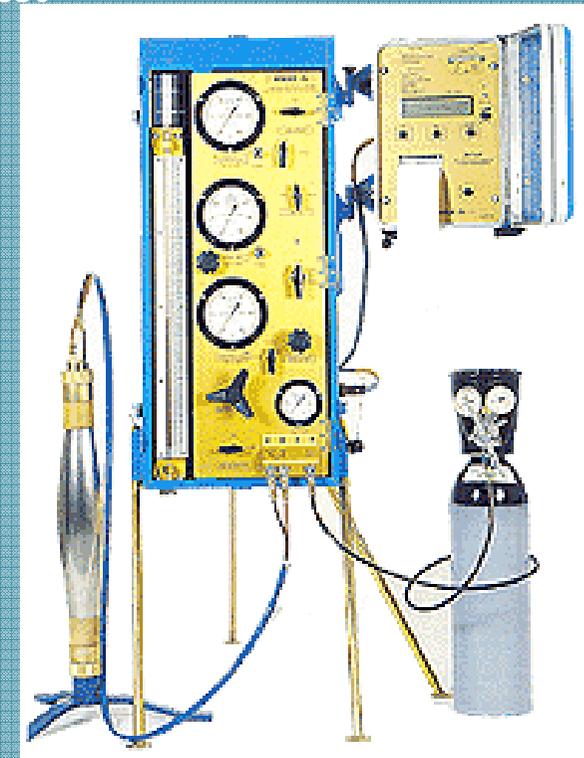
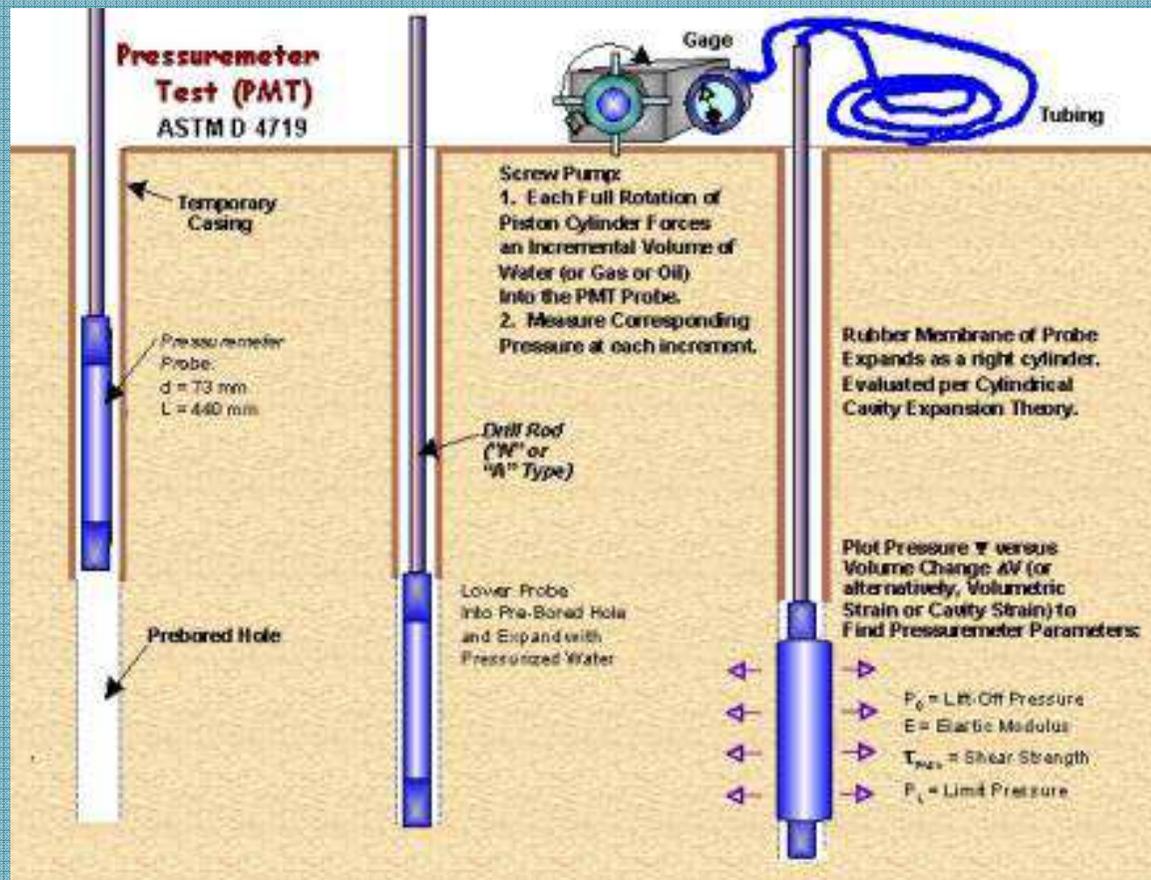


Pressiometro da foro (Menard)

Attrezzatura

1. Sonda cilindrica espandibile da fondo foro per immissione di gas o liquido
2. Sistema di aste
3. Dispositivi di pompaggio e misura pressioni + volumi di fluido immesso

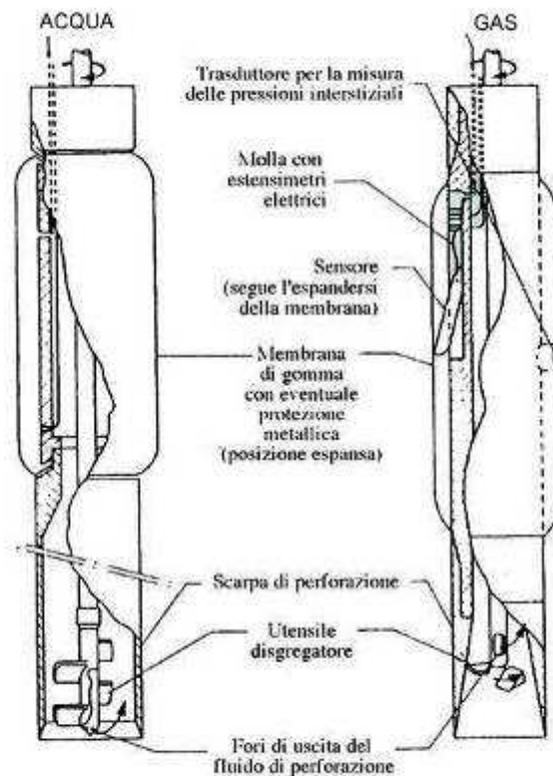


Dimensioni sonda:

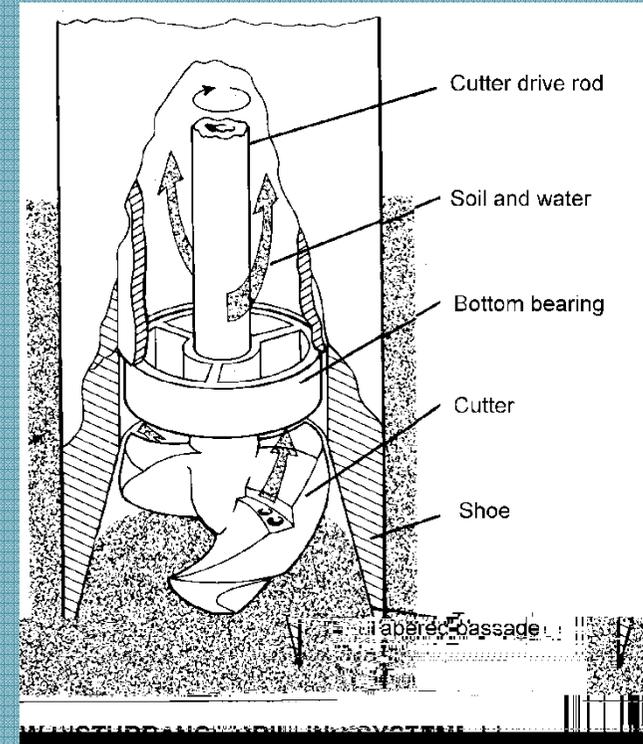
diametro $d = 58 \text{ mm}$
lunghezza $L = 350 \text{ mm}$

Pressiometro autoperforante (SBPT)

Provisto di utensile disgregatore
che rimuove un volume di terreno
pari a quello della sonda

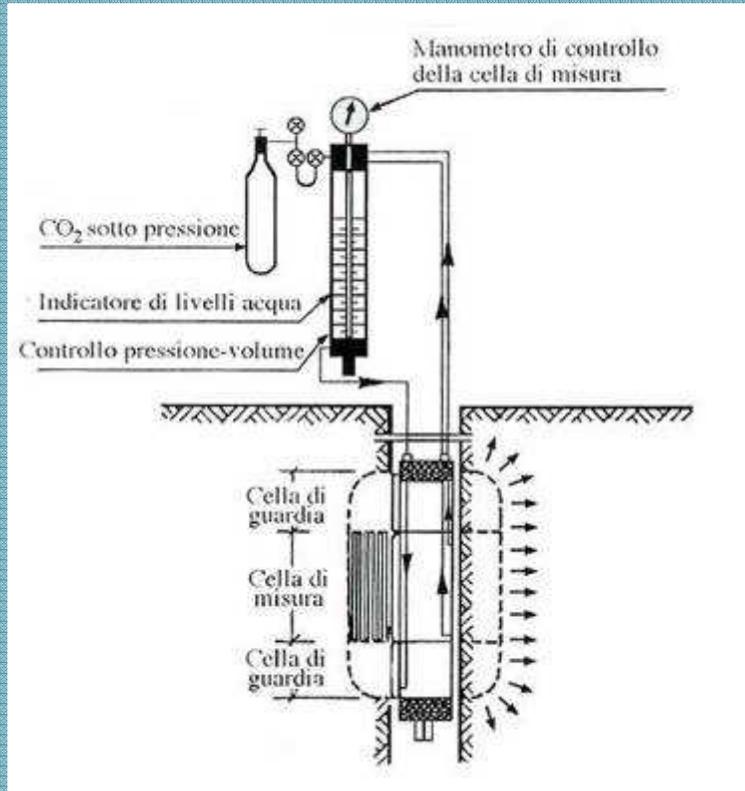


PAFSOR (LCPC) Cam-ko-meter (Cambridge)

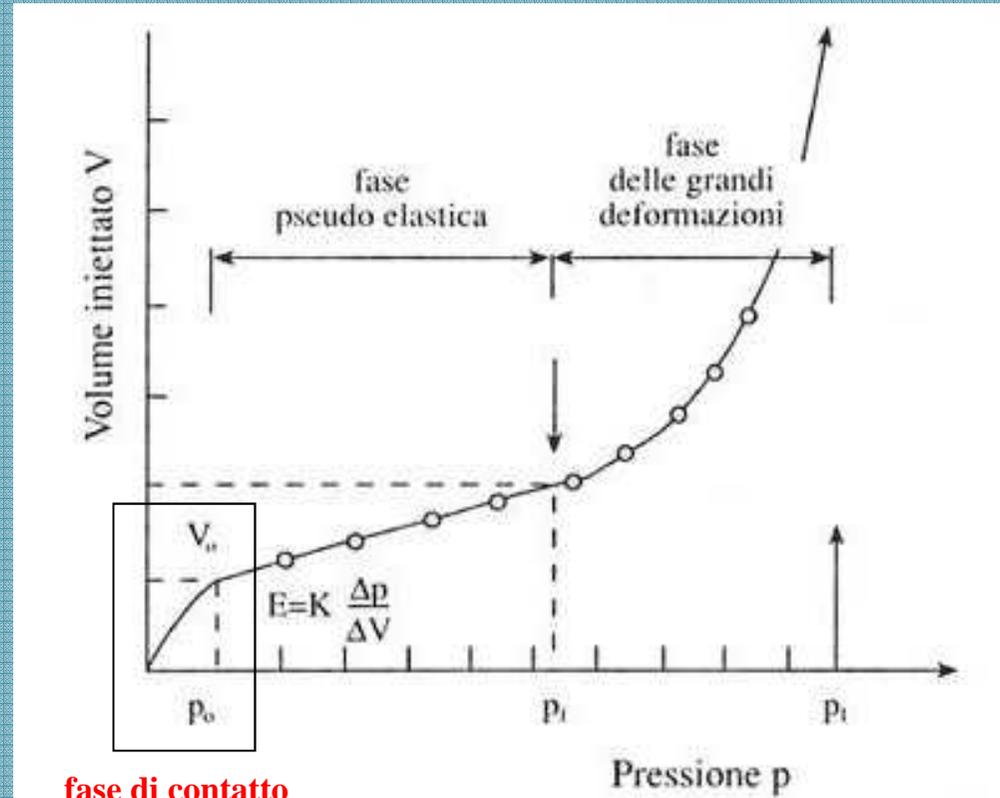


Prova pressiometrica (PMT): esecuzione

1. Immissione di liquido in pressione



2. Misura di variazioni di volume



fase di contatto
con le pareti del foro

Limitazioni esecutive

Instabilità foro e difficoltà di ottenimento resistenza in terreni a grana grossa

Prova pressiometrica: interpretazione

Modello: equilibrio della cavità cilindrica indefinita ($p = \sigma_r$; $\varepsilon_v = 2 \varepsilon_r$)

1. tensione orizzontale $\sigma_{r0} = p_0 \Rightarrow$ coefficiente di spinta a riposo k_0

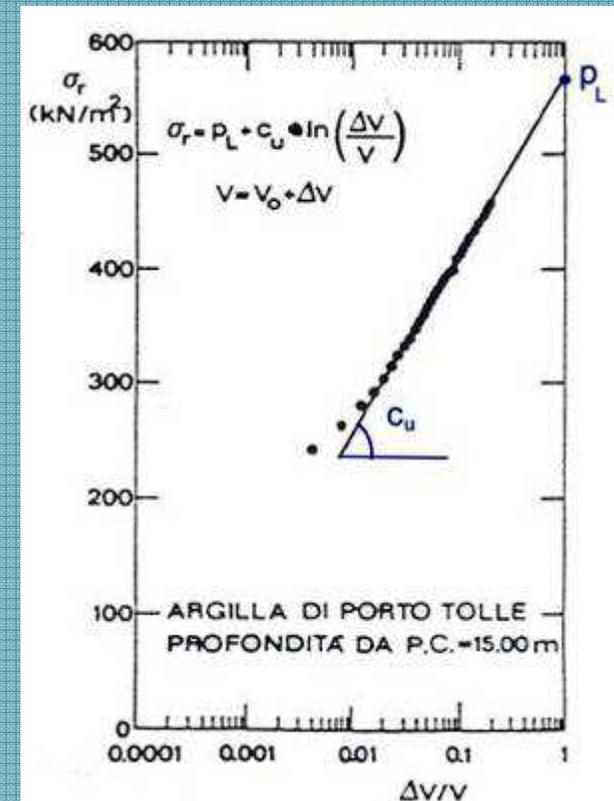
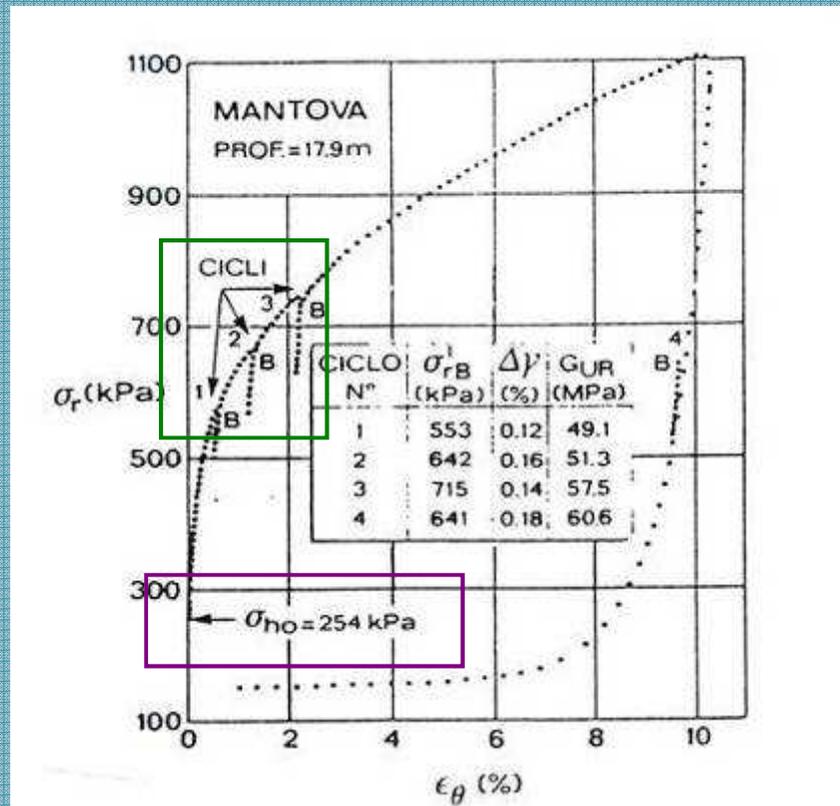
$$k_0 = \frac{\sigma'_{h0}}{\sigma'_{v0}} = \frac{\sigma_{r0} - u}{\sigma_{v0} - u}$$

