

COMUNE DI PALERMO



COMMITTENTE:



DIREZIONE LAVORI:



IMPRESA ESECUTRICE:



## PROGETTO ESECUTIVO

### PRIMO LOTTO FUNZIONALE CHIUSURA DELL'ANELLO FERROVIARIO IN SOTTERRANEO NEL TRATTO DI LINEA TRA LE STAZIONI DI PALERMO NOTARBARTOLO E GIACHERY E PROSEGUIMENTO FINO A POLITEAMA

STUDI, RILIEVI E INDAGINI - GEOLOGIA  
RELAZIONE GEOLOGICO – TECNICA (VOL. 4 di 5)

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
R S 7 2	0 1	E	Z Z	R B	G E 0 0 0 1	0 0 4	A

PROGETTAZIONE: ATI (Associazione Temporanea d'Imprese)



PROGIN SPA (Capogruppo Mandataria)



Sab (Mandante)

Revis.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato/Data
A	Emissione	Anselmo	12/03/10	Bellomo	12/03/10	S. Esposito

Nole del file: RS7201EZZRBGE0001004 A n: Elab.



Committente **TECNIS S.p.A.**  
 Cantiere **Chiusura anello ferroviario Notarbartolo-Giachery- Politeama**  
 Località **Palermo**  
 Data Inizio **30/01/10**      Data Fine **05/02/10**

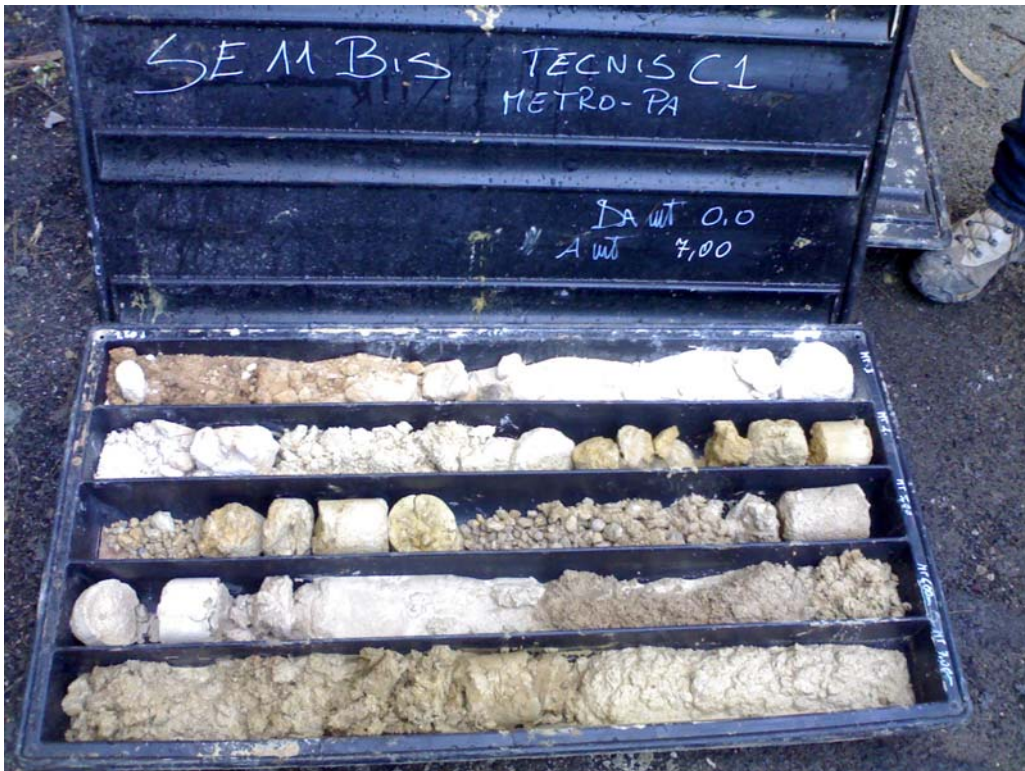
SONDAGGIO **SE11**      FOGLIO  
**bis**  
 Il geologo  
**Dr. G. Anselmo**

Stratigrafia	Profondita'	Livello piezometrico	S.P.T.				Campioni	Descrizione
			10	20	30	40		
								Terreno di riporto
	3.00							Calcarenite tenera di colore giallastro con intercalati sottili livelli cementati centimetrici e sottili livelli sabbiosi centimetrici
	4.10							Biocalcarenite cementata
	4.50							Sabbie fini con inclusi elementi lapidei di natura calcarenitica centimetrici
	4.90							Sabbie di colore ocre
	6.00							Sabbie limose con inclusi elementi calcarenitici centimetrici
	7.00							Sabbie limose di colore nocciola con inclusi elementi di natura calcarenitica centimetrici
	8.50		8.00	8.45				Sabbie limose di colore nocciola con inclusi elementi calcarenitici centimetrici
	9.50	9.50						
	11.00							Sabbie limose di colore ocre con inclusi elementi calcarenitici centimetrici
	12.50		12.00	12.45				Quarzarenite fratturata
	14.00							Sabbie con inclusi elementi quarzarenitici
	15.50							Sabbie fini con inclusi elementi quarzarenitici
	16.80							Argilliti di colore grigio scuro, molto consistenti. Sono presenti elementi di natura quarzarenitica
	17.50						C1	
	18.00							
	19.10						C2	
	19.50							
	20.80							
	20.90						C3	
	21.50		21.43					Quarzareniti
	22.50							Argille di colore tabacco, plastica, a struttura scagliettata
	22.70							Argilliti lapidee a struttura scagliettata
	25.50							Quarzareniti
	26.50							

