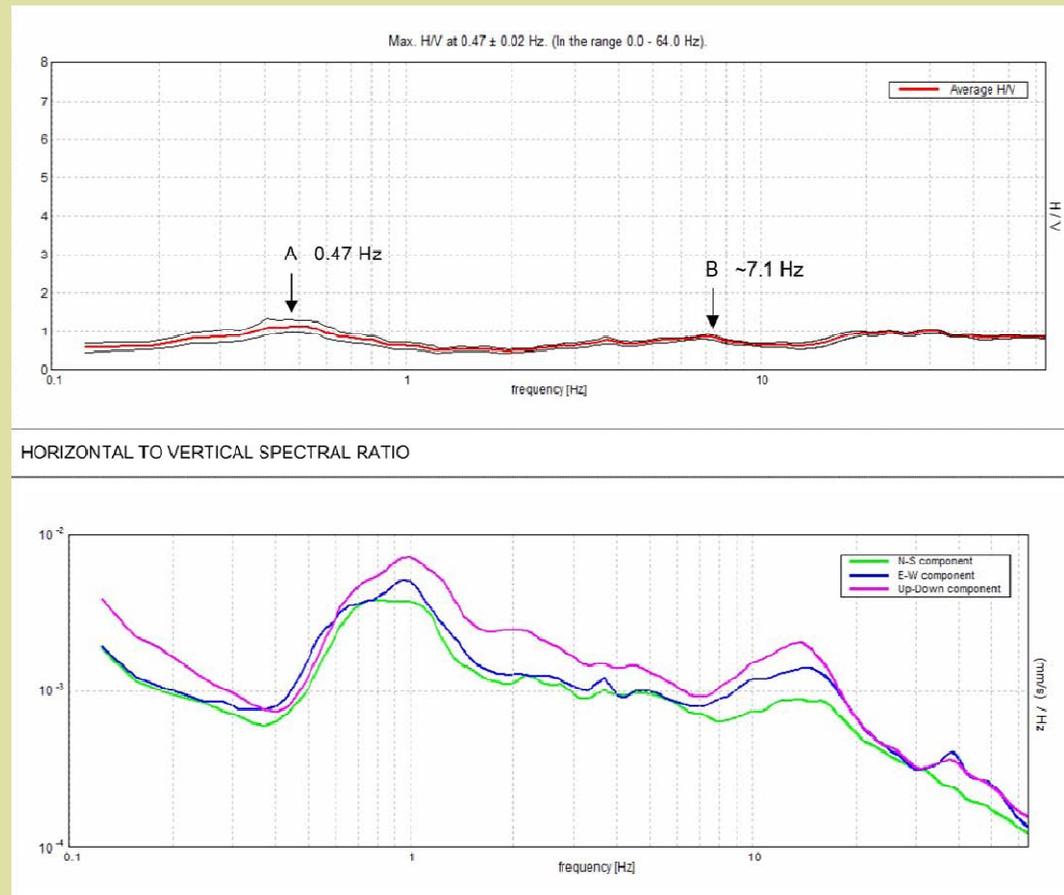
**Conoscendo lo spessore H del sedimento è possibile avere informazioni sulla velocità “media” delle onde S**

**Alternativamente, conoscendo quest’ultima è possibile definire lo spessore dello strato sedimentario**

Da Prof. Dario Albarello – 2004

(da *Categorie di sottosuolo e indagini sismiche: casi particolari di categorie S1 o S2*  
Dott. Geol. P. Barzanti, 2010)

## ATTENZIONE!: PUO' NON ESSERCI RISONANZA!!



## Tabella di confronto tra le varie metodologie

Metodo	Profondità	Vantaggi	Limiti	Dati	Ingombro	costi	Attendibilità	Possibilità di controllo
Crosshole	Illimitata	precisione dati, inversioni di velocità	nessuno	Vs - Vp, parametri dinamici	no	molto elevati	elevata	elevata
Downhole	80-100 m	precisione dati, inversioni di velocità	nessuno	Vs - Vp, parametri dinamici	no	elevati	elevata	elevata
Prospezioni sismiche a rifrazione L = 90 +120 m	40-50 m	Sezione 2D	inversioni di velocità, rumore ambientale, ingombro	Vs - Vp, parametri dinamici	120-160 m	medio-alti	medio-alta	buona
Prospezioni sismiche con onde superficiali tipo MASW attive	40-50 m	Dettaglio superficiale. Inversioni di velocità, limitato ingombro	difficoltà interpretative in mancanza di sismostratigrafia di riferimento	Vs	50-100 m	medi	elevata in relazione al modello sismostratigrafico	bassa
Misure di rumore ambientale H/V	Illimitata	ingombro nullo, rapidità		frequenza fondamentale di vibrazione del terreno o in alternativa, spessore delle coperture	no	bassi		bassa

Tutte le metodologie soffrono di limiti intrinseci, come ad esempio:

- la prospezione downhole può risultare imprecisa nel tratto iniziale, per profondità corrispondenti alla distanza foro-punto di energizzazione;
- la sismica a rifrazione deve fare i conti con il problema dello “strato nascosto” e con le inversioni di velocità (anche se una accurata analisi GRM può mettere sull’avviso l’interprete qualora i valori di “messa a fuoco” XY calcolati si discostino dagli XY scelti);
- nella sismica a rifrazione in terreni caratterizzati da graduale incremento di velocità (tipico il caso di alcuni depositi argillosi fluviolacustri) la curvatura delle dromocrone si presta a diversi schemi interpretativi, quindi in questi casi è più opportuno ricorrere ad elaborazioni tomografiche basate su procedimenti di inversione.

**Sta all’esperienza, capacità e correttezza deontologica del professionista applicare la tecnica più opportuna in relazione al Modello Geologico di Riferimento ed all’importanza dell’intervento, eventualmente integrando i risultati di più metodologie al fine di ricostruire il modello sismico più attendibile possibile**