



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE

A.A. 2019-2020

*LABORATORIO DI ACQUISIZIONE
ED ELABORAZIONE DATI GEOFISICI*

UNITA' DIDATTICA 4 - UD4

METODI SISMICI

SCHEMA UNITA' DIDATTICA

- Basi e principi fisici (cenni sulle onde elastiche)

- Strumentazione (sorgenti-ricevitori)

- Sismica a RIFLESSIONE

acquisizione dati, elaborazione, analisi

- Sismica a RIFRAZIONE

concetti di base

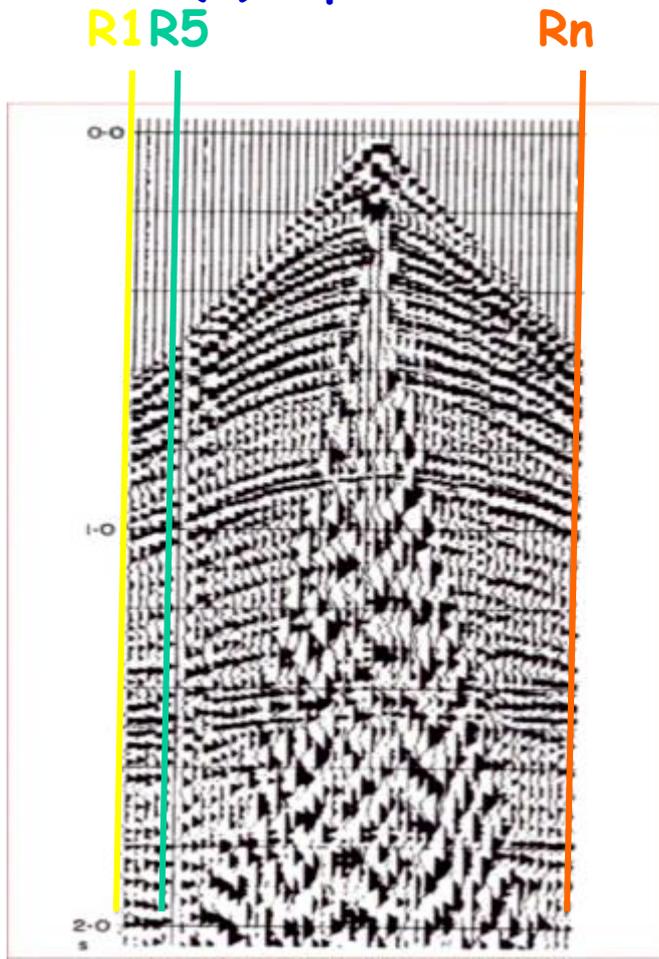
- ONDE DI SUPERFICIE → MASW

acquisizione elaborazione e cenni di inversione

Metodi "sismici"

Sorgente: qualsiasi sistema "naturale" o "artificiale" in grado di provocare una "perturbazione sismica" → cioè un movimento del terreno → Onde sismiche

Sulla base delle onde sismiche provocate che vengono **REGISTRATE** da sensori (R) è possibile ricavare **INFORMAZIONI SUL SOTTOSUOLO**



Esistono **NUMEROSE** onde che possono venir generate e si propagano:

A) ONDE di CORPO

- "p"
- "s"
- Dirette
- Riflesse
- Rifratte
- Diffratte
- Multiple
- ...

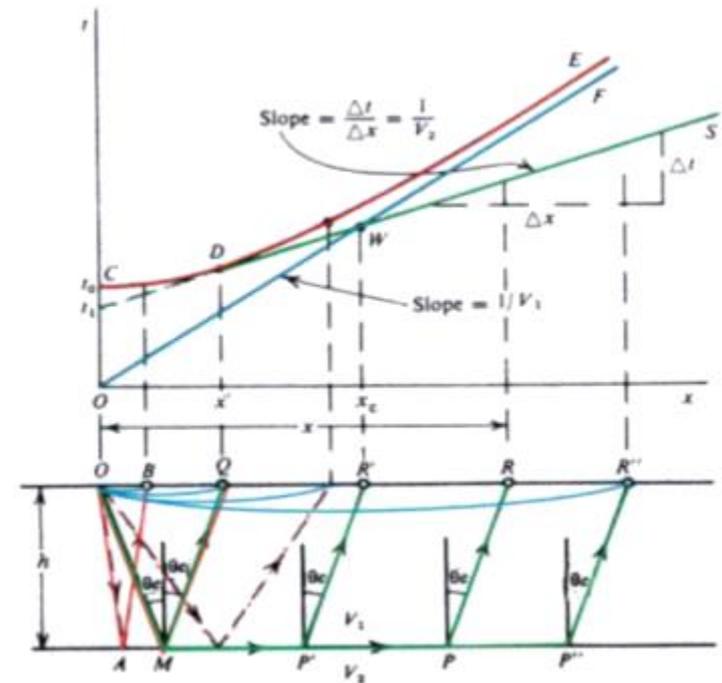
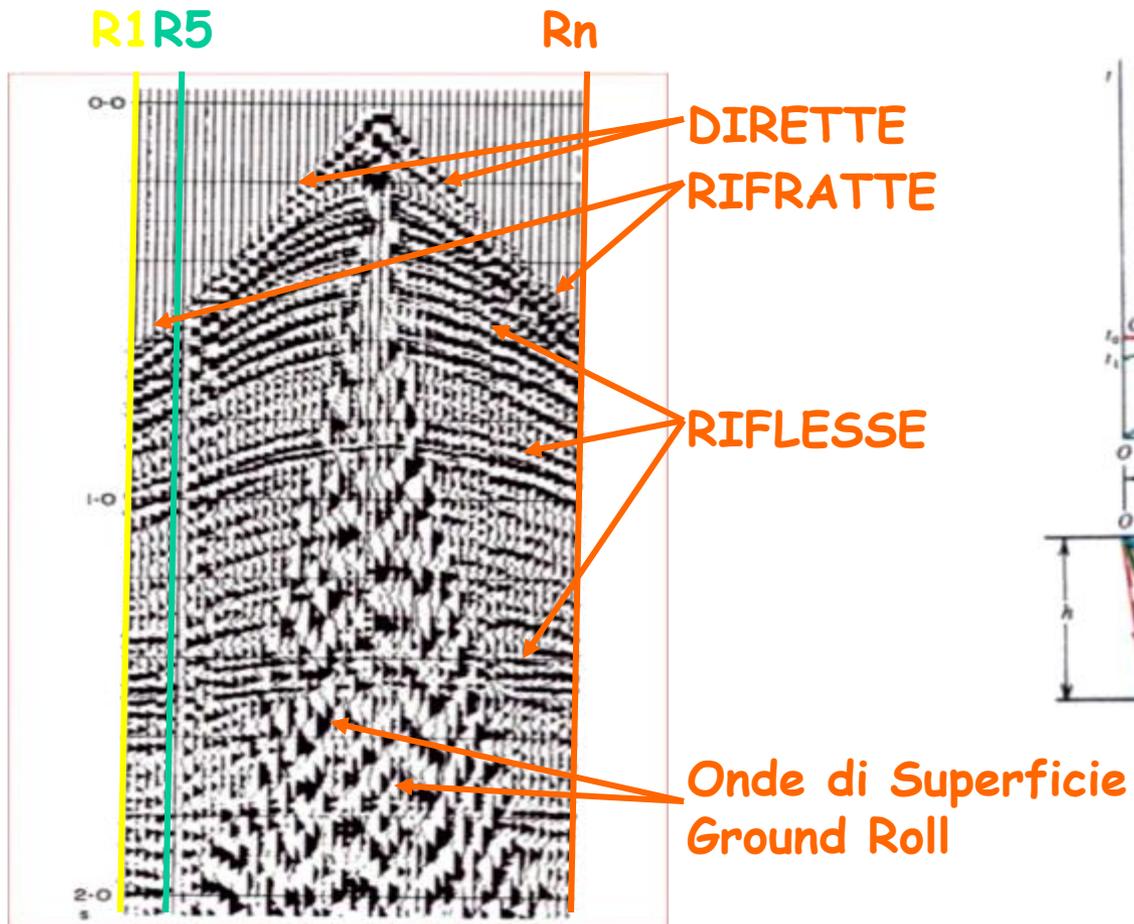
B) ONDE di SUPERFICIE

- Rayleigh
- Love
- ...

Metodi "sismici"

In una indagine sismica NON E' possibile a priori acquisire solo un tipo di onda

In fase di ANALISI del dato potremo decidere di utilizzare UN DETERMINATO TIPO DI ONDA



Metodi "sismici"

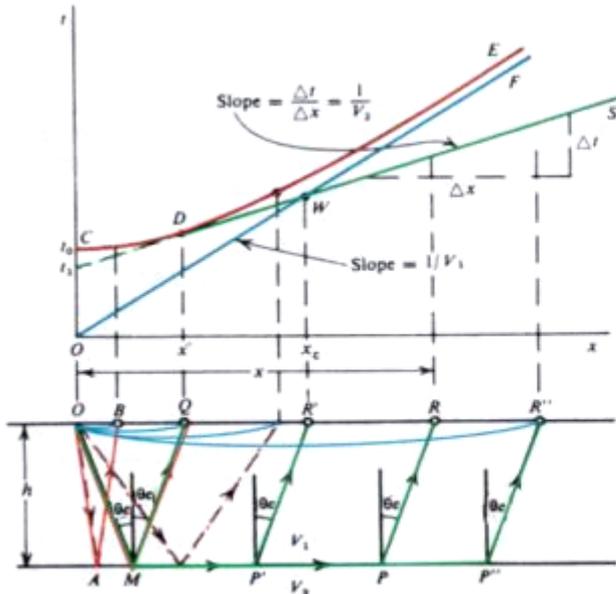


Fig. 4.15 Relation between reflection and refraction raypaths and traveltime curves.

Onda diretta $T = \frac{x}{v_1}$

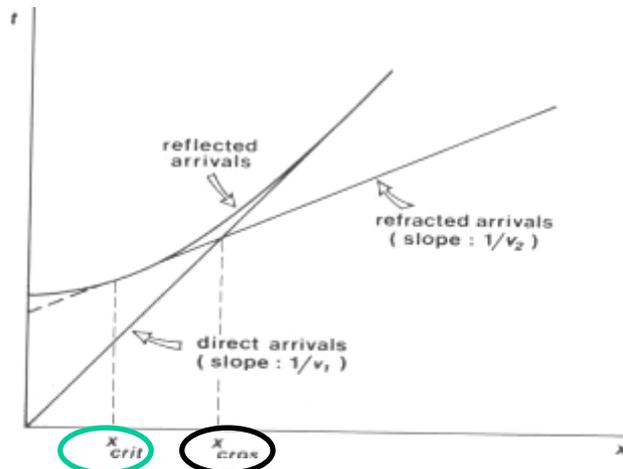
Retta passante per l'origine

Onda riflessa $T^2 = \left(\frac{x}{v_1}\right)^2 + \left(\frac{2h}{v_1}\right)^2$

Iperbole

Onda rifratta $T = \frac{x}{v_2} + \frac{2h \cos i_c}{v_1}$

Retta non passante per l'origine



x_c o $x_{crit} =$ distanza critica

$x_{cros} =$ distanza di *crossover*

Metodi "sismici"

I dati sismici sono registrati in termini di variazioni dell'ampiezza di oscillazione in funzione del tempo, per una determinata posizione di sorgente e ricevitore → Traccia sismica

A seconda del METODO si utilizzeranno porzioni diverse della traccia:

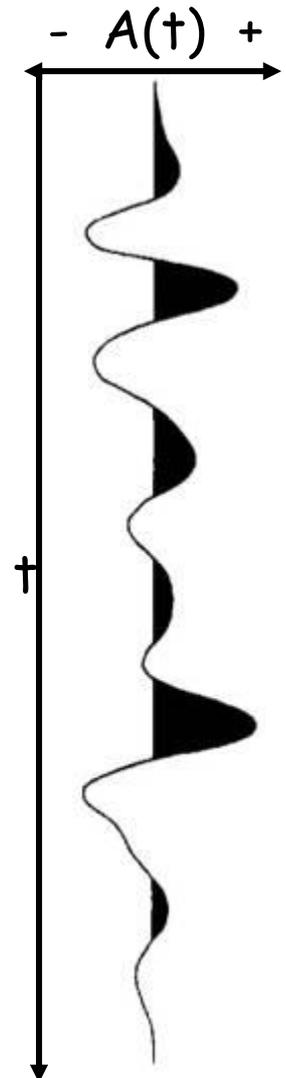
Sismica a riflessione → intera traccia sismica
onde riflesse

Sismica a rifrazione → Primo arrivo della traccia
onda diretta e onde rifratte

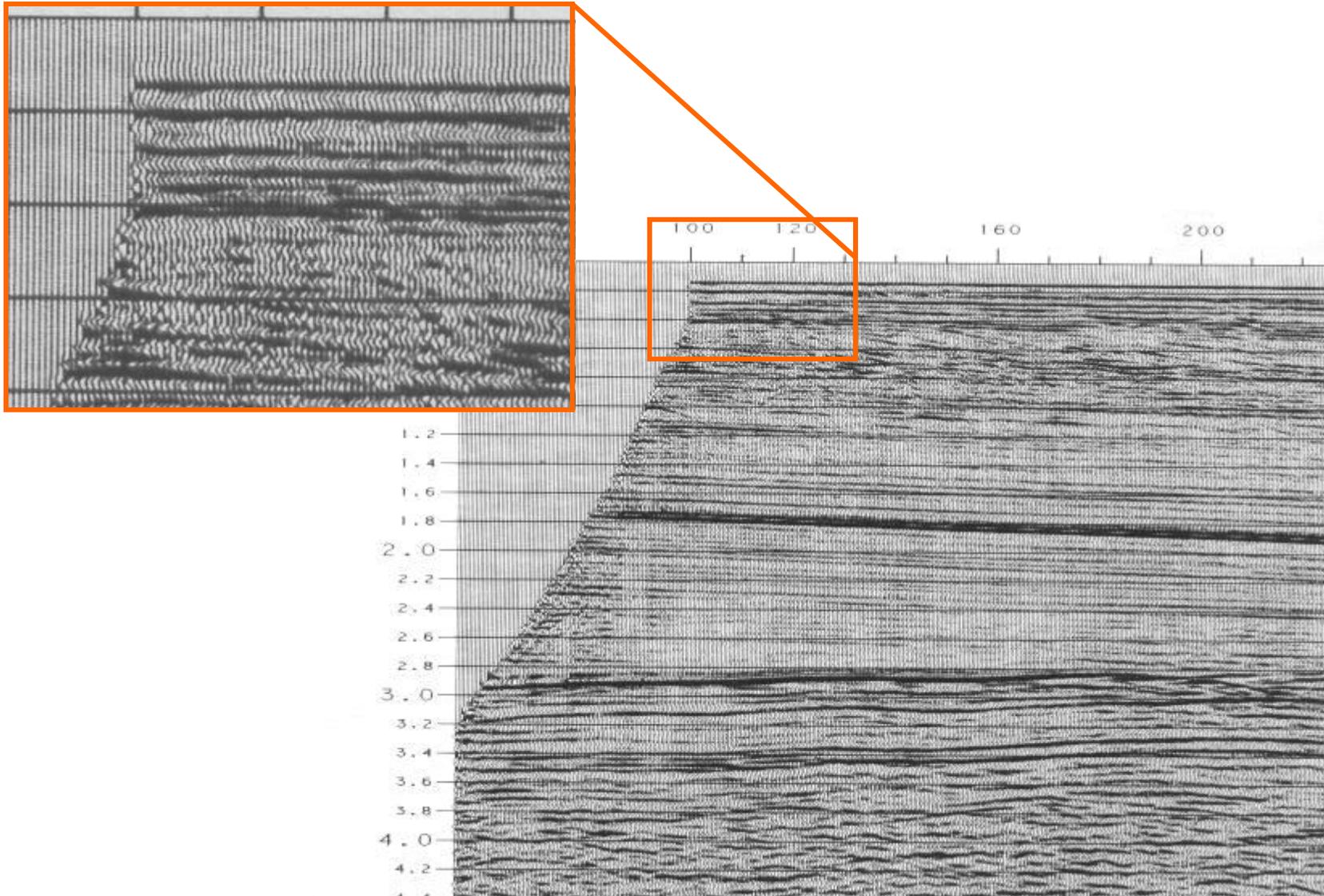
Metodi Tomografici → Primi arrivi o porzioni della traccia
onde dirette / rifratte / riflesse / ...

Multichannel Analysis of Surface Waves
(MASW)

Microtremori, ...

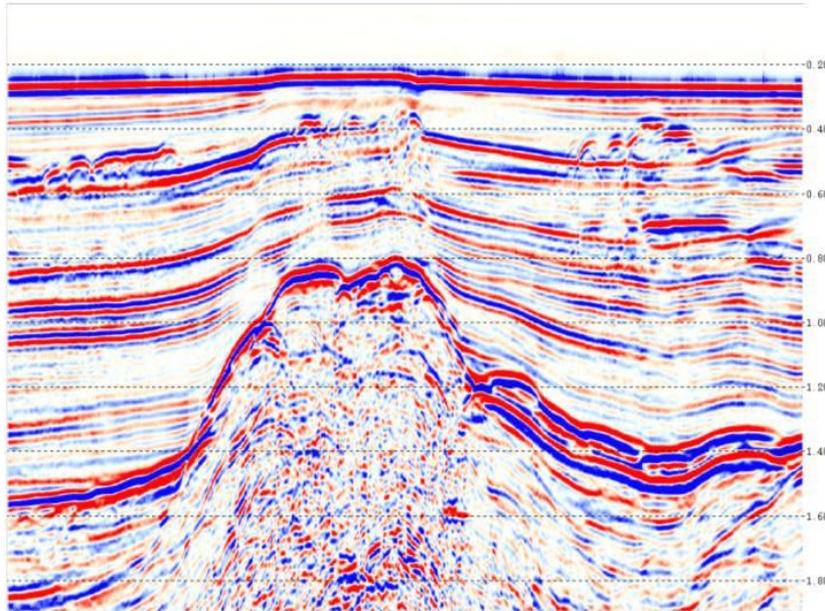


Metodi "sismici"



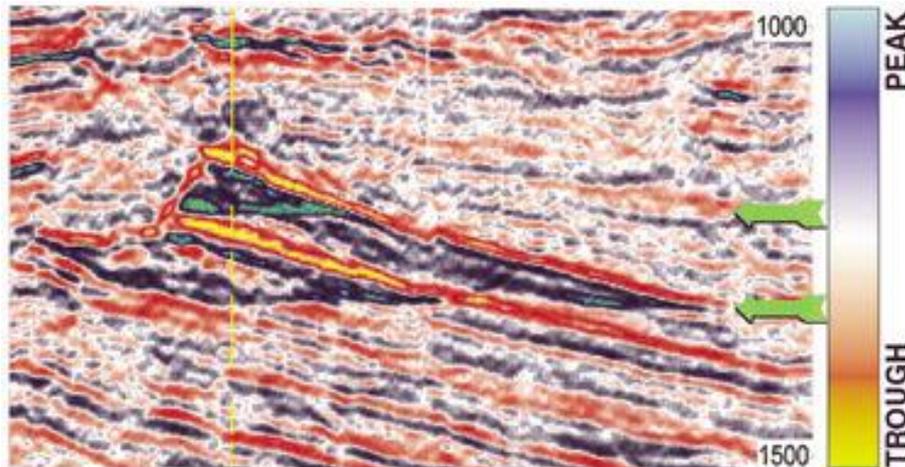
Esempio di profilo a riflessione con *display wiggle/variable area*

Metodi "sismici"



Esempi di Variable-intensity colour

Esempio di profilo sismico in
Adriatico centrale



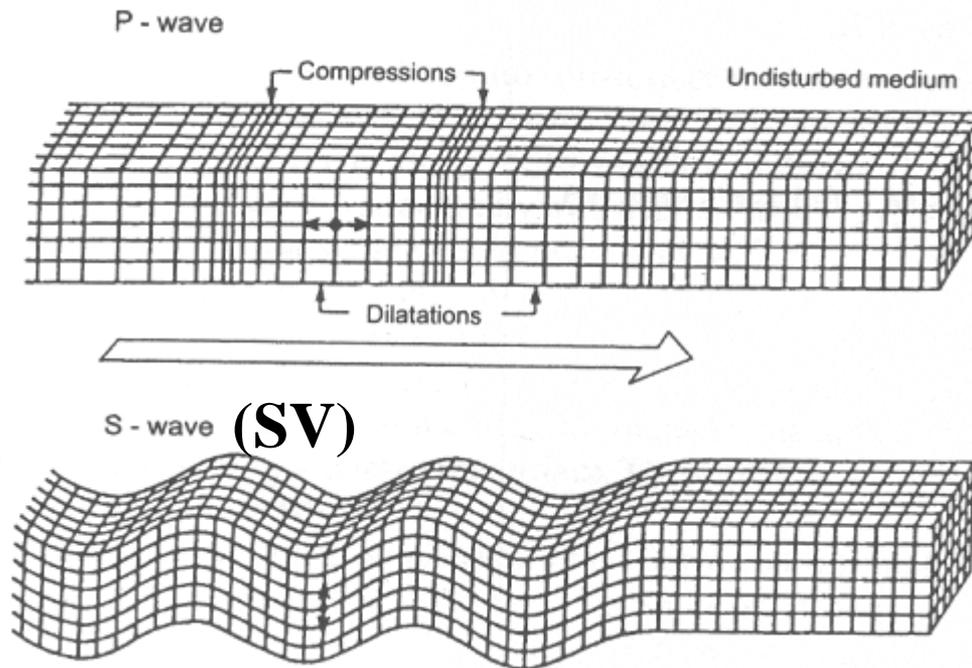
Riflessioni al contatto gas-olio
e olio-acqua, entrambi
evidenziati dalle frecce verdi,
in un *reservoir* in produzione
offshore della Nigeria
(Exxon-Mobil Nigeria).

Cenni teoria onde sismiche

Onde di CORPO → si propagano nell'intero volume

→ Onde P ed S

- **Onde P (dilatazionali, longitudinali, irrotazionali, compressionali):** corrispondono a variazioni nella dilatazione Δ .
- **Onde S (di taglio, trasversali, rotazionali):** corrispondono a variazioni in una o più componenti della rotazione θ .

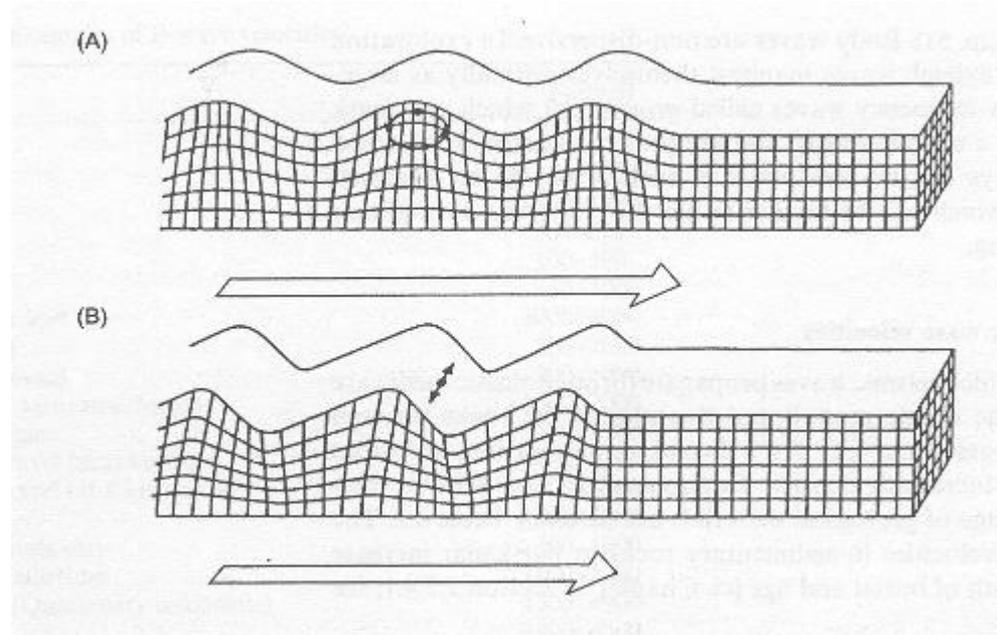


Cenni teoria onde sismiche

Onde di SUPERFICIE → si propagano lungo un'interfaccia (SE ESISTE!)