*Postazione sondaggio SE11BIS*



*Foto cassetta C1*



*Foto cassetta C2*



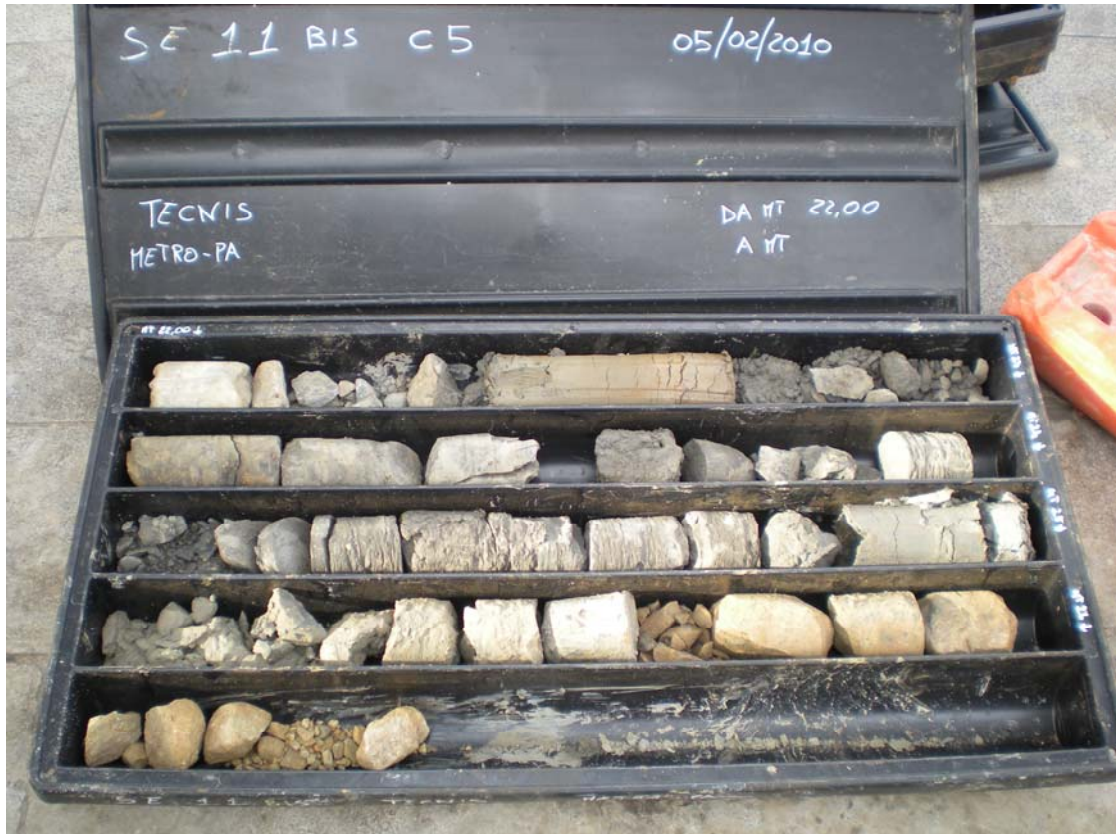
Foto cassetta C3



Foto cassetta C4



*Foto cassetta C5*





Committente **TECNIS S.p.A.**  
 Cantiere **Chiusura anello ferroviario Notarbartolo-Giachery - Politeama**  
 Località **Palermo**  
 Data Inizio **22/01/10**      Data Fine **26/01/10**

SONDAGGIO    FOGLIO  
**SE12**  
 Il geologo  
**Dr. G. Anselmo**

Stratigrafia	Profondita'	Livello piezometrico	S.P.T.	Campioni	Descrizione	Down Hole
			10 20 30 40		Terreno di riporto	
	1.50				Calcarenite cementata di colore biancastro	
	1.70				Sabbie di colore biancastro, a granulometria media, con inclusi elementi lapidei di natura calcarenitica	
	2.10				Calcarenite cementata	
	2.70				Calcarenite di colore ocra, a struttura nodulare. E' presente un livello calcarenitico cementato con grossi bioclasti alla profondità compresa tra 4.7 e 5.9 m	
	6.00				Calcarenite di colore ocra, a struttura nodulare con sabbie fini limose	
	11.00				Sabbie fini limose scarsamente addensate	
	12.00			11.30 11.70	Sabbie fini debolmente limose con inclusi elementi lapidei centimetrici di natura calcarenitica	
	13.00		12.60 13.50	19 45	Limi sabbiosi, plastici con inclusi elementi lapidei di natura calcarenitica di taglia da centimetrica a decimetrica	
	13.90				Limi sabbiosi plastici con fossili di colore bianco di dimensioni millimetriche	
	15.00		15.30	31	Sabbie fini addensate, debolmente limose con inclusi gusci di bivalvi e fossili di piccola taglia	
	16.00		15.75	42	Limi sabbiosi di colore grigio, plastici, con inclusi fossili di taglia millimetrica di colore bianco	
	20.30			17.00 17.40	Sabbie limose, addensate, di colore tabacco con inclusi ciottoli di trovanti di natura quarzarenitica di grossa taglia	
	23.00				Limi sabbiosi con inclusi ciottoli quarzarenitici di colore grigiastro	
	24.00		24.00 24.45	10 21	Argilla alterata a struttura scaliettata, consistente con inclusi elementi lapidei di natura argillitica consistenti. Fm. Flysch Numidico	
	25.00		26.00	21	Sabbie debolmente limose di colore grigio con inclusi trovanti quarzarenitici	
	27.00		26.45	46	Quarzarenite, litoide. Fm. Flysch Numidico	
	31.00			26.50 27.00		