2. curva tensione-deformazione ($\sigma_r : \varepsilon_r$) \Rightarrow rigidità tangente G

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{d\sigma_r}{d\varepsilon_r}$$

3. curva $\sigma_r : \varepsilon_r \Rightarrow$ pressione limite p_L e resistenza non drenata c_u

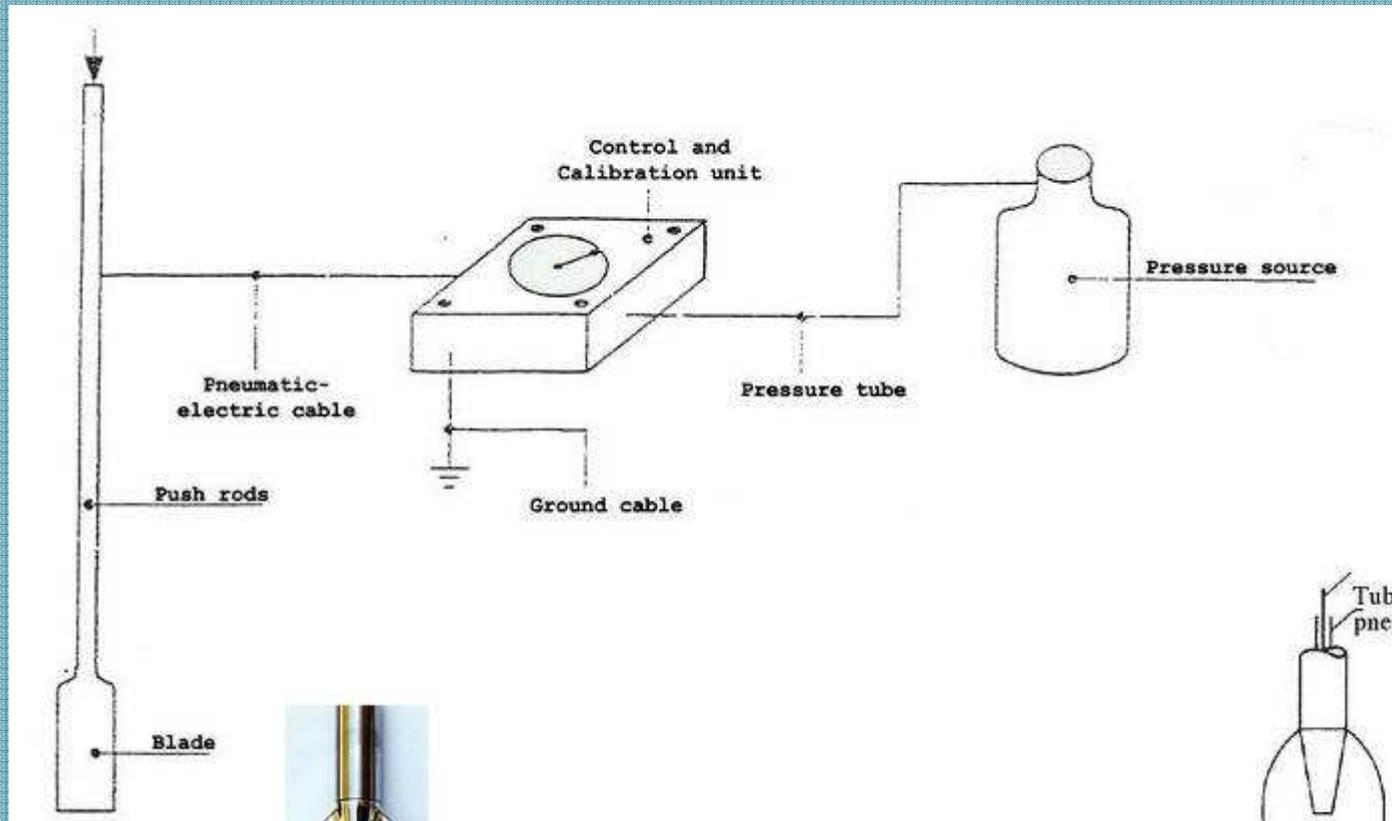
$$\sigma_r = p_L + c_u \cdot \ln \varepsilon_v$$



Prova dilatometrica (DMT)

Attrezzatura

piastra laminare con membrana espandibile, infissa da superficie

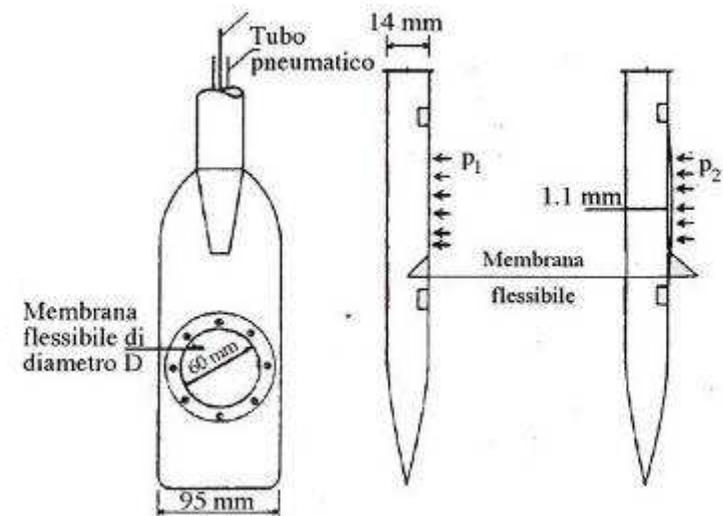


Dimensioni lama ("pala"):

larghezza = 95 mm

spessore = 14 mm

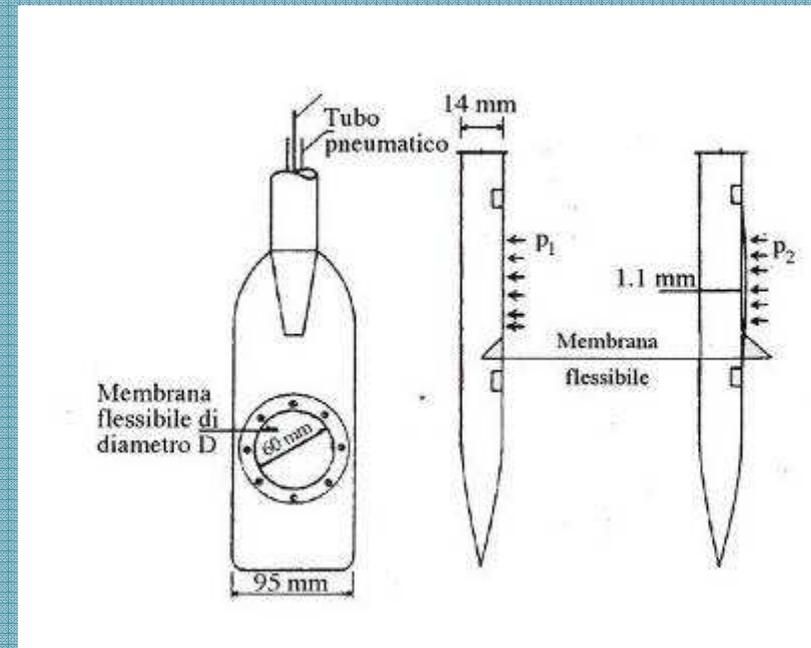
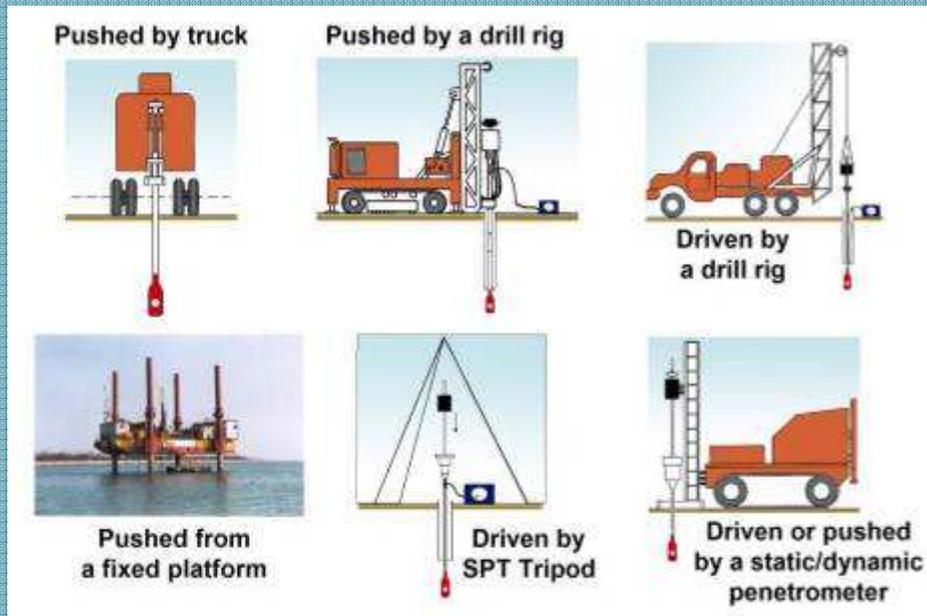
diametro membrana = 60 mm



Prova dilatometrica: esecuzione

Sistemi di infissione:

Ogni 20 cm di penetrazione, si immette gas in pressione misurando pressioni e spostamenti



Limitazioni esecutive:

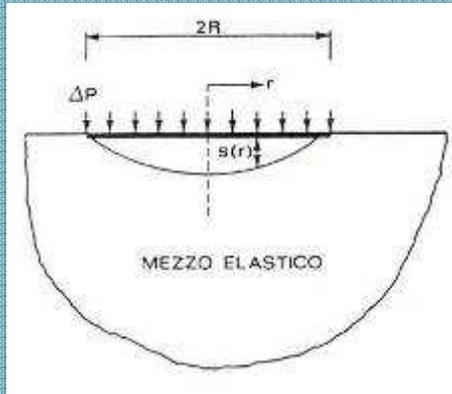
- difficoltà di penetrazione in terreni addensati
- interpretazione ~ empirica

p_0 → inizio espansione membrana
 p_1 → corrispondente ad un'espansione di 1.1 mm
 p_2 → ritorno alla condizione iniziale

Prova dilatometrica: interpretazione

Modello

piastra circolare su semispazio elastico



$$S(r) = \frac{2R\Delta P}{\pi} \cdot \frac{1-\nu}{E} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2}$$

(per $r=0$; $2R=60$ mm)

$$s = 1.1 \text{ mm} \rightarrow p_1$$



2. Modulo dilatometrico E_d

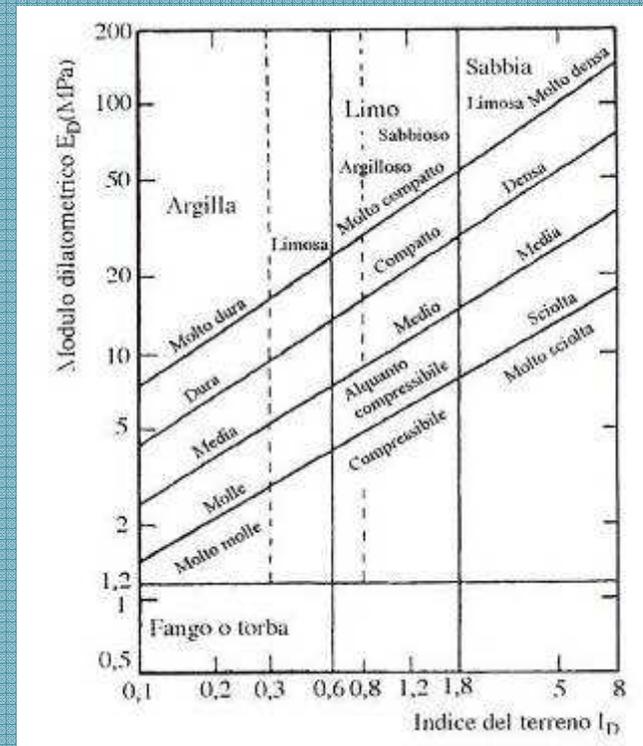
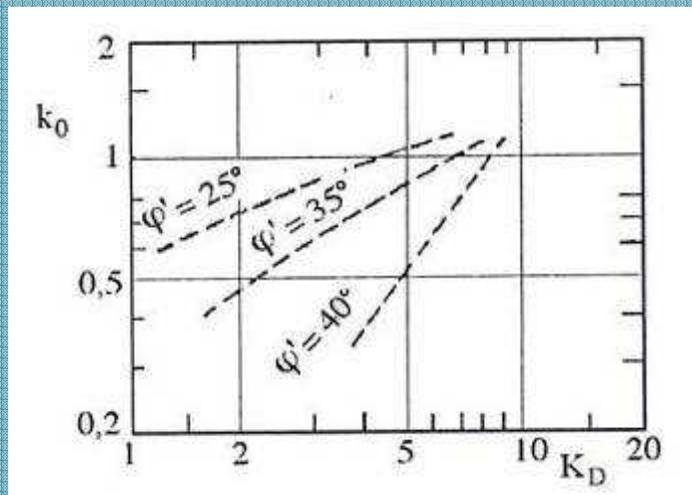
$$E_d = \frac{E'}{1-2\nu^2} = 34.7(p_1 - p_0)$$

1. Coefficiente dilatometrico K_d

$$K_d = \frac{p_0 - u}{\sigma_{v0} - u}$$



coefficiente di spinta a riposo k_0



3. Indice di materiale I_d

$$I_d = \frac{p_1 - p_0}{p_0 - u}$$

Equilibrio dinamico del mezzo elastico

Equazioni indefinite di equilibrio dinamico
($\rho = \gamma/g$)

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right)$$

Legame costitutivo elastico lineare
(relazioni di Navier)

$$\sigma_x = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_x$$

$$\sigma_y = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_y$$

$$\sigma_z = \lambda \varepsilon_v + 2G \varepsilon_z$$

$$\tau_{yz} = G \gamma_{yz}$$

$$\tau_{zx} = G \gamma_{zx}$$

$$\tau_{xy} = G \gamma_{xy}$$

Costanti elastiche:

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$$\lambda + 2G = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = E_{ed}$$