- **Onde di Rayleigh, di Love, di Sholte,...**
- **Onde con movimento circolare che si propagano lungo una superficie di separazione tra due mezzi aventi caratteristiche sismiche diverse. Tendono ad attenuarsi rapidamente aumentando la distanza da questa superficie. ONDE GUIDATE.**

Rayleigh



Love

Cenni teoria onde sismiche

Onde P ed S (2)

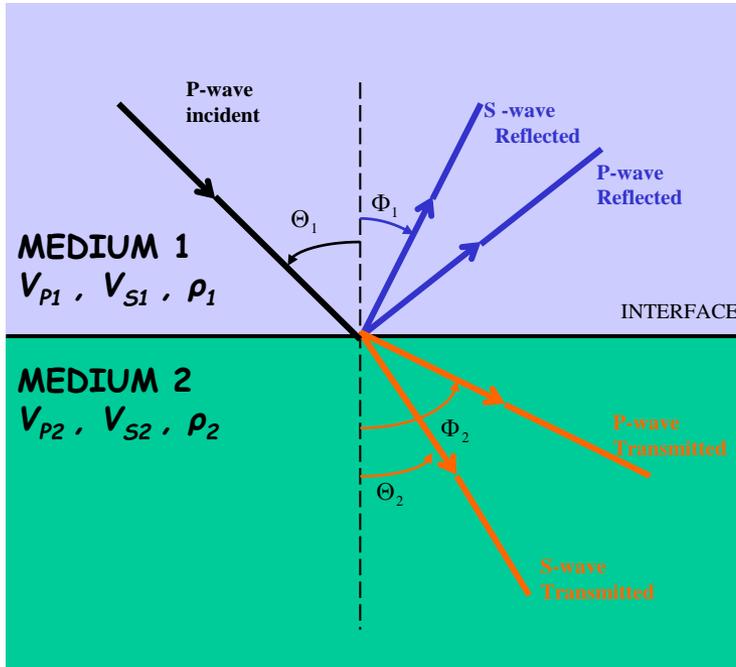
- **Velocita' delle Onde P:** $\alpha = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}}$;

- **Velocita' delle Onde S :** $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

Definiamo poi il rapporto di Poisson σ come

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

Fondamenti



REFLECTION COEFFICIENT R_p

For a P-wave with vertical incidence the R_p can be calculated by:

$$R_p = \frac{V_{P2}\rho_2 + V_{P1}\rho_1}{V_{P2}\rho_2 - V_{P1}\rho_1} \quad \text{i.e.} \quad R_p = \frac{I_{P2} - I_{P1}}{I_{P2} + I_{P1}}$$

The general case (P and S waves) is much more complicated and in linear (matrix) form is:

$$Q = \begin{pmatrix} \tilde{P}\tilde{P} & \tilde{S}\tilde{P} & \tilde{P}\tilde{P} & \tilde{S}\tilde{P} \\ \tilde{P}\tilde{S} & \tilde{S}\tilde{S} & \tilde{P}\tilde{S} & \tilde{S}\tilde{S} \\ \tilde{P}\tilde{P} & \tilde{S}\tilde{P} & \tilde{P}\tilde{P} & \tilde{S}\tilde{P} \\ \tilde{P}\tilde{S} & \tilde{S}\tilde{S} & \tilde{P}\tilde{S} & \tilde{S}\tilde{S} \end{pmatrix} = P^{-1}R$$

Aki & Richards (1980)

Where:

$$P = \begin{pmatrix} -\sin \Theta_1 & -\cos \Phi_1 & \sin \Theta_2 & \cos \Phi_2 \\ \cos \Theta_1 & -\sin \Phi_1 & \cos \Theta_2 & -\sin \Phi_2 \\ 2\rho_1 V_{S1} \sin \Phi_1 \cos \Theta_1 & \rho_1 V_{S1} (1 - 2\sin^2 \Phi_1) & 2\rho_2 V_{S2} \sin \Phi_2 \cos \Theta_2 & \rho_2 V_{S2} (1 - 2\sin^2 \Phi_2) \\ -\rho_1 V_{P1} (1 - 2\sin^2 \Phi_1) & \rho_1 V_{S1} \sin 2\Phi_1 & \rho_2 V_{P2} (1 - 2\sin^2 \Phi_2) & -\rho_2 V_{S2} \sin 2\Phi_2 \end{pmatrix} \quad \text{Propagation/Transmission}$$

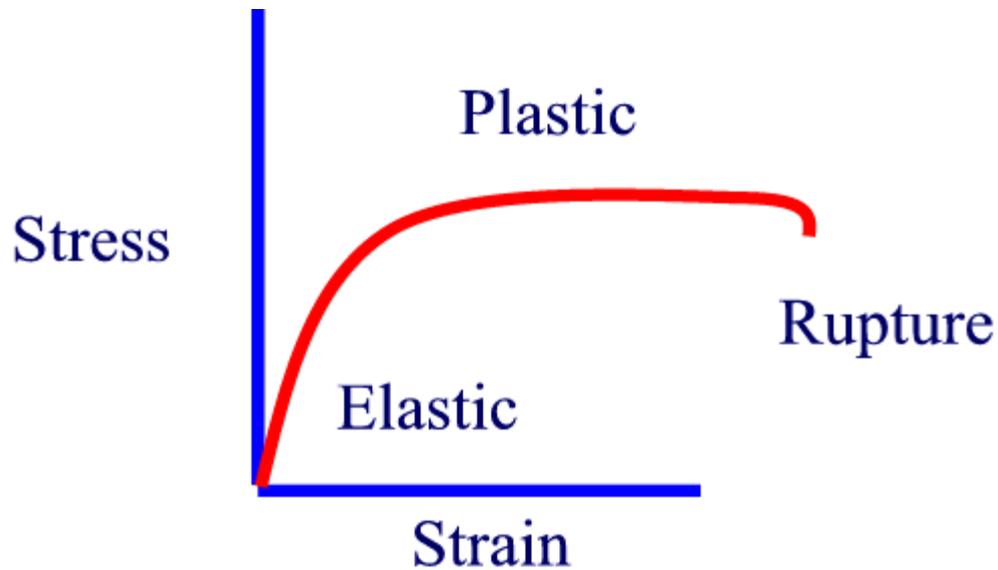
$$R = \begin{pmatrix} \sin \Theta_1 & \cos \Phi_1 & -\sin \Theta_2 & -\cos \Phi_2 \\ \cos \Theta_1 & -\sin \Phi_1 & \cos \Theta_2 & -\sin \Phi_2 \\ 2\rho_1 V_{S1} \sin \Phi_1 \cos \Theta_1 & \rho_1 V_{S1} (1 - 2\sin^2 \Phi_1) & 2\rho_2 V_{S2} \sin \Phi_2 \cos \Theta_2 & \rho_2 V_{S2} (1 - 2\sin^2 \Phi_2) \\ \rho_1 V_{P1} (1 - 2\sin^2 \Phi_1) & -\rho_1 V_{S1} \sin 2\Phi_1 & -\rho_2 V_{P2} (1 - 2\sin^2 \Phi_2) & \rho_2 V_{S2} \sin 2\Phi_2 \end{pmatrix} \quad \text{Reflection}$$

→ L'AMPIEZZA dell'onda RIFLESSA (e trasmessa)

→ $f(V_p, V_s, \rho, \text{angle})$

Fondamenti

Curva sforzo-deformazione per le rocce



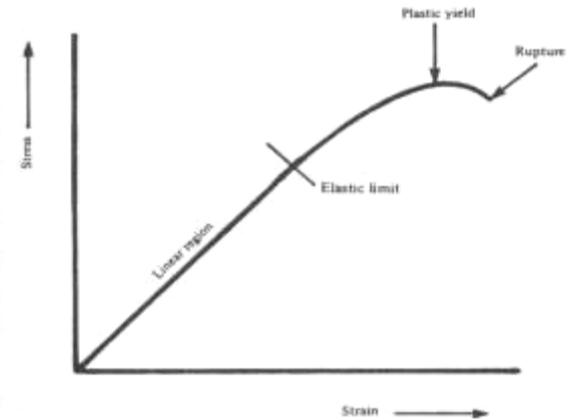
La deformazione elastica avviene quando un corpo si deforma in seguito ad uno sforzo applicato, ma ritorna alla sua forma originale quando lo sforzo venga rimosso.

La deformazione plastica avviene quando un corpo subisce una deformazione irreversibile senza visibile frattura. All'applicazione dello sforzo si ha deformazione, che rimane dopo la rimozione dello sforzo stesso.

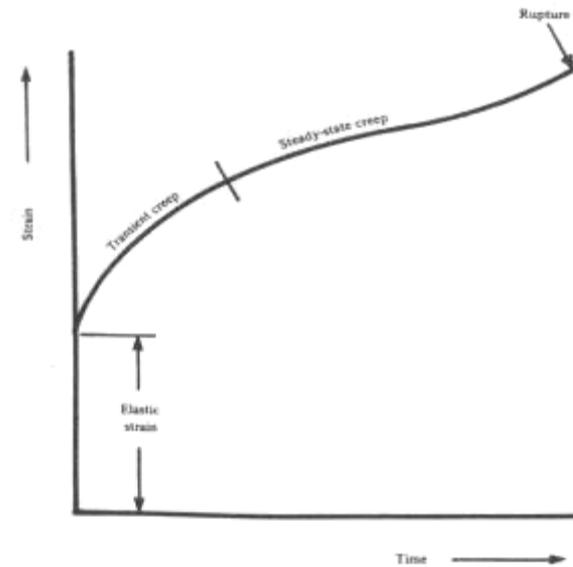
Fondamenti

Legge di Hooke

All'interno del campo elastico, la deformazione prodotta da uno sforzo è direttamente proporzionale allo sforzo che l'ha generata



(a)



(b)

Fig. 2.4 Stress-strain-time relationships. (a) Stress versus strain; (b) strain versus time.

Fondamenti

Comportamento elastico di un materiale:

si ha comportamento elastico quando vi sia una relazione lineare tra lo sforzo applicato al materiale e la deformazione istantanea dello stesso. L'annullamento dello sforzo comporta l'istanteo annullamento della deformazione.

Alcune rocce approssimano il comportamento elastico ideale durante piccole deformazioni se a ridotta profondità e per sforzo di breve durata. In particolare questo avviene per le onde sismiche: lo sforzo è applicato per un tempo piccolissimo e il materiale si comporta elasticamente anche a profondità sub-croscali.

Possiamo quindi considerare il passaggio dell'energia sismica all'interno delle rocce come caratterizzato da un comportamento di tipo elastico.

→ RICAWARE INFORMAZIONI SUI CONTRASTI DI IMPEDENZA ACUSTICA PRESENTI NEL SOTTOSUOLO

Fondamenti

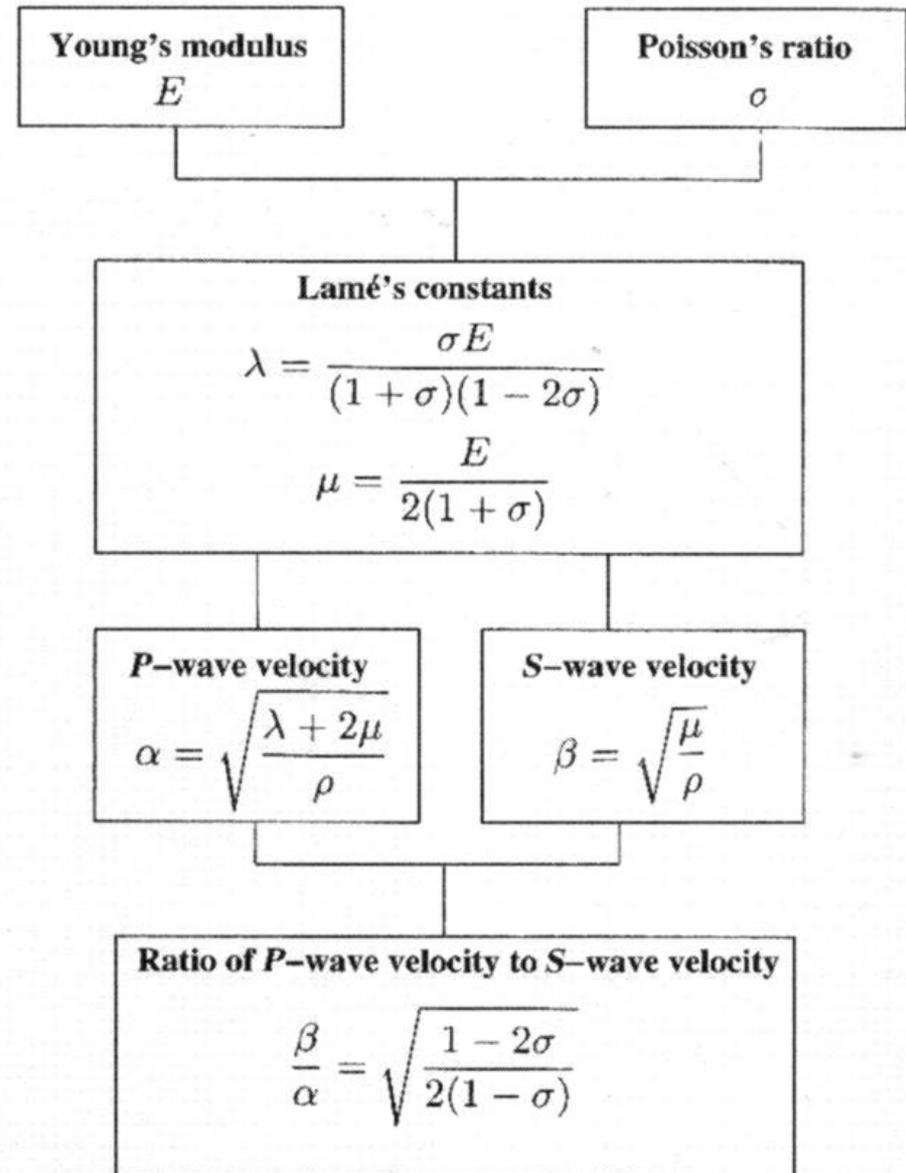
Elastic deformation is a deformation in solid bodies that vanishes once the stress is released.

Hooke's law for elastic deformations states that the strain at any point is directly proportional to the stresses applied at that point.

Elastic moduli are material constants that describe stress-strain relations

→ Dai parametri misurati in un esperimento sismico (es. velocità) è possibile **STIMARE** i parametri che descrivono il comportamento elastico di una roccia.

→ I valori ottenuti sono valori "VOLUMETRICI". Si riferiscono cioè alla "Massa Rocciosa" piuttosto che al materiale "Roccia".



Strumentazione

Dipende essenzialmente da:

TIPO DI RILIEVO: a terra; a mare; in pozzo
PROFONDITA' DI INDAGINE DESIDERATA
GRADO DI DETTAGLIO DESIDERATO

1. Sistemi posizionamento

GPS (Global Positioning System)

EDM (Electromagnetic Distance Measuring equipment)

2. Sorgenti

Impulsive/Non-impulsive

~~Marine/Terrestri~~

3. Sensori

Geofoni

~~Idrofoni~~

Strumentazione - Sorgenti

Sorgente sismica ideale

Produce un'onda che

- 1 - contiene sufficiente energia per essere rilevata a grande distanza
- 2 - ha breve durata, in modo da consentire identificazione di discontinuita' vicine (alte frequenze e banda larga)
- 3 - e' ripetitiva
- 4 - non genera rumore

Sorgenti ATTIVE (quelle comunemente utilizzate)

"Sorgenti PASSIVE" (sismologia + microtremoni + ...)

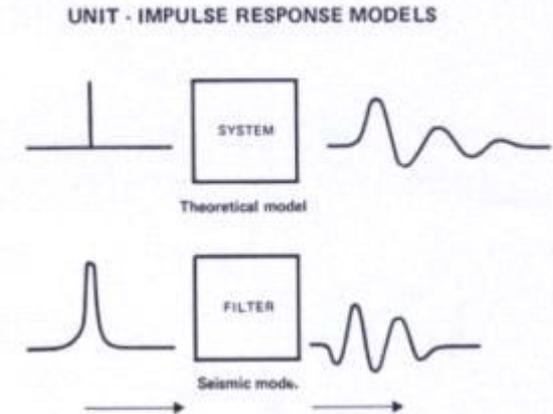
Strumentazione - Sorgenti



Strumentazione - Sorgenti

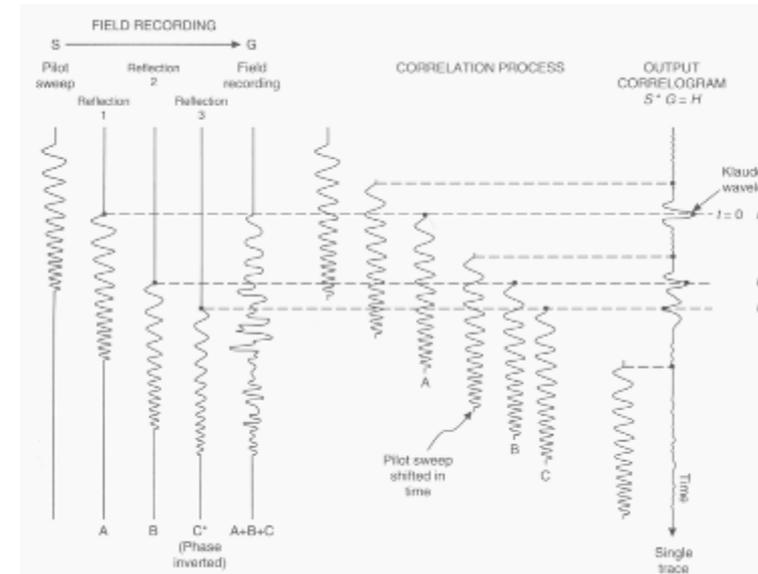
Impulsive:

generano una forma d'onda simile ad un impulso, cioè con ampiezza concentrata in un tempo breve. La forma d'onda NON è nota



Non Impulsive:

generano una forma d'onda con una certa durata temporale. La forma d'onda è nota e può essere modificata in funzione degli obiettivi dell'indagine e dei parametri del sottosuolo



Strumentazione - Sorgenti

Sorgenti sismiche non impulsive: a terra

Vibroseis

Produce un'energizzazione estesa nel tempo, a frequenza continuamente variabile, definita da

$$P(t) = A(t) \sin 2\pi t \left[f_0 + \left(\frac{df}{dt} \right) t \right]$$

Se $df/dt > 0$ si ha **up-sweep**

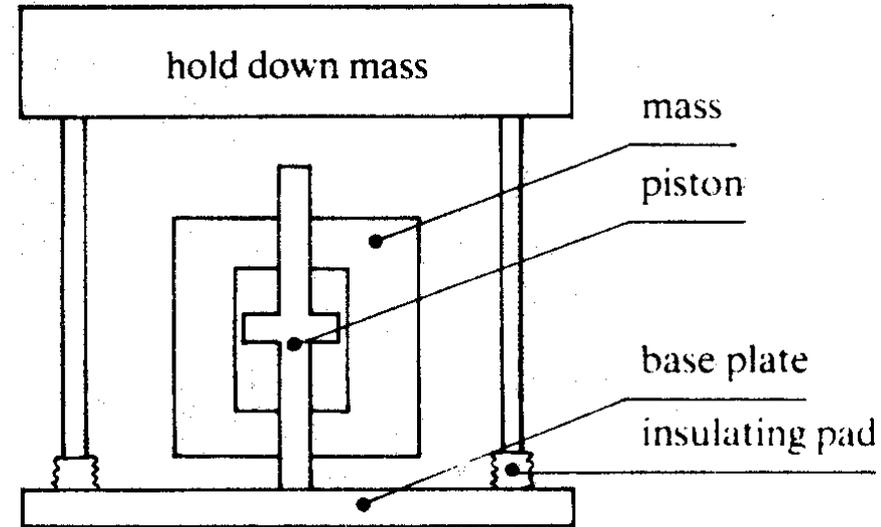
Se $df/dt < 0$ si ha **down-sweep**

Per ottenere dai dati Vibroseis un'approssimazione alla risposta impulsiva del terreno e' necessario effettuare la cross-correlazione della traccia sismica registrata con la forma d'onda emessa dalla sorgente.

Strumentazione - Sorgenti

Sorgenti sismiche non impulsive: a terra

Vibroiseis



Strumentazione - Geofoni

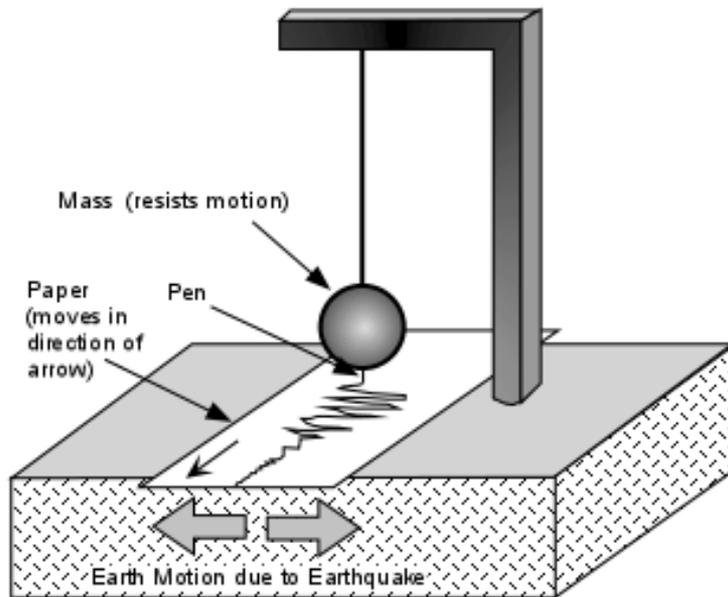
Il più antico "sismometro"



- The Chinese Ground Motion Meter, invented in 132 AD by the Chinese mathematician, Cheng Heng, was the world's first seismograph.
- The eight wooden dragons each had a ball in its mouth. During an earthquake, a ball dropped from a dragon's mouth into the frog's mouth beneath it, indicating the direction of tremor.

Strumentazione - Geofoni

Sismometro/Sismografo/geofono



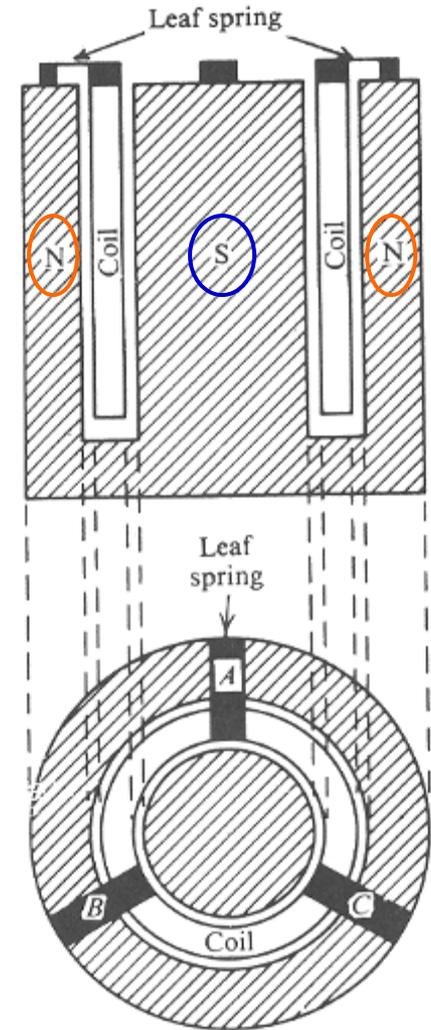
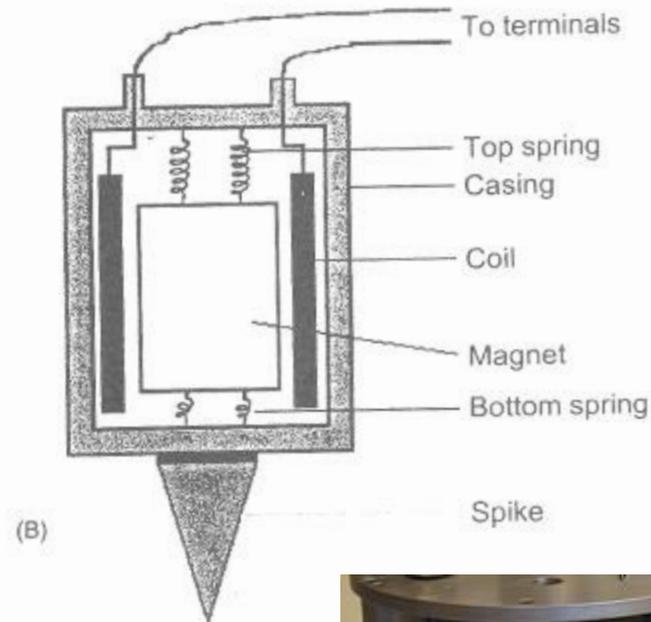
- A basic seismometer consists of a freely suspending mass from a frame attached to the ground.
- The relative motion of the frame with respect to the heavy mass is printed as a seismogram.

Geofoni a 3 componenti XYZ

Geofoni a 1 componente (es. P/S_H/S_V/...)

Strumentazione - Geofoni

Sensori → geofoni a 1 componente



Strumentazione - Geofoni

I geofoni

Principio di funzionamento:

Avvolgimento sospeso in campo magnetico generato da magnete permanente (tramite molle).

Avvolgimento tende a mantenere per inerzia la sua posizione, magnete si muove solidale con terreno.

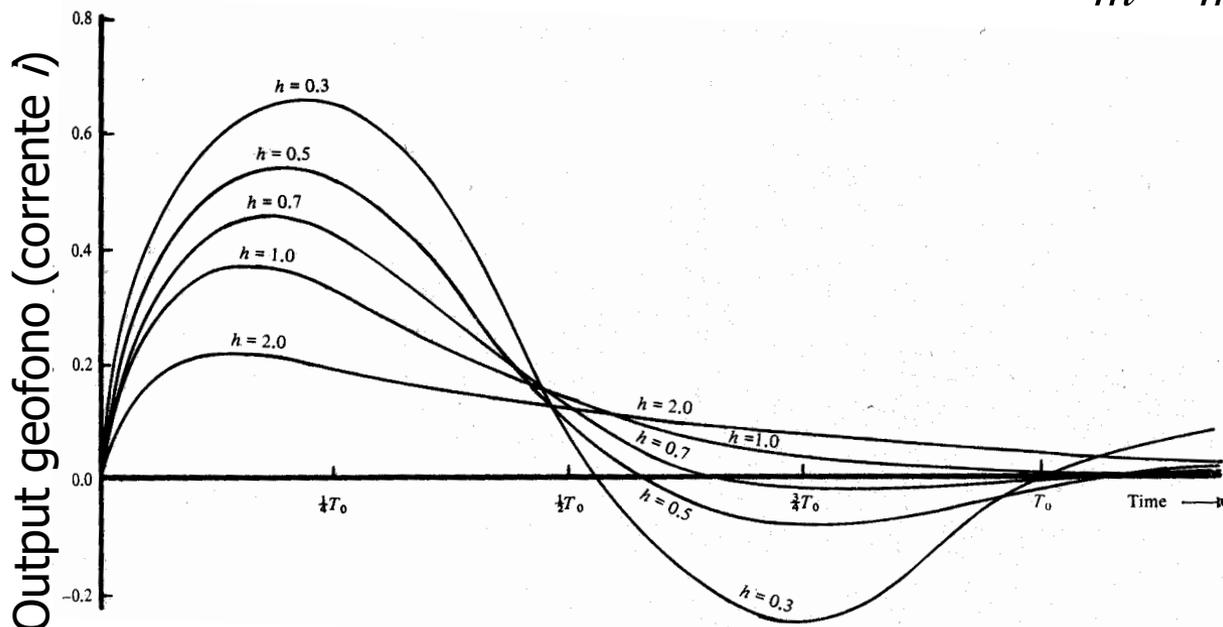
Moto relativo avvolgimento-campo magnetico genera differenza di potenziale agli estremi dell'avvolgimento.