*Postazione sondaggio SE12*



*Foto cassetta C1*





Foto cassetta C2



Foto cassetta C3



Foto cassetta C4

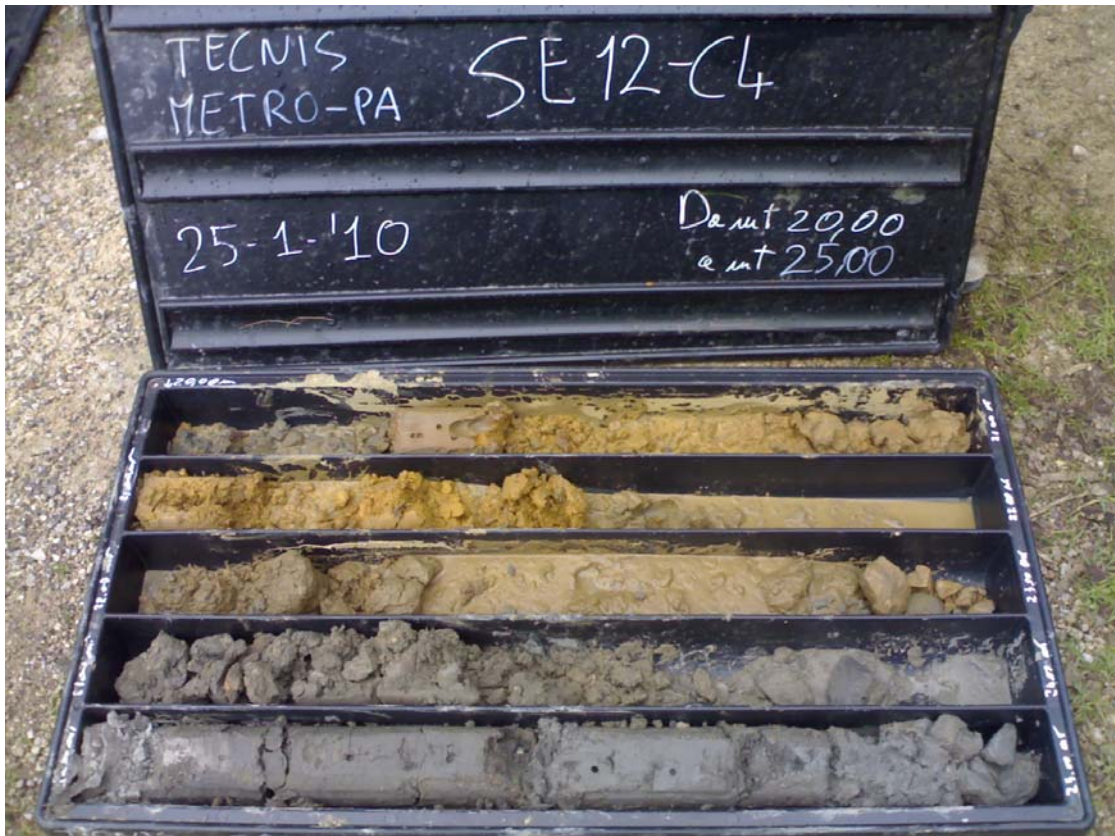
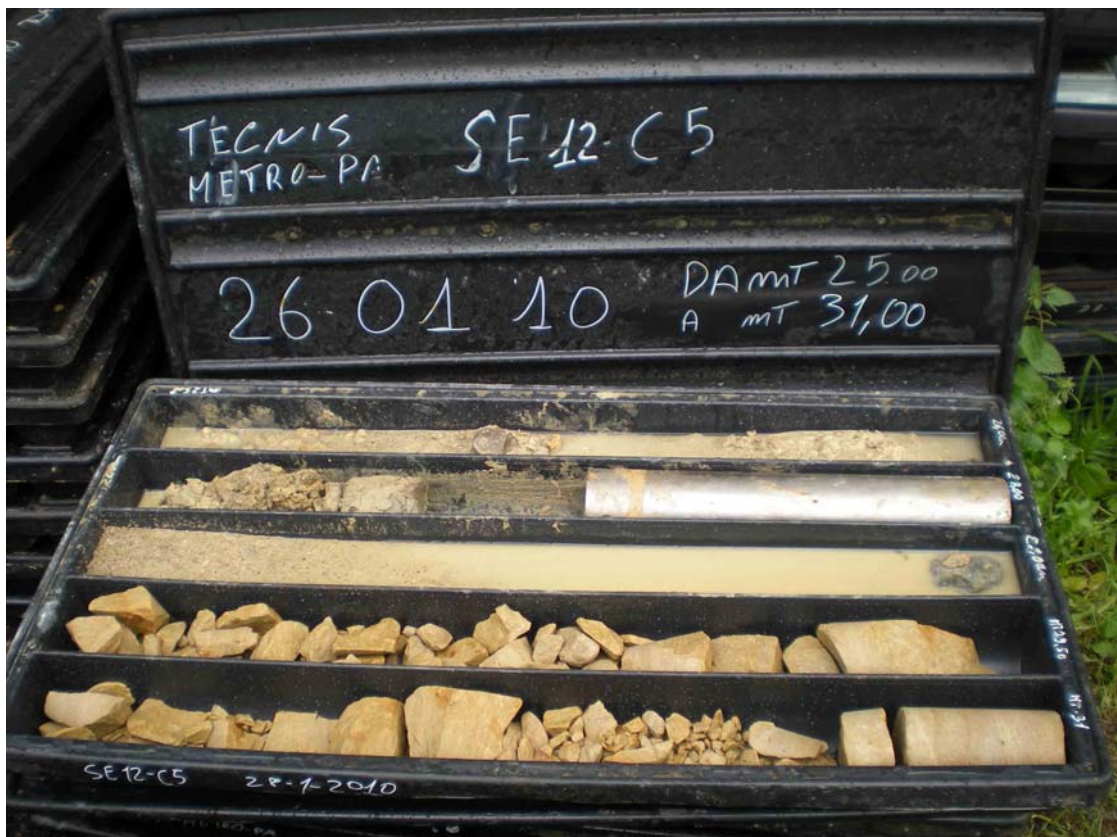


Foto cassetta C5



### 6.3 STANDARD PENETRATION TEST

Nel corso dei sondaggi geognostici, sono state esperite, per la caratterizzazione geotecnica numerose prove dinamiche discontinue S.P.T. in foro, alle profondità indicate nei moduli stratigrafici.

#### *Normativa di riferimento*

Le prove sono state eseguite in avanzamento, facendo riferimento alla normativa ASTM n° D. 1586/68 (Standard Penetration and Split-Barrel Sampling of Soil).

#### *Attrezzatura utilizzata*

Le caratteristiche dell'attrezzatura utilizzata, in conformità alla normativa sopra richiamata, sono le seguenti:

- campionatore tipo Raymond, apribile longitudinalmente, diametro  $\Phi$  est 50.0 mm e  $\Phi$  int 35.0 mm, lunghezza utile 630 mm, munito di valvola a sfera alla sommità e con utensile di avanzamento costituito da scarpa o da punta conica, in funzione della composizione granulometrica dei livelli attraversati;
- massa battente di peso pari 63.5 Kg, con l'altezza di caduta uguale a 762 mm, munita di dispositivo automatico di sganciamento;
- aste collegate al campionatore aventi peso pari a 6.5 Kg/ml;
- centratore di guida e di irrigidimento installato tra la testa di battuta in sommità e il piano di campagna;
- differenza fra il diametro esterno delle aste e il diametro della tubazione di rivestimento non superiore a 60 mm.