Propagazione di due perturbazioni:

$$\rho \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial t^2} = (\lambda + 2G) \Delta^2 \varepsilon_v \quad \left(\Delta = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

onda di deformazione volumetrica

(o **onda P**) con velocità

$$V_P = \sqrt{\frac{E_{ed}}{\rho}}$$

$$E_{ed} = \rho \cdot V_P^2$$

$$\rho \frac{\partial^2 \gamma_{ij}}{\partial t^2} = G \Delta^2 \gamma_{ij} \quad \{ ij = xy, yz, zx \}$$

onda di deformazione distorsionale

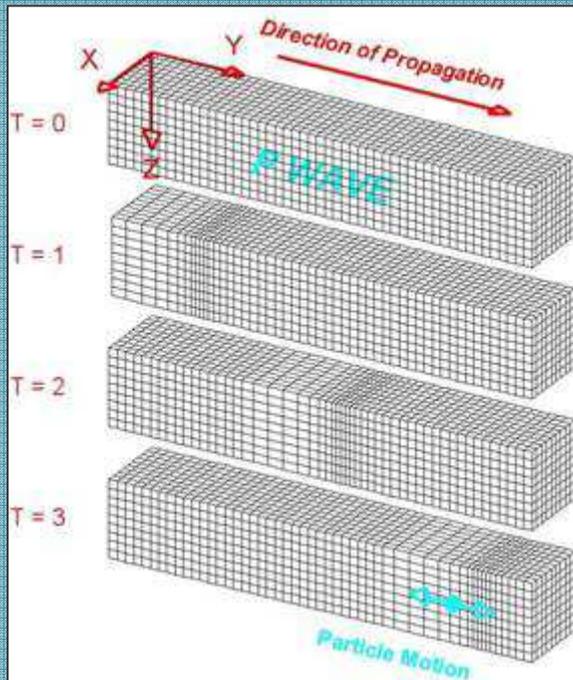
(o **onda S**) con velocità

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

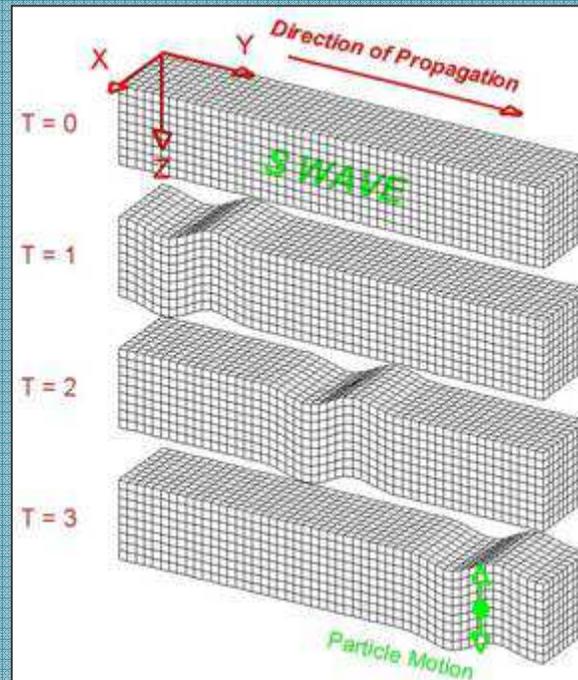
$$G = \rho \cdot V_S^2$$

Meccanismi di propagazione delle onde

Propagazione delle onde di volume (P e S)



$$\epsilon_v = g(V_P t + s) + h(V_P t - s)$$



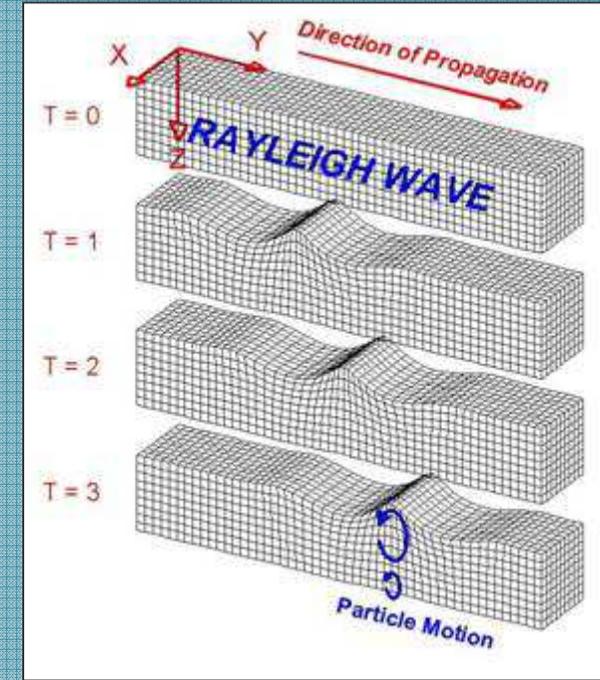
$$\gamma_{xy} = g(V_S t + s) + h(V_S t - s)$$

Se la perturbazione è un'armonica di frequenza f ,
 si propagerà nello spazio
 con periodo (*lunghezza d'onda*)

$$\lambda_P = \frac{V_P}{f}$$

$$\lambda_S = \frac{V_S}{f}$$

Onda di superficie o di Rayleigh (R)



Le onde R si generano:

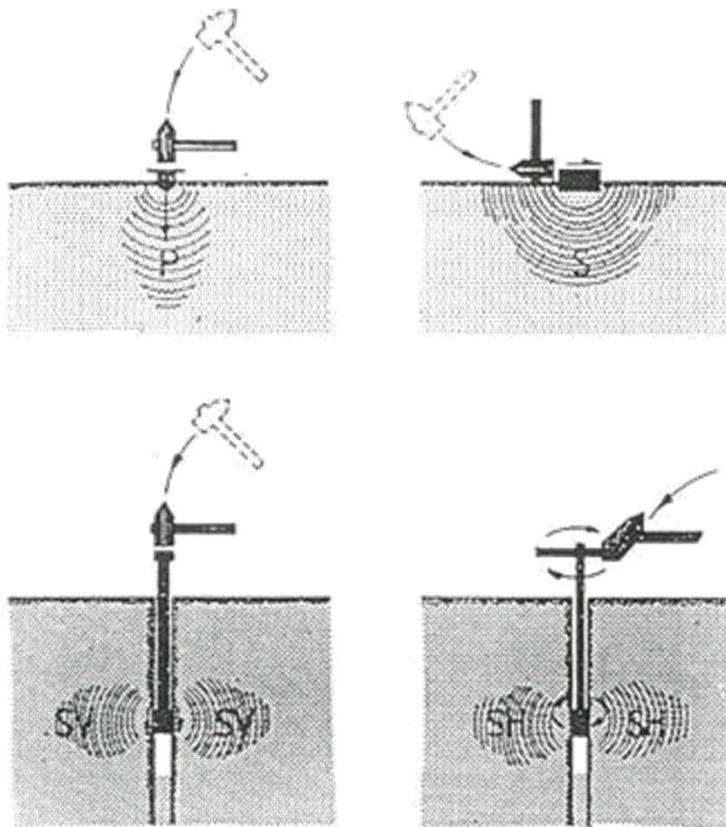
- alla superficie di un semispazio
- all'interfaccia tra due strati

ed hanno $V_R \approx V_S$

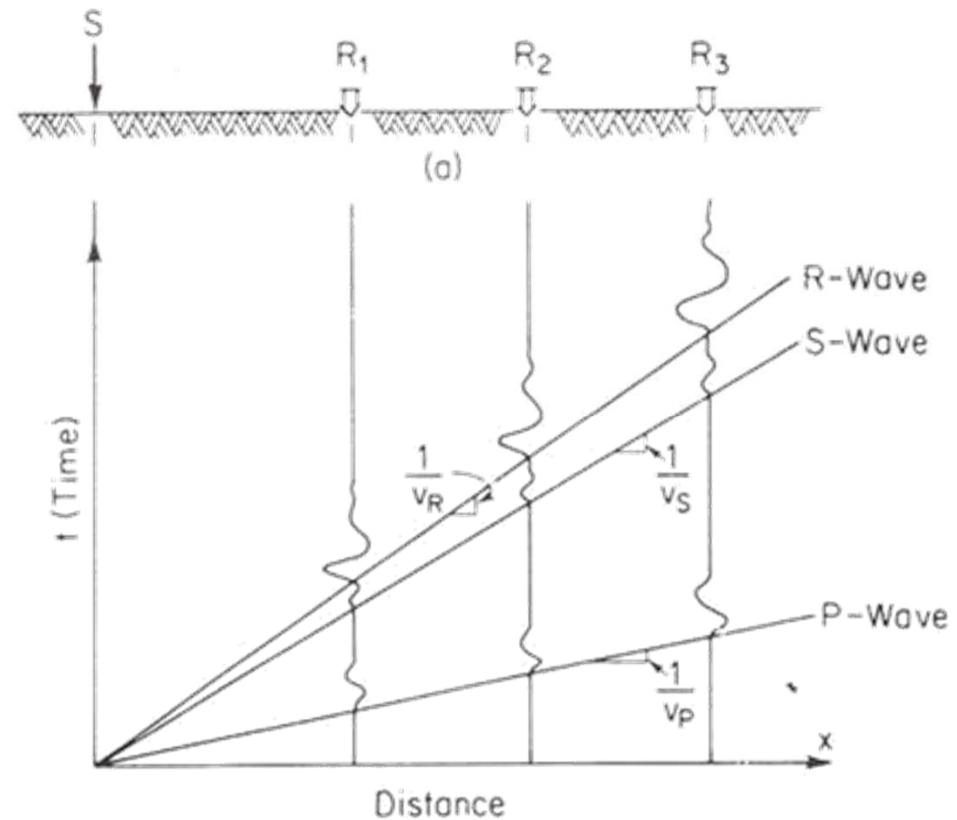
Metodi di indagine sismica in sito

Principio:

- generare onde di volume o di superficie con una sorgente polarizzata
- registrare gli effetti con uno o più ricevitori (geofoni)
- ottenere le velocità di propagazione delle onde P, S, R nel terreno



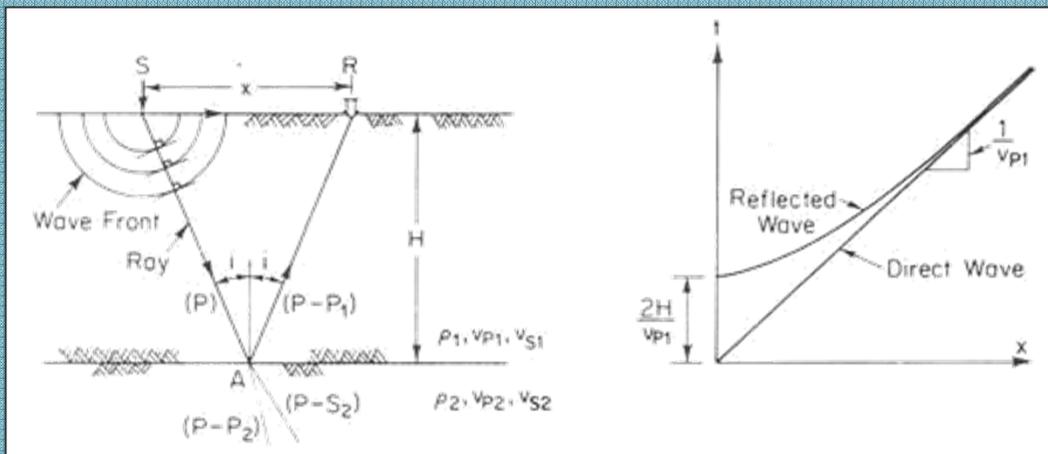
Esempi di sorgenti impulsive



Registrazioni tempi di arrivo delle onde per distanze variabili → 'dromòcrone'

Prospezioni sismiche di superficie

Metodo a riflessione



onda diretta:

$$t_d = \frac{x}{V_{P_1}}$$

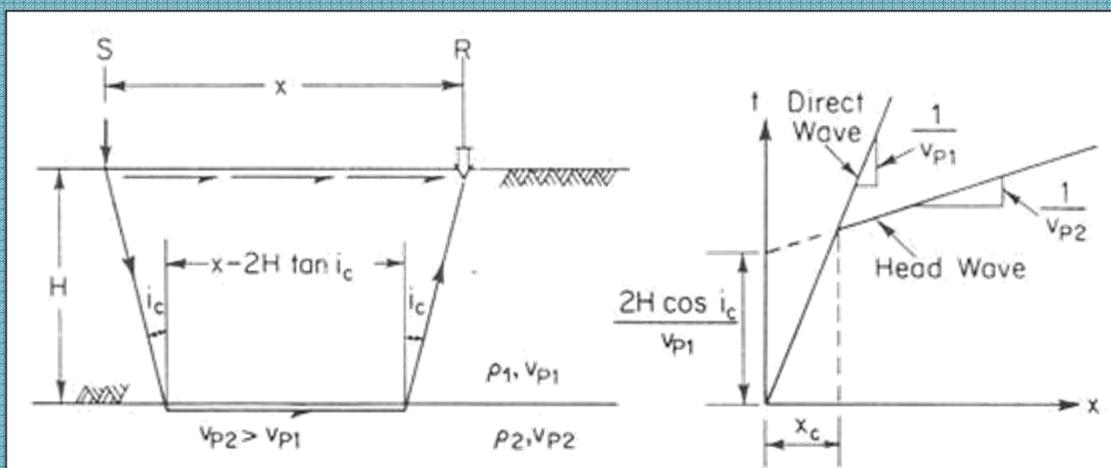
onda riflessa:

$$t_r = \frac{\sqrt{x^2 + 4H^2}}{V_{P_1}} \left(= \frac{2H}{V_{P_1}} \text{ per } x=0 \right)$$



spessore e velocità strato superficiale

Metodo a rifrazione



onda rifratta:

$$t_r = \frac{x}{V_{P_2}} + 2H \sqrt{\frac{1}{V_{P_1}^2} - \frac{1}{V_{P_2}^2}} = \frac{x}{V_{P_2}} + \frac{2H \cos i_c}{V_{P_1}}$$



spessore e velocità strato superficiale + velocità substrato

Esecuzione di prove di rifrazione con onde S

Attrezzatura:

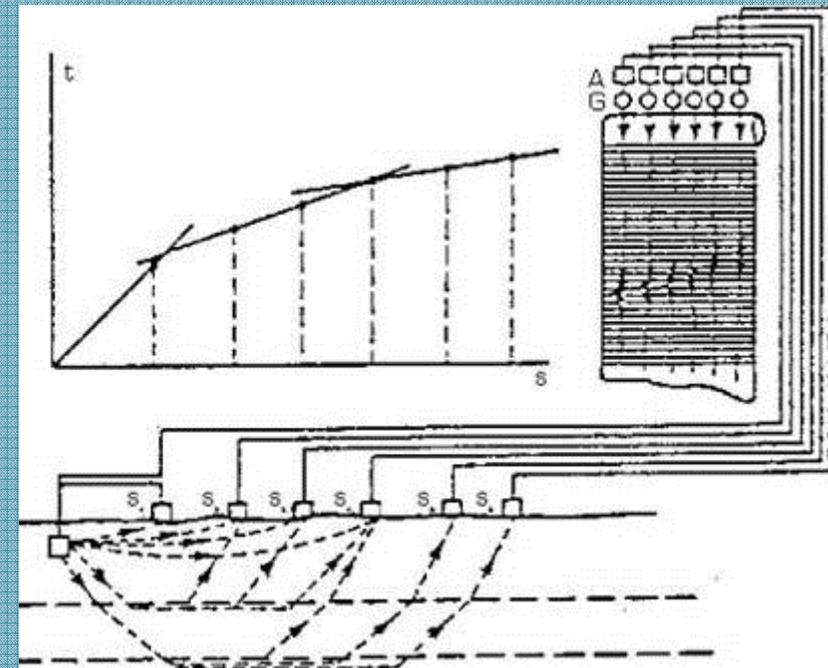
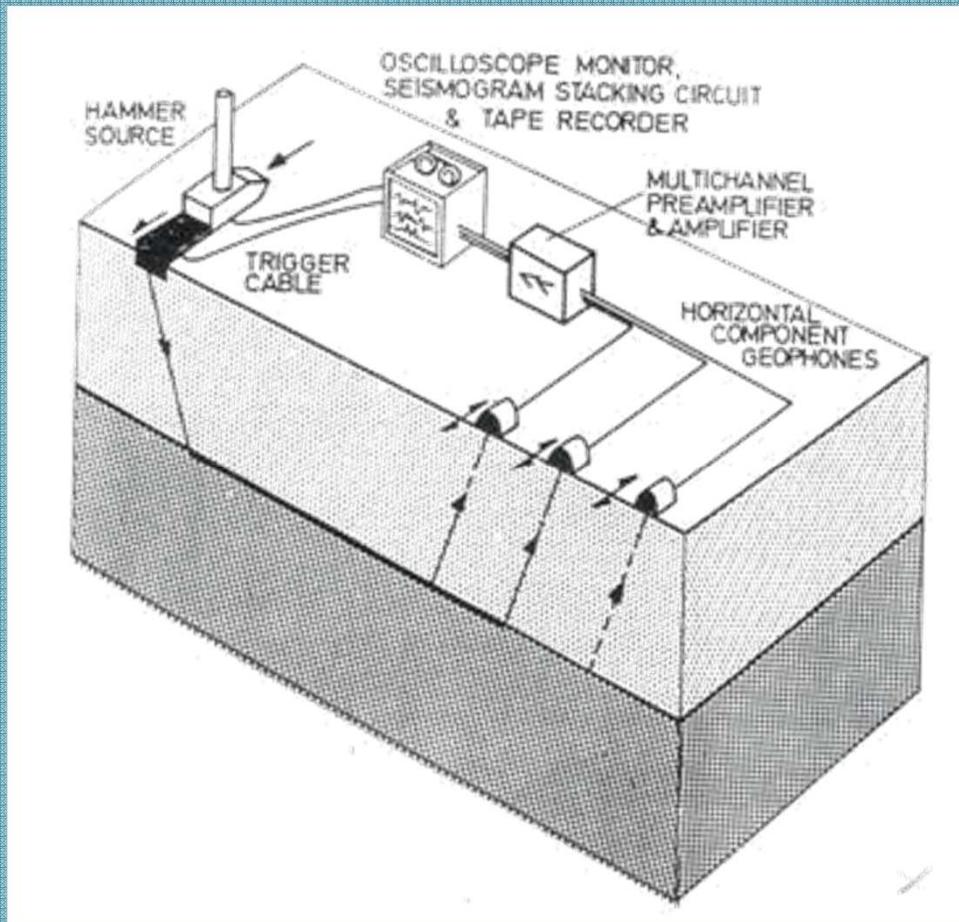
1. sorgente 'polarizzata' trasversale
2. batteria di geofoni orientati
3. registratore multicanale

Interpretazione:

dromocrone

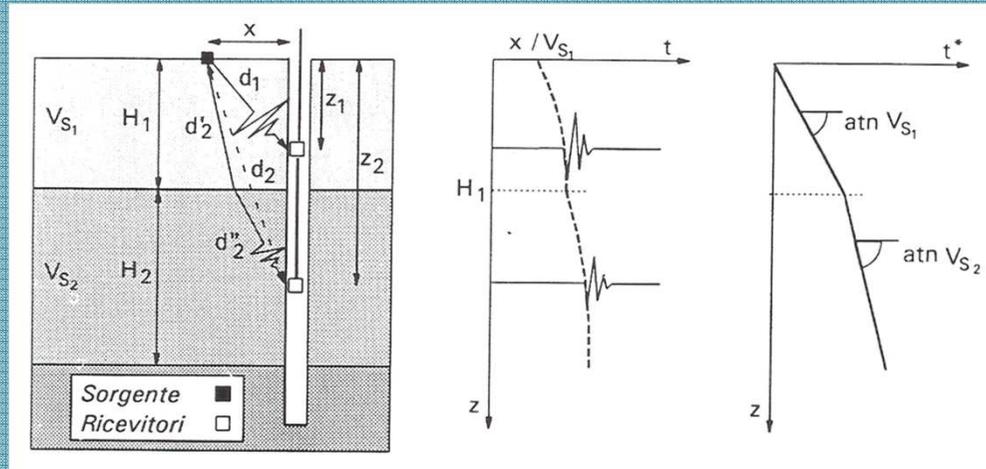


velocità e spessori di strati successivi



Metodi di indagine sismica da foro

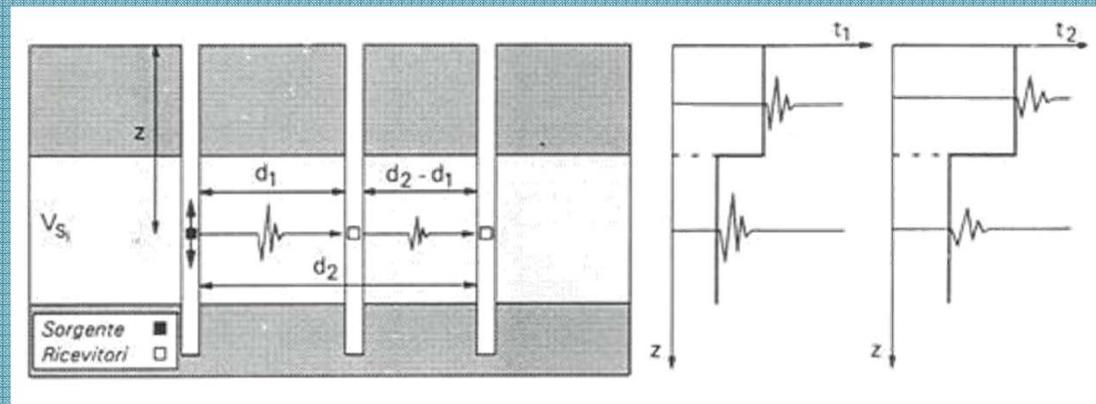
Metodo Down-Hole (DH)



Scopo: registrare gli arrivi di onde **S** a profondità variabili.

La sorgente è **superficiale**, i ricevitori (in numero di uno o più) sono posizionati all'interno di un foro.

Metodo Cross-Hole (CH)

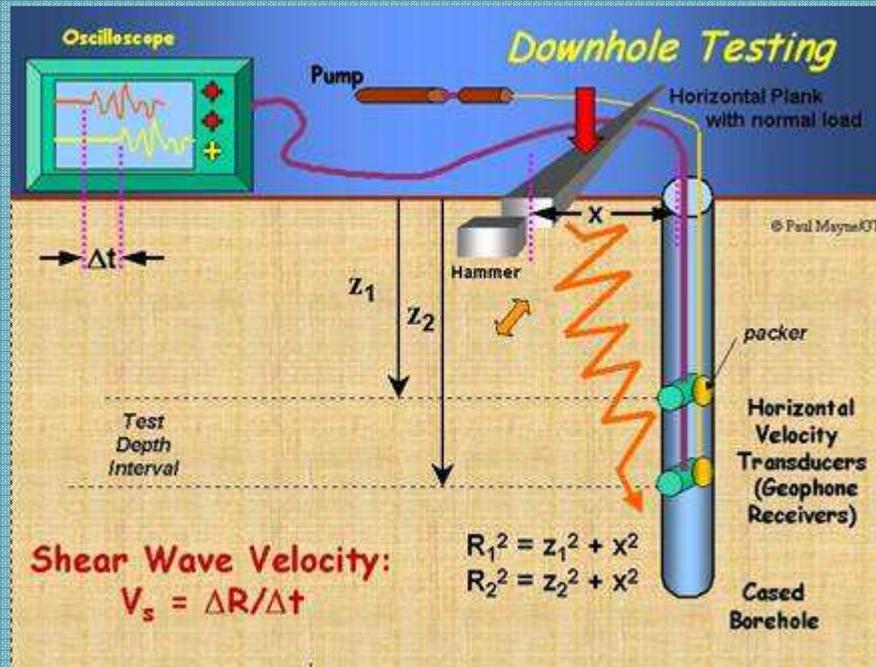


Scopo: registrare gli arrivi di onde **S** a profondità variabili.

La sorgente è **in foro**, i ricevitori (in numero di uno o più) sono posizionati in altrettanti fori.

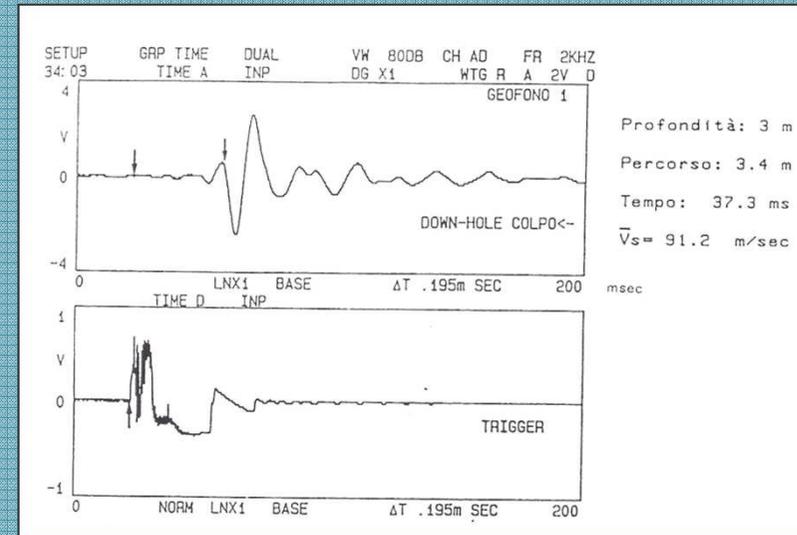
Prove sismiche in foro: Down-Hole

Down-Hole (DH)

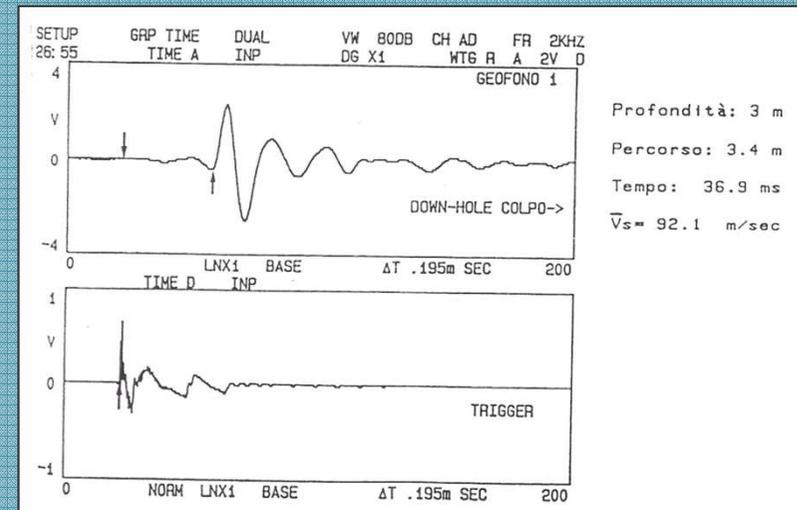


- ⇒ sorgente orizzontale ad impatto
- ⇒ necessario un solo foro
- ⇒ ampiezza onde attenuata con z

Esempio di acquisizione:



Inversione polarità sorgente:



Esempio di allestimento prova Down-Hole



foro \varnothing 100 mm con tubazione PVC \varnothing 80 mm

geofono con 2 + 2 velocimetri hz + 1 verticale

Intepretazione di prova DH a 1 ricevitore

Tempi diretti → V_S media tra 0 e z

$$V_S = \frac{\sqrt{z^2 + x^2}}{t}$$

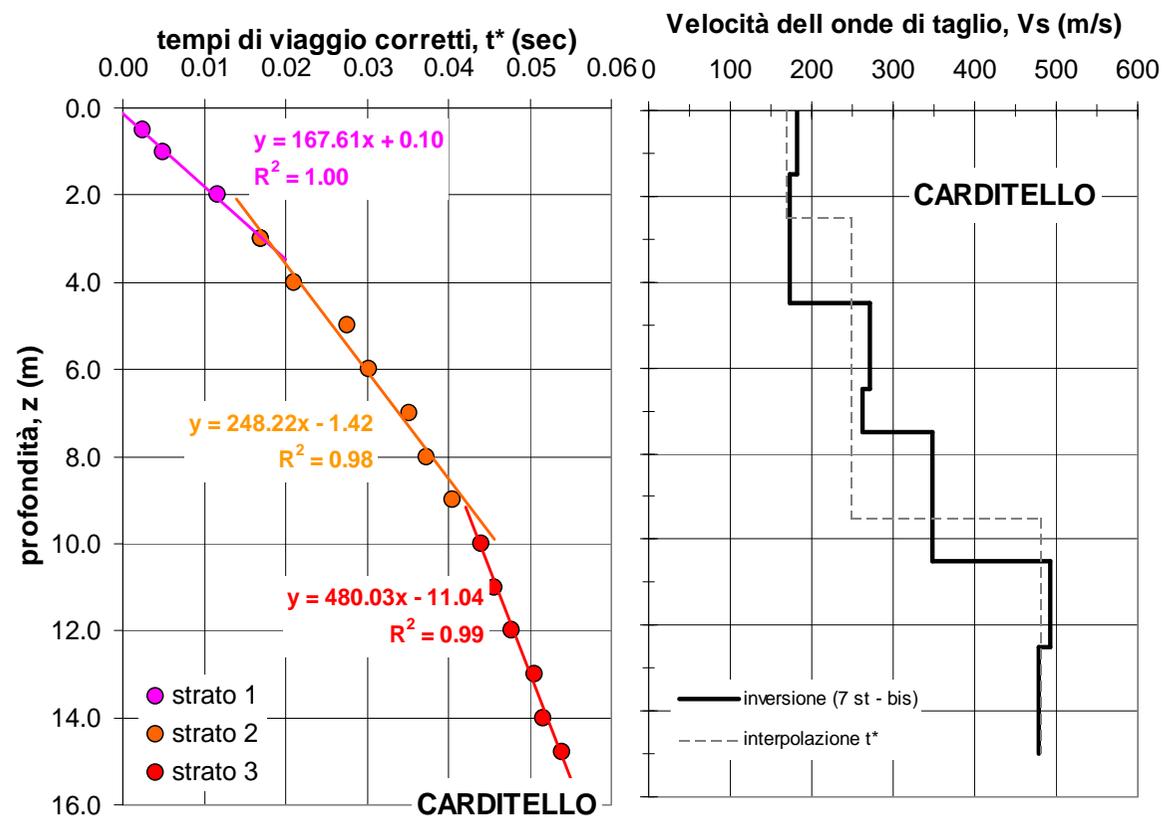
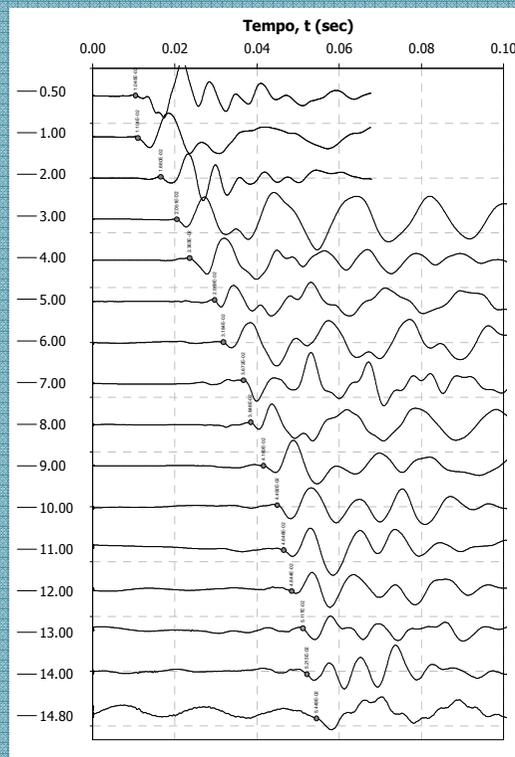
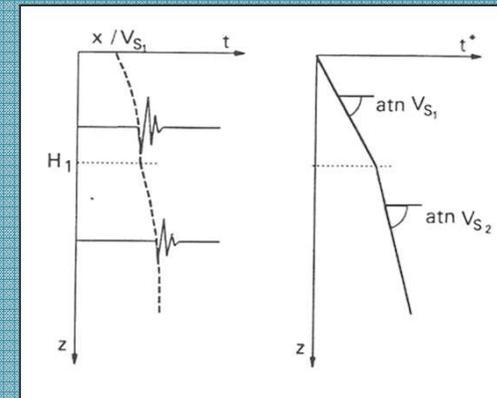
Tempi equivalenti