Strumentazione - Geofoni

I geofoni

Smorzamento (damping) h : puo' essere meccanico o elettromagnetico. Quando $h=1$, smorzamento critico e output geofono non oscilla.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 i}{dt^2} + 2h\omega_0 \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i &= \left(\frac{K}{R} \right) \frac{d^3 z}{dt^3} \\ 2h\omega_0 &= \frac{\tau}{m} + \frac{K^2}{mR} \end{aligned} \right\}$$



i = corrente in avvolgimento
 z = spostamento terreno (geofono)
 $K = 2\pi r n H$
 m, r, n = massa, raggio, n. giri avvolgimento
 R = resistenza totale avvolgimento e circuito
 τ = fattore smorzamento meccanico

Strumentazione - Geofoni

I geofoni

Perche' l'ampiezza del moto dell'avvolgimento sia indipendente dalla frequenza, la frequenza naturale del sistema deve essere inferiore alle frequenze di interesse e il ritardo di fase deve variare linearmente con la frequenza.

Parametro essenziale per definire caratteristiche geofono e' la sensitivita'

$$= \Gamma = \frac{\text{Votaggio in uscita}}{\text{Velocita' moto geofono}}$$

Strumentazione - Geofoni

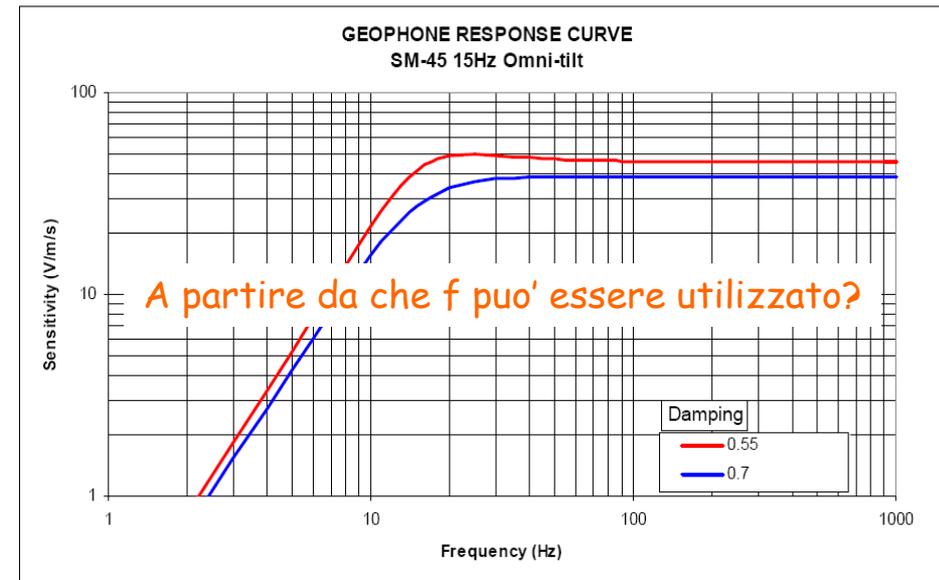
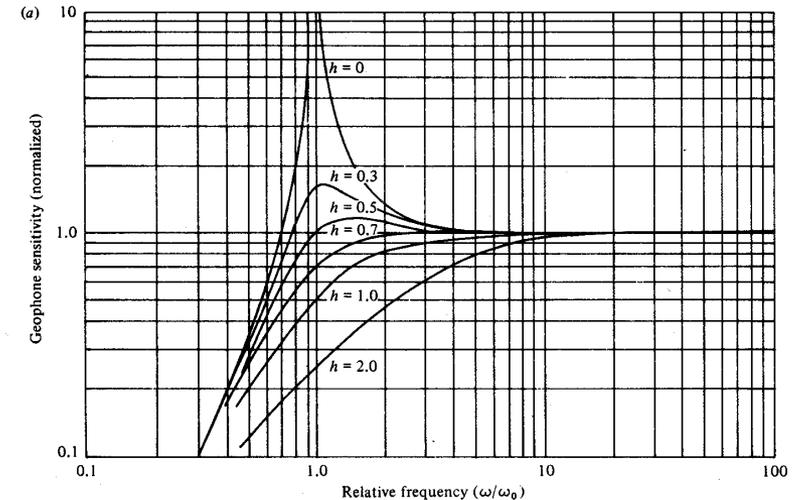
I geofoni

La sensitività dipende essenzialmente da K ed h ed ha un valore di circa 0.7 V/cm/s per i sensori attualmente in uso.

In questo modo la risposta è circa costante a partire dalla Frequenza naturale (F_n) del sistema.

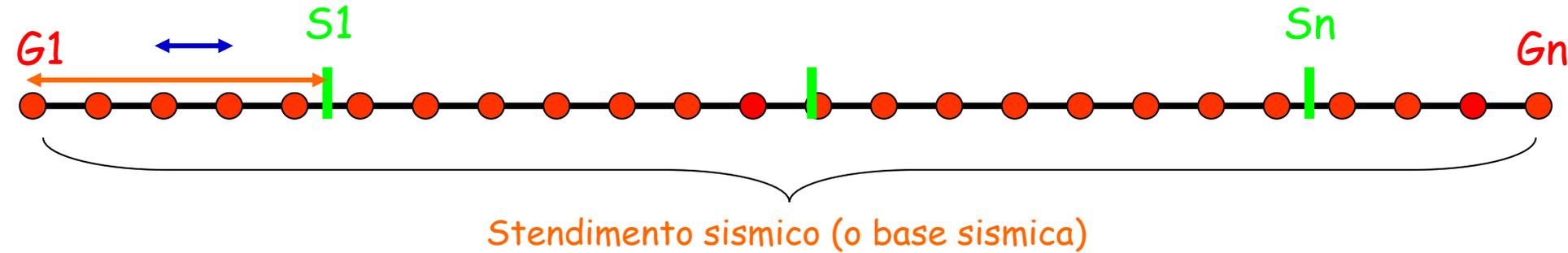
Esistono in commercio geofoni con F_n da pochi Hz fino a centinaia di Hz.

**ATTENZIONE
ALL'APPLICAZIONE**



Strumentazione GEOMETRIE

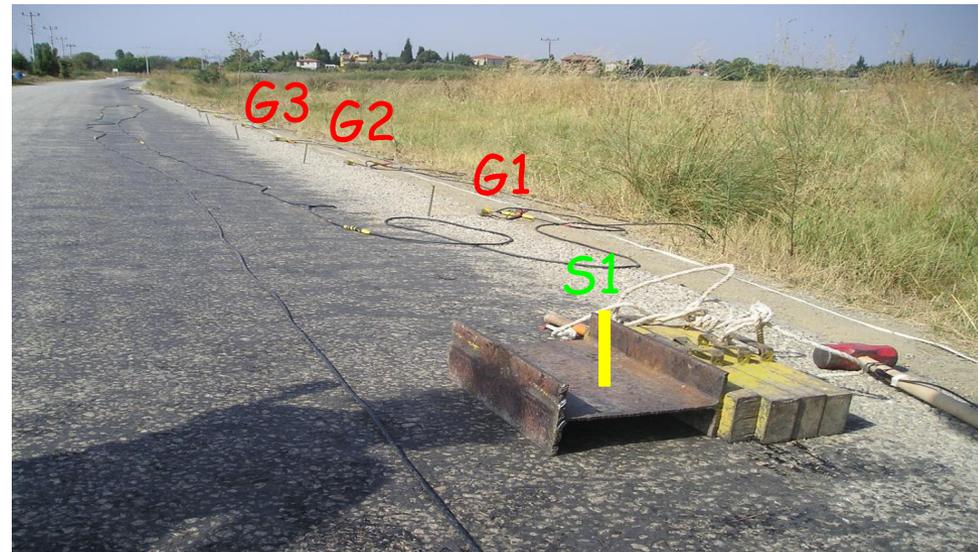
Un po' di nomenclatura



↔ Distanza intergeofonica

→ Distanza Geofono-Sorgente → OFFSET

█ Punto di Energizzazione (Shot Point)

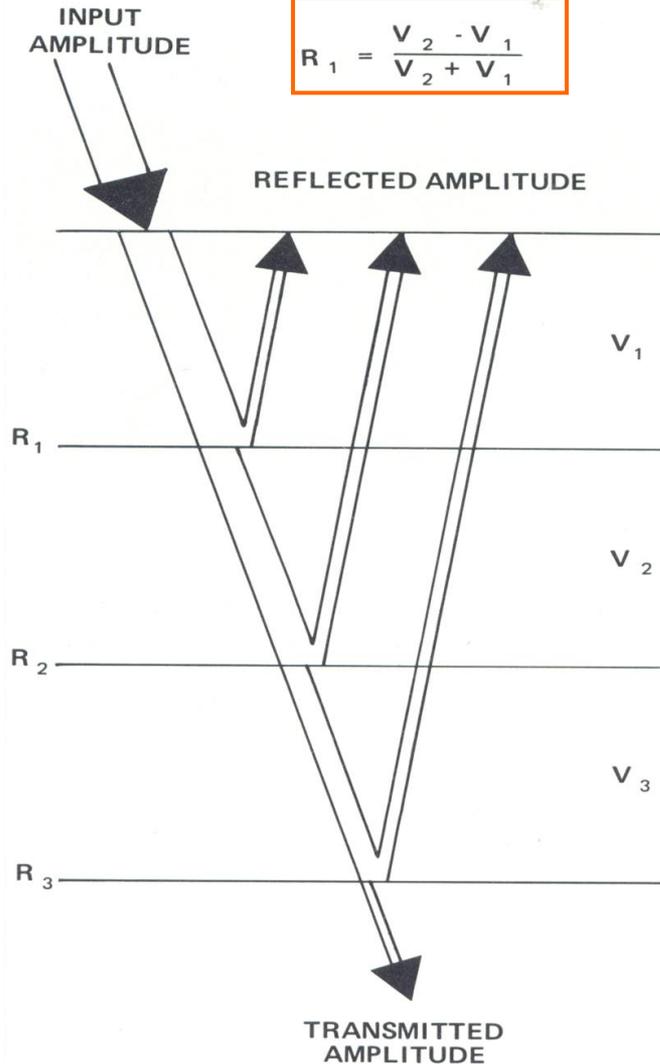


Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

SEISMIC REFLECTION MODEL

Formula
semplificata

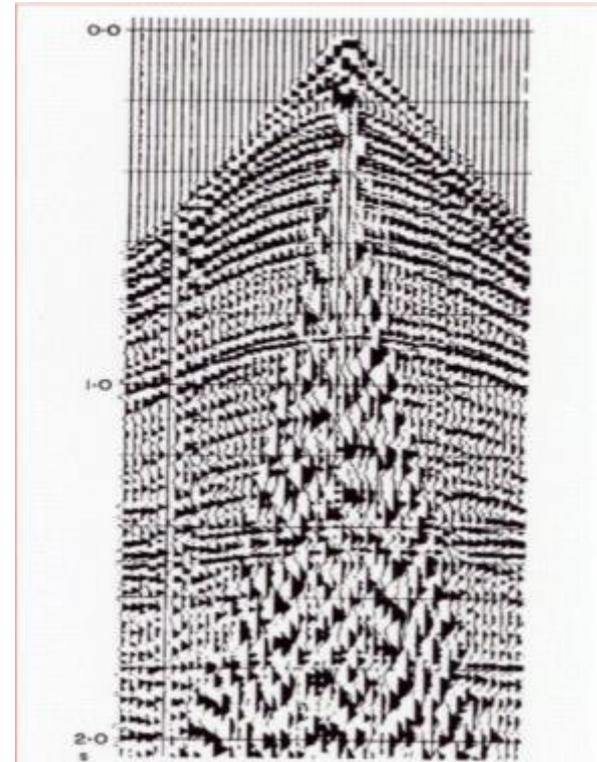
$$R_1 = \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}$$



LEGGI dell'Ottica Geometrica (sufficientemente lontano dalla sorgente - far field)

1. Angolo di riflessione = angolo di incidenza
2. Raggio d'onda incidente e riflesso complanari
3. Ampiezza del raggio d'onda riflesso dipendente da R_c

Risultato di un esperimento con più sensori a diversa distanza



Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

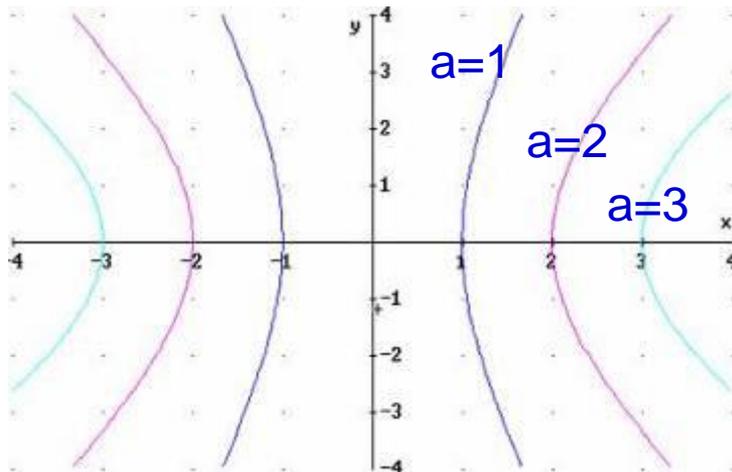
L'equazione dell'onda riflessa viene descritta da una iperbole che tende asintoticamente alla retta dell'onda diretta.

Trasformando l'equazione nella forma

$$x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$$

$$\Rightarrow a = 2h/v_1 :$$

all'aumentare di a , e quindi della profondità h , aumenterà la pendenza dell'iperbole di riflessione
all'aumentare di v calerà la pendenza.



Onda riflessa
$$T^2 = \left(\frac{x}{v_1}\right)^2 + \left(\frac{2h}{v_1}\right)^2$$

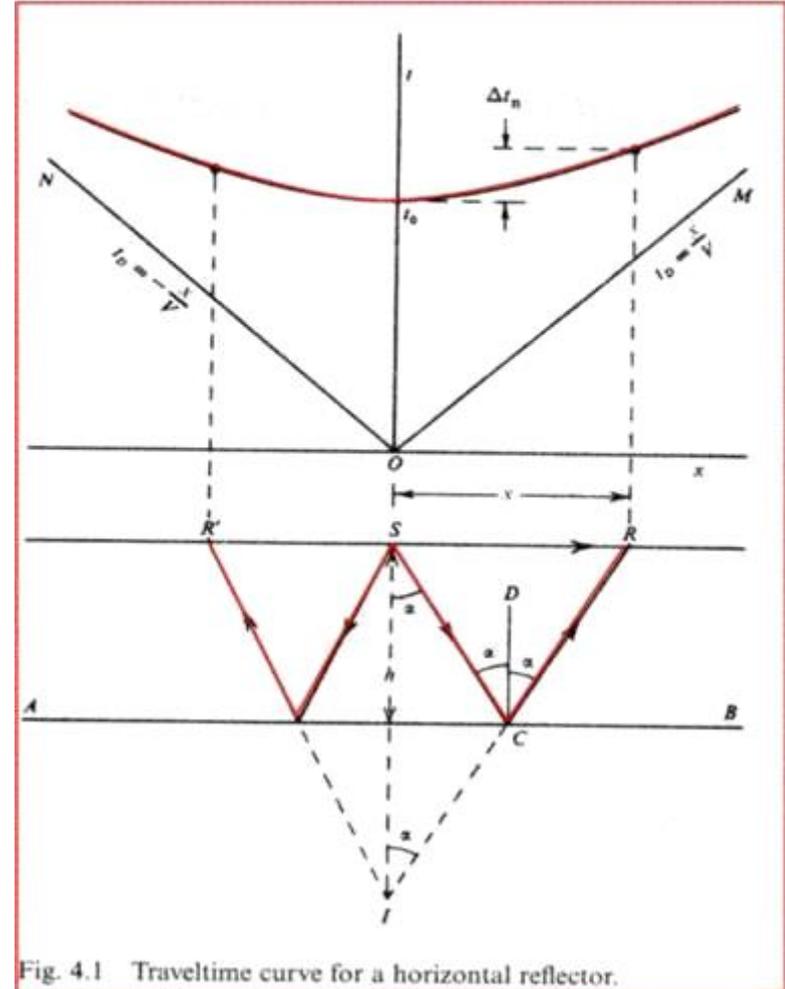
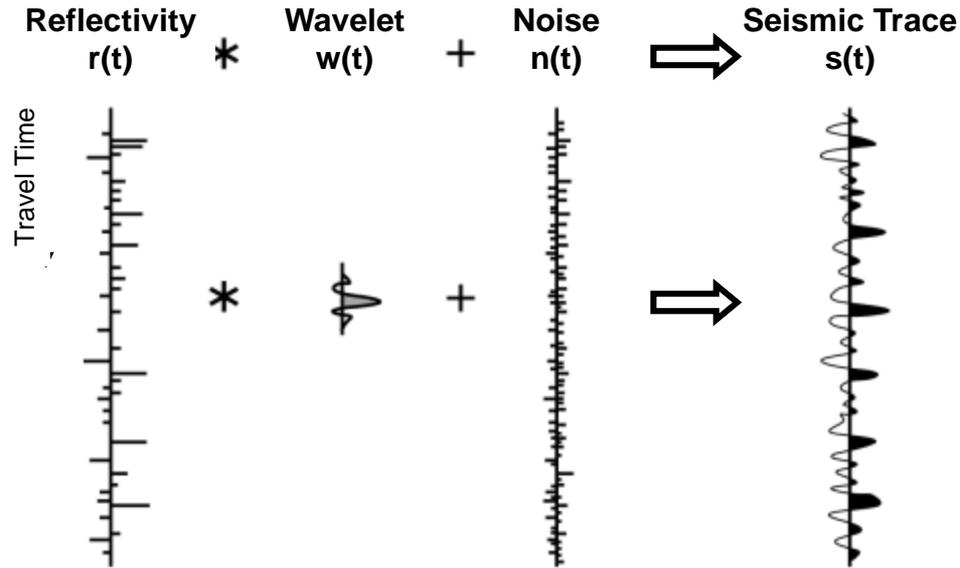


Fig. 4.1 Traveltime curve for a horizontal reflector.

Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

Modello Convolutivo

DOMINIO DEL TEMPO
(dato registrato)

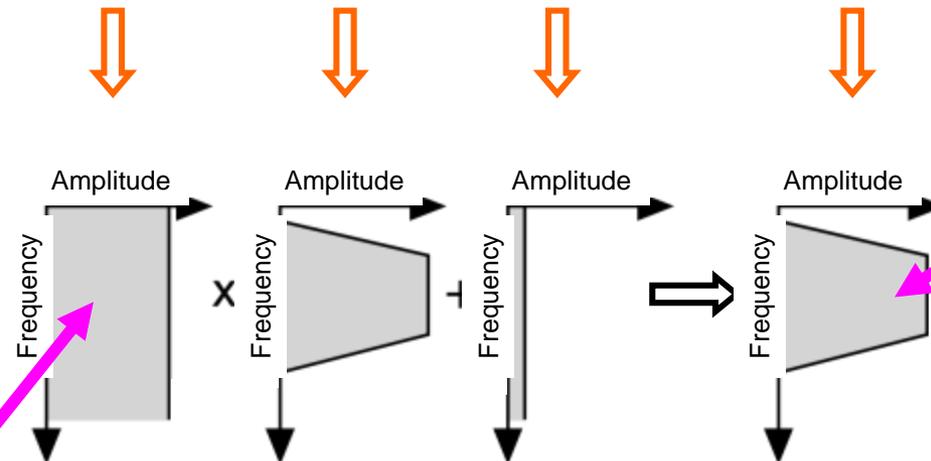


Partyka, 1999

FT

DOMINIO DELLE FREQUENZE
(dato trasformato)

Statisticamente spettro Bianco



Statisticamente spettro bianco a banda limitata

Partyka, 1999

Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

RISOLUZIONE: VERTICALE

$$\lambda = v / f$$

λ = lunghezza d'onda dominante (0.1 – 250 m)

v = velocità delle onde P (300-7000 m/sec)

f = frequenza dominante (10-1000Hz)

Table 11-1. Threshold for vertical resolution.

$\lambda/4 = v/4f$		
v (m/s)	f (Hz)	$\lambda/4$ (m)
2000	50	10
3000	40	18
4000	30	33
5000	20	62

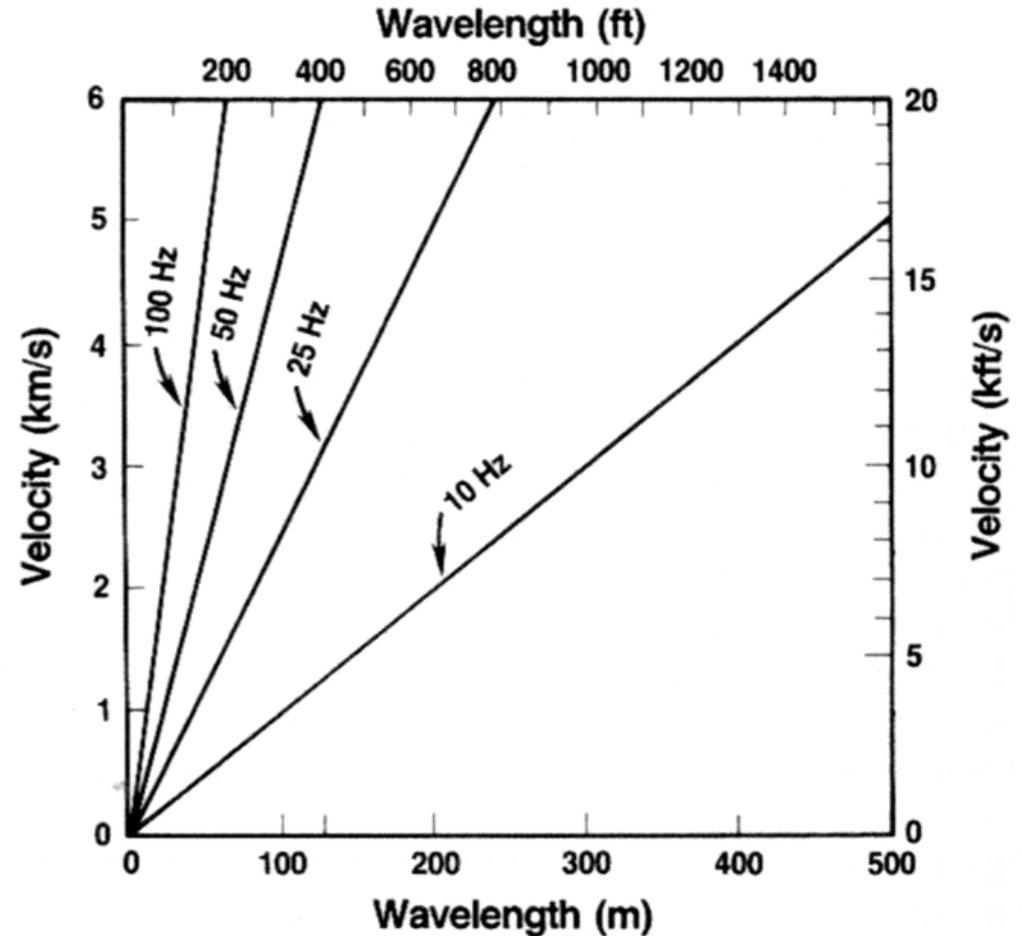


FIG. 11.1-1. The relationship between velocity, dominant frequency, and wavelength.

Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

Risoluzione laterale:

distanza laterale minima tra due punti riflettenti: rappresenta il limite per cui i punti stessi possano essere riconosciuti individualmente in un profilo sismico.