### *Metodologia di esecuzione*

Le prove SPT consistono nell'infliggere nel terreno alla base del preforo il campionatore per tre tratti consecutivi, ciascuno pari a 15 cm, rilevando il numero di colpi necessario per la penetrazione di ciascun tratto.

Il valore N, utile ai fini della parametrizzazione geotecnica, è dato dalla somma dei colpi impiegati per il 2° e il 3° tratto.

La prova può essere sospesa quando il numero dei colpi, per un tratto di 15 cm, superi il valore 50 (Rifiuto): in tale caso si annota la penetrazione in centimetri ottenuta con 50 colpi.

Prima di eseguire ciascuna prova è stata controllata la quota del fondo, confrontandola con quella raggiunta con la manovra di perforazione precedentemente effettuata.

Per evitare che l'attrito tra il terreno e le aste inserite all'interno del foro potesse influenzare il numero reale dei colpi utili per l'infissione, falsando l'interpretazione dei risultati, si è proceduto ad inserire progressivamente i tubi di rivestimento.

Negli appositi spazi dei moduli stratigrafici presentate di seguito sono riportati per esteso i risultati di tutte le prove S.P.T. eseguite.

### *Interpretazione dei risultati ottenuti*

La prova penetrometrica dinamica consiste nella misura della resistenza alla penetrazione di un apposito utensile di dimensioni e caratteristiche standard, fatto avanzare nei terreni per mezzo di un dispositivo a percussione.

Durante l'infissione viene registrato il numero di colpi N necessario per ottenere un determinato avanzamento del campionatore.

La prova consiste nell'infiggere nel terreno l'utensile per tratti consecutivi, rilevando il numero di colpi (N) necessario per la penetrazione di ciascun tratto di 15 cm.

Il valore di NSPT è dato dalla somma dei colpi ottenuti per due tratti (N30).

La prova viene sospesa quando il numero di colpi N, per un tratto di 15 cm, supera 50. In tal caso si annota la penetrazione (in cm) ottenuta con i 50 colpi.

Per poter poi correlare opportunamente i valori forniti dalle prove ai parametri geotecnici dei terreni occorre tenere in debita considerazione fattori (quali granulometria del terreno, la presenza dell'acqua, le tensioni efficaci in sito) che influenzano i valori della resistenza della penetrazione.

Per quanto riguarda gli aspetti relativi alle tensioni efficaci in sito si è ritenuto fin dagli anni cinquanta (Terzaghi e Peck, 1948; Meyerhof, 1956) che le tensioni citostatiche fossero distrutte dalle azioni dinamiche create dalle prove e che pertanto i valori di NSPT non fossero influenzati dalla profondità della prova.

Successivamente evidenze sperimentali in sito (Lacroix e Horn, 1973) e in laboratorio (Gibbs e Holtz, 1957; Schultze, 1965; Bienagousky e Marcuson, 1976) hanno confermato che le tensioni efficaci hanno un'influenza fondamentale sul valore di NSPT.

Infatti, da prove penetrometriche SPT eseguite (Jamiolkowski e Pasqualini, 1974) dal piano di campagna sono stati ottenuti i valori di NSPT superiori a quelli ottenuti sullo stesso sito dopo aver eseguito uno scavo di circa 8 m; i valori inferiori di quest'ultimo sono dovuti all'effetto della diminuzione delle tensioni efficaci.

Peck e Bazaraa sulla base di correlazione dei risultati di un numero notevole di prove SPT e di prove di carico su piastra hanno suggerito di correggere i valori sperimentali NSPT mediante le seguenti espressioni:

$$N'SPT = 4 N SPT/1 + 4,097 \delta \text{ per } \delta \geq 0,732 \text{ kg/cm}^2$$

$$N'SPT = 4 N SPT/3,25 + 1,024 \delta \text{ per } \delta < 0,732 \text{ Kg/cm}^2$$

in seguito Peck (1974) ha apportato delle modifiche, suggerendo di tenere conto delle influenze delle tensioni efficaci attraverso il coefficiente di correzione  $C_n$ ; per cui si ha:

$$N' SPT = C_n N SPT$$

con  $C_n = 0,77 \log 20/\delta$

$\delta$  = la tensione efficace agente alla profondità alla quale è eseguita la prova.

Nella figura sono riportate le correlazioni suggerite nel "Design Manual for soil Mechanics, Foundations and Earth Structures", cui sono sovrapposti i risultati di correlazioni fatte da Houston (1960), Fletcher (1965), Shioi e Fukuni (1982).

I parametri di deformabilità possono ricavarsi da correlazioni suggerite da Mitchell e Gardner (1975) riportate nei grafici allegati ove sono confrontati i valori del modulo confinato ( $M_o$ ) con i valori  $N' SPT$ .

Deuver (1982) osserva che il modulo di Young  $E$  e il valore di  $N SPT$  sono legati da una relazione espressa dall'equazione:

$$E = S1 + N' SPT + S2$$

ove i valori  $S1$  ed  $S2$ , costanti, sono riportati nella Tabella con riferimento a diversi tipi di terreno.

Per quanto riguarda il problema dell'influenza della presenza della falda d'acqua sui valori di NSPT, questo è stato affrontato da diversi autori (Schultze e Menzenbach, 1961; Schultze e Melzer, 1965; Gibbs e Holtz,

1957; Terzaghi e Peck, 1948; Peck e Bazaraa, 1969) con molta disparità di risultati e di giustificazione teoriche.

Prove eseguite in laboratorio (Gibbs e Holtz, 1957; Schultze e Melzer, 1965) conducono al risultato che la presenza dell'acqua fa diminuire i valori di NSPT (a parità di densità relativa, tensioni di confinamento e granulometria) e tale diminuzione è più risentita nelle sabbie grossolane che nelle sabbie fini. Tuttavia gli stessi Gibbs e Holtz sembrano molto perplessi sulla credibilità di questi risultati.