$$t^* = \frac{z}{d} t = \frac{z}{\sqrt{z^2 + x^2}} t$$

→ V_S ad ogni profondità z

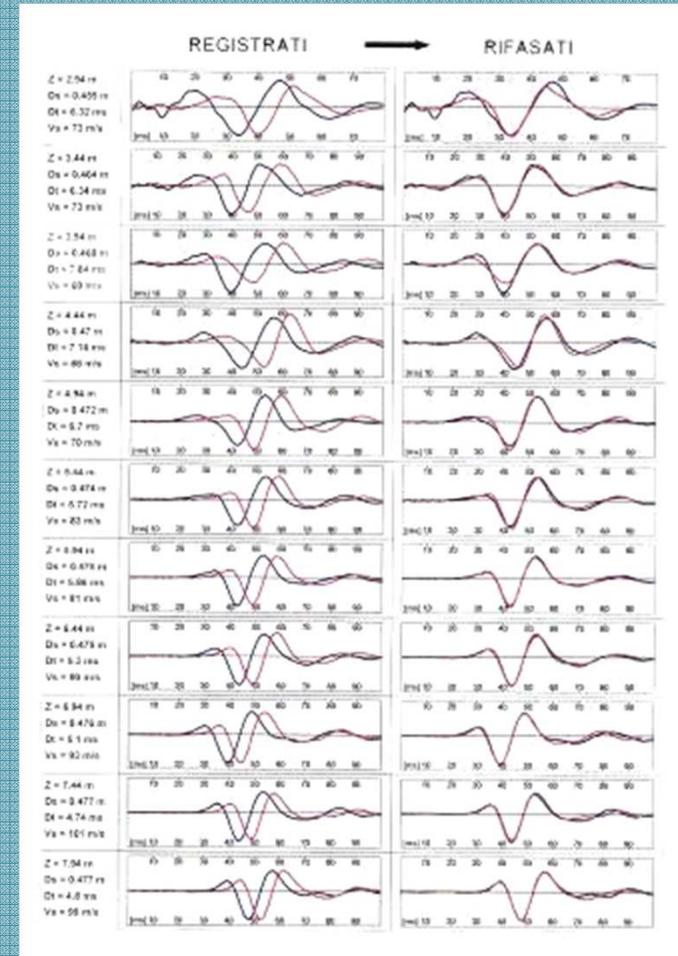
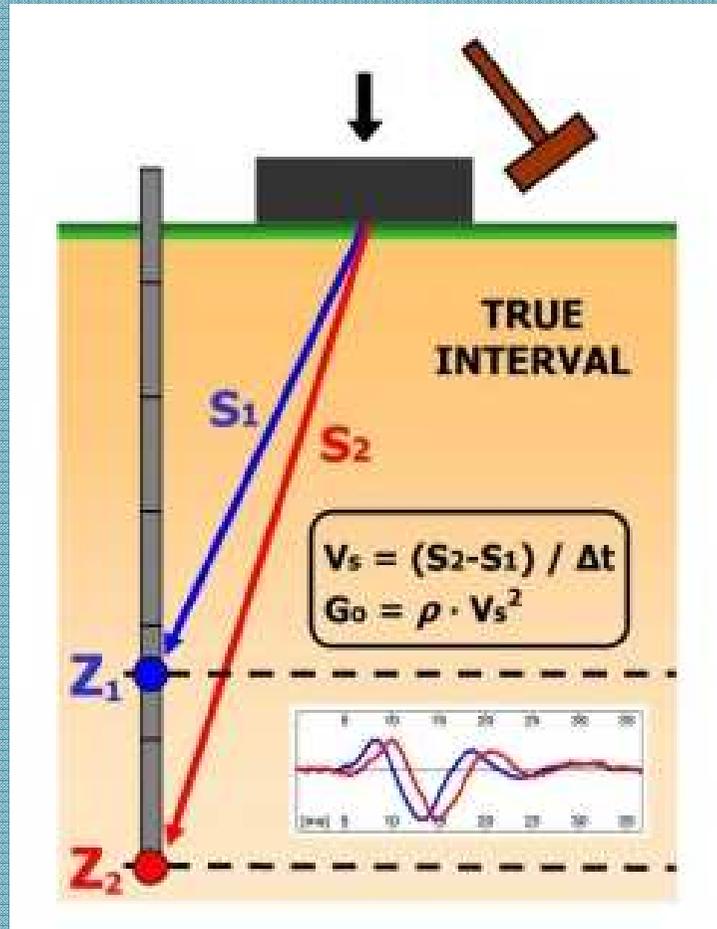
$$V_S^* = \frac{\Delta z}{\Delta t^*}$$

Inversione: identifica, per successive iterazioni, il profilo di V_S che fornisce la spezzata $t^*:z$ che meglio approssima le misure sperimentali



Il dilatometro sismico (SDMT)

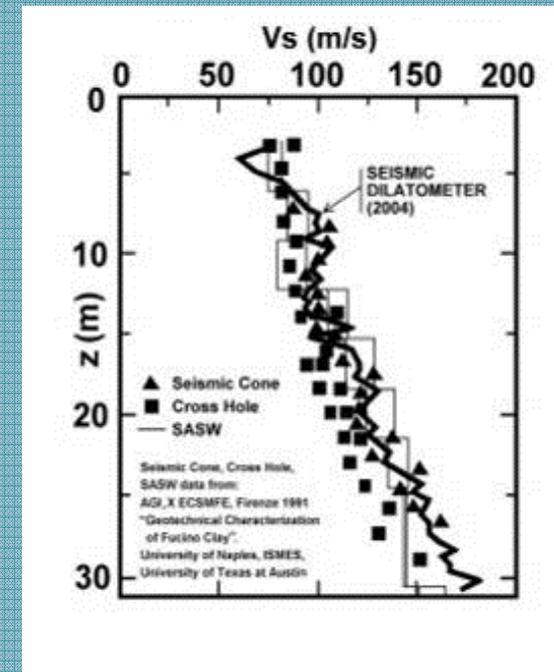
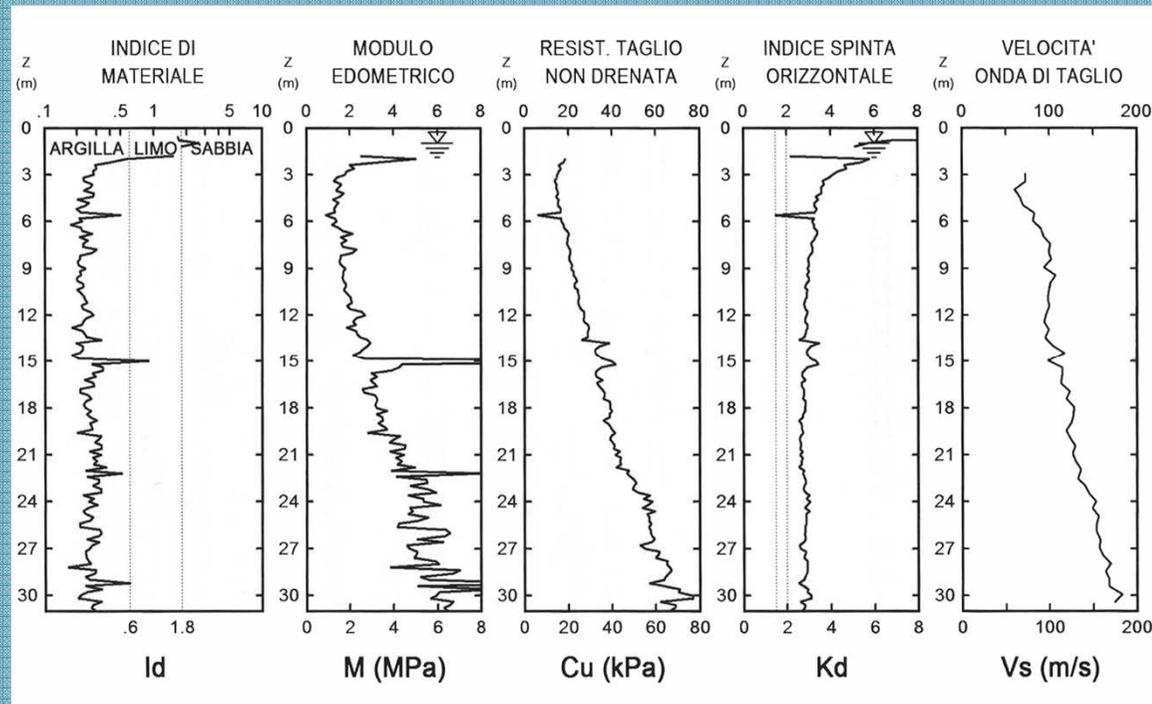
Dilatometro Marchetti 'classico' (DMT) + 2 geofoni = 'dilatometro sismico'



interpretazione mediante velocità d'intervallo
(sfasamento del segnale tra i due ricevitori)

Risultati di una prova con il SDMT

Parametri misurati tradizionalmente

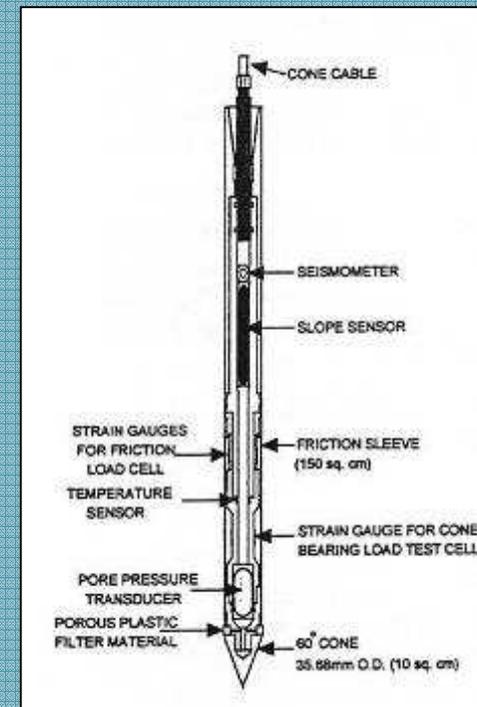
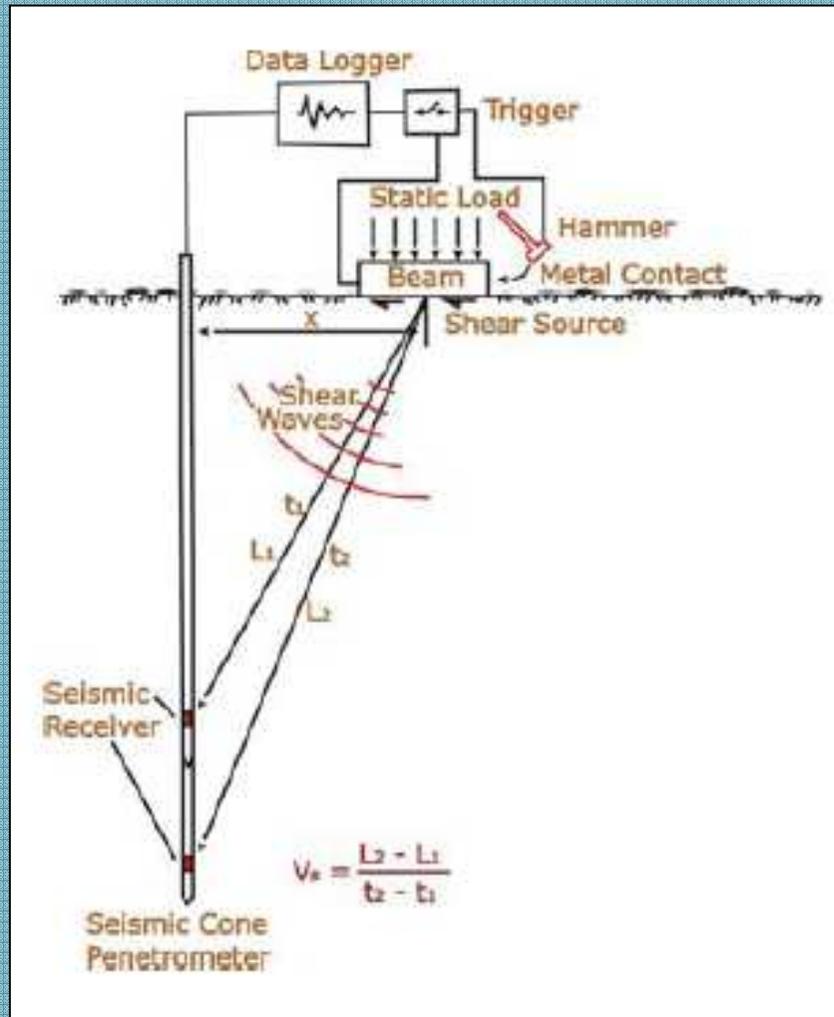


Profilo di V_s in buon accordo con prove Cross-Hole

Il piezocono sismico (SCPT)