La risoluzione laterale dipende dalle caratteristiche dell'"esperimento sismico" condotto, in particolare:

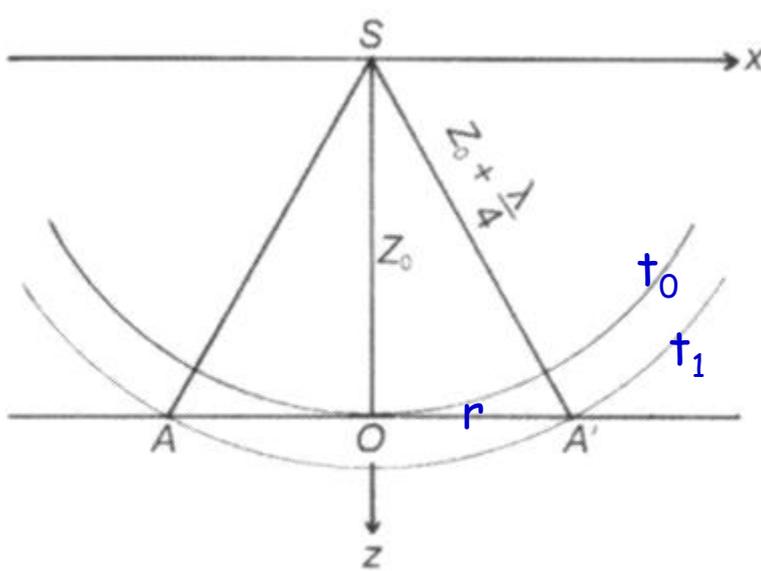
CAMPIONAMENTO SPAZIALE (intervallo tra le tracce)

CARATTERISTICHE DEL SEGNALE

UTILIZZATO (f , λ , t di arrivo)

Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

RISOLUZIONE: VERTICALE



$$r = \sqrt{\left(z_0 + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - z_0^2}$$

$$r = \sqrt{z_0^2 + \frac{\lambda^2}{16} + 2 \frac{z_0 \lambda}{4} - z_0^2}$$

$$r = \sqrt{\frac{\lambda^2}{16} + \frac{z_0 \lambda}{2}}$$

considerando che $\lambda \ll z_0$

$$r \cong \sqrt{\frac{z_0 \lambda}{2}}$$

Tutta l'Energia che arriva nel tempo $t_1 - t_0$ interferisce **COSTRUTTIVAMENTE** perché: $t_0 = \frac{2z_0}{v}$ $t_1 = \frac{2(z_0 + \lambda/4)}{v}$ $\rightarrow t_1 - t_0 = T/2$

Essendo: $v = f\lambda$ e $z_0 = \frac{t_0 v}{2}$

$$r \cong \sqrt{\frac{z_0 \lambda}{2}}$$

$$r \cong \sqrt{\frac{z_0 v}{2f}}$$

$$r \cong \sqrt{\frac{t_0 v \cdot v}{2 \cdot 2f}}$$

$$\rightarrow r \cong \frac{v}{2} \sqrt{\frac{t_0}{f}} \rightarrow \text{Prima zona di Fresnel}$$

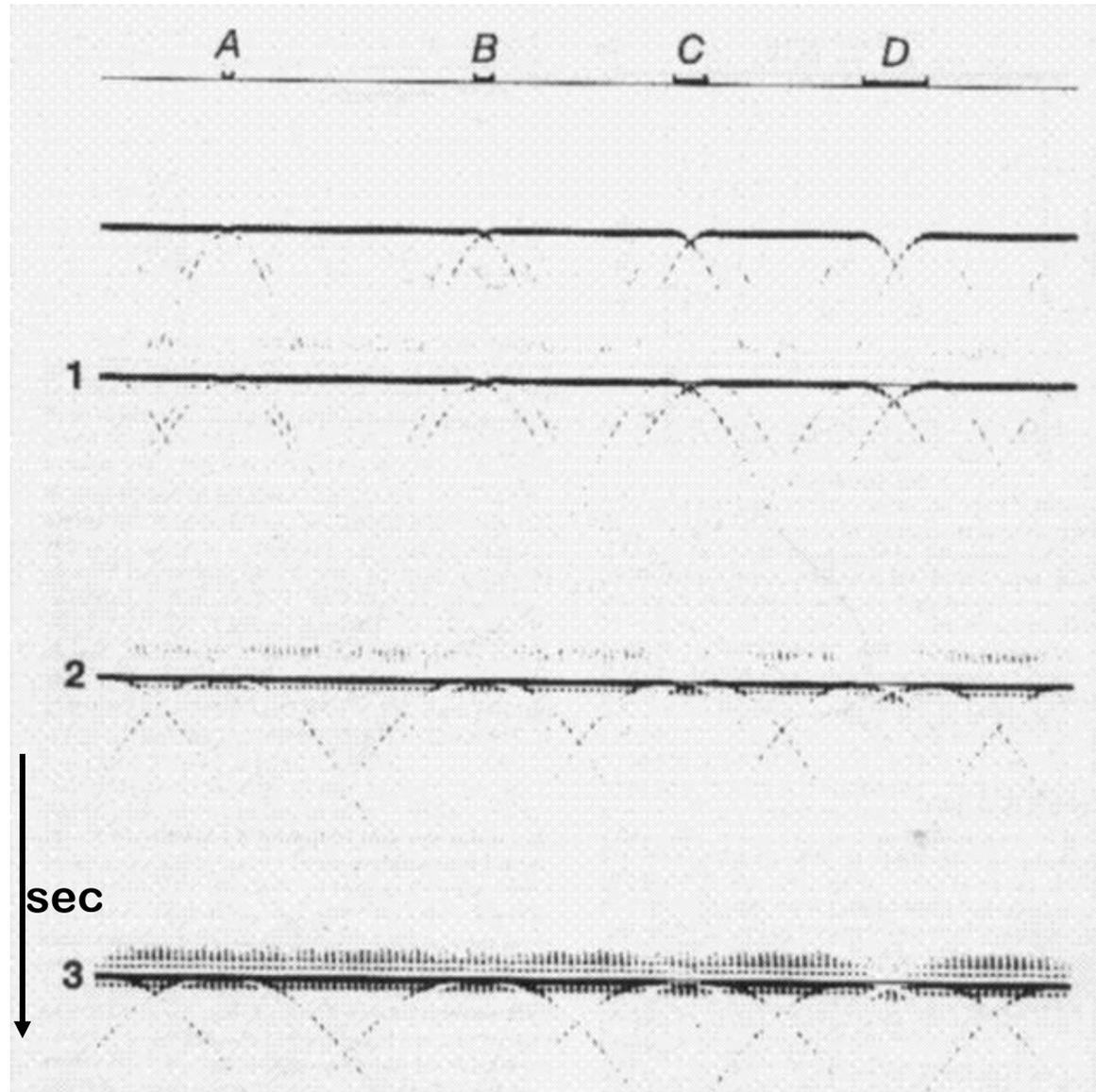
$$R_{LAT} \propto \frac{1}{r}$$

Sismica a Riflessione - Richiami di teoria

Effetto della profondità (0.5, 1, 2, 3 sec 2wt) dei riflettori sulla risoluzione laterale

$$r \cong \sqrt{\frac{z_0 \lambda}{2}}$$

A, B, C, D segmenti di diversa lunghezza relativi ad assenza di riflessione: il livello del rumore e la presenza delle diffrazioni sono elementi importanti.





Possibili applicazioni in qualsiasi ambiente a scala da
 10^0m a 10^6m

Frequenze da qualche Hz a 10^2 KHz

Profondità di indagine da qualche m a 10^5m

DIPENDE DALL'ENERGIA DELLA SORGENTE
(e caratteristiche attenuazione materiali)

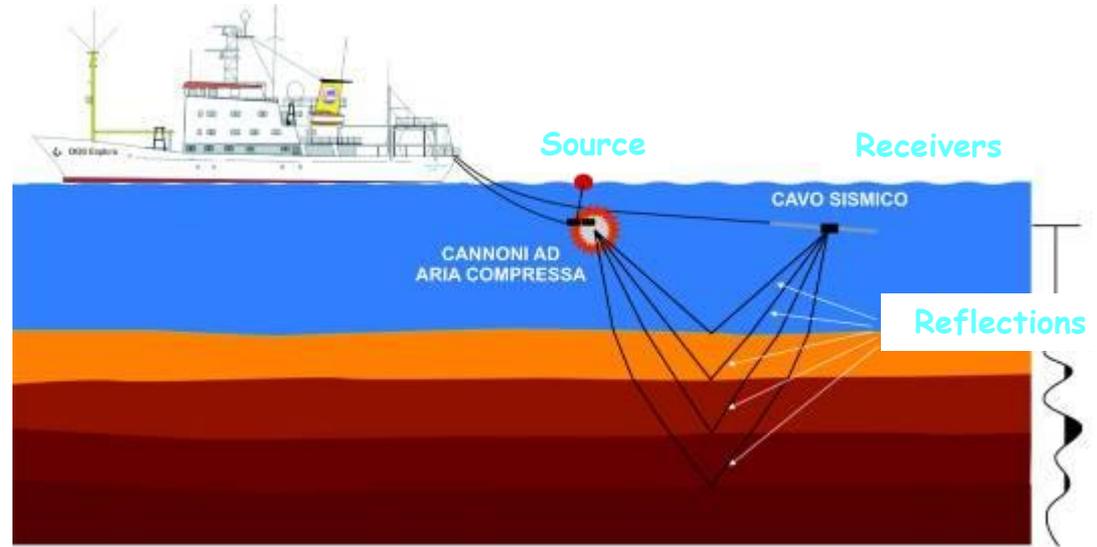
Il metodo piu' largamente diffuso per la prospezione geofisica del sottosuolo, fondamentale nell'esplorazione e lo sfruttamento di giacimenti di idrocarburi.

Fornisce informazioni piu' dettagliate di qualsiasi altro metodo non-invasivo su stratigrafia, struttura e proprieta' dei materiali.

Utilizza tempi di arrivo, ampiezza e fase degli echi dalle discontinuita' nelle proprieta' elastiche presenti nel sottosuolo per ricavarne posizione e proprieta' fisiche (impedenza acustica, velocita' propagazione onde sismiche, parametri elastici)

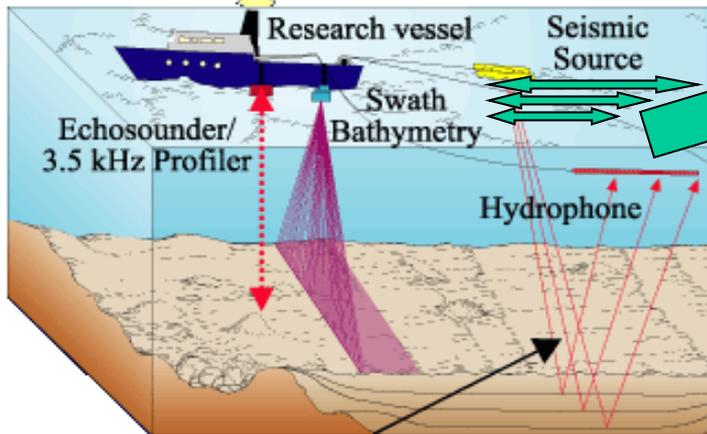
REFLECTION SEISMIC: ACQUISITION

SINGLE CHANNEL



GPS
USCG Differential Corrections

2D MULTI CHANNEL (UP to 500) → MULTIOFFSET



SEISMIC REFLECTION (Subsurface Coverage)



Sismica a Riflessione - Metodologia

Numero di sensori (geofoni/idrofoni) o gruppi di sensori puo' variare da 1 a diverse centinaia. Strumentazione piu' diffusa per piccola profondita' (<100m) e' a 24 canali.

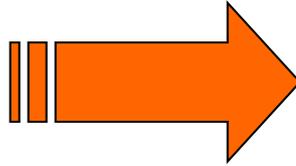
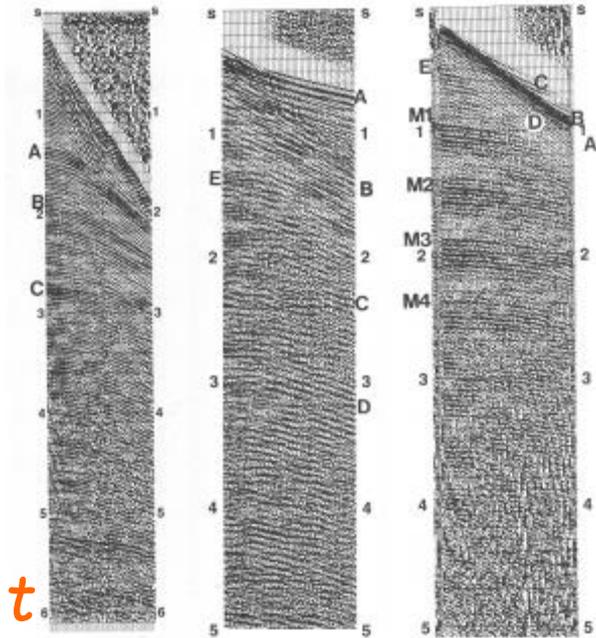
In un rilievo 2-D (a terra) si usa la tecnica del **profilo continuo**:

stendimenti di sensori collegati dal cavo sismico, di lunghezza media compresa tra 10m e 1Km sono disposti lungo il profilo (possibilmente rettilineo) da indagare.

Gli stendimenti sono divisi di norma in 2 semibasi che vengono alternativamente spostate nella direzione di avanzamento del profilo.

Si registrano serie di **COMMON SHOT GATHER** ovvero insiemi di tracce (una per ogni geofono attivo - channel) relative ad un'unica posizione della sorgente.

COMMON SHOT GATHER



SEZIONE "FINALE"



Per ottenere il dato finale sono necessarie molte operazioni di ELABORAZIONE da applicare in sequenza definite "processing flow"

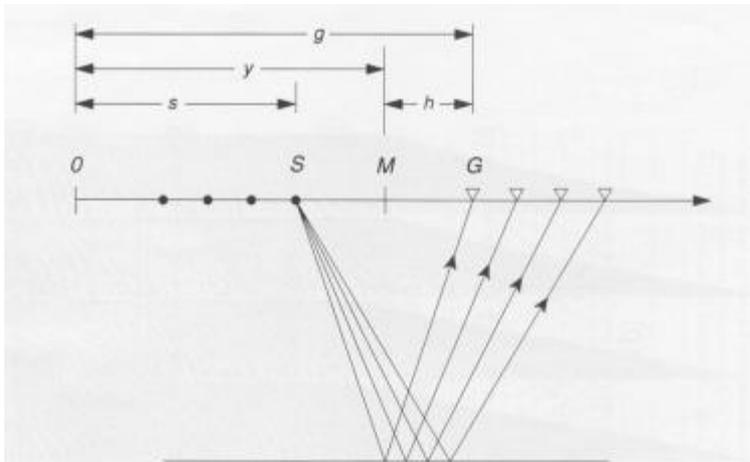
L'elaborazione non può essere standardizzata, perché dipende da molti fattori, il più importante è forse rappresentato dalle **CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DEL SOTTOSUOLO**, ovvero dall'**OBIETTIVO FINALE** di INDAGINE

Esempio di Processing flow:

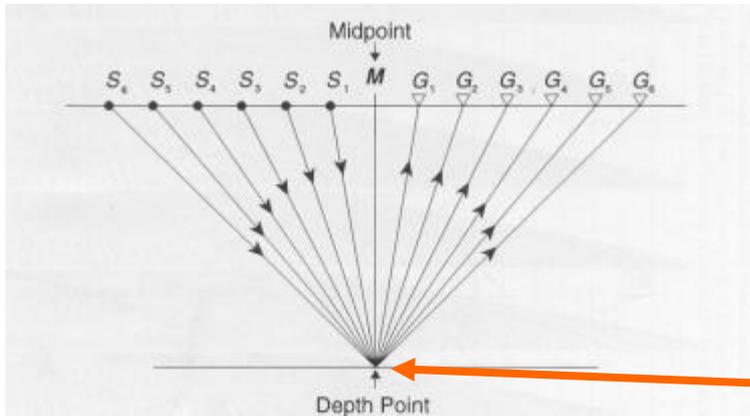
- *Editing*
- *Sorting/geometry*
- *Filtraggio*
- *Recupero di ampiezza*
- *Correzioni statiche (se dato in terra)*
- *Spectral shaping/deconvoluzione*
- *Analisi di Velocità - NMO*
- *Stack*
- *Migrazione/conversione in profondità*
- *Analisi specifiche AVO, AVA, Attributi*

Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Sorting/geometry



Dalle coordinate di acquisizione
Common Shot Gather...



A quelle di elaborazione
Common MidPoint gather (CMP)

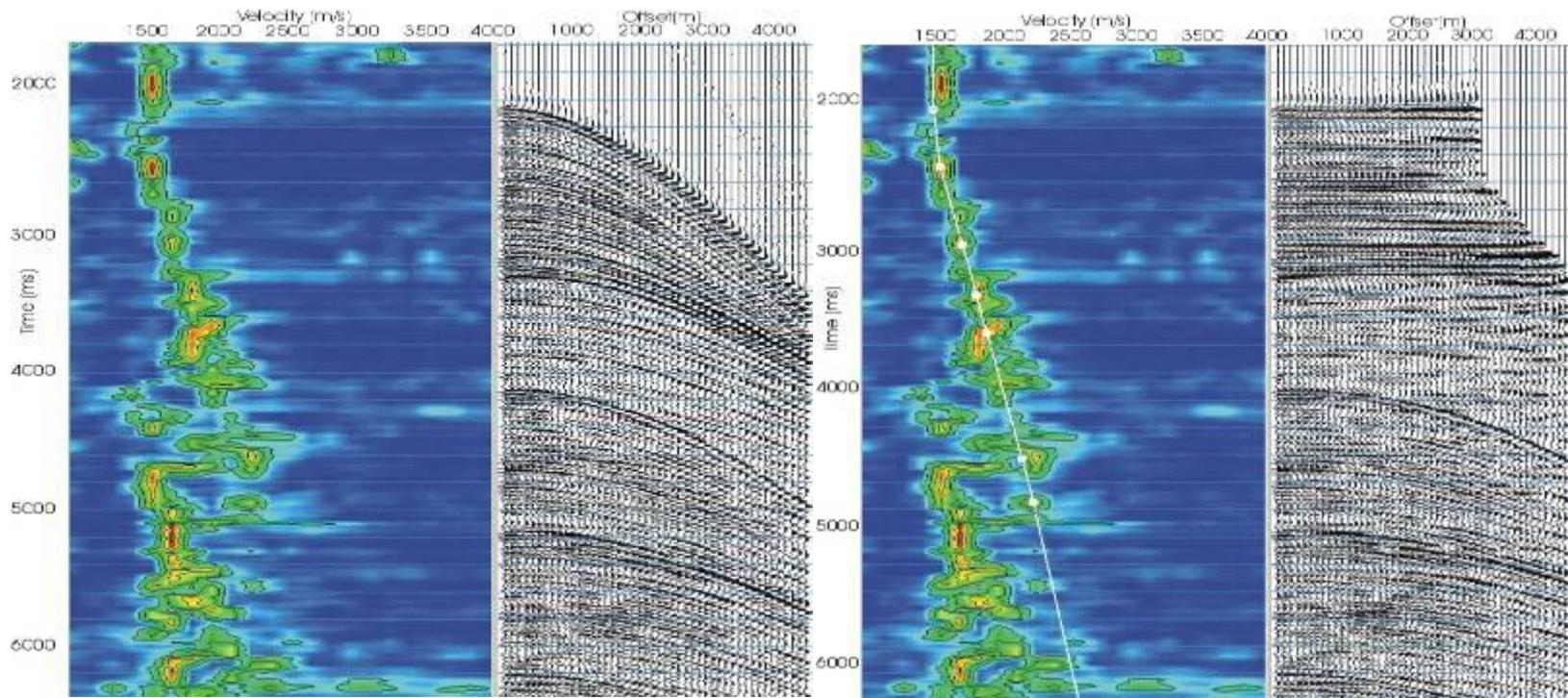
Nello schema copertura (n) pari a 600%, ovvero 6 raggi d'onda illuminano il medesimo punto.

Copertura 100% = Copertura singola

Più raggi d'onda colpiscono il medesimo punto in profondità → Copertura Multipla (Multifold) → ridondanza dei dati

Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Analisi di Velocità - Normal MoveOut

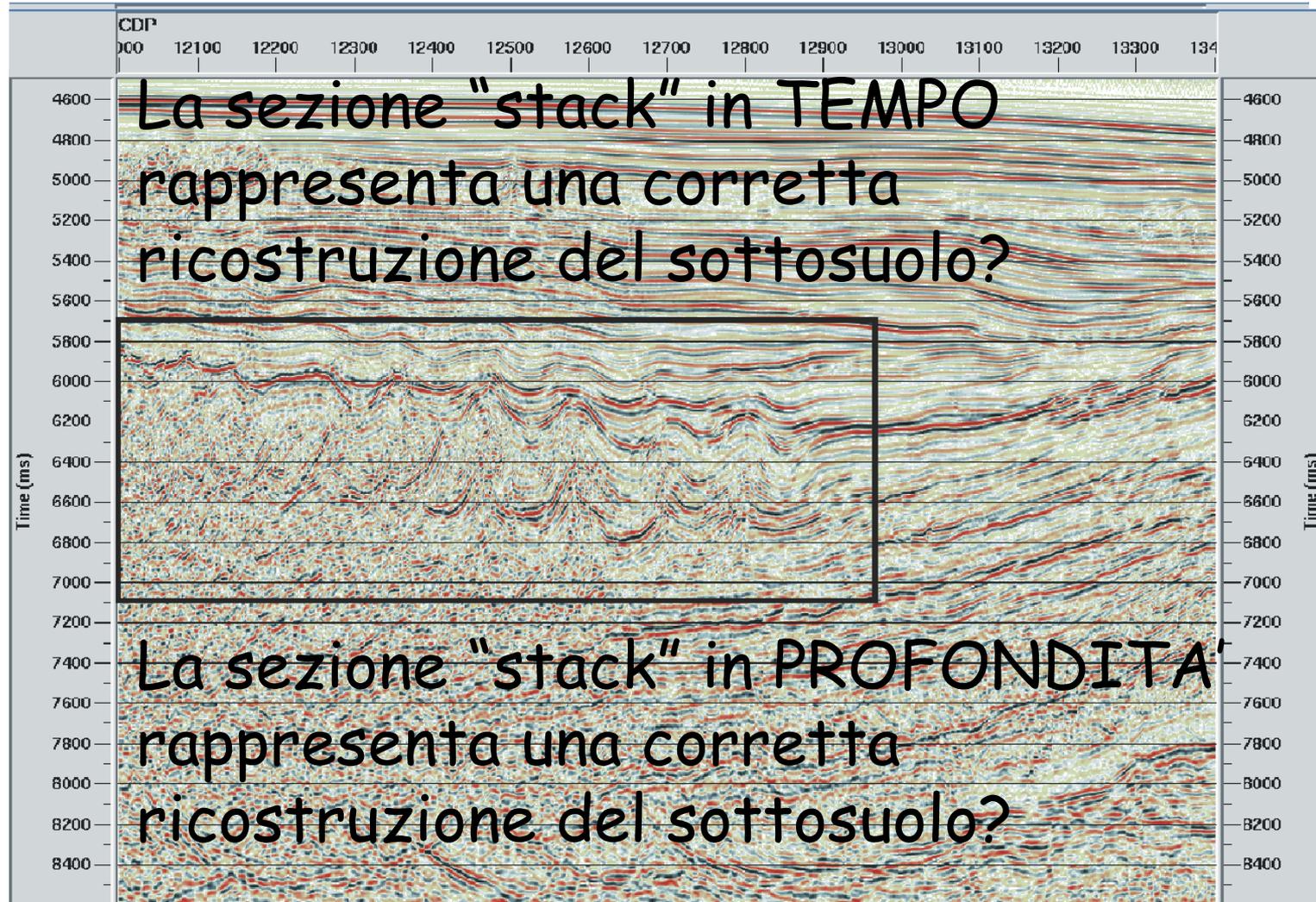


Importanza della Velocità:

1. Permette di effettuare la **CONVERSIONE** tempo → Profondità
2. Permette di parametrizzare correttamente molti algoritmi di elaborazione
3. Permette di incrementare il rapporto S/N
4. E' un parametro petrofisico **FONDAMENTALE** (Poisson, imp. acustica,...)

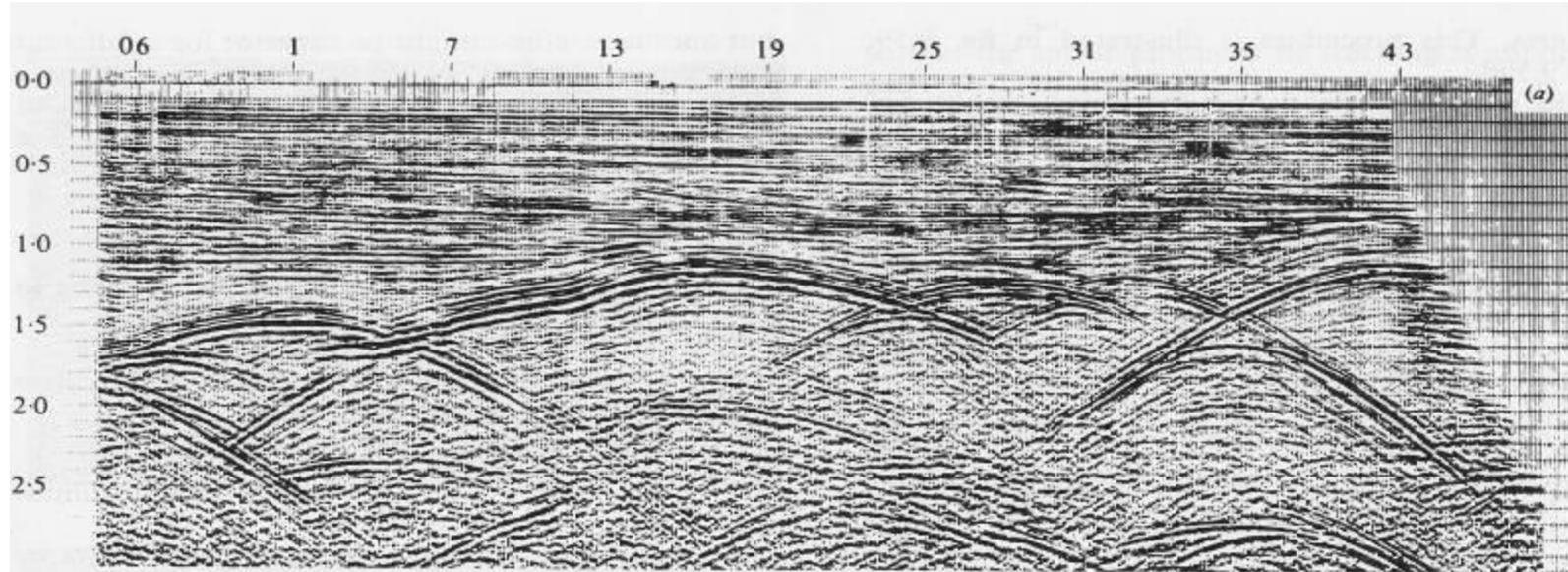
Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Ricostruzione corretta del sottosuolo (IMAGING)