Conclusioni analoghe, anche se in misura molto meno pronunciata, sono ottenute da Schultze e Menzenbach, 1961, dall'analisi di prove condotte in situ.

Terzaghi e Peck ritengono che gli unici tipi di sabbie che risentono della presenza della falda d'acqua siano quelle fine e/o limose molto compatte e per esse quando il valore di NSPT misurato risulta superiore a 15, consigliano la seguente espressione correttiva:

$$N' = 15 + 0,5 (NSPT - 15) \text{ con } NSPT \geq 15,$$

il che equivale a prendere, come rappresentativi del terreno di fondazione, valori minimi di quelli misurati.

L'indagine "in situ" più sistematica per lo studio degli effetti dell'immersione delle sabbie molto fini (si intendono per sabbie molto fini quelli aventi diametro effettivo compreso tra 0,1 e 0,05 mm) e/o limose sui valori di NSPT è quella di Bazaraa (1967) e Peck e Bazaraa (1969) che hanno studiato i risultati ottenuti in fori di sondaggi situati in 11 differenti zone, mediando i valori di NSPT per una profondità di circa 1 metro sopra e sotto il livello della falda.

Risulta che, mediamente, il valore di NSPT sotto la falda è circa 1,7 volte superiore a quello ottenuto sopra di essa e che l'aumento è più pronunciato nel caso di sabbie sciolte che nel caso di sabbie dense. Tali

autori suggeriscono che la densità relativa di sabbie molto fini e/o limose immerse, in cui sia stato misurato il valore di NSPT, possa essere uguale a quella di una sabbia asciutta la cui resistenza alla penetrazione è data da:

$$N' = 0,6 \text{ NSPT per NSPT qualunque.}$$

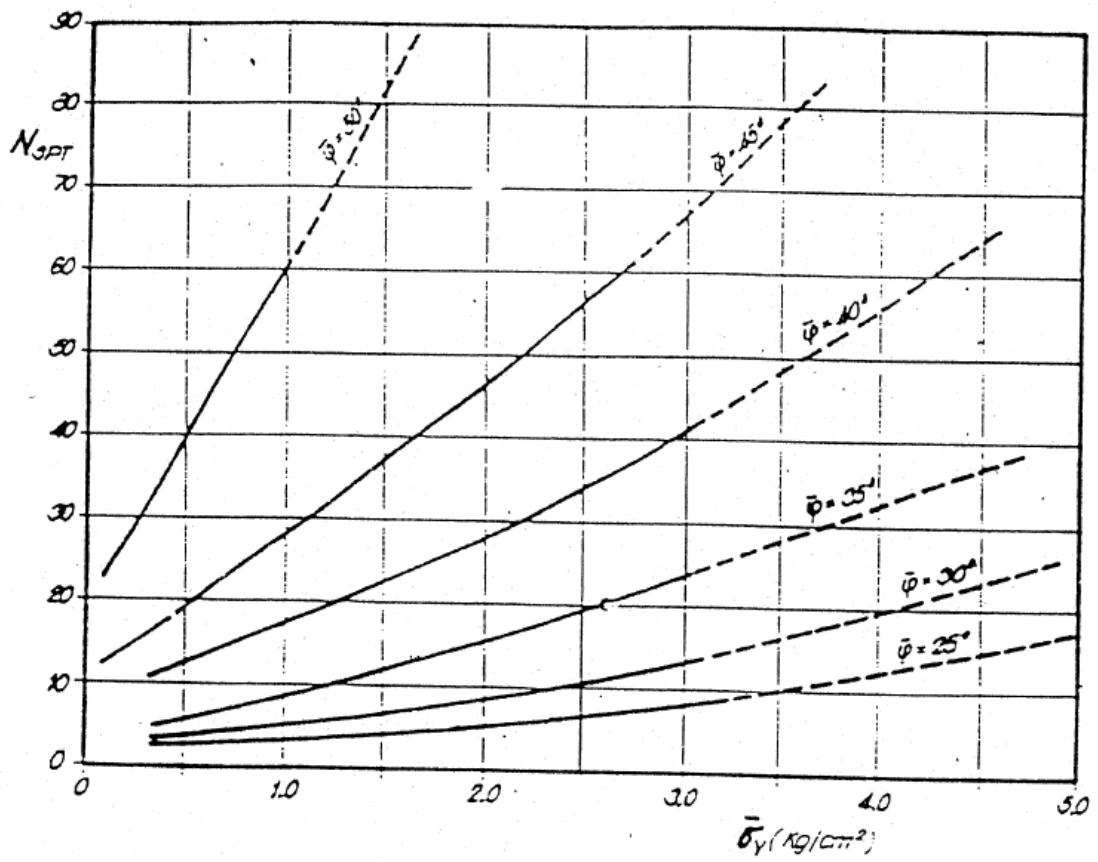
In generale, la maggior parte degli autori sono concordi nel trascurare l'effetto sui valori di NSPT della presenza della falda d'acqua nelle sabbie fini, medie e grossolane e di tenerne invece conto tramite la (1) nelle sabbie molto fini e/o limose compatte.

Per la valutazione della densità relativa "Dr" si può fare riferimento alle correlazioni empiriche di Terzaghi- Peck, riportate in grafico.

L'angolo d'attrito interno si può stimare tramite altre correlazioni empiriche come ad esempio quella di Peck-Hanson-Thorborn o di Meyerof riportate anche esse in grafico.

Una ulteriore correlazione tra i risultati delle prove penetrometriche dinamiche e le caratteristiche di resistenza meccanica dei terreni è stata proposta da De Mello (1973).