Automezzo per trasporto e contrasto

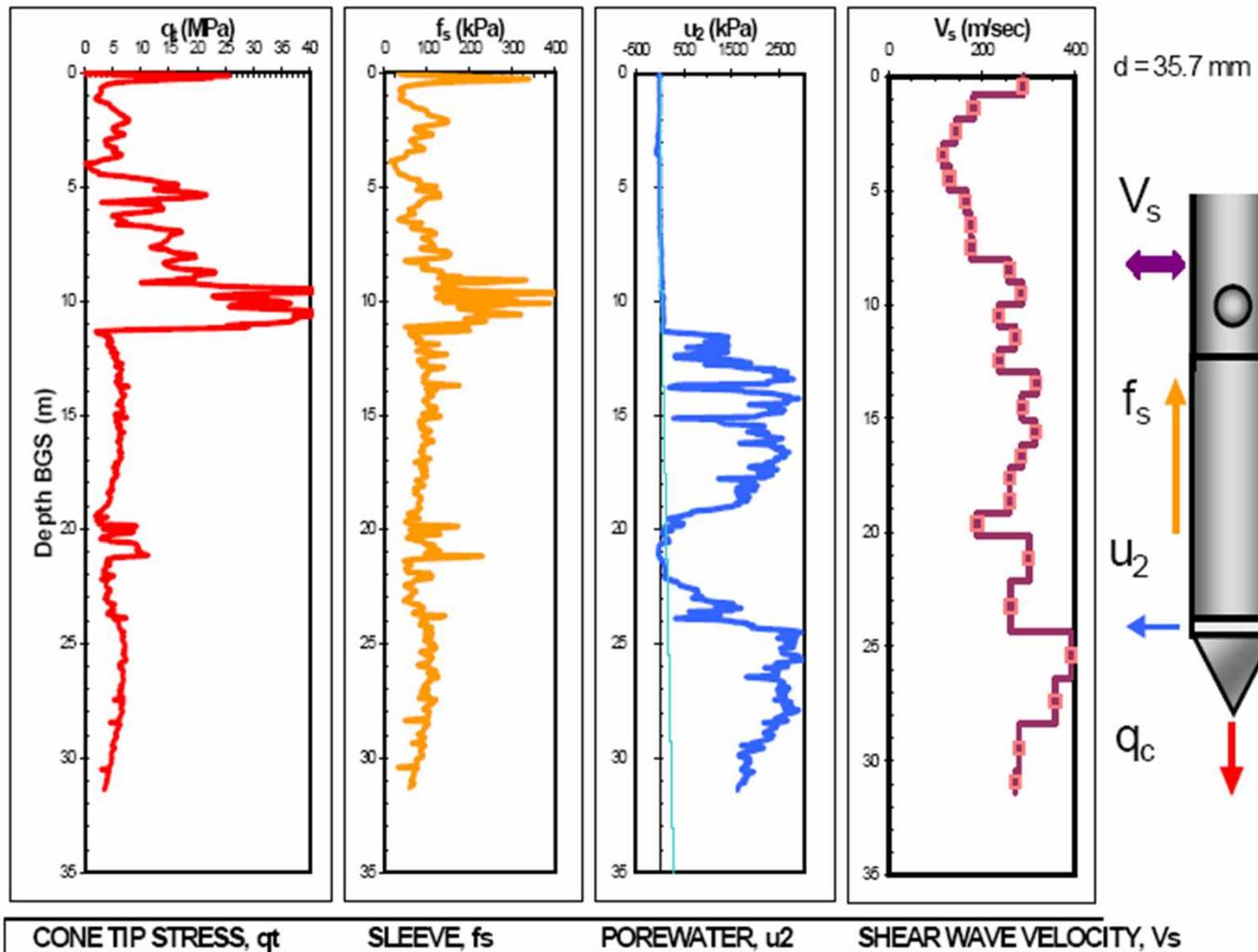
Schema di esecuzione



Punta con trasduttori

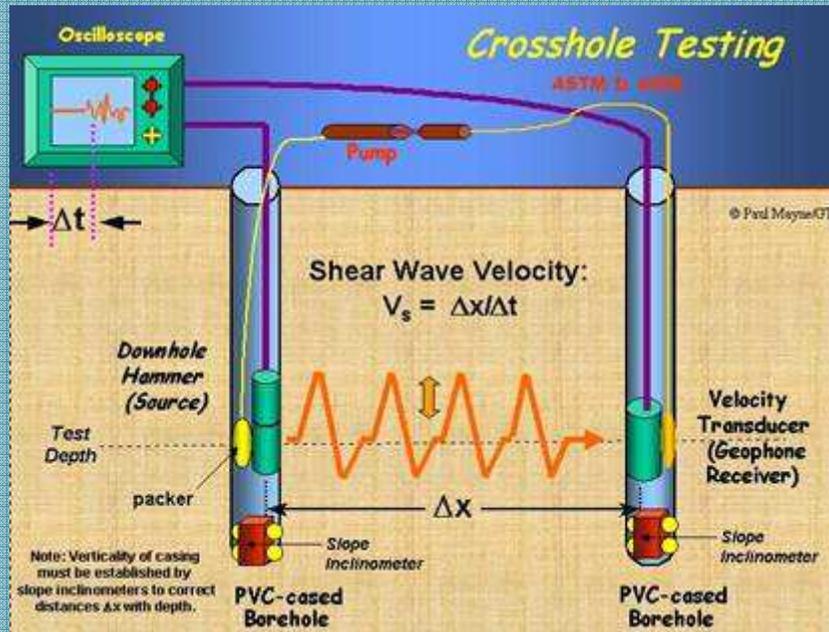
Risultati di una prova con il SCPT

Parametri misurati tradizionalmente



Prove sismiche in foro: Cross-Hole

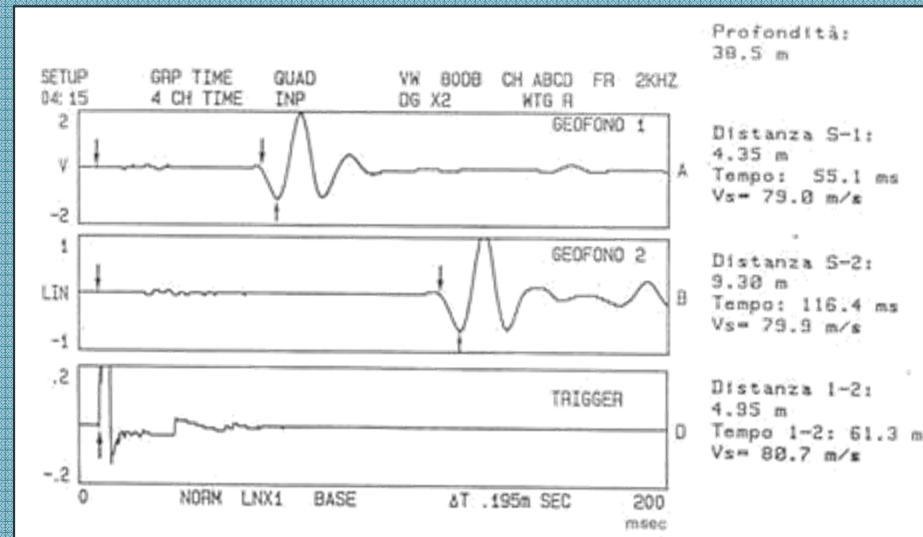
Cross-Hole (CH)



- ⇒ sorgente verticale ad impatto
- ⇒ necessari almeno due fori
- ⇒ ampiezza onde indipendente da z

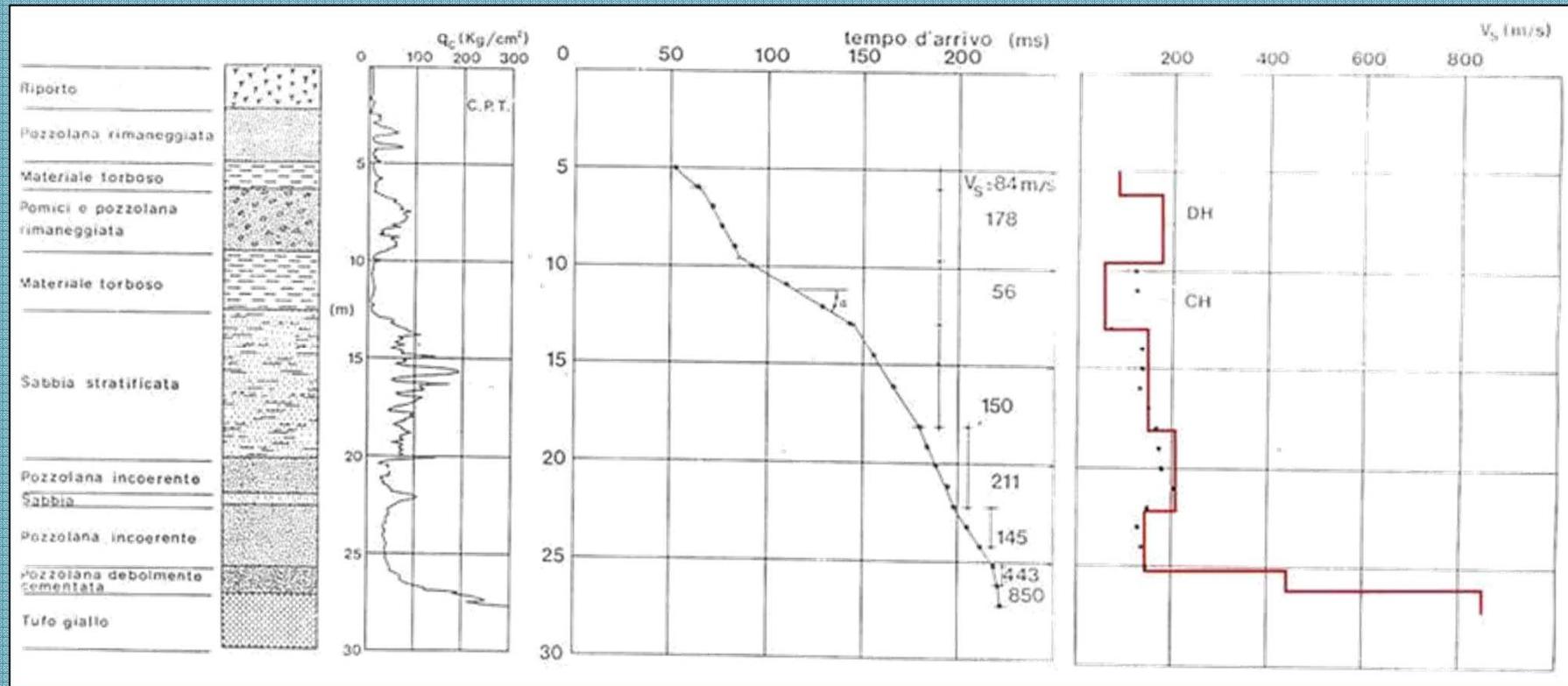
Variante con 2 ricevitori (e 3 fori):
permette di leggere i 'tempi di intervallo'
e di applicare l'analisi di Fourier

Tempi di arrivo sorgente – 1° e 2° ricevitore:



Profili di velocità da prove sismiche in foro

In presenza di strati deformabili 'intrappolati' tra terreni più rigidi, la prova DH può addirittura risultare più affidabile della prova CH

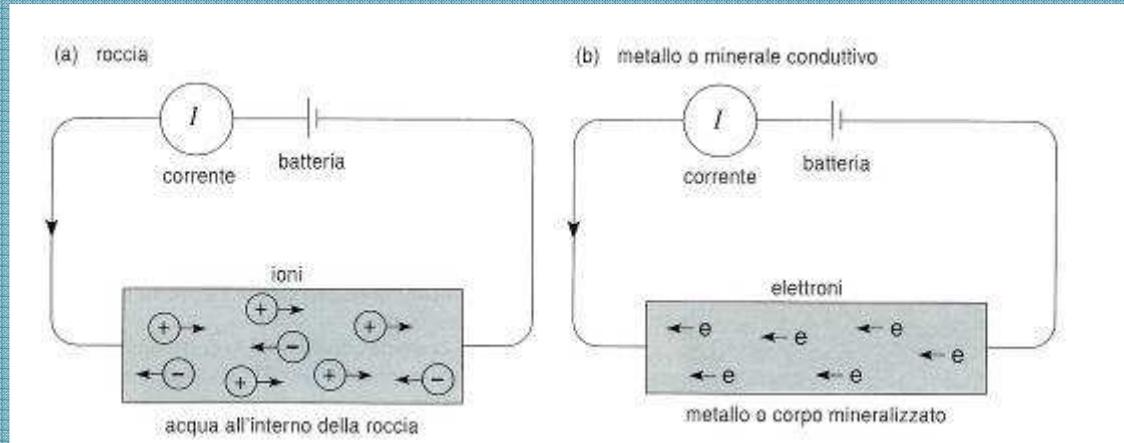


Prove DH e CH nei terreni piroclastici di Poggioreale (zona E di Napoli)

Indagini geoelettriche

Principio:

- generare un campo elettrico nel sottosuolo con **coppie di generatori ('dipoli')**
- registrare gli effetti con uno o più **misuratori di corrente ('galvanometri')**
- ottenere le **resistività elettriche ρ** a distanze (\rightarrow spessori) variabili



La resistività cresce:

- con l'aumento di dimensione dei grani
- con l'aumento della cementazione

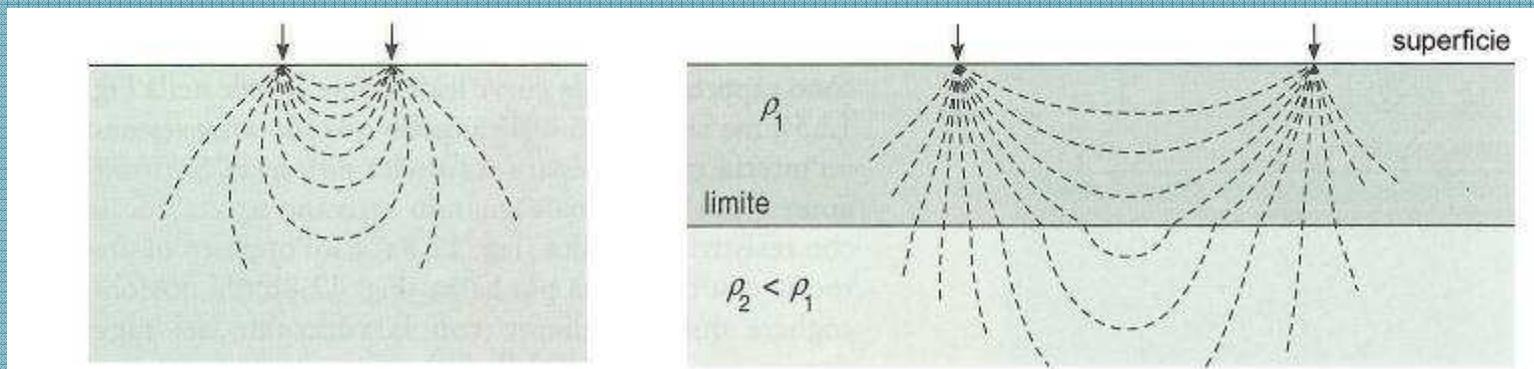
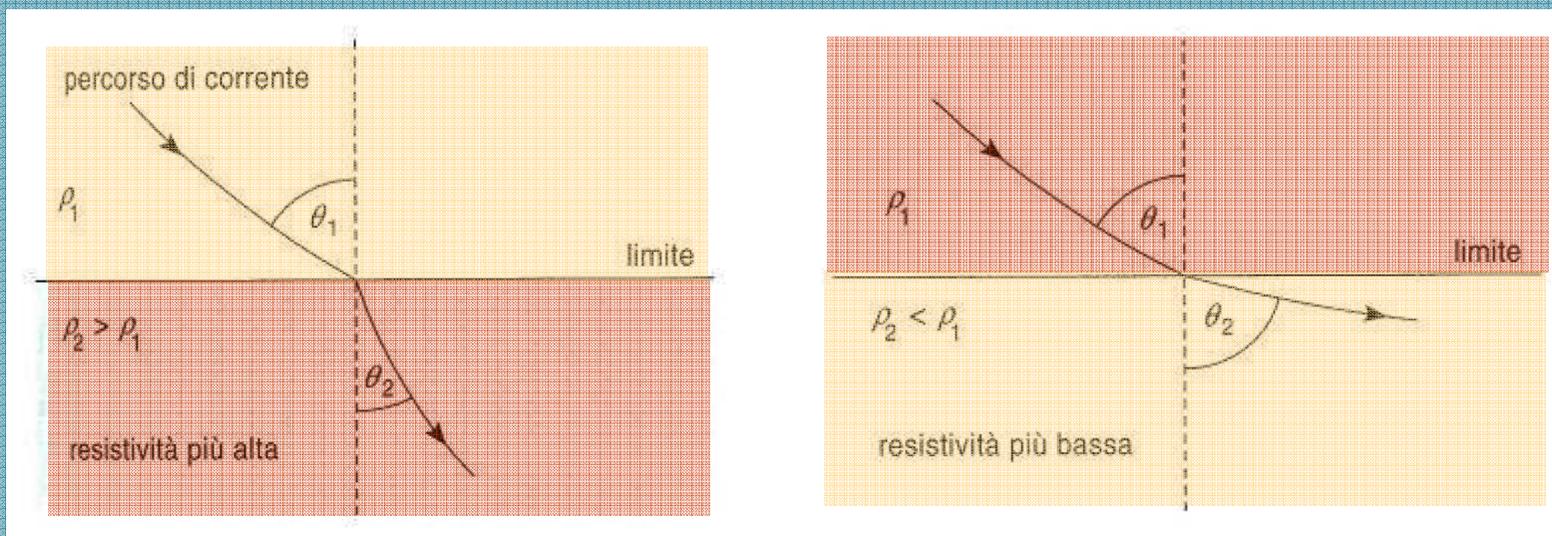
quindi $\rho_{\text{argilla}} < \rho_{\text{sabbia}} < \rho_{\text{roccia}}$

Rocce, minerali, minerali metallici	Resistività (ohm·m)
Sedimentarie	
calcare chalk	50-150*
argilla	1-100
ghiaia	100-5000
calcare	50-10 ⁷
marna	1-100
quarzite	10-10 ⁸
argilla (shale)	10-1000
sabbia	500-5000
arenaria	1-10 ⁶
Ignee e metamorfiche	
basalto	10-10 ⁷
gabbro	1000-10 ⁷
granito	100-10 ⁹
marmo	100-10 ⁸
scisto	10-10 ⁴
ardesia	100-10 ⁷
Minerali e minerali metallici	
argento	1,6 × 10 ⁻⁸
grafite (giacimento massivo)	10-4-10 ⁻³
galena (Pbs)	10 ⁻² -10 ²
magnetite di giacimento	1-10 ⁵
sfalerite (ZnS)	10 ³ -10 ⁶
pirite	1 × 100
calcopirite	1 × 10 ⁻⁵ -0,3
quarzo	10 ¹⁰ -2 × 10 ¹⁴
salgemma	10-10 ¹¹
Acque ed effetto del contenuto in sale	
acqua pura	1 × 10 ⁶
acque naturali	1-10 ³
acqua di mare	0,2
sale 20%	5 × 10 ⁻²
granito, 0% di acqua	10 ¹⁰
granito, 0,19% di acqua	1 × 10 ⁹
granito, 0,31% di acqua	4 × 10 ³

* I valori e gli intervalli, che sono tratti da varie fonti, sono soltanto approssimativi.

Indagini geoelettriche in mezzi eterogenei

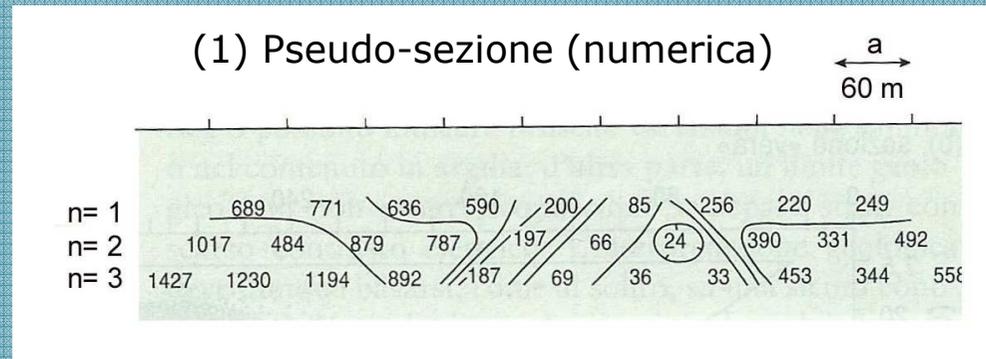
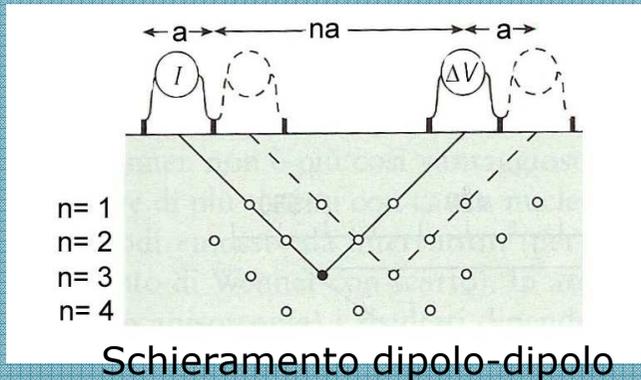
Le deviazioni delle linee di flusso (e quindi la resistenza misurata) sono condizionate da fenomeni di rifrazione alle interfacce



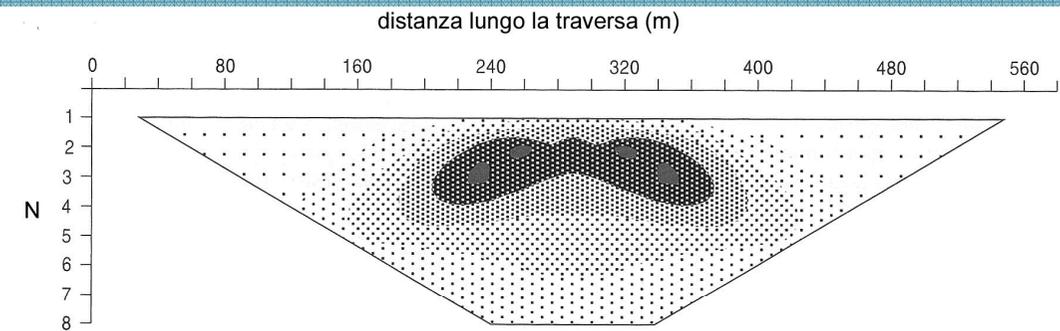
sottosuolo omogeneo

sottosuolo stratificato

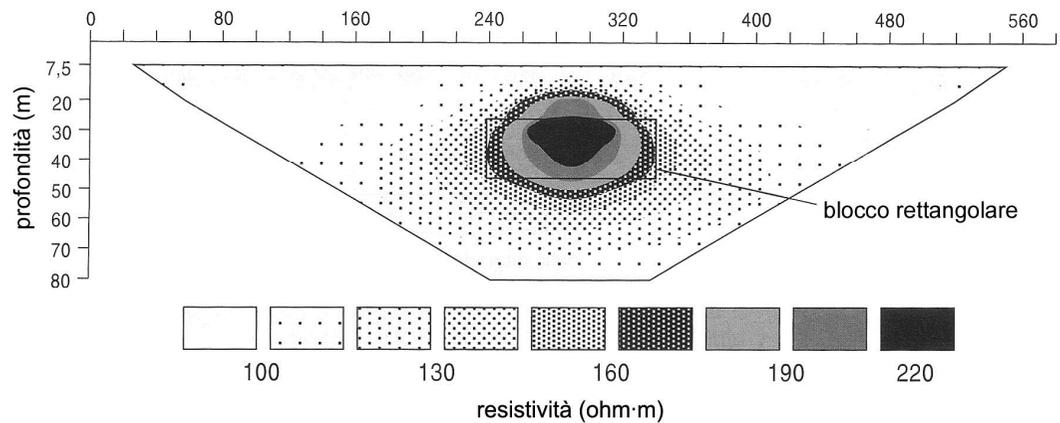
Tomografia di resistività elettrica (ERT)



(2) Pseudo-sezione (grafica)



(3) Sezione vera



Esecuzione di una tomografia geoelettrica (ERT)

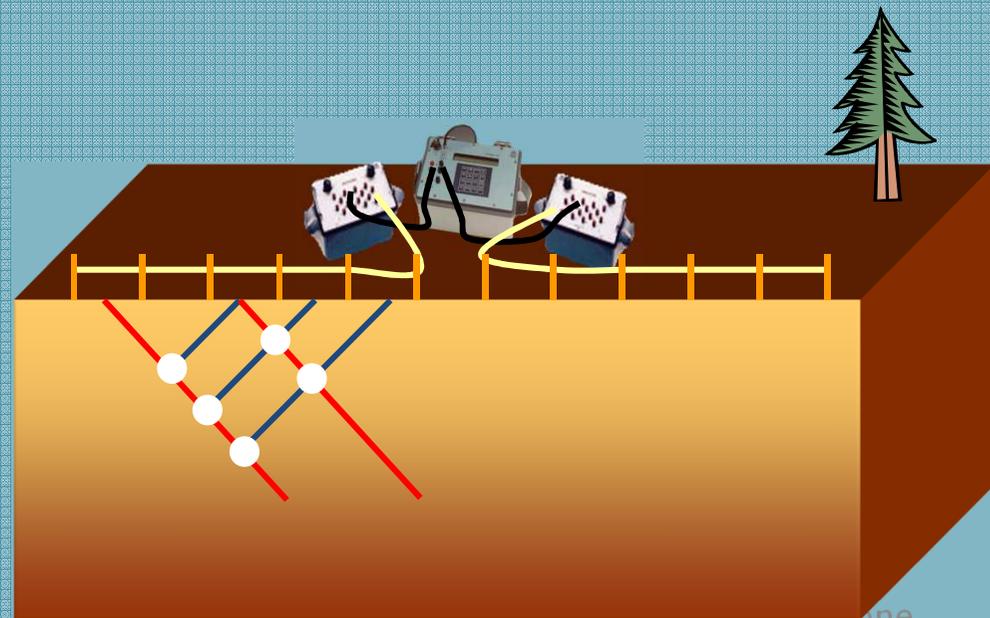
Laboratorio mobile



Georesistivimetro



Allestimento



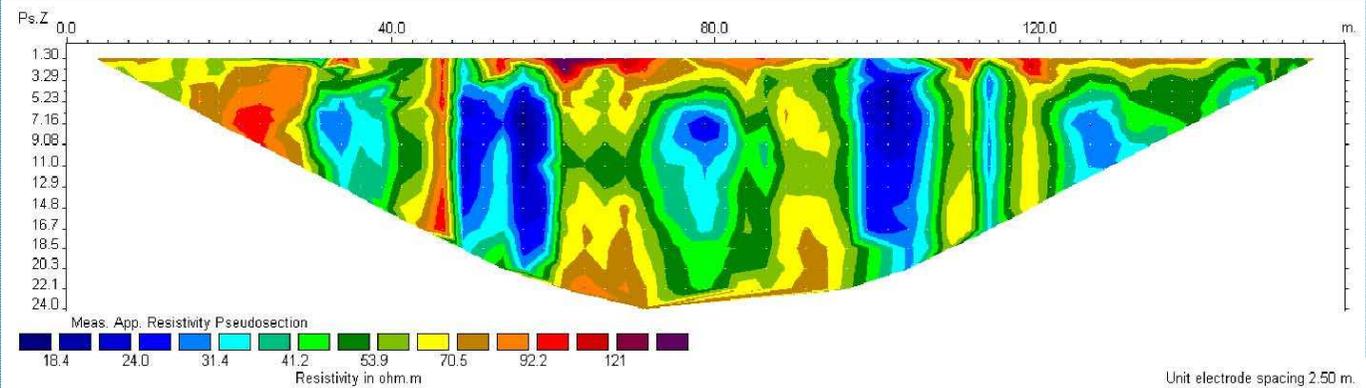
Esecuzione

Prove di espansione
e geofisiche

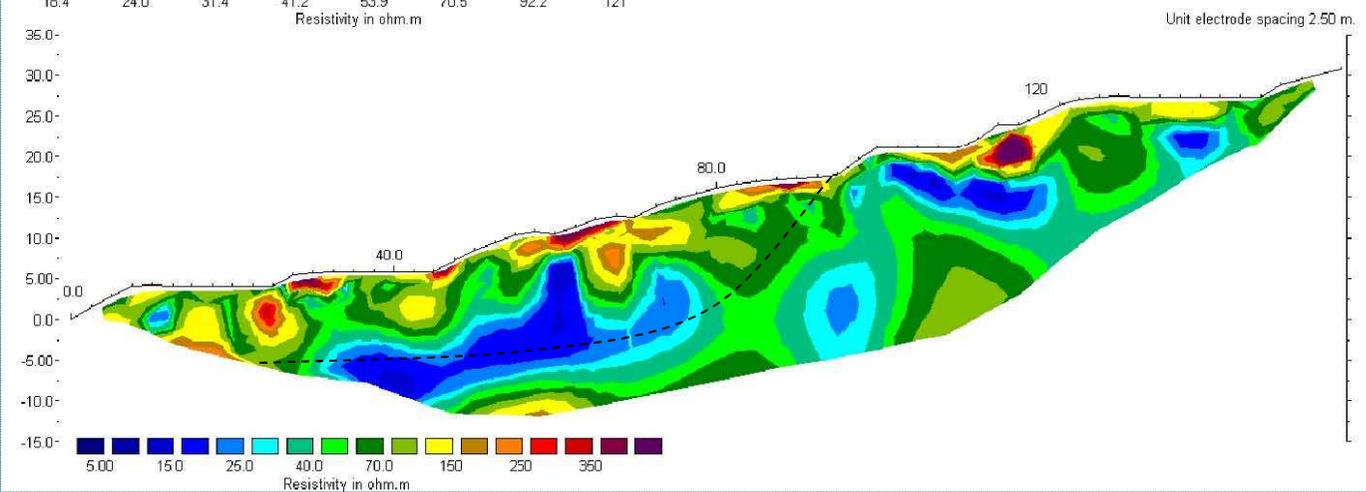
Tomografia geoelettrica (ERT) lungo una frana



Pseudo-sezione

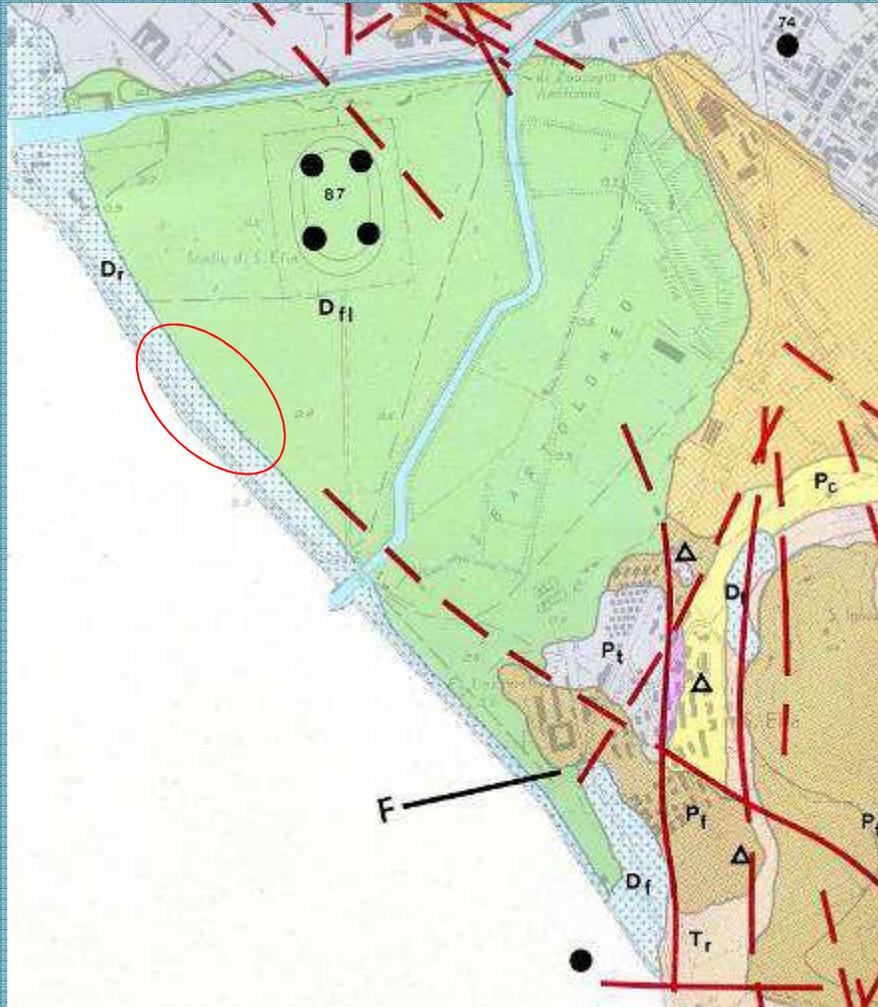


Sezione interpretata



Un caso di indagini geofisiche

Carta Geologica (1979)

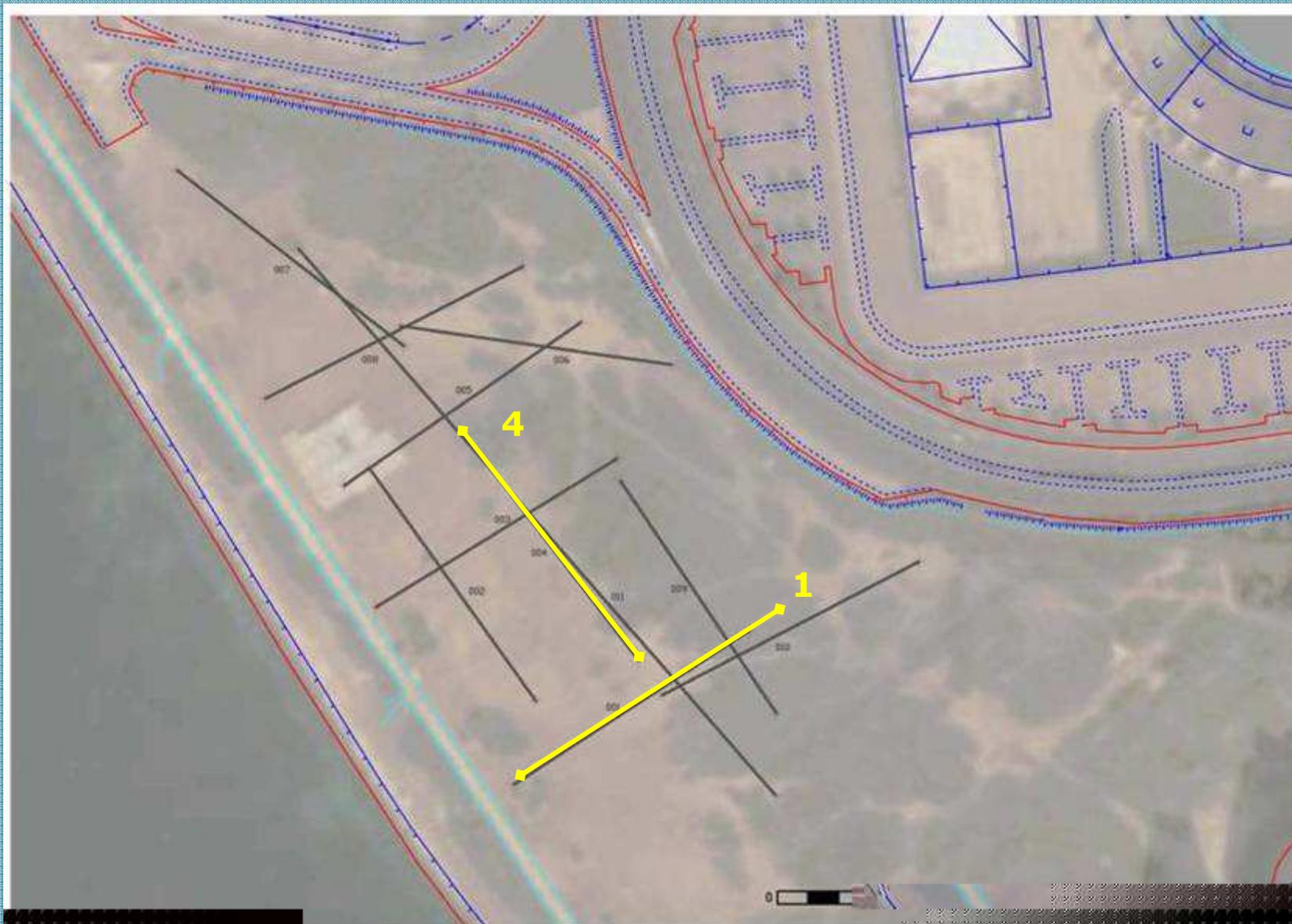


C.T.I. 1:25000 (1885)



D_{fl} = depositi fluvio-lacustri limo-argillosi
D_r = terreni di riporto

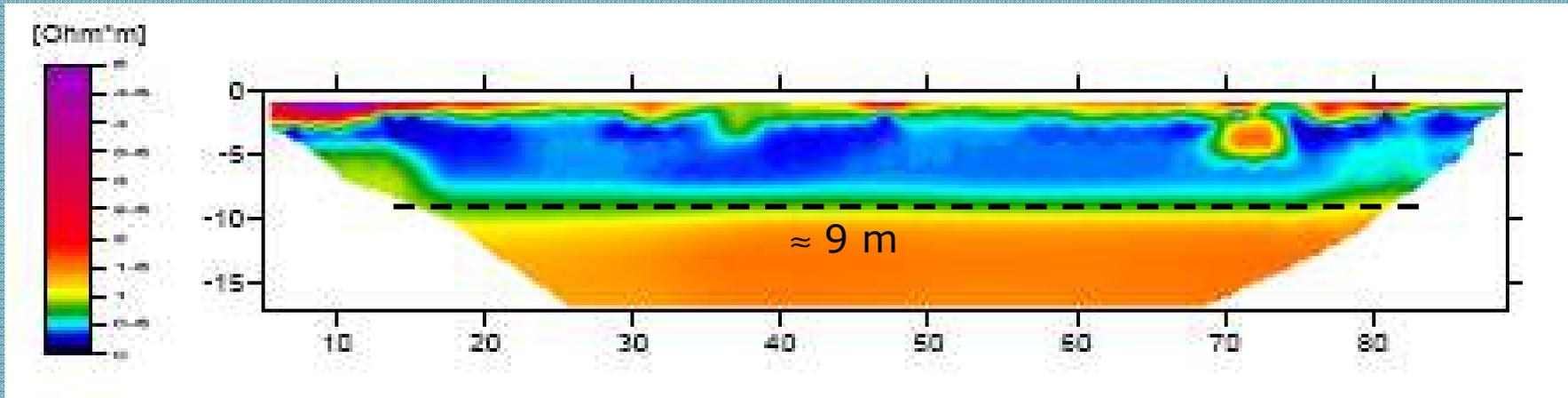
Piano di indagini elettriche



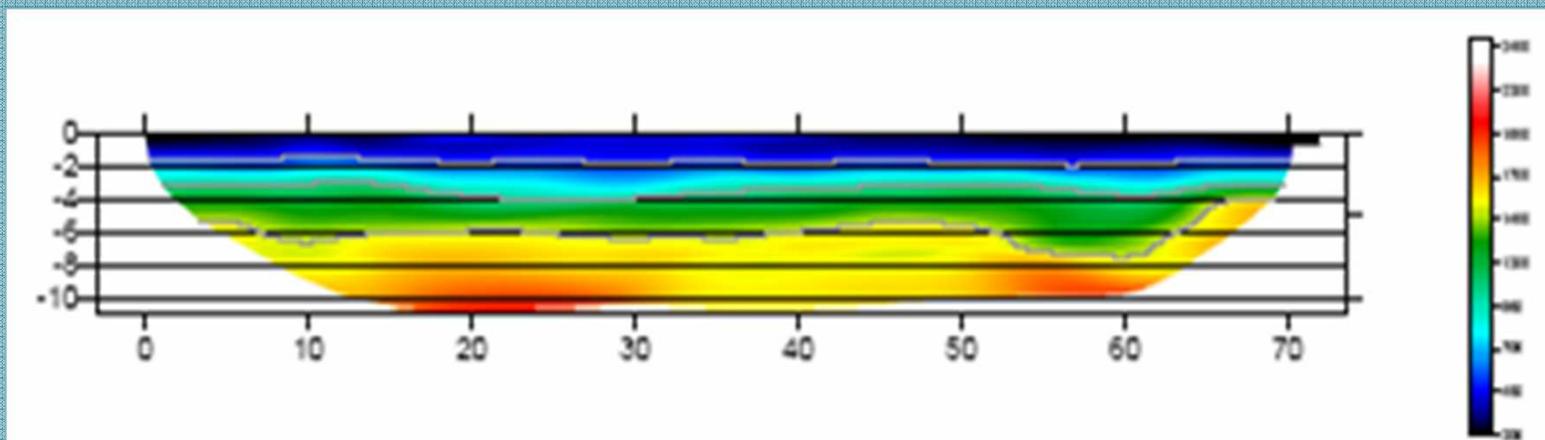
Piano di indagini sismiche



Sezioni SW-NE

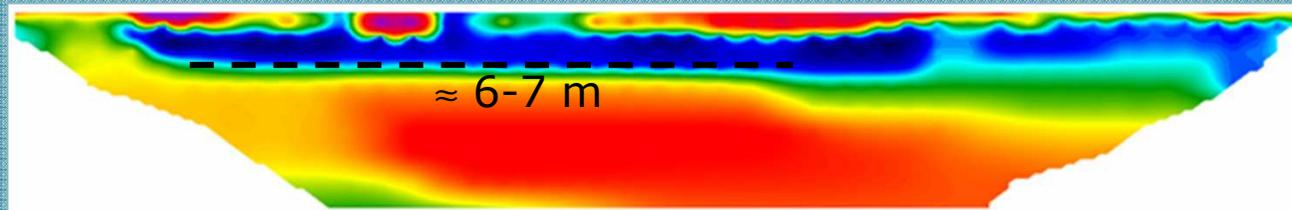


Tomografia elettrica 1

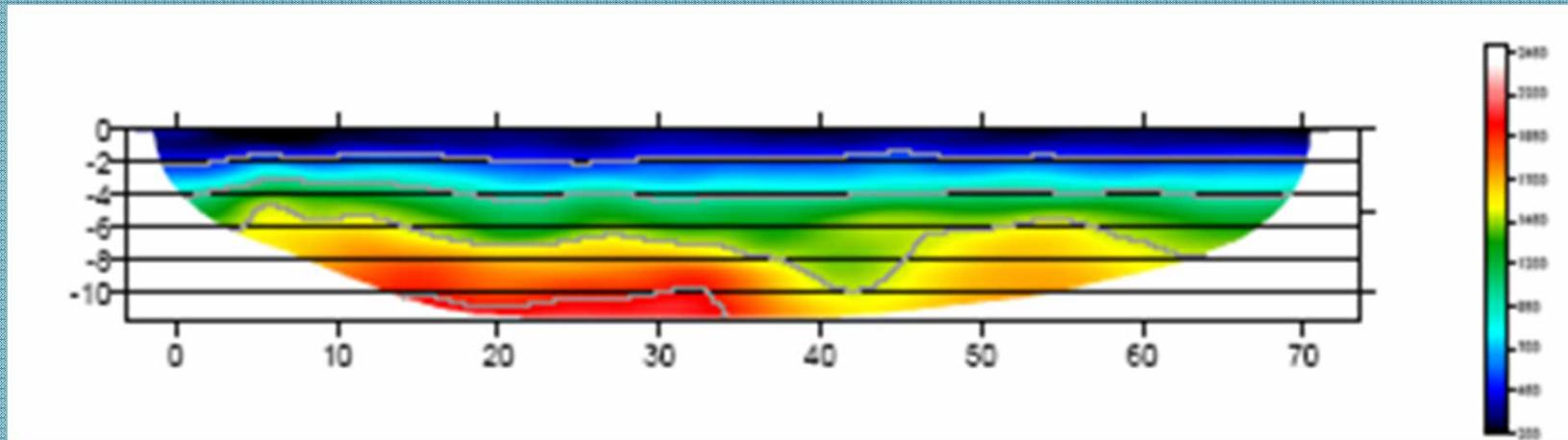


Linea sismica 3

Sezioni NW-SE

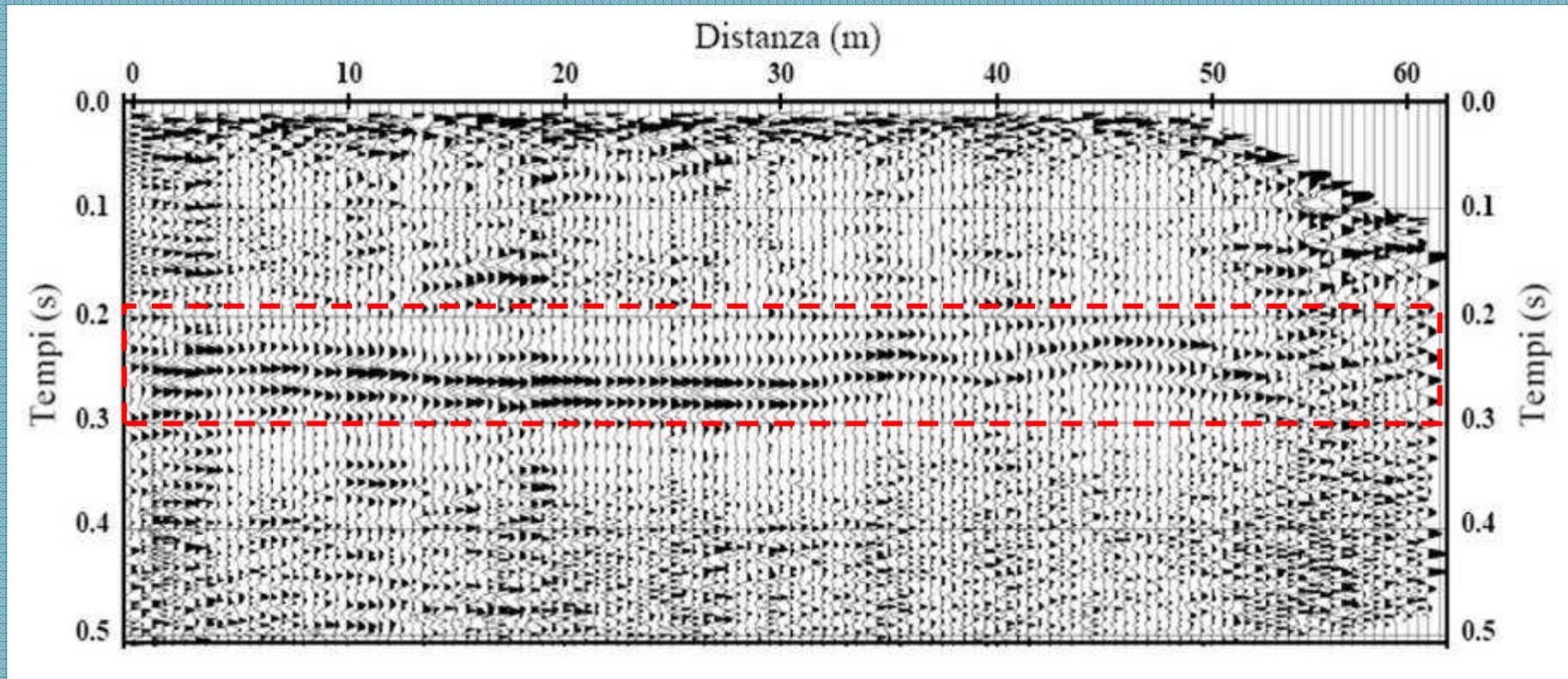


Tomografia elettrica 4



Linea sismica 5

Sismica a riflessione onde S (NW-SE)



E' evidente la presenza di una superficie 'riflettente' corrispondente a tempi di propagazione compressiva (a/r) di $\cong 250$ ms, cioè ad una variazione litologica a circa 16m.

Modello di sottosuolo 3D