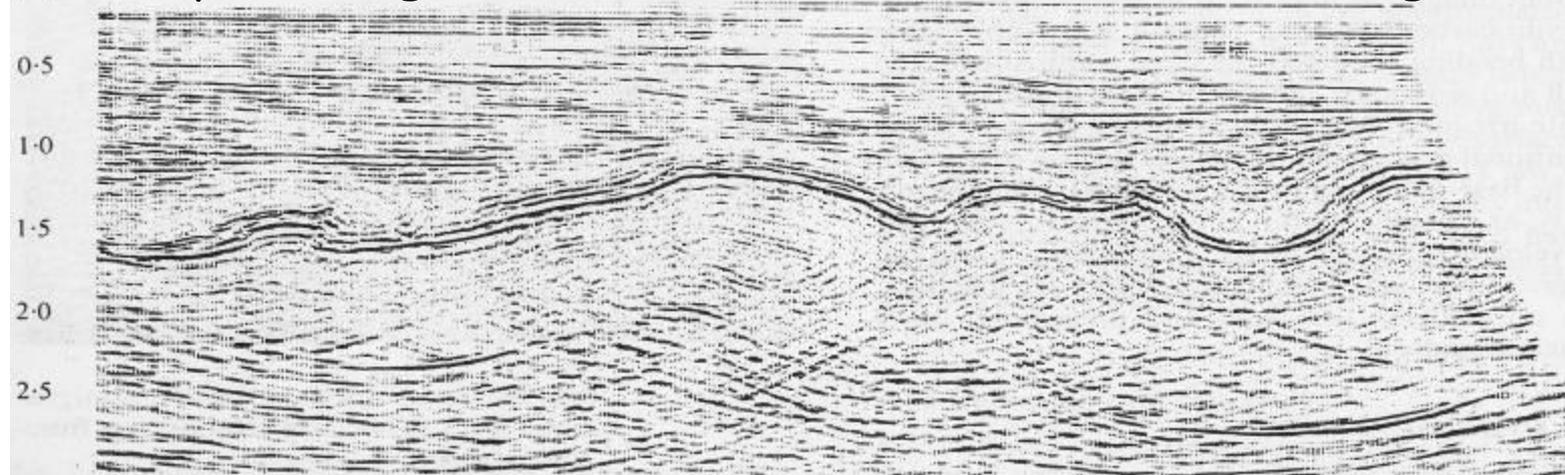


Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Migrazione



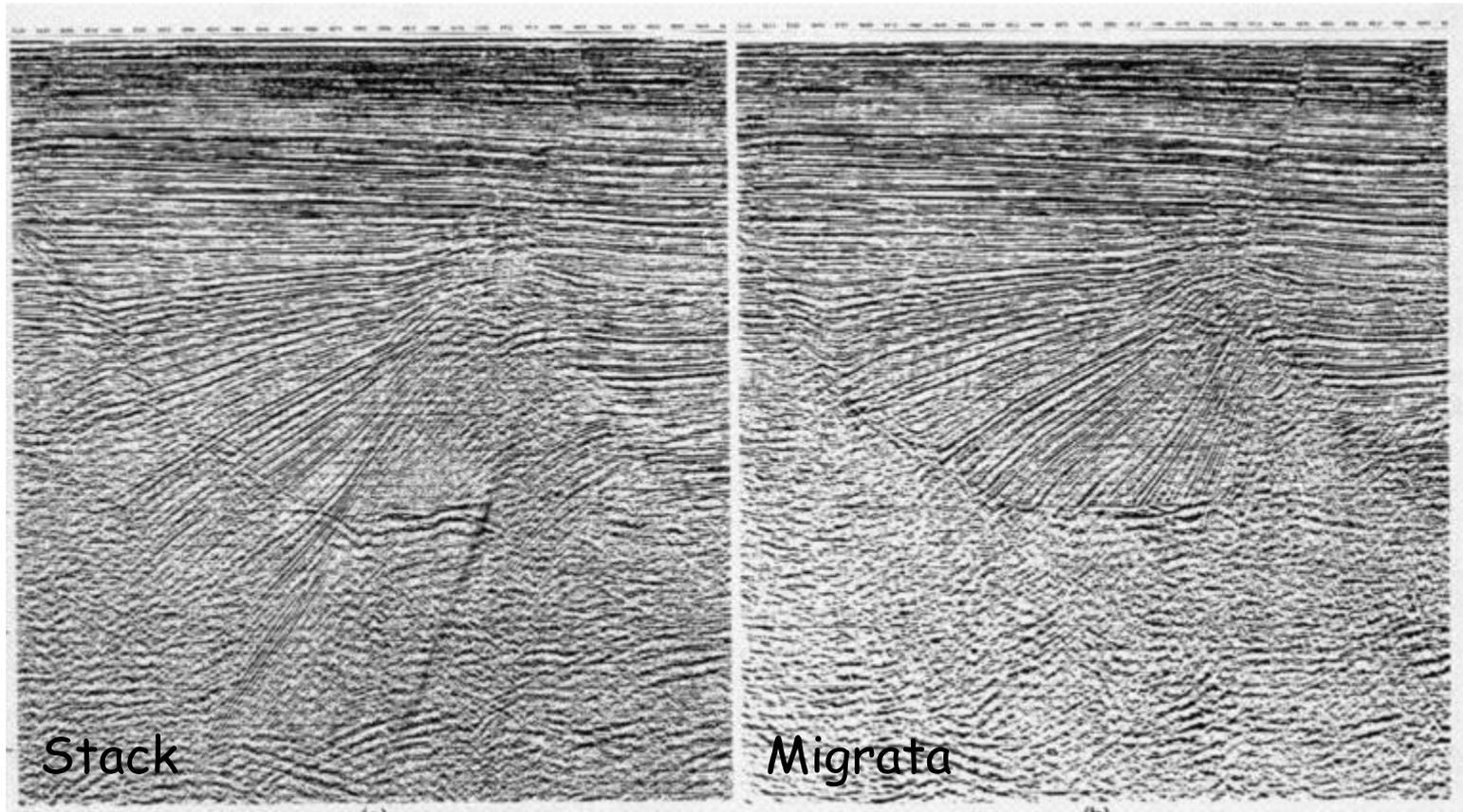
Esempio di migrazione: a) sezione *stack* b) sezione migrata (b)



Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

UD4

Migrazione



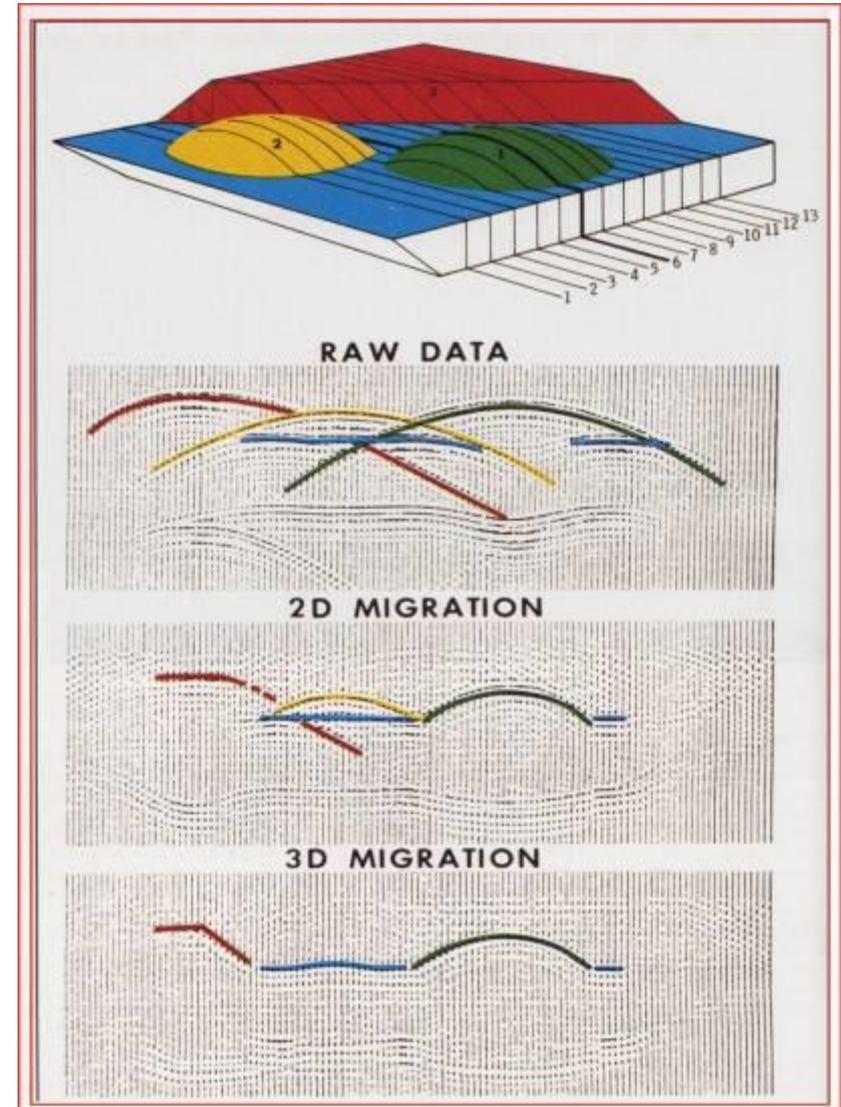
In questo esempio la migrazione ha riportato alla corretta posizione i riflettori pendenti, mettendo chiaramente in luce la loro interruzione in corrispondenza delle faglie listriche vergenti verso destra.

Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Migrazione

Riflettori pendenti
con direzione obliqua od esterni
rispetto al piano verticale del profilo
sismico:

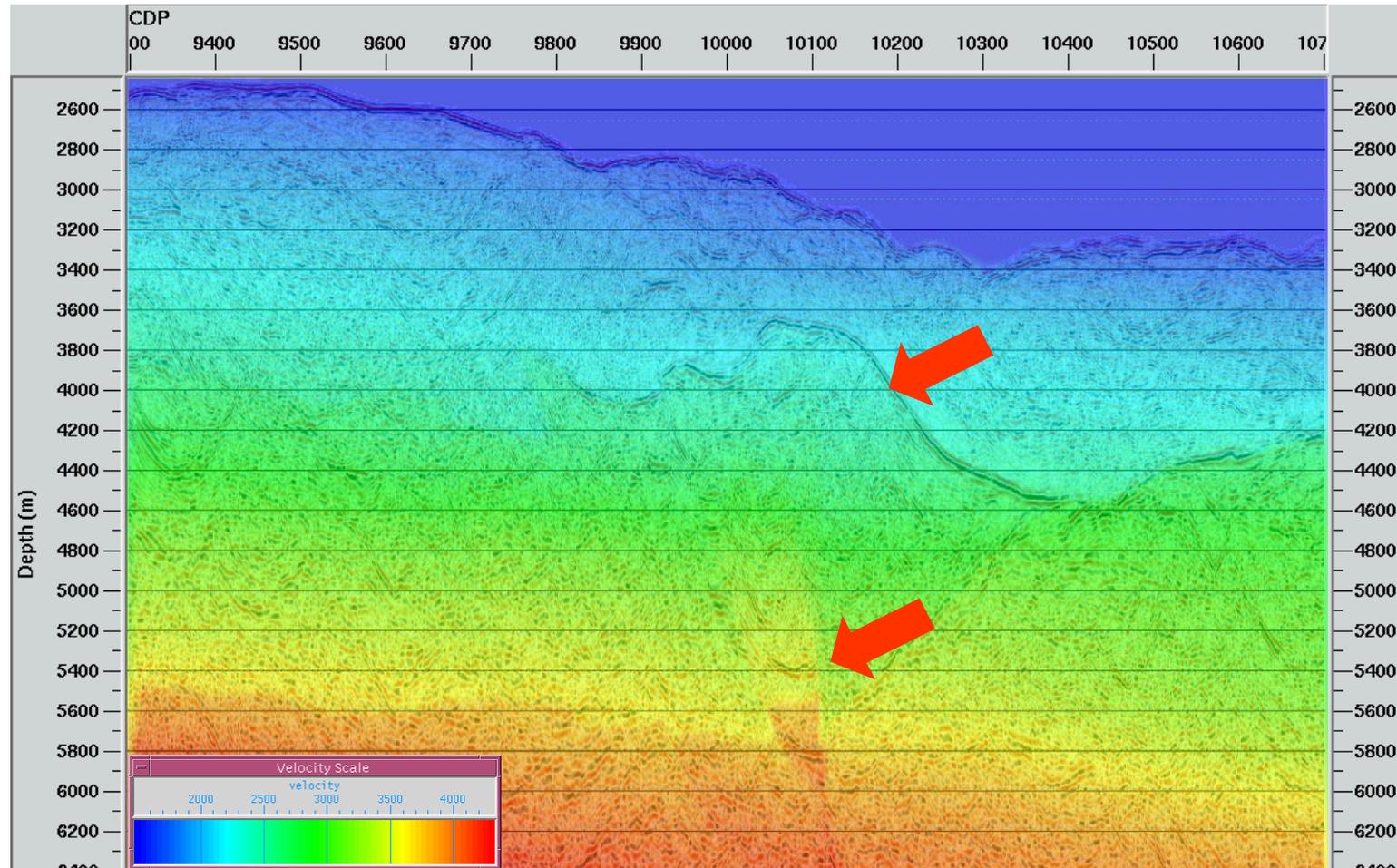
solo la migrazione 3-D è in grado di
fornire un profilo sismico fedele alla
situazione reale di strati pendenti.
La migrazione 2-D comunque fornisce
un risultato spesso soddisfacente per
l'interpretazione.



Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Migrazione

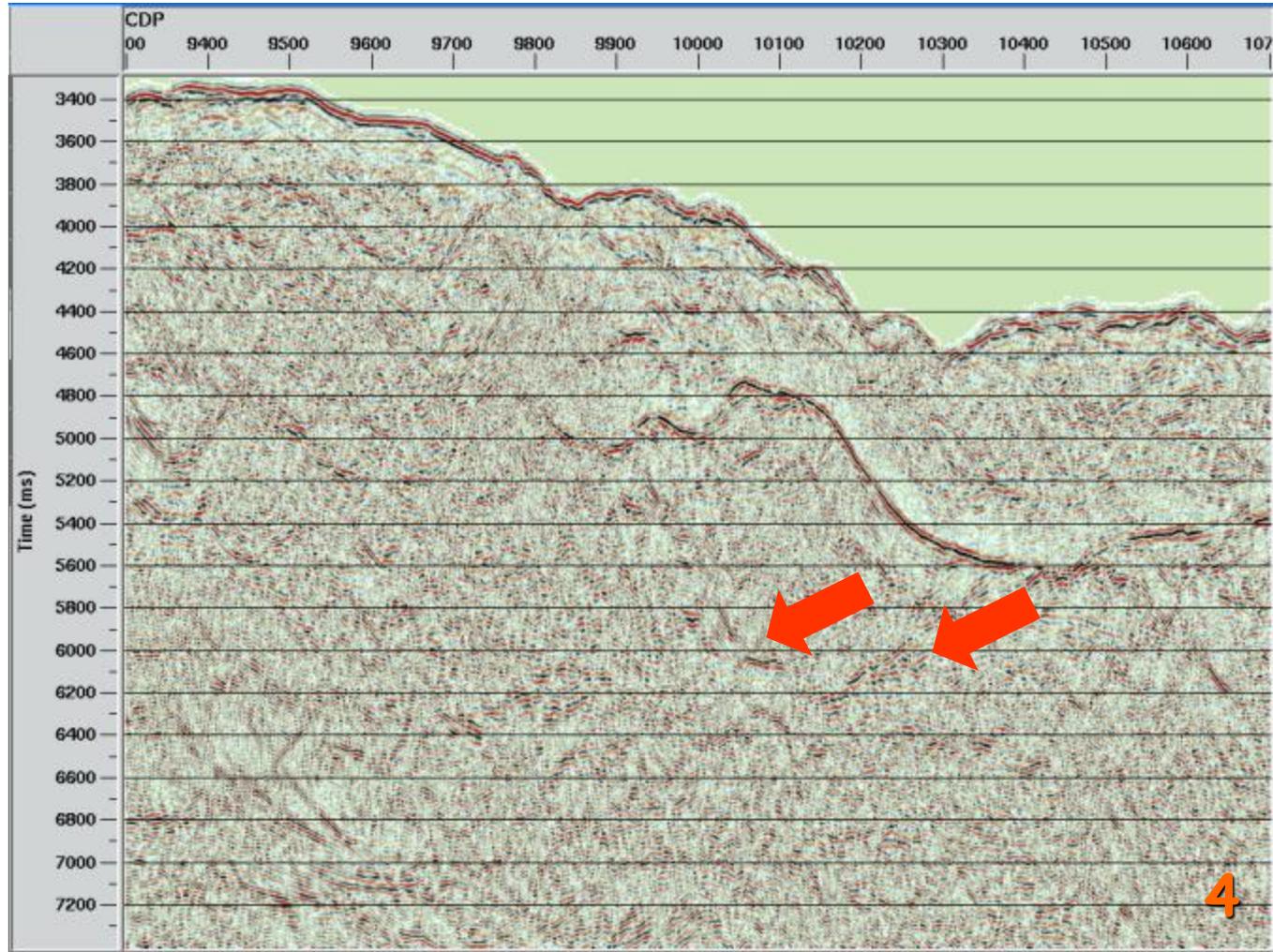
*Particolare della sezione PreSDM con il
Macromodello V-Z finale*



Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Migrazione

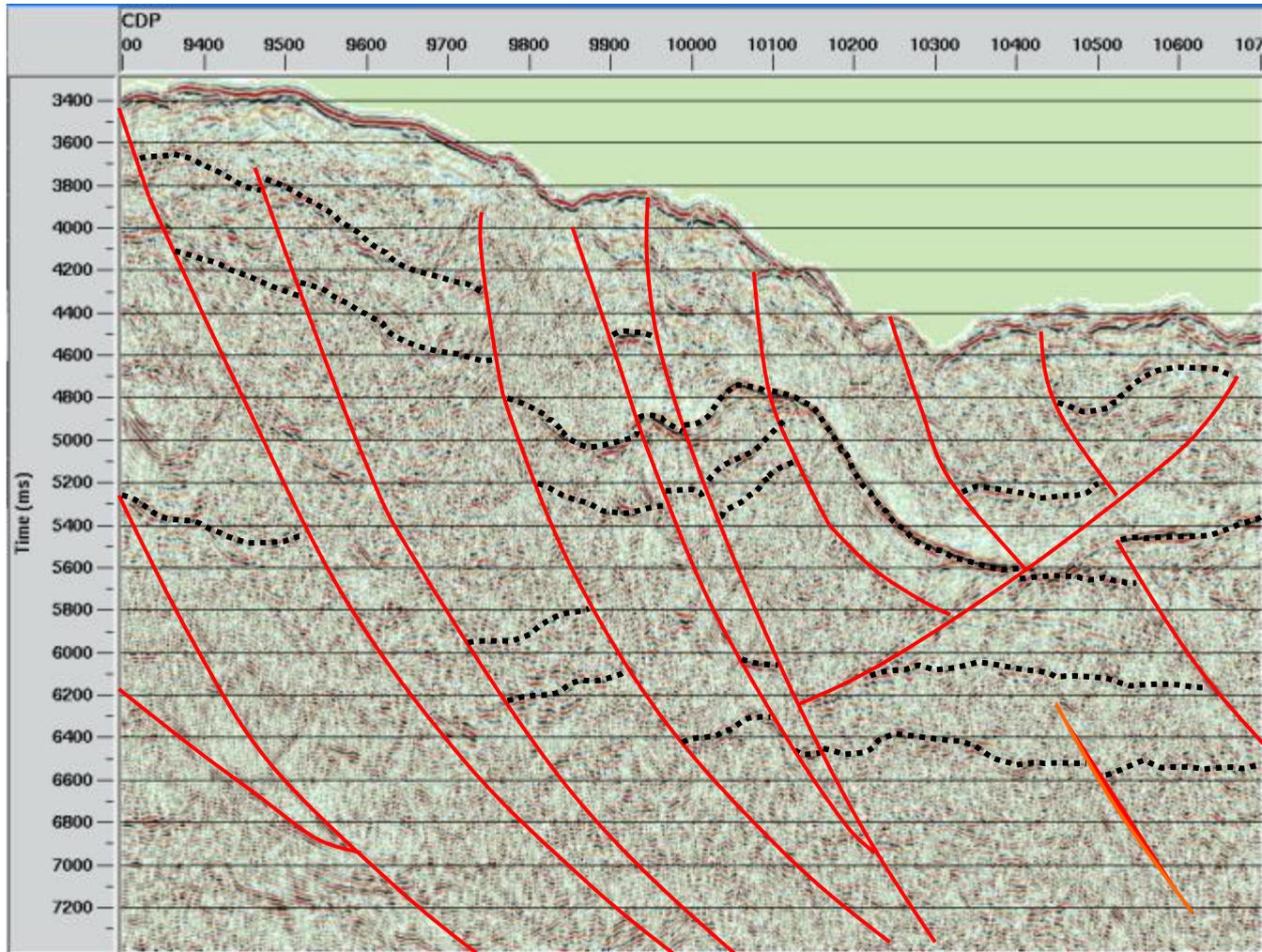
Particolare della delimitazione delle BDMSD e TM



Sismica a Riflessione - ELABORAZIONE

Migrazione

Particolare della sezione TC PreSDM interpretata



Sismica a Riflessione **PREGI** e **DIFETTI**



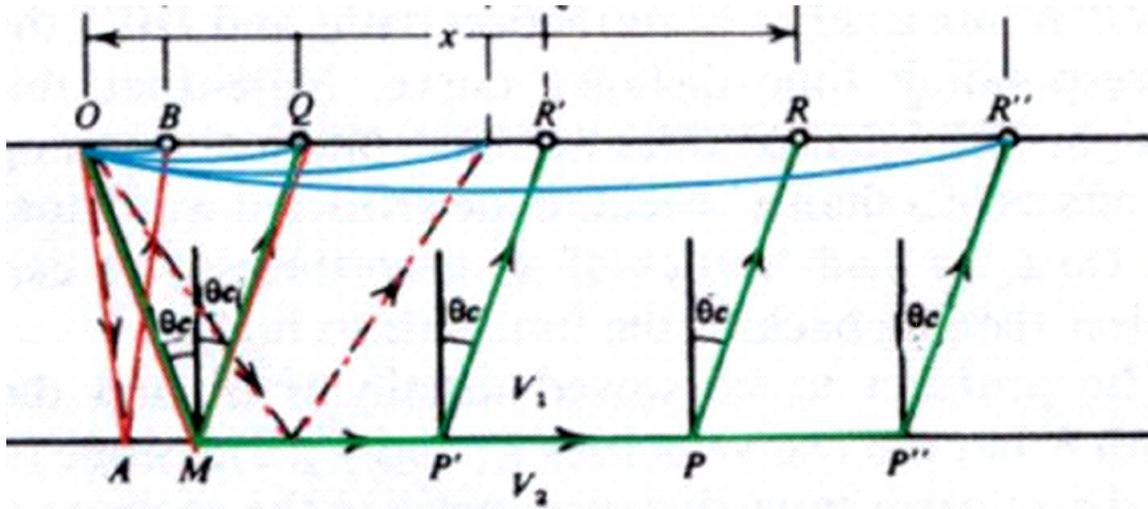
1. Accurata ricostruzione del Sottosuolo in termini di geometrie, forme, posizione delle discontinuità di impedenza acustica → geologia
2. Stima dei parametri petrofisici delle rocce e dei fluidi (v , σ , E)
3. Stima del tipo e contenuto in fluidi con tecniche particolari (Amplitude Versus Offset Analysis - AVO; attributi sismici; Hydrocarbon indicator)
4. Virtualmente senza limiti di profondità di investigazione
5. Possibilità di ottenere immagini a grande dettaglio soprattutto entro i primi Km dalla superficie
6. Possibilità di indagini 2D, 3D (volumi), 4D (confronti nel tempo)
7. Possibile adattamento del metodo per le più svariate applicazioni



1. Costi elevati (1-10K€ Km - > a terra rispetto che a mare)
2. Necessaria complessa elaborazione del segnale
3. Logistica di acquisizione spesso complessa. Richieste numerose persone specializzate
4. Per grandi acquisizioni necessari numerosi permessi ed autorizzazioni

Sismica a RIFRAZIONE - Richiami di teoria

UD4



Onda diretta

$$T = \frac{x}{v_1}$$

Onda rifratta

$$T = \frac{x}{v_2} + \frac{2h \cos i_c}{v_1}$$

La sismica a rifrazione utilizza:

1) Le onde DIRETTE

2) Le onde rifratte

originate da onde incidenti con angolo d'incidenza pari all'angolo critico, per il quale l'angolo di rifrazione è pari a 90°

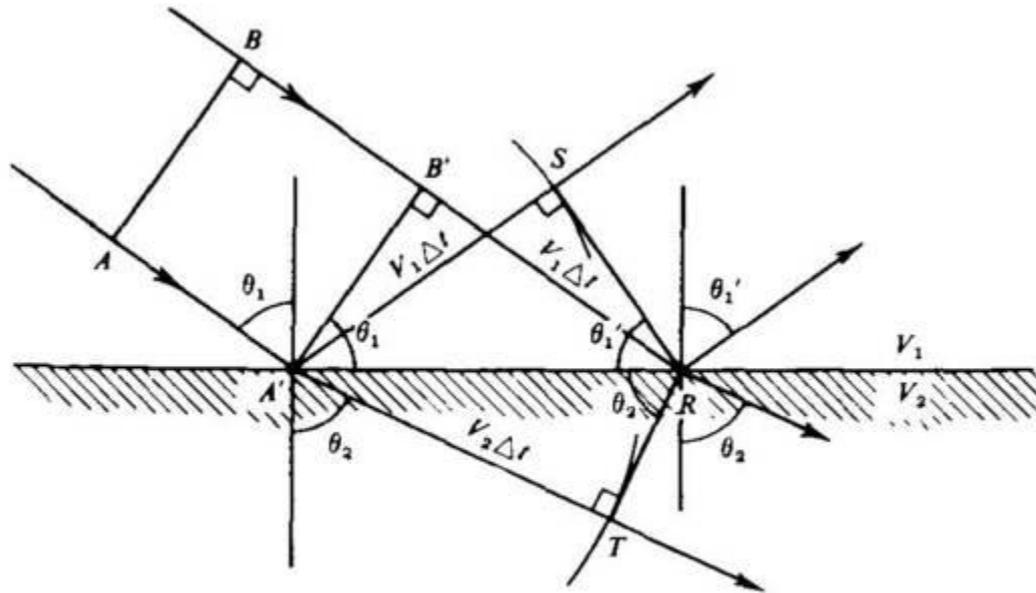
Sismica a RIFRAZIONE - Richiami di teoria

Onda rifratta e Legge di Snell

p = ray parameter

θ = inclinazione del raggio rispetto alla superficie di discontinuità

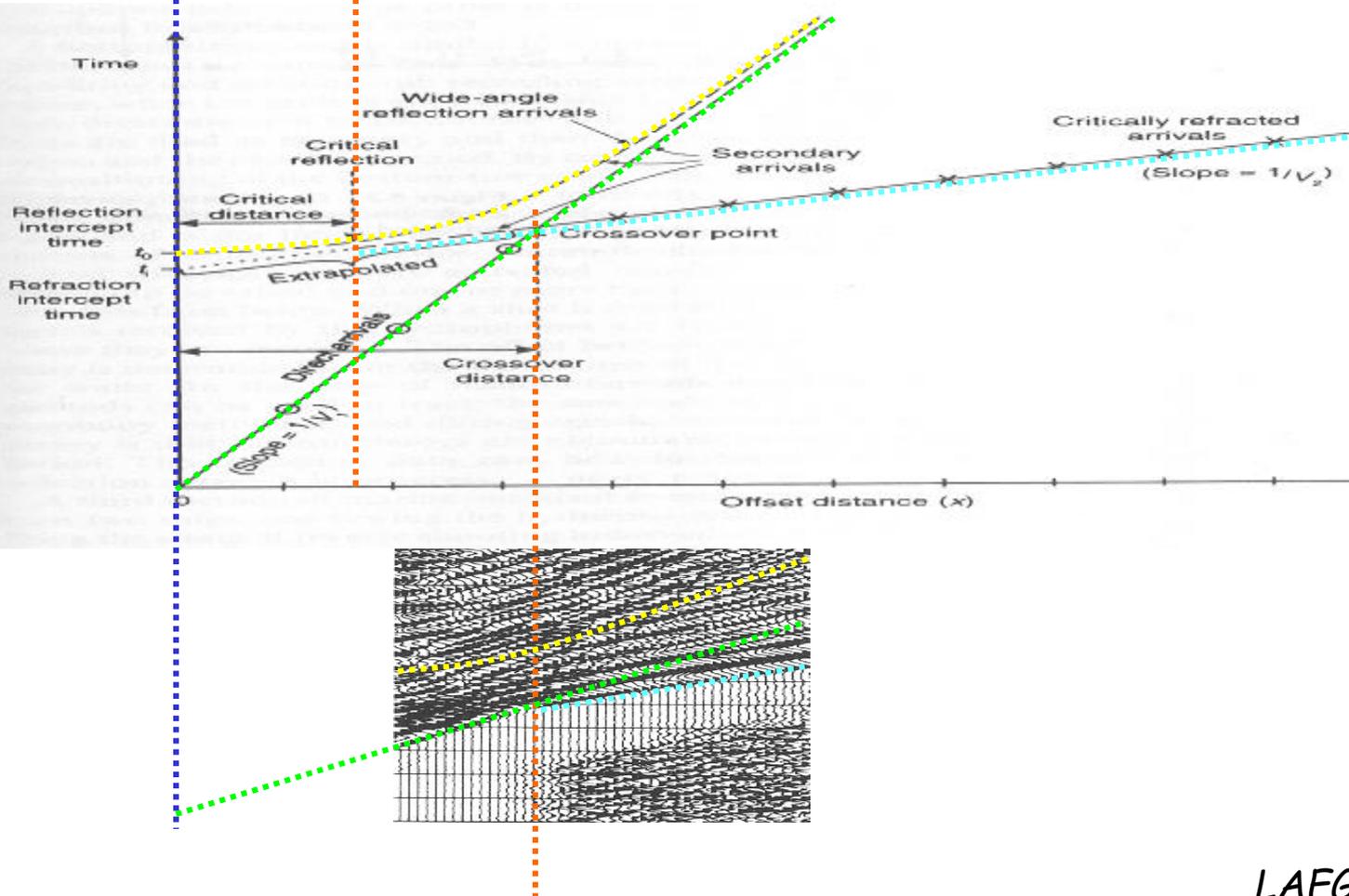
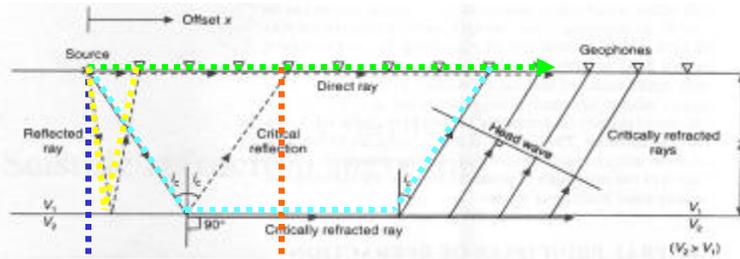
$$\frac{\sin \theta_1}{V_1} = \frac{\sin \theta_2}{V_2} = p.$$



Reflection and refraction of a plane wave.

All'angolo critico avremo: $\sin \theta_c = V_1 / V_2$

Sismica a RIFRAZIONE - Richiami di teoria

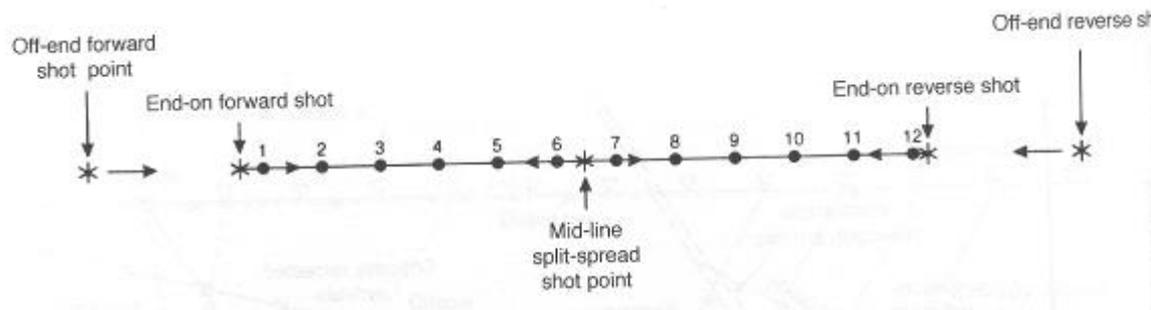


Sismica a RIFRAZIONE - Procedure

Acquisizione dati:

Stendimento con intervallo tra geofoni costante

IMP. Lunghezza stendimento + offset \rightarrow PROFONDITA' MAX di indagine (ovviamente variabile in funzione delle caratteristiche del sottosuolo e dell'ENERGIA della SORGENTE)



Possibile acquisizione sia con geofoni verticali (P, SV) che orizzontali (SH)

REGOLE "del Pollice": Lunghezza stendimento

$$\approx 3 \times x_{\text{crossover}}$$

$$\approx 5 \div 8 \times \text{profondita' interesse}$$

Sismica a RIFRAZIONE - Procedure

ACQUISIZIONE

Sulla base delle conoscenze preliminari definire la lunghezza dello stendimento
Effettuare almeno due shot coniugati (uno all'estremo opposto dell'altro).

Maggiore è il numero di shot > sarà il grado di dettaglio con cui si potranno definire profondità e velocità dei rifrattori

ELABORAZIONE

Effettuare il picking dei primi arrivi su tutti gli shot (attenzione: sempre la stessa fase) → DROMOCRONE

Stabilire il/i metodi per ricavare dal dato i valori di profondità dei rifrattori (n-1) e le velocità (n)

Possibili metodi "DIRETTI"

TEMPO INTERCETTO

DISTANZA DI CROSSOVER

PHANTOMING

METODO DEL "Delay Time"

Metodo Reciproco Generalizzato

(Palmer, 1980)

...

ASSUNZIONE "implicita": LIVELLI
OMOGENEI CON CONTRASTI NETTI

In alternativa metodi "INDIRETTI"
Tomografie

ASSUNZIONE "implicita": OGNI
PUNTO HA VELOCITA' VARIABILE
CON VALORI POTENZIALMENTE
RANDOM

Sismica a RIFRAZIONE - Analisi dei dati

Box 5.2 Travel time calculations for a two-layer case
(see Figures 5.1 and 5.3)

Total travel time is:

$$T_{SG} = T_{SA} + T_{AB} + T_{BG}$$

where:

$$T_{SA} = T_{BG} = z/(V_1 \cos i_c)$$

$$T_{AB} = (x - 2z \tan i_c)/V_2.$$

Substituting expressions (2) and (3) into (1), we obtain:

$$T_{SG} = z/(V_1 \cos i_c) + (x - 2z \tan i_c)/V_2 + z/(V_1 \cos i_c)$$

which simplifies to:

$$T_{SG} = (1/V_2)x + 2z (\cos i_c)/V_1. \quad (4)$$

This has the form of the general equation of a straight line, $y = mx + c$, where $m =$ gradient and $c =$ intercept on the y -axis on a time-distance graph. So, from equation (4), the gradient is $1/V_2$, and c is the refraction time intercept t_1 (see Figure 5.1) such

An alternative form to equation (4) is:

$$T_{SG} = x(\sin i_c)/V_1 + 2z(\cos i_c)/V_1 \quad (5)$$

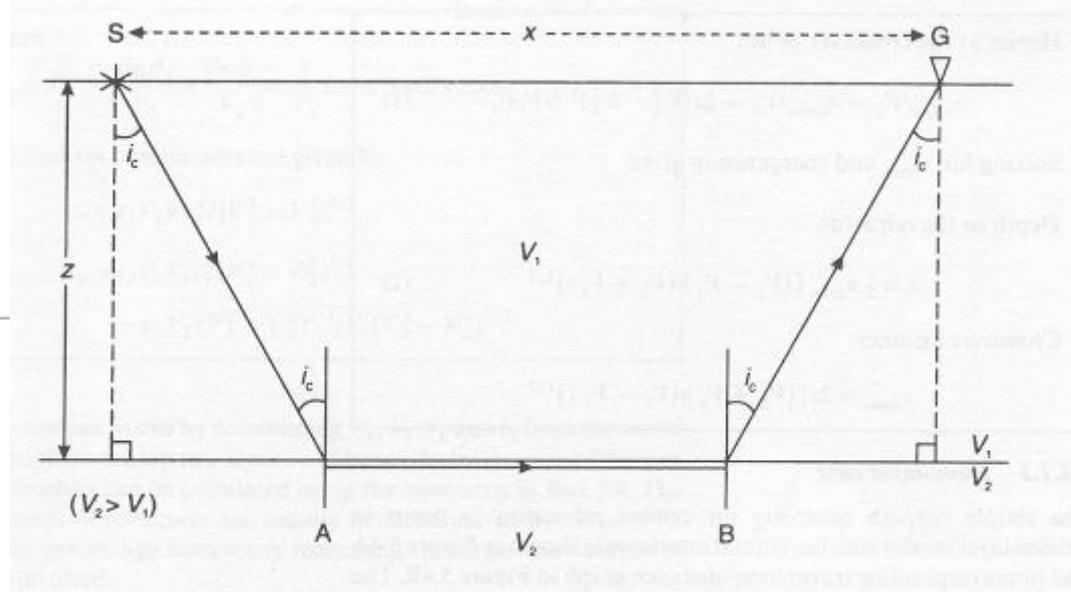
or

$$T_{SG} = x/V_2 + t_1 \quad (6)$$

where

$$t_1 = 2z(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}/V_1 V_2 \quad (7)$$

$$z = t_1 V_1 V_2 / 2(V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \quad (8)$$



continued

Hence, at the crossover point:

$$x_{\text{cross}}/V_1 = x_{\text{cross}}/V_2 + 2z(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}/V_1 V_2. \quad (1)$$

Solving for x_{cross} and reorganising gives:

Depth to the refractor:

$$z = \frac{1}{2} x_{\text{cross}} [(V_2 - V_1)/(V_2 + V_1)]^{1/2} \quad (2)$$

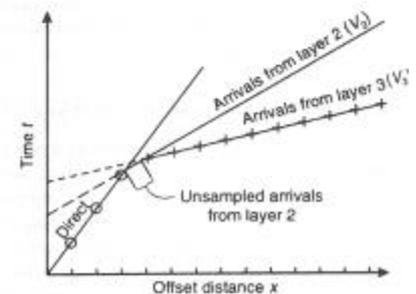
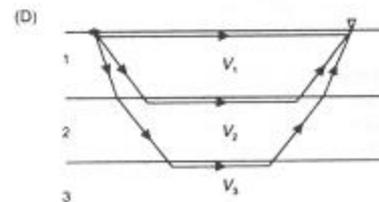
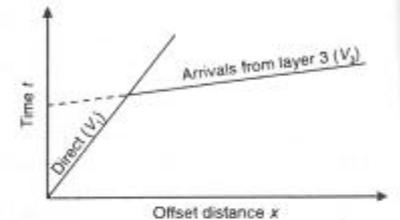
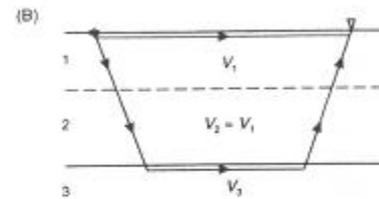
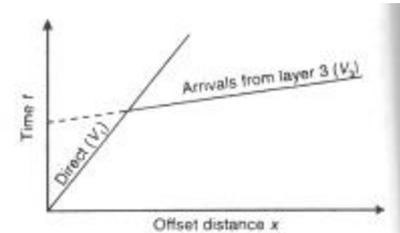
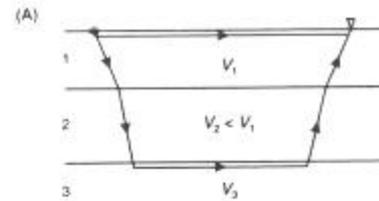
Crossover distance:

$$x_{\text{cross}} = 2z[(V_2 + V_1)/(V_2 - V_1)]^{1/2}$$

2 problemi fondamentali di interpretazione

- 1) Strato nascosto (inversione di velocità)
- 2) Dato ininterpretabile con metodi diretti se crescita graduale di velocità $\rightarrow ?t_i, ?x_c, \dots$

Inoltre attenzione ai parametri geometrici di acquisizione

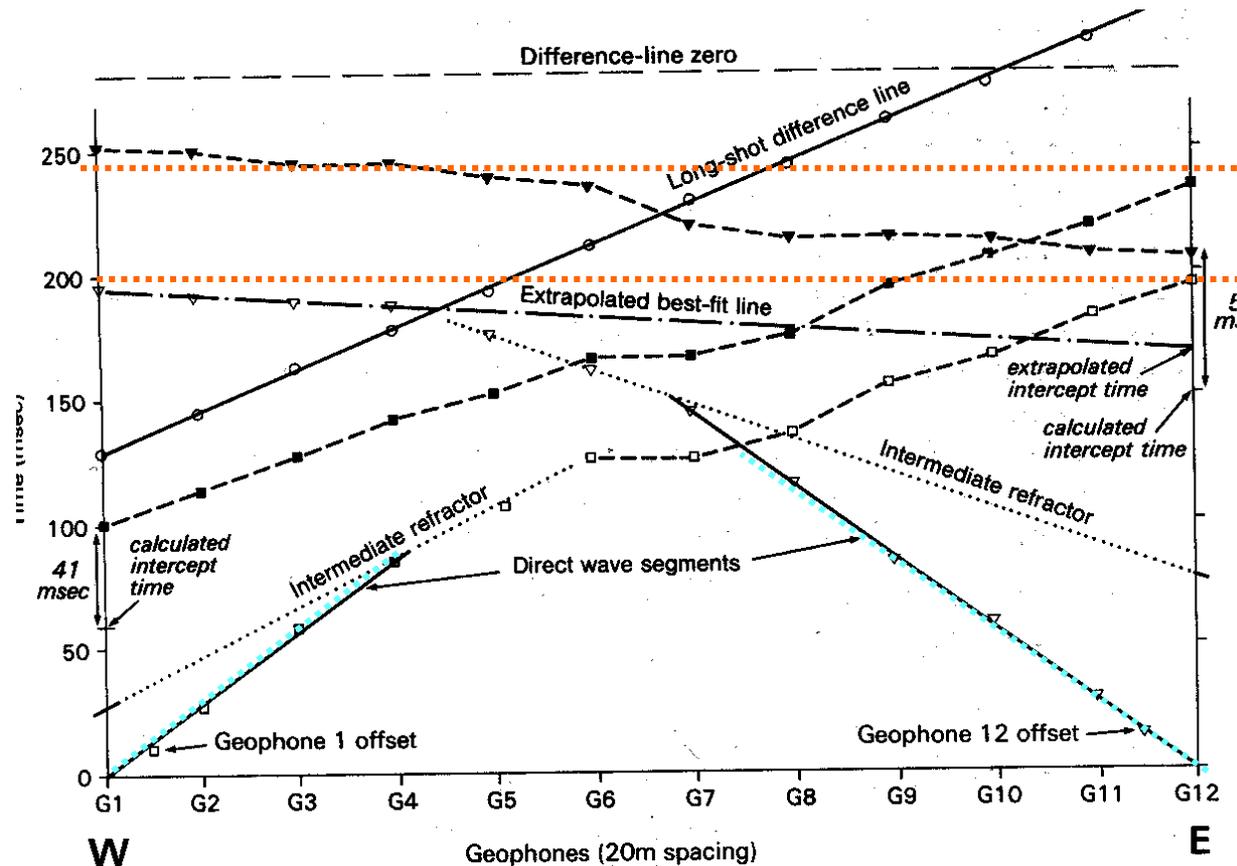


Sismica a RIFRAZIONE - Analisi dei dati

Controllo delle DROMOCRONE

1) il tempo totale per 2 scoppi coniugati DEVE essere uguale altrimenti errori di acquisizione non risolvibili

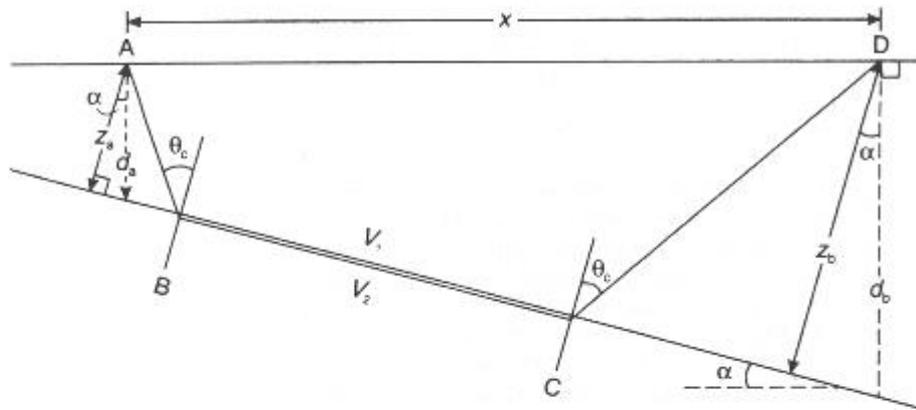
1) L'estrapolazione delle onde dirette DEVE avere tempo zero per offset nullo



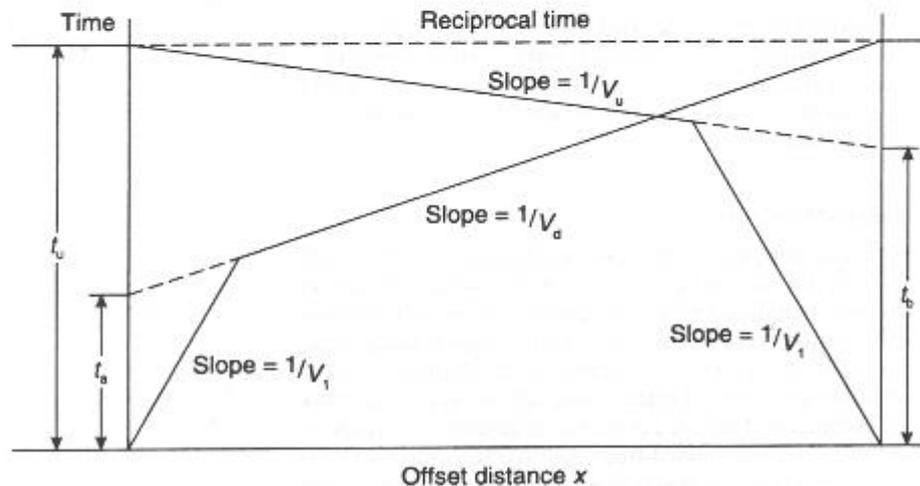
Inoltre bisogna verificare gli incroci delle DROMOCRONE:
se si discostano dal centro dello stendimento → Strati INCLINATI →
Velocità APPARENTI

Sismica a RIFRAZIONE - Analisi dei dati

Strati inclinati → SONO NECESSARI Gli Shot coniugati



(B)



Total travel time over a refractor dipping at an angle α is given by:

$$T_{ABCD} = (x \cos \alpha)/V_2 + [(z_a + z_b) \cos i_c]/V_1$$

where V_2 is the refractor velocity, and z_a and z_b are the distances perpendicular to the refractor.

The down-dip travel time t_d is given by:

$$t_d = x [\sin(\theta_c + \alpha)]/V_1 + t_a \quad (1)$$

where $t_a = 2z_a (\cos \theta_c)/V_1$.

$$t_u = x [\sin(\theta_c - \alpha)]/V_1 + t_b \quad (2)$$

where $t_b = 2z_b (\cos \theta_c)/V_1$.

Equations (1) and (2) above can be written in terms of the apparent up-dip velocity (V_u) and down-dip velocity (V_d) such that:

$$t_d = x/V_d + t_a, \quad \text{where } V_d = V_1/\sin(\theta_c + \alpha)$$

$$t_u = x/V_u + t_b, \quad \text{where } V_u = V_1/\sin(\theta_c - \alpha).$$

An approximate relationship between true and apparent velocities for shallow angles of dip ($\alpha < 10^\circ$) is given by:

$$V_2 \approx (V_d + V_u)/2.$$



Sismica a RIFRAZIONE PREGI e DIFETTI

1. Costi moderati (da 500€ per singolo profilo di 100m di lunghezza)
2. Elaborazione del segnale relativamente semplice
3. Logistica di acquisizione semplice/sorgenti anche a piccola energia (mazza battente)
4. Primi arrivi solitamente facilmente distinguibili ed individuabili
5. Sono sufficienti poche persone durante la fase di acquisizione dati



1. Ricostruzione approssimativa e talora soggettiva del sottosuolo in termini di "posizione dei rifrattori" e "velocità tra i rifrattori" o, nel caso tomografico "determinazione delle velocità entro celle di dimensioni opportune"
2. Non sensibile alla presenza di fluidi
3. Risultati erronei in presenza di Inversioni di Velocità
4. Risultati non interpretabili in presenza di incremento graduale delle velocità
5. Scarsa risoluzione verticale/laterale



DOMANDE ???

Introduzione: stima delle velocità V_s

- **Obiettivo:**

Ricavare la distribuzione verticale della velocità delle onde di taglio $V_s(z)$ e/o del modulo di rigidità $\mu(z)$

Tecniche per l'acquisizione di questo parametro in situ:

- 1) Prove in foro (down hole, cross hole, log di pozzo)
- 2) Profili sismici (riflessione o rifrazione) con geofoni orizzontali ed energizzatori di onde SH.
- 3) Analisi delle onde di superficie registrate con geofoni verticali
 - a) Metodi ATTIVI: SASW e **MASW**
 - b) Metodi PASSIVI: microtremori

Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW

Analisi della dispersione geometrica delle onde superficiali attraverso una procedura in quattro fasi:

1. Acquisizione dati sismici
2. Analisi dati sismici
utilizzate ONDE DI SUPERFICIE : Love,
Rayleigh, Scholte
3. Modellazione (simulazione numerica)
4. Inversione → **da $v_R(f)$ a $v_S(z)$**

Cosa sono le onde superficiali (1)

- Onde che si propagano parallelamente alla superficie della Terra [quindi non propagano energia verso l'interno (z)]
- L'energia che trasportano si concentra in uno strato superficiale di spessore \approx una lunghezza d'onda (λ) \rightarrow

DIVERSE (λ) \rightarrow PROFONDITA' DIVERSE

- Le proprietà fisiche dello strato superficiale influenzano quindi la loro propagazione

Cosa sono le onde superficiali (2)

- Non sono onde longitudinali ne' trasverse (moto delle particelle parallelo o perpendicolare alla direzione di trasporto dell'energia)
- Le particelle alla superficie del mezzo subiscono un moto CIRCOLARE

Cosa sono le onde superficiali (3)

- La loro densità di energia è maggiore, a parità di distanza dalla sorgente (r), rispetto alle onde di volume perché si distribuisce su fronti d'onda di dimensioni inferiori

**PERCIO' SONO EVENTI DOMINANTI NELLE
REGISTRAZIONI SISMICHE**

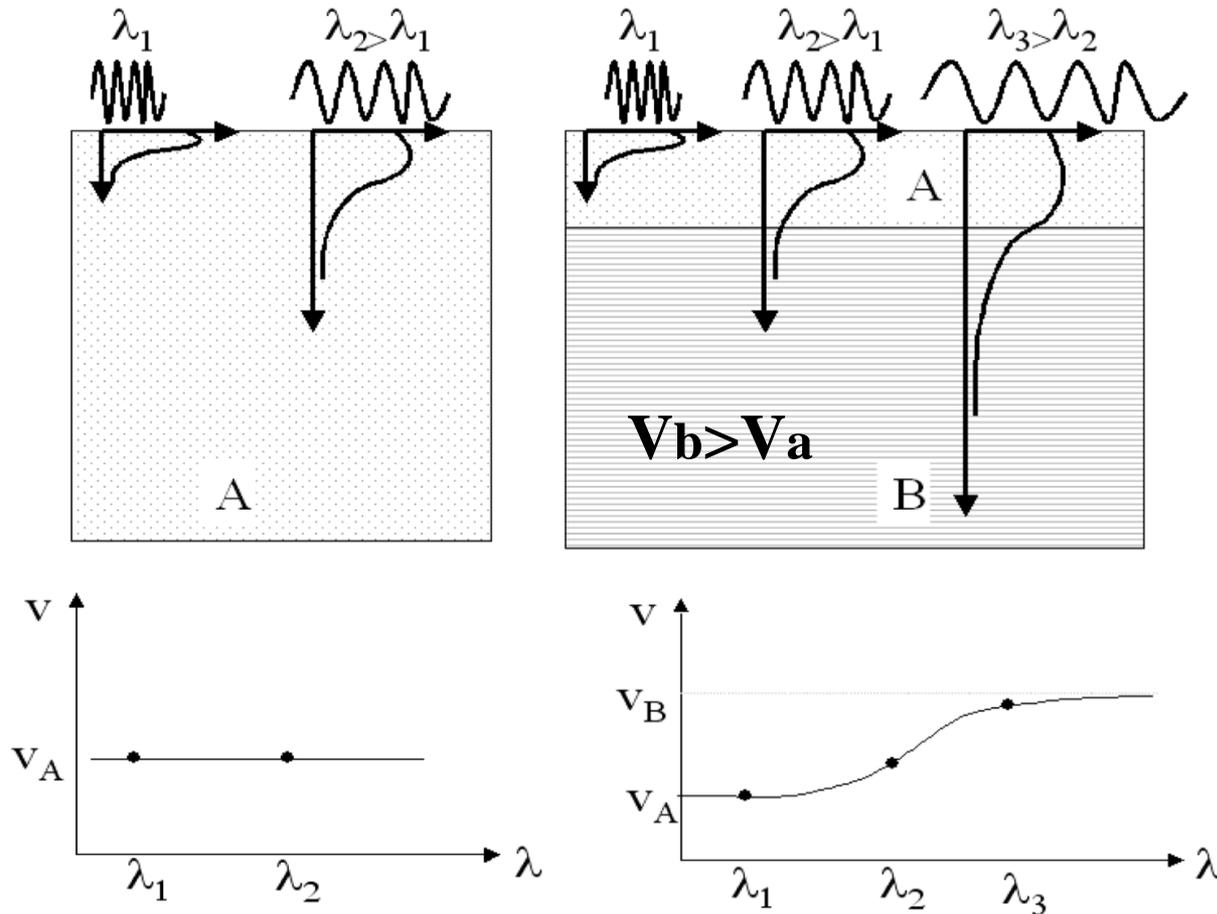
(Ground Roll nelle applicazioni di sismica a riflessione)

- L'ampiezza diminuisce esponenzialmente con la profondità (z)

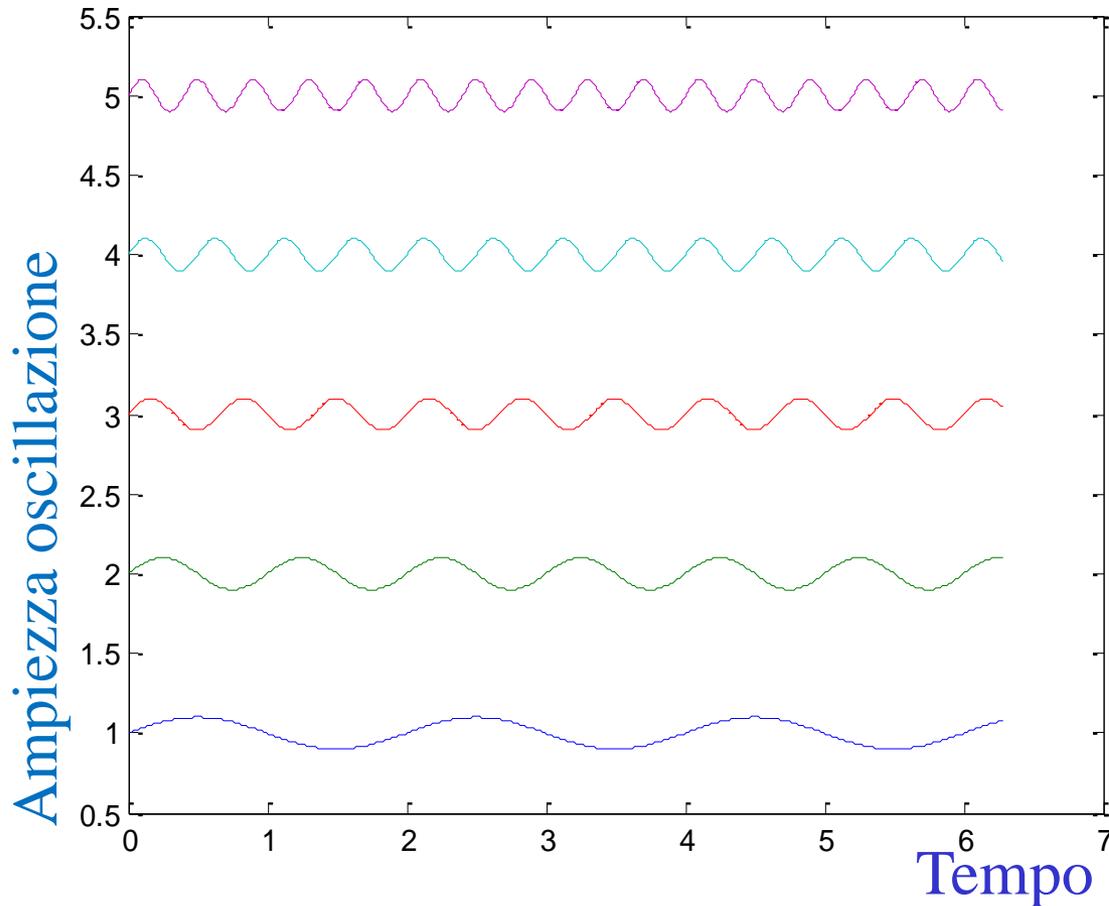
Cosa sono le onde superficiali (4)

- **Dispersione: in mezzi verticalmente eterogenei, componenti che hanno diversa frequenza (f) hanno diversa velocità di fase.**
- Questo tipo di dispersione dipende dalla geometria del materiale eterogeneo (e.g. stratificazione) e non dalle proprietà fisiche di un materiale omogeneo. Si parla quindi di **DISPERSIONE GEOMETRICA.**

Velocita' di fase di onde superficiali in un mezzo omogeneo (A) e stratificato (B)

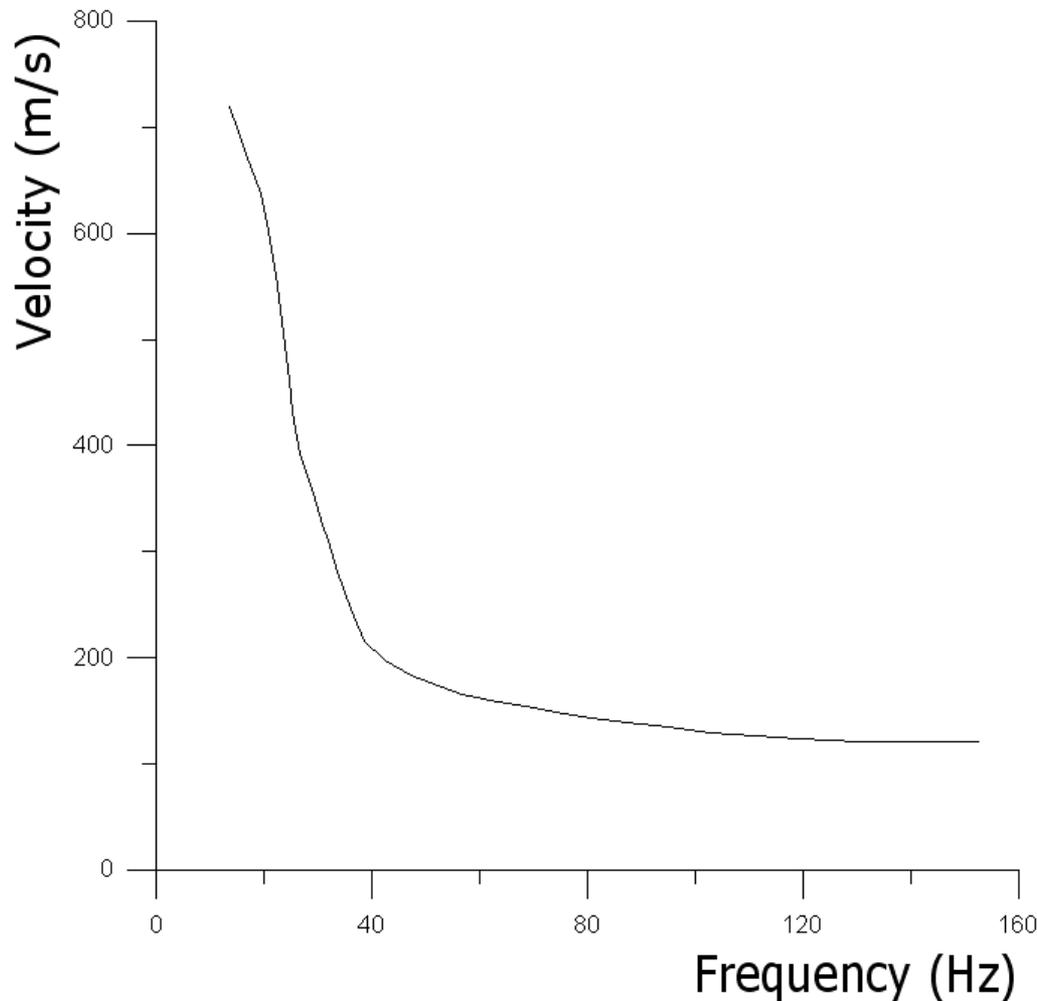


Modi di oscillazione: variazione di λ a parita' di frequenza



La stessa frequenza di oscillazione puo' tradursi in λ diverse e quindi in velocita' di fase diverse

Esempio di curva di dispersione per onde superficiali



Le BASSE
frequenze tendono
a campionare strati
PROFONDI

Le frequenze
ELEVATE le zone
più superficiali...
anche perché si
ATTENUANO
prima

Propagazione di onde di Rayleigh in mezzo stratificato

- In un mezzo stratificato la propagazione delle onde di Rayleigh e' un fenomeno

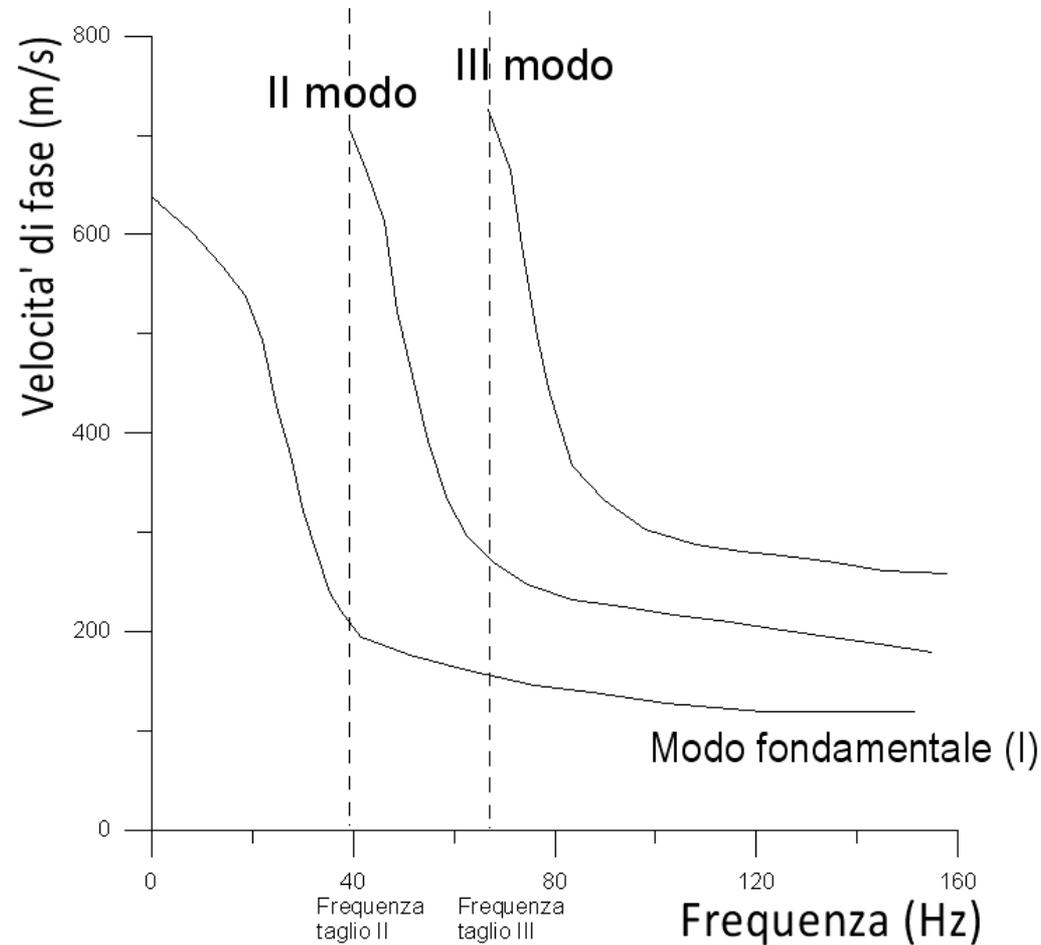
MULTIMODALE

ovvero, per una determinata frequenza di oscillazione, possono esistere:

- Diverse lunghezze d'onda (e quindi)
- Diverse velocita' di fase

Le diverse velocita' di fase possono coesistere e corrispondono a diversi MODI di propagazione

Modo Fondamentale e modi superiori

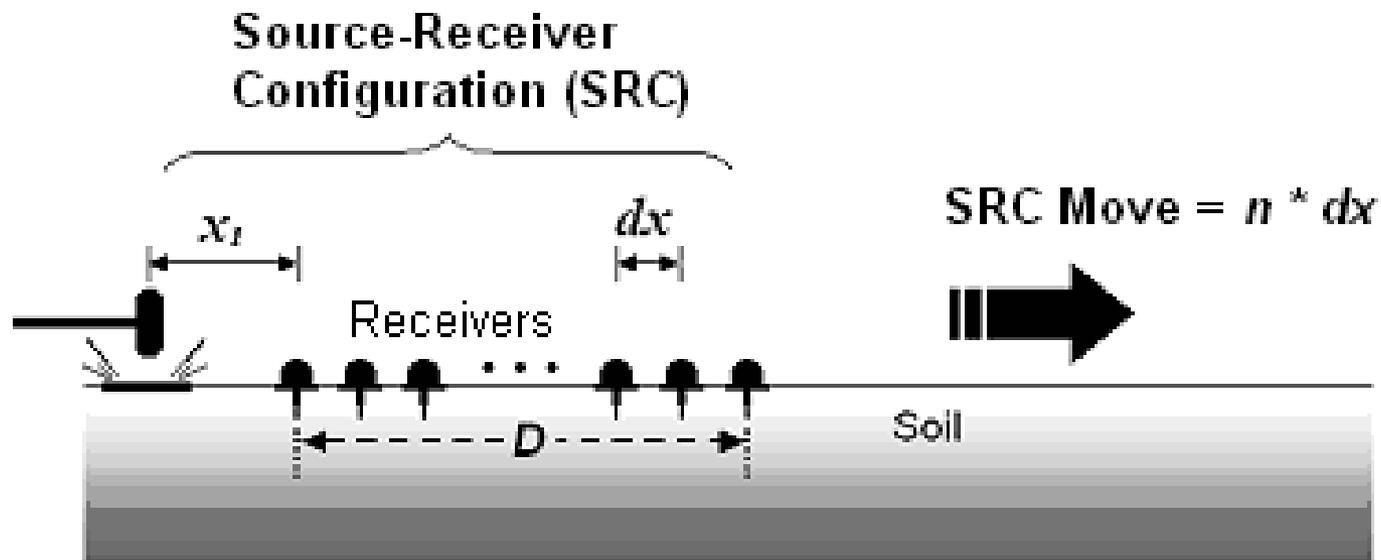


Modi di propagazione: caratteristiche fondamentali

- Ogni modo (ad eccezione del fondamentale) esiste al di sopra di una frequenza limite inferiore (frequenza di taglio)
- Il numero di modi e' limitato se il numero di strati e l'intervallo di frequenze sono finiti
- Il **modo fondamentale** (primo modo, modo fondamentale di Rayleigh) e' l'unico al di sotto della frequenza di taglio del secondo modo

Modi di propagazione e curva di dispersione (1)

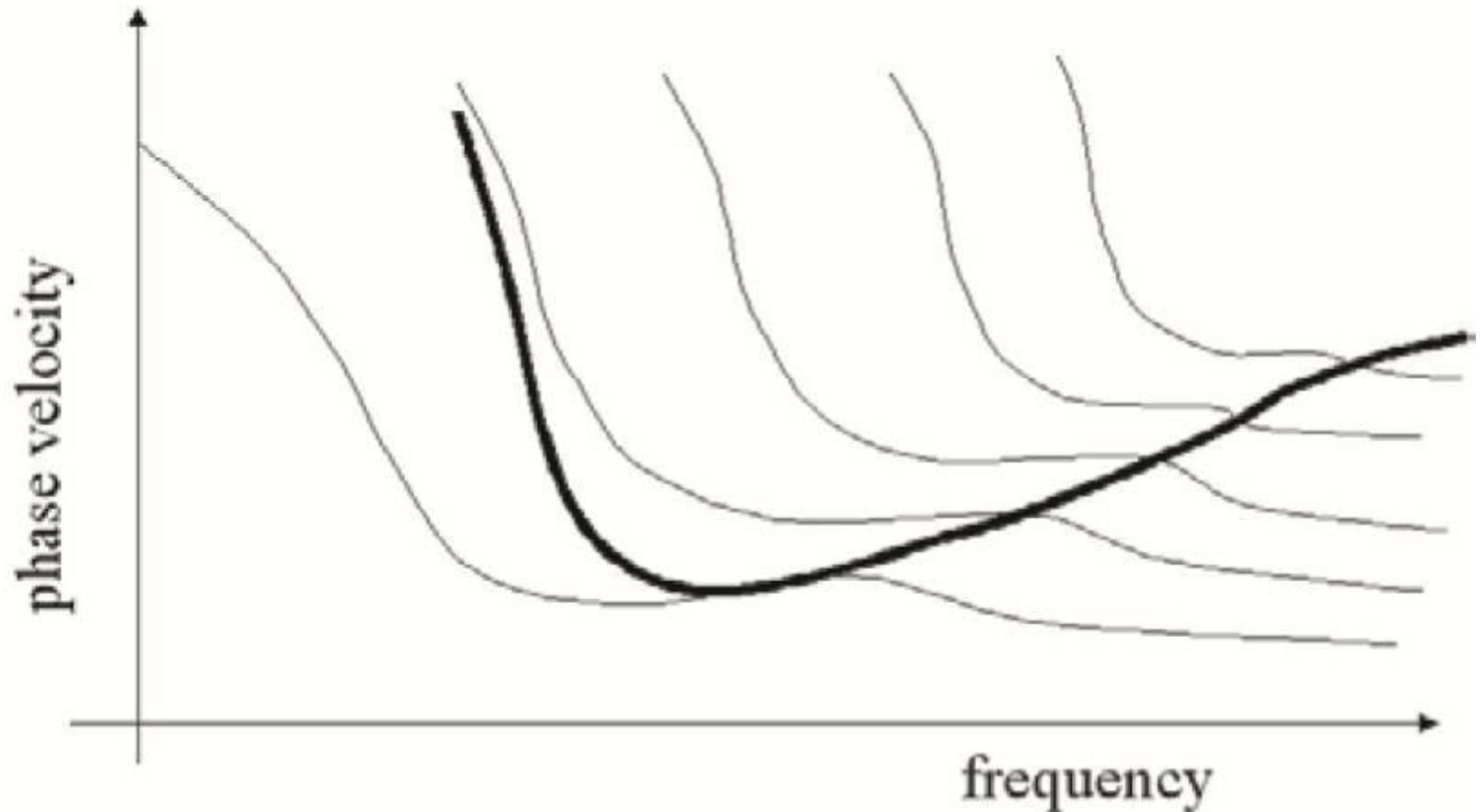
- La curva di dispersione delle onde superficiali si puo' ottenere da un esperimento sismico Common Shot Gather



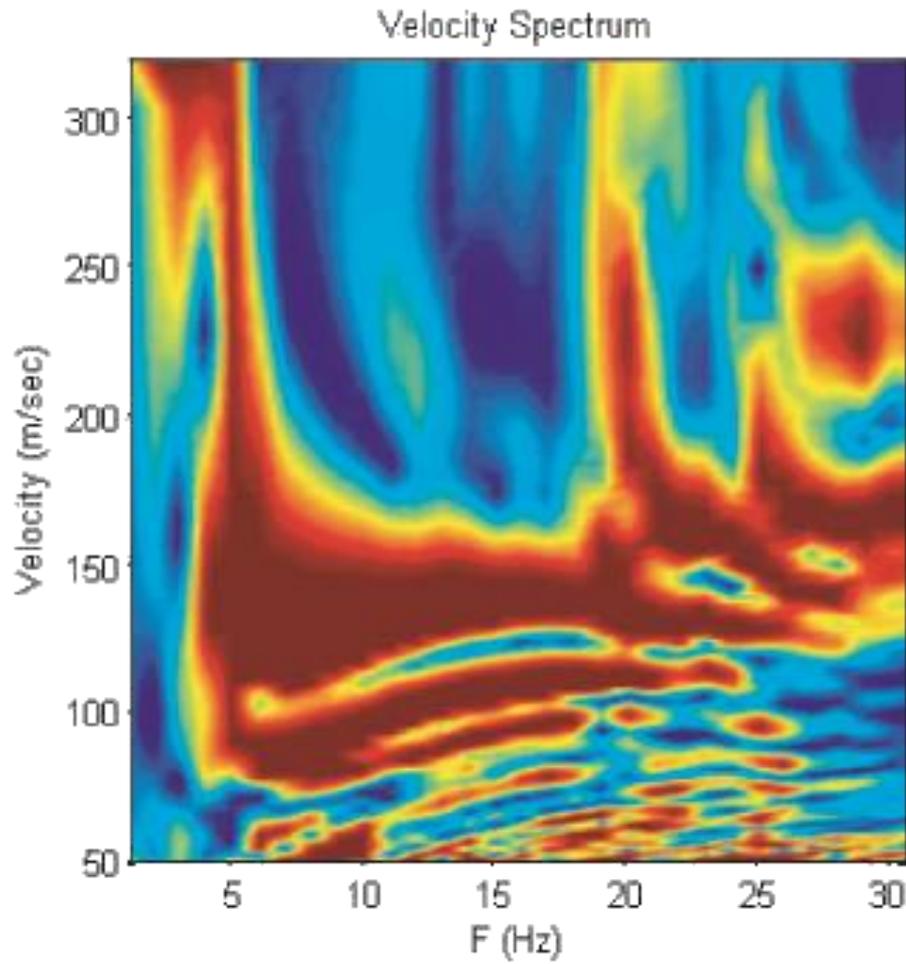
Modi di propagazione e curva di dispersione (2)

- La curva di dispersione delle onde superficiali può essere utilizzata per ricavare le proprietà del sottosuolo, che ne influenzano l'andamento
- La sua interpretazione può essere tuttavia complicata dalla sovrapposizione dei differenti modi, che rende impossibile l'identificazione della velocità di fase per ciascun modo e consente di ricavare solo una **CURVA DI DISPERSIONE APPARENTE**

Sovrapposizione modale e curva di dispersione apparente (1)



Sovrapposizione modale e curva di dispersione apparente (2)



La distribuzione dell'energia sui differenti modi di propagazione dipende da fattori legati alla struttura ed alle proprietà fisiche del terreno e dalle caratteristiche della sorgente sismica

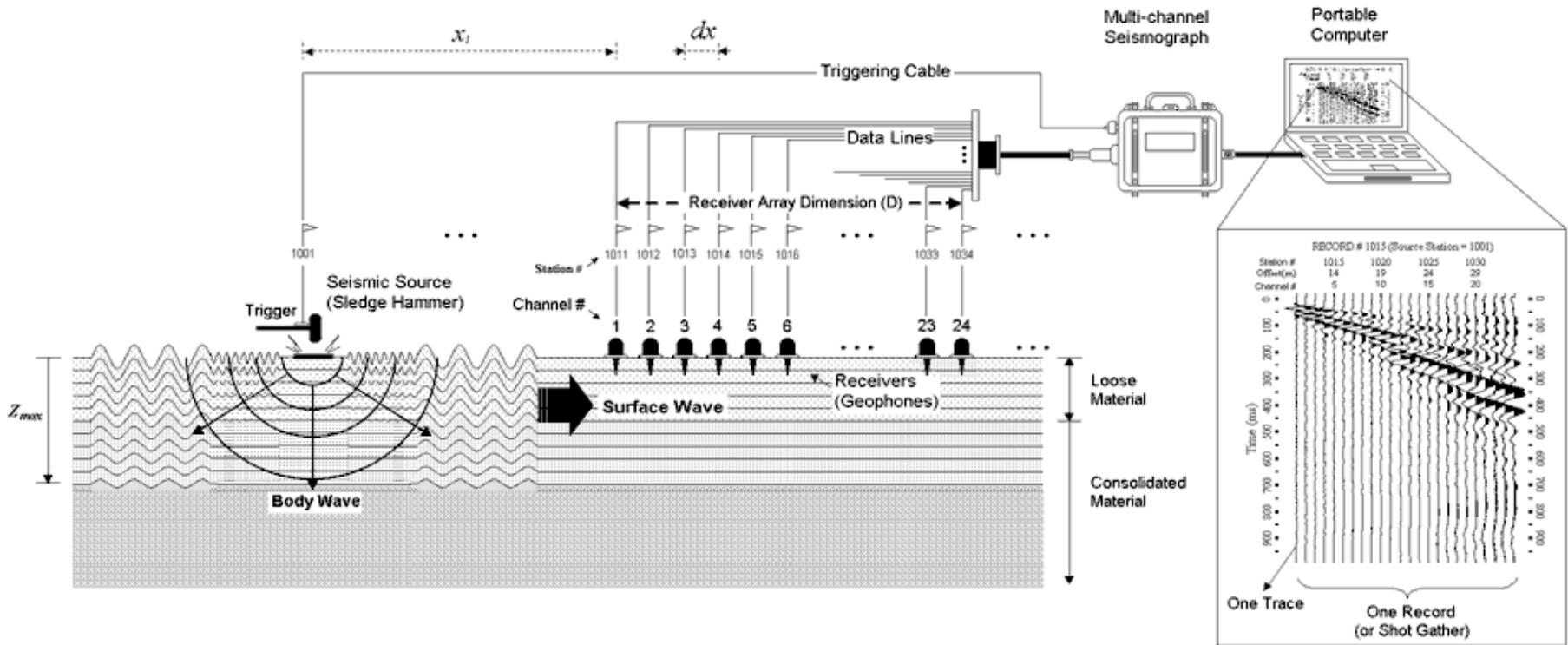
UNO DEI PUNTI CRUCIALI DEL METODO E' DEFINIRE CORRETTAMENTE LA CURVA DI DISPERSIONE $\rightarrow v=F(f)$ SUI DATI REALI

Analisi ed interpretazione delle onde superficiali

- L'obiettivo di calcolare la velocità delle onde S nel terreno si raggiunge attraverso una procedura che ha 3 fasi principali:



Fase 1: acquisizione dati



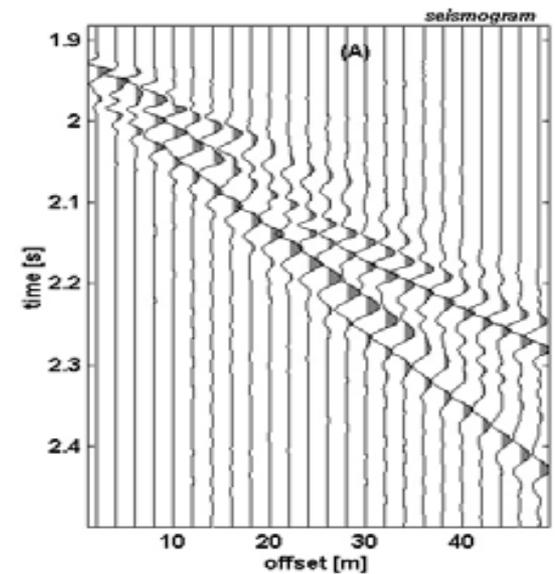
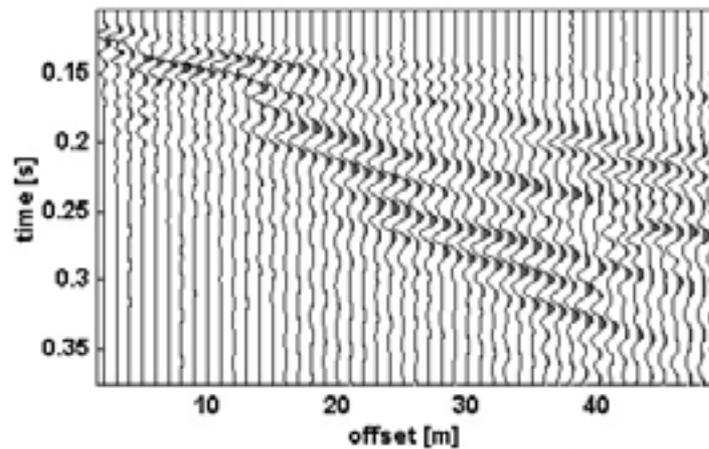
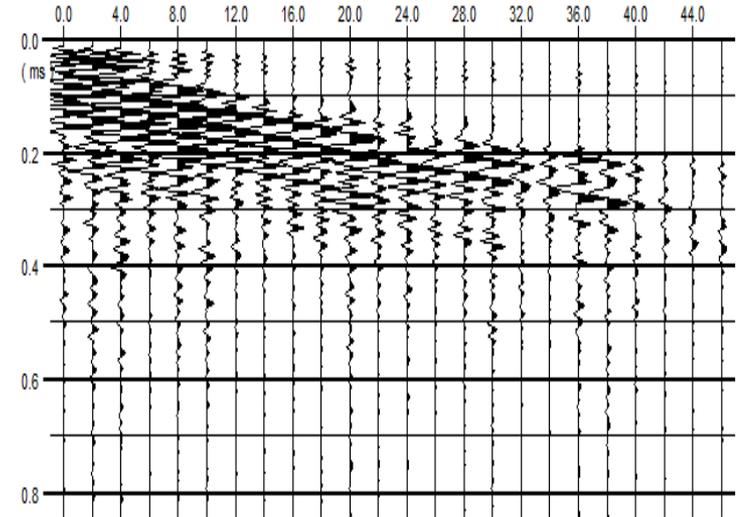
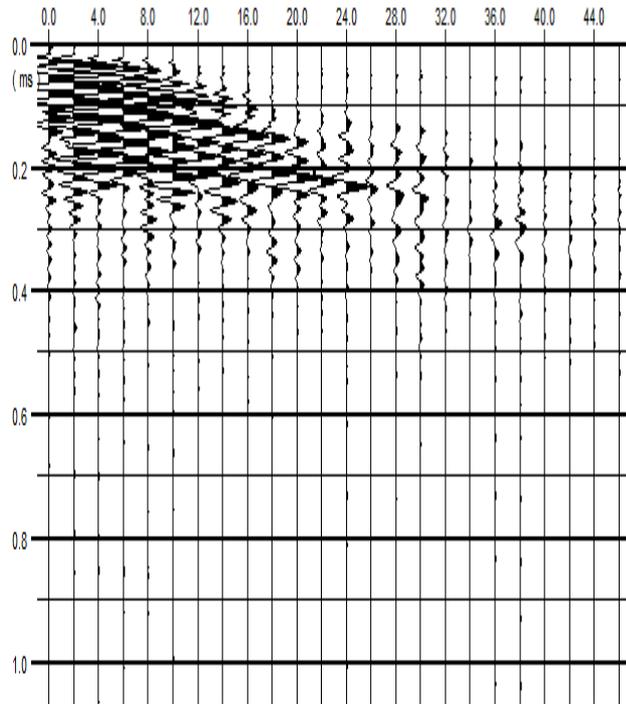
Obiettivo: acquisizione di **Common Source (Shot) Gather**

Fase 1: acquisizione dati

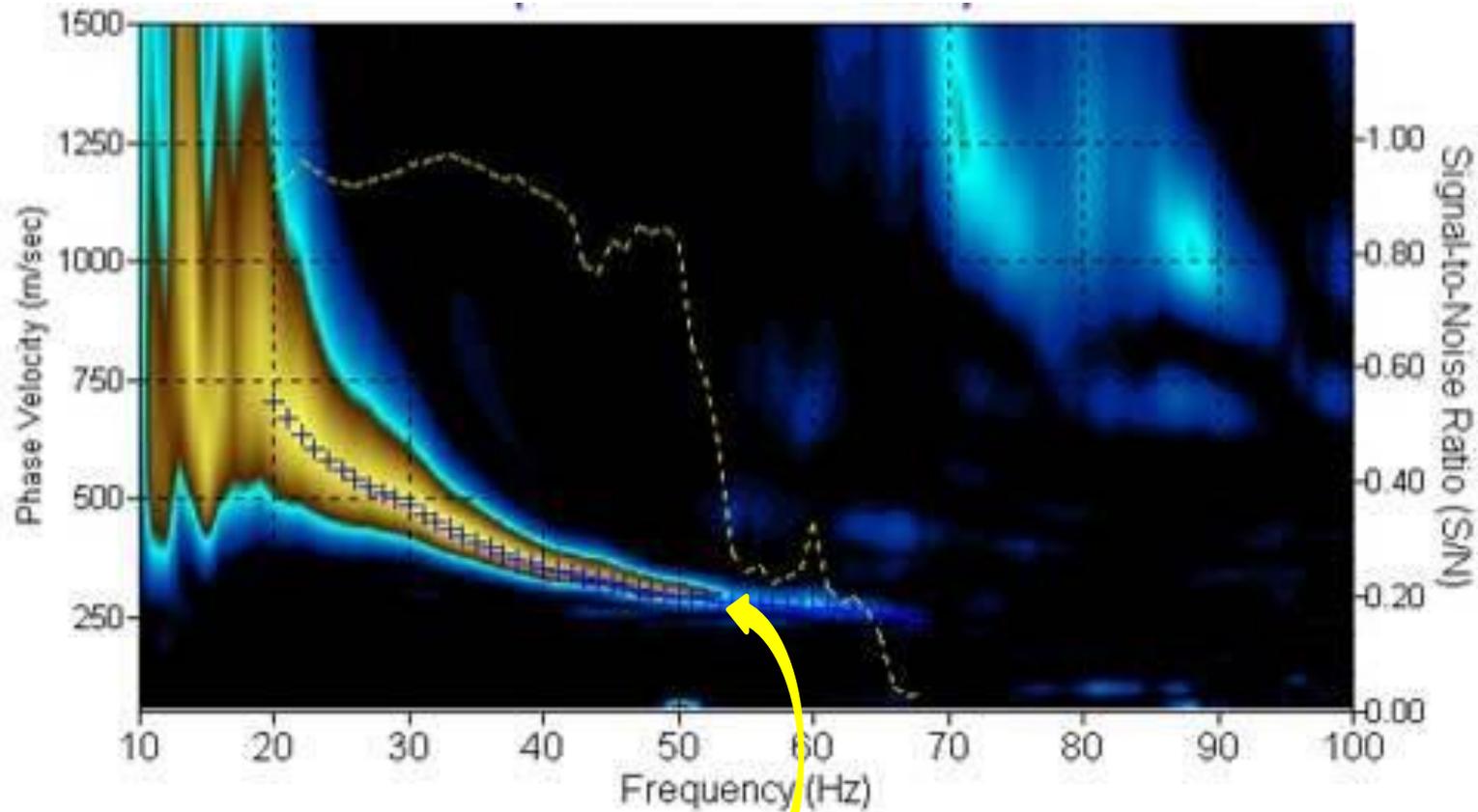
REQUISITI MINIMI

- Utilizzare geofoni **VERTICALI** (come per le onde P) a bassa frequenza (ad es. 4.5Hz) per poter registrare correttamente ANCHE le basse frequenze
- Utilizzare almeno 12 geofoni, meglio 24 per ottenere una migliore qualità dei dati
- Acquisire alcuni shot possibilmente relativi a DUE stendimenti perpendicolari per verificare la validità dell'ipotesi 1D del sottosuolo
- Eseguire shot in off-end tipicamente tra -2m e -10m rispetto al primo e all'ultimo geofono
- La spaziatura dei geofoni → lunghezza dello stendimento deve essere tale da consentire una sufficiente dispersione delle onde di superficie. Normalmente si utilizzano spaziature tra 1.5m e 4m
- Utilizzare una sorgente adeguata (normalmente *sledgehammer* su piastra)
- Acquisire per un tempo sufficientemente lungo (solitamente dell'ordine di 2s) per poter registrare correttamente le basse frequenze
- Acquisire con un intervallo di campionamento sufficientemente piccolo (dell'ordine di 0.5ms) per registrare correttamente le alte frequenze

Esempi di dataset reali

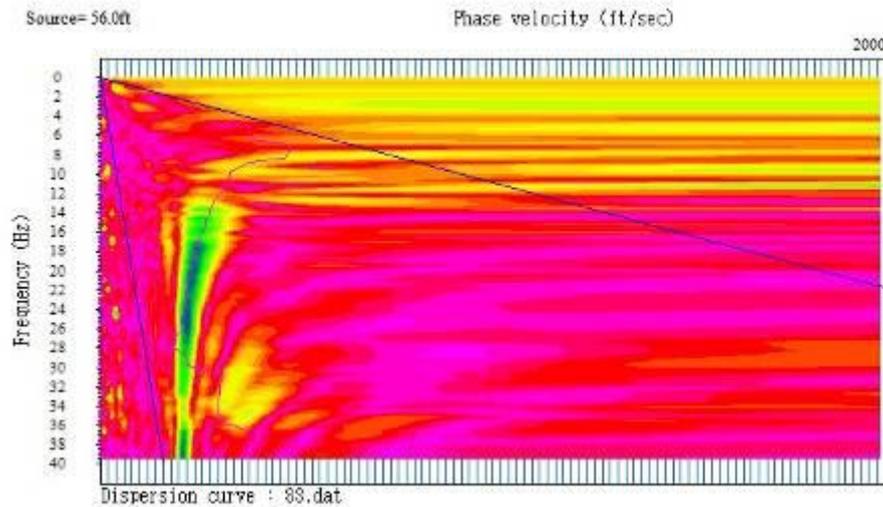


Fase 2: analisi dati

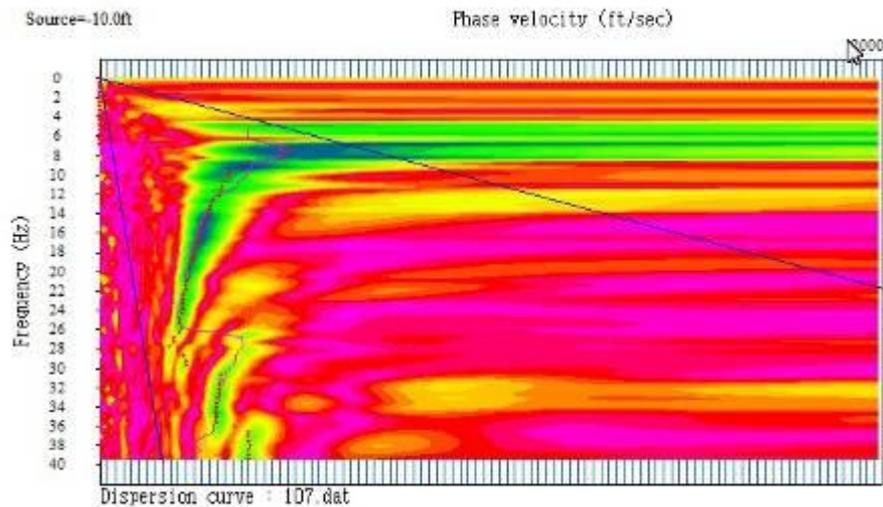


Obiettivo: estrazione **Curve di dispersione apparente:**
si usano varie rappresentazioni, ma l'obiettivo è univoco

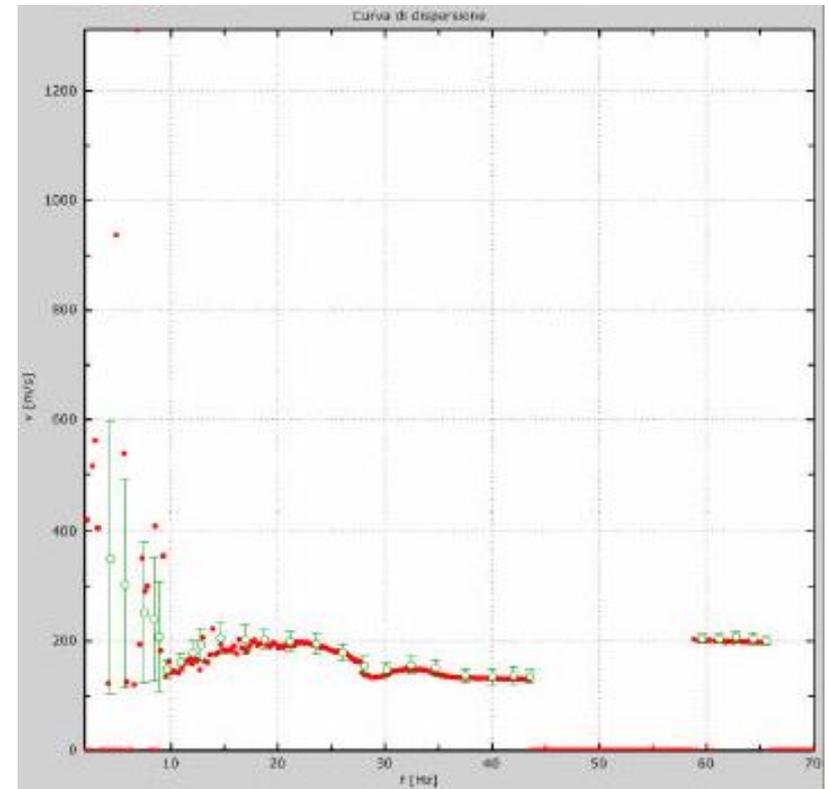
Esempi con casi reali



Domina il modo fondamentale



Presenza di modi superiori



Esempio di picking semi automatico di una curva di dispersione apparente con quantificata la barra di errore per le singole misure

Fase 3: inversione

Obiettivo: calcolo $V_s(z)$ e mappatura 1D $\rightarrow V_s(z)$
 2D $\rightarrow V_s(x,z)$

Parametro molto usato $V_{s30} \rightarrow$

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_i^n \left(\frac{h_i}{V_{si}} \right)}$$

dove V_{si} e h_i sono: la velocità delle onde di taglio verticali e lo spessore dell'iesimo strato

Esistono numerosissimi metodi di inversione potenzialmente applicabili con approcci STATISTICI o DETERMINISTICI

PER CONVENZIONE LA POSIZIONE DEL PROFILO DI VELOCITA' OTTENUTO E' AL CENTRO DELLO STENDIMENTO (punto mediano tra shot point e ultimo geofono)

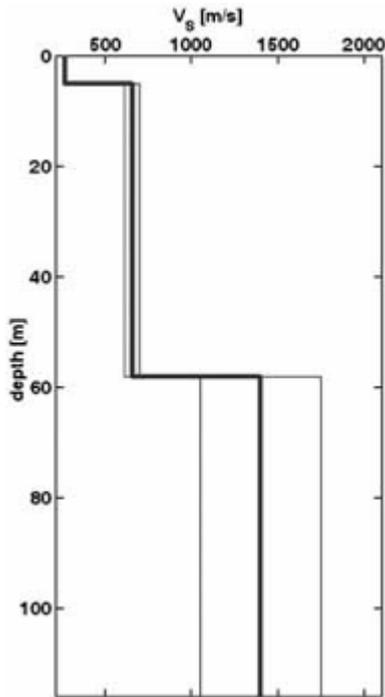
ATTENZIONE: non sempre è possibile investigare realmente fino a 30m di profondità \rightarrow necessità di rilevare dispersione anche a basse frequenze \rightarrow sorgente/accoppiamento con il terreno devono produrre anche basse frequenze.

Problemi per zone con importanti variazioni laterali (situazioni 2D o 3D)

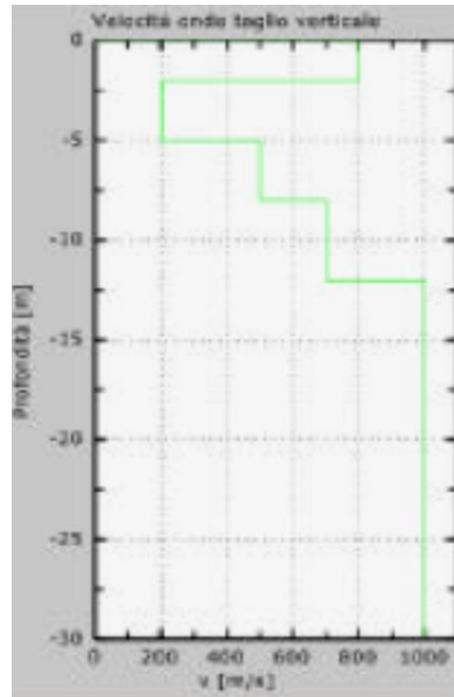
Problemi in presenza di gradienti topografici

Problemi in presenza di guide d'onda superficiali (es. canali, tubature di grosse dimensioni, manufatti sepolti,...)

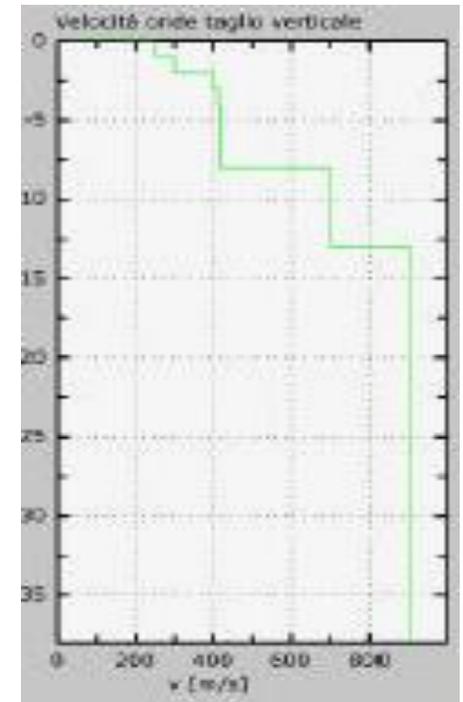
Inversione 1D: esempi reali



V_s crescente con la profondità (es. suolo; sabbia; roccia compatta)

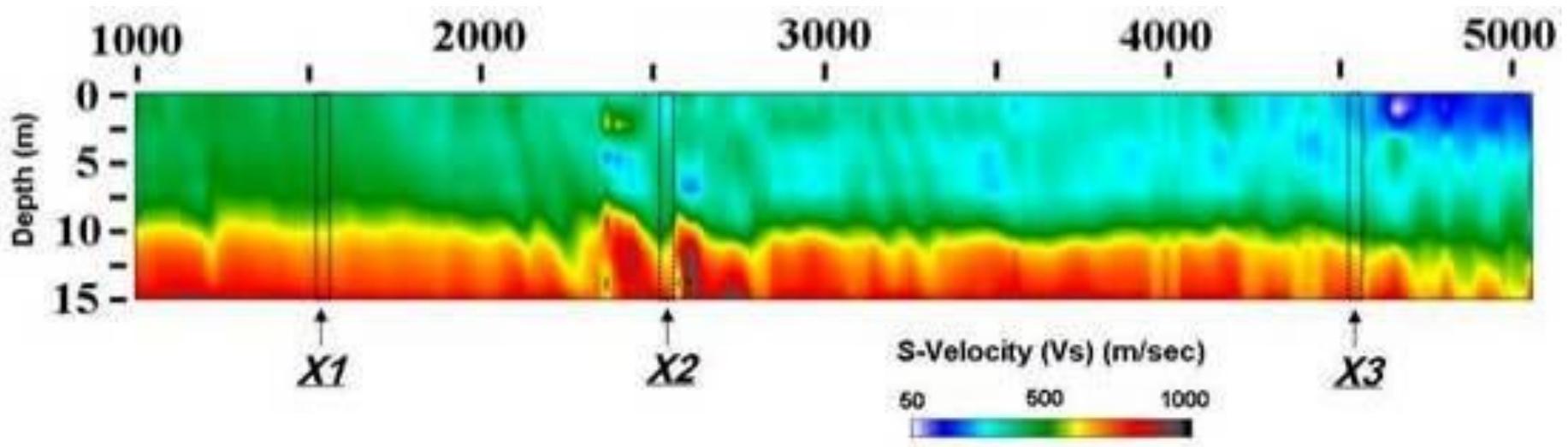


Inversione di velocità



Stratigrafia complessa senza inversioni con substrato sismico rigido

Fase 3: inversione 2D (o 1.5D)



Obiettivo: calcolo 2D $\rightarrow V_s(x,z)$

Si puo' ottenere:

1) invertendo simultaneamente vari shot (eventualmente vincolando il dato ad esempio con le onde rifratte \rightarrow INVERSIONE CONGIUNTA) \rightarrow Profilo 2D

2) Invertendo separatamente più shot lungo una linea e poi interpolando i risultati \rightarrow Profilo 1.5D

$V_s(z)$ e stima degli effetti di sito

La normativa vigente (OPCM 3274, DM 14.09.2005, norme tecniche per le costruzioni; Eurocodice 8) prevede:

- a. **Classificazione sismica terreno** (V_{s30} , SPT – terreni granulari, coesione non drenata – materiali coesivi)
- b. Stima effetti di sito
- c. Valutazione effetti del terremoto (di riferimento → ogni Comune ha i dati relativi) su comportamento meccanico terreno
- d. Eventuale valutazione effetto topografico

la normativa, in assenza del valore della V_{s30} , prevede la possibilità di stabilire la categoria di suolo sulla base dei valori del numero di colpi N_{spt} (per i soli terreni prevalentemente granulari) o della resistenza al taglio non drenata C_u (per i soli terreni prevalentemente coesivi). Questa alternativa lasciata dalla norma non risulta economicamente vantaggiosa rispetto alle tecniche sismiche di superficie ed è sconsigliata dall'autore, perché introduce numerose incertezze. Infatti la prova SPT e la resistenza al taglio non drenata C_u sono solo indirettamente collegate alle caratteristiche di propagazione delle onde sismiche nei suoli ed inoltre il ricorso ai valori di N_{spt} e di C_u potrebbe risultare non agevole in diverse situazioni: es. in presenza di alternanza di strati granulari e coesivi entro i primi 30m, valori di SPT a rifiuto localizzati solo a certe profondità per presenza di blocchi, valore di C_u dipendente dal livello di deformazione e quindi della tecnica di indagine seguita per la sua determinazione, etc.

Round type	Description of stratigraphic profile	V_{s30} (m/s)
A	Rock or other rock-like geological formation, including at most 5 m of weaker material at the surface.	>800
B	Deposits of very dense sand, gravel, or very stiff clay, at least several tens of metres in thickness, characterised by a gradual increase of mechanical properties with depth.	360÷800 ($N_{spt} > 50$) ($Cu > 250$ kPa)
C	Deep deposits of dense or mediumdense sand, gravel or stiff clay with thickness from several tens to many hundreds of metres.	180÷360 ($15 < N_{spt} < 50$) ($70 < Cu < 250$ kPa)
D	Deposits of loose-to-medium cohesionless soil (with or without some soft cohesive layers), or of predominantly soft-to-firm cohesive soil.	< 180 ($N_{spt} < 15$) ($Cu < 70$ kPa)
E	A soil profile consisting of a surface alluvium layer with vs values of type C or D and thickness varying between about 5 m and 20 m, underlain by stiffer material with vs > 800 m/s.	
S1	Deposits consisting, or containing a layer at least 10 m thick, of soft clays/silts with a high plasticity index ($PI > 40$) and high water content	< 100 ($10 < Cu < 20$ kPa)
S2	Deposits of liquefiable soils, of sensitive clays, or any other soil profile not included in types A – E or S1	

Eurocode 8

Suolo	Descrizione geotecnica	V_{s30} (m/s)
A	Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s30} > 800$ m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5m	>800
B	Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti con spessori di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{s30} compresi tra 360m/s e 800m/s	360÷800 ($N_{spt} > 50$) ($Cu > 250$ kPa)
C	Depositi di sabbie o ghiaie mediamente addensate o argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi tra 180m/s e 360m/s	180÷360 ($15 < N_{spt} < 50$) ($70 < Cu < 250$ kPa)
D	Depositi di granulari da sciolti a poco addensati o coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di $V_{s30} < 180$ m/s	< 180 ($N_{spt} < 15$) ($Cu < 70$ kPa)
E	Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, con valori di V_s simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5m e 20m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_s > 800$ m/s	
S1	Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($IP > 40$) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di $V_{s30} < 100$ m/s	< 100 ($10 < Cu < 20$ kPa)
S2	Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti	

Tabella 2.1: Classificazione del tipo di suolo secondo la nuova normativa sismica O.P.C.M. n. 3274/2003 e D.M. 15/09/2005 Testo Unico sulle costruzioni.

O.P.C.M 3274 e D.M. 15.09.2005

Classificazione dei suoli in base a V_s

$$\mu = V_s^2 * \rho$$

TIPO DI SUOLO	V_s min [m/s]	V_s media [m/s]	V_s max [m/s]
ROCCE MOLTO DURE (es. rocce metamorfiche molto poco fratturate)	1400	1620	-
ROCCE DURE (es. graniti, rocce ignee, conglomerati, arenarie e argilliti, da mediamente a poco fratturati)	700	1050	1400
SUOLI GHIAIOSI e ROCCE DA TENERE A DURE (es. rocce sedimentarie ignee, tenere, arenarie, argilliti, ghiaie e suoli con > 20% di ghiaia)	375	540	700
ARGILLE COMPATTE e SUOLI SABBIOSI (es. sabbie da sciolte a molto compatte, limi e argille sabbiose, argille da medie a compatte e argille limose)	200	290	375
TERRENI TENERI (es. terreni di riempimento sotto falda, argille da tenere a molto tenere).	100	150	200



Domande ???