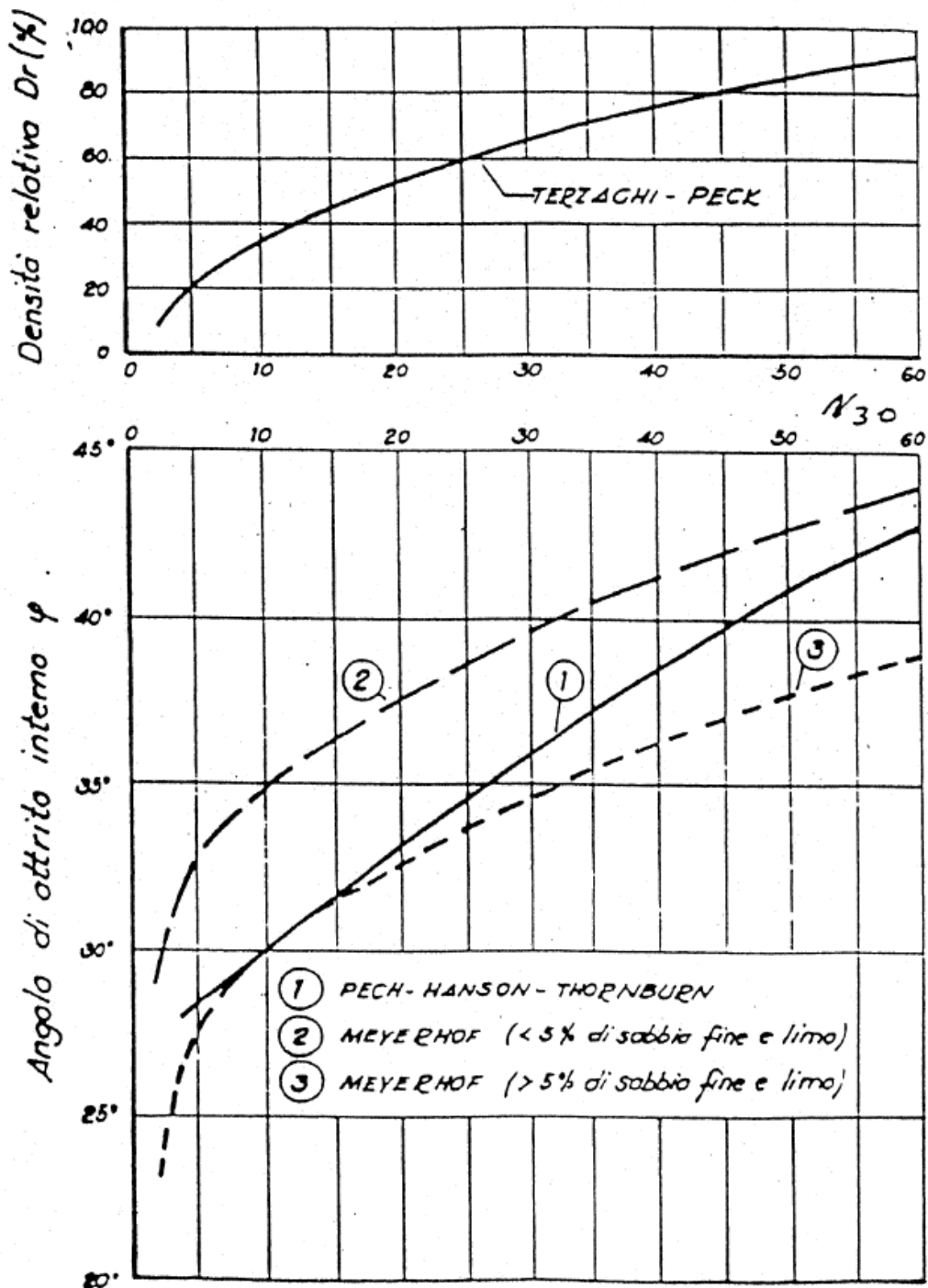


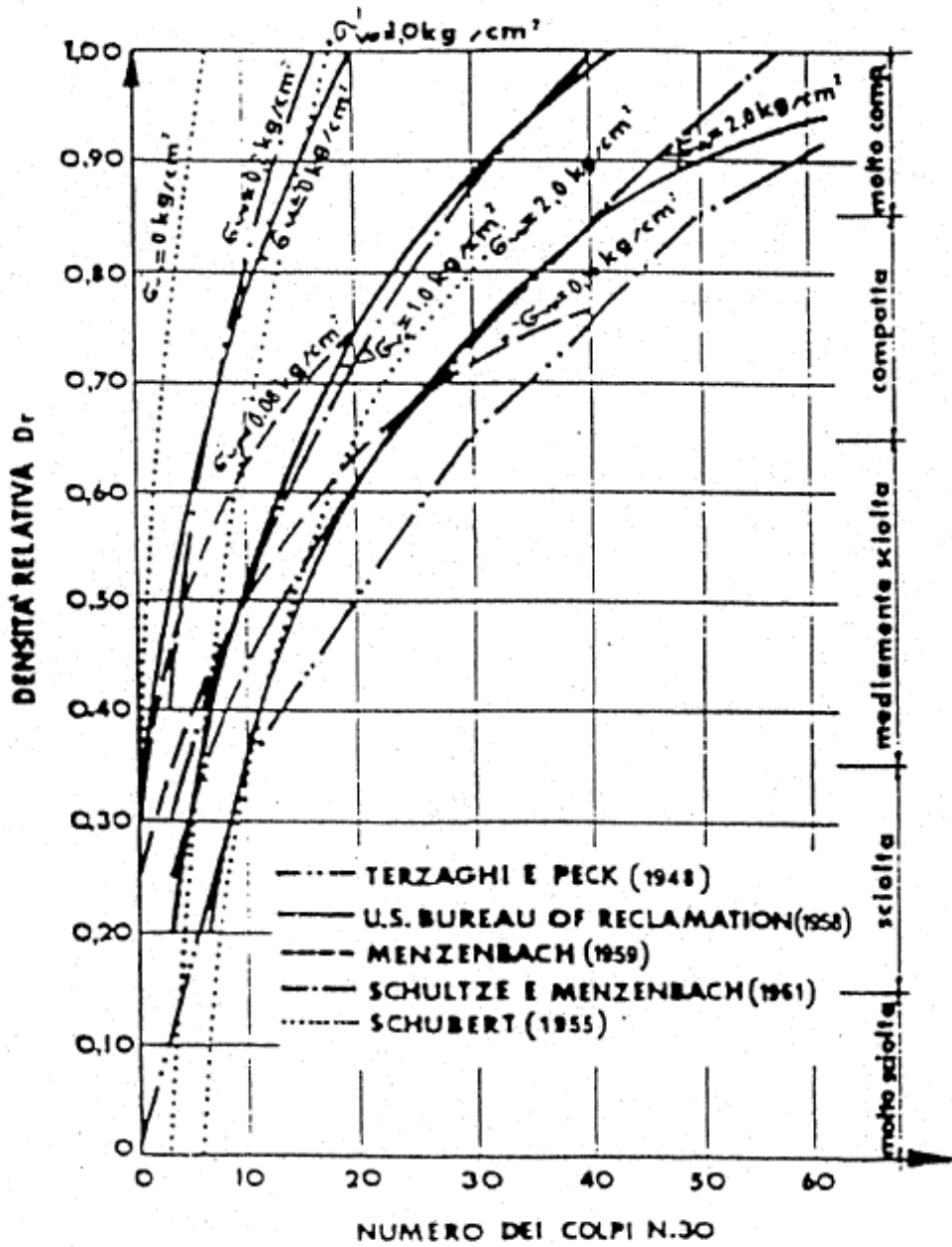


- CORRELAZIONE  $\bar{\varphi} = f(N_{SPT}, \bar{\sigma}_Y)$   
 SECONDO DE MELLO (1971)

# STANDARD PENETRATION TEST

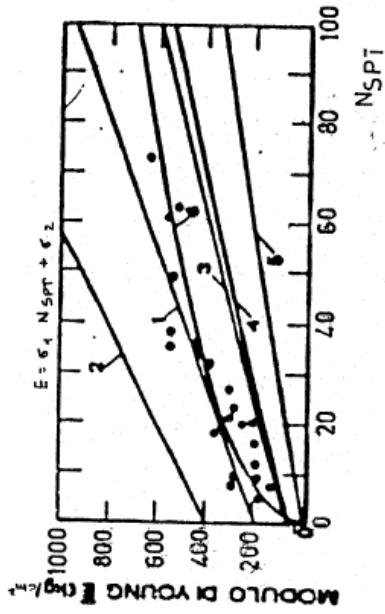
**CORRELAZIONI FRA N, DENSITA' RELATIVA E ANGOLO D'ATTRITO**  
(TERRENI SABBIOSI)





$G_v$  - tensione naturale efficace

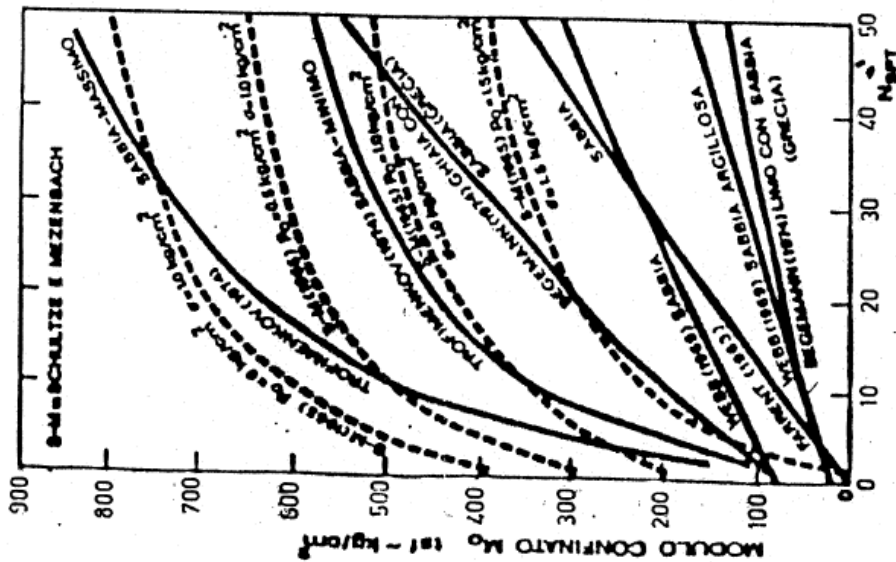
- Densità relativa in funzione del numero di colpi del S.P.T. (Schültze).



Valori di  $S_1$   $S_2$

CURVA	$S_1$ [N°%]	$S_2$ [N°%]	NOTE	RIFERIMENTO
1	0.756	18.75	SABBIA E GHIAIA MC	B'APPOLONIA ET AL., 1970
2	1.043	36.79	SABBIA SC	B'APPOLONIA ET AL., 1970
3	0.517	7.46	—	SCHULTZE & MEZEMBACH, 1961
4	0.478	7.17	SABBIA SATURA	HEER, 1970
5	0.316	1.58	SABBIA ARGILLOSA	HEER, 1970

b) RELAZIONI  $\bar{E}$ - $N_{SPT}$  (DENVER, 1963)



c) RELAZIONI  $M_0$ - $N_{SPT}$   
(MITCHELL & GARDNER, 1975)

-Correlazione tra  $N_{30}$  e il modulo confinato  $M_0$  e il modulo di young  $\bar{E}$

<b>SONDAGGIO</b>	<b>Da mt a mt</b>	<b>N1</b>	<b>N2</b>	<b>N3</b>
SE01	3,50m a 3,53m	21	36	50
	7,50m a 7,95m	14	17	16
	11,50m a 11,95m	13	29	18
	16,50m a 16,95m	16	18	19
	20,0m a 20,25m	30	50	/
SE02	3,50m a 3,87m	21	36	50
	7,50m a 7,95m	14	17	22
	9,50m a 9,95m	13	15	21
	16,50m a 16,62m	50	/	/
	20,00m a 20,45m	12	15	15
SE03	4,30m a 4,52m	37	50	/
	9,00m a 9,45m	20	25	21
	12,00m a 12,45m	7	6	10
	15,45m a 15,87m	50	/	/
	18,00m a 18,45m	9	31	37
SE04	3,90m a 4,35m	4	3	3
	7,00m a 7,45m	2	3	2
	12,10m a 12,55m	4	3	3
	16,00m a 16,45m	4	3	4
SE05	5,20m a 5,65m	16	32	21
	9,00m a 9,45m	3	4	8
	11,00m a 11,45m	10	12	9
	14,00m a 14,45m	8	10	12
	17,00m a 17,45m	20	14	8
	20,00m a 20,45m	9	12	10
SE05Bis	4,00m a 4,50m	6	10	9
	8,00m a 8,45m	12	15	19
	12,50m a 12,95m	6	13	9
SE06	3,50m a 3,95m	7	3	3
	8,50m a 8,95m	8	4	5
	11,00m a 11,45m	6	3	9
	14,50m a 14,60m	50	/	/
	17,50m a 17,95m	4	5	15
	20,40m a 20,80m	10	22	50
	26,50m a 26,95m	9	14	19
	30,10m a 30,55m	11	17	22
SE07	11,00m a 11,45m	10	20	15
	14,00m a 14,45m	3	5	12
	17,00m a 17,22m	31	50	/
	20,00m a 20,43m	18	40	50
	23,50m a 23,73m	39	50	/
SE08	3,50m a 3,95m	22	22	25
	7,00m a 7,45m	19	23	31
	9,00m a 9,45m	7	12	19
	12,00m a 12,45m	2	5	4

	15,00m a 15,45m	8	17	14
	17,50m a 17,54m	50	/	/
SE09	5,30m a 5,75m	16	25	38
	8,60m a 9,00m	21	37	50
	11,60m a 12,05m	15	19	27
	16,00m a 16,07m	50	/	/
	18,60m a 18,68m	50	/	/
SE10				
	8,50m a 8,60m	50	/	/
	12,20m a 12,40m	48	50	/
	13,80m a 14,20m	19	38	50
	18,50m a 18,57m	50	/	/
	21,50m a 21,66m	33	50	/
SE11	5,00m a 5,05m	50	/	/
	6,50m a 6,53m	50	/	/
	9,50m a 9,58m	50	/	/
	14,50m a 14,56m	50	/	/
	17,50m a 17,58m	50	/	/
SE11Bis	8,00m a 8,45m	20	12	11
	12,00m a 12,45m	12	8	5
	20,80m a 20,90m	50	/	/
	21,40m a 21,43m	50	/	/
SE12	12,60m a 13,05m	19	45	48
	15,30m a 15,75m	31	42	48
	24,00m a 24,45m	10	21	48
	26,00m a 26,45m	21	50	/

#### 6.4 PROVE PENETROMETRICHE STATICHE (CONE PENETRATION TEST)

La prova penetrometrica statica CPT (di tipo meccanico) consiste essenzialmente nella misura della resistenza alla penetrazione di una punta meccanica di dimensioni e caratteristiche standardizzate, infissa nel terreno a velocità costante ( $v = 2 \text{ cm/sec} \pm 0,5 \text{ cm/sec}$ ).

La penetrazione viene effettuata tramite un dispositivo di spinta (martinetto idraulico), opportunamente ancorato al suolo con coppie di coclee ad infissione, che agisce su una batteria doppia di aste (aste coassiali esterne cave e interne piene), alla cui estremità è collegata la punta.

Lo sforzo necessario per l'infissione è misurato per mezzo di manometri, collegati al martinetto mediante una testa di misura idraulica.

La punta conica (del tipo telescopico) è dotata di un manicotto sovrastante, per la misura dell'attrito laterale: punta/manicotto tipo "Begemann".

Le dimensioni della punta/manicotto sono standardizzate e precisamente:

- diametro Punta Conica meccanica  $\varnothing = 35,7 \text{ mm}$
- area di punta  $A_p = 10 \text{ cm}^2$
- angolo di apertura del cono  $\alpha = 60^\circ$
- superficie laterale del manicotto  $A_m = 150 \text{ cm}^2$

Sulla batteria di aste esterne può essere installato un anello allargatore per diminuire l'attrito sulle aste, facilitandone l'infissione.

Una cella di carico, che rileva gli sforzi di infissione, è montata all'interno di un'unità rimovibile, chiamata "selettore", che preme alternativamente sull'asta interna e su quella esterna.

Durante la fase di spinta le aste sono azionate automaticamente da un comando idraulico.

L'operatore deve solamente controllare i movimenti di spinta per l'infissione delle aste.

I valori acquisiti dalla cella di carico sono visualizzati sul display di un Sistema Acquisizione Automatico (qualora presente) o sui manometri.

Per mezzo di un software (in alcuni strumenti) è possibile sia durante l'acquisizione, che in un secondo momento a prove ultimate trasferire i dati ad un PC.

Le letture di campagna (che possono essere rilevate dal sistema di acquisizione sia in Kg che in Kg/cm<sup>2</sup>) durante l'infissione sono le seguenti:

- Lettura alla punta LP = prima lettura di campagna durante l'infissione relativa all'infissione della sola punta
- Lettura laterale LT = seconda lettura di campagna relativa all'infissione della punta+manicotto
- Lettura totale LLTT = terza lettura di campagna relativa all'infissione delle aste esterne (tale lettura non sempre viene rilevata in quanto non è influente metodologicamente ai fini interpretativi).

I dati della prova rilevati sono, quindi, una coppia di valori per ogni intervallo di lettura costituiti da LP (Lettura alla punta) e LT (Lettura della punta + manicotto), le relative resistenze vengono desunte per differenza; inoltre la resistenza laterale viene conteggiata 20 cm sotto (alla quota della prima lettura della punta).

Trasferiti i dati ad un PC vengono elaborati da un programma di calcolo “*STATIC PROBING*” della GeoStru.

Le resistenze specifiche  $Q_c$  (Resistenza alla punta RP) e  $Q_l$  (Resistenza Laterale RL o  $f_s$  attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione) vengono desunte tramite opportune



costanti e sulla base dei valori specifici dell'area di base della punta e dell'area del manicotto di frizione laterale tenendo in debito conto che:

$$A_p = \text{l'area punta (base del cono punta tipo "Begemann")} = 10 \text{ cm}^2$$

$$A_m = \text{area del manicotto di frizione} = 150 \text{ cm}^2$$

$$C_t = \text{costante di trasformazione} = 10$$

Il programma Static Probing permette inoltre l'archiviazione, la gestione e l'elaborazione delle Prove Penetrometriche Statiche.

La loro elaborazione, interpretazione e visualizzazione grafica consente di "catalogare e parametrizzare" il suolo attraversato con un'immagine in continuo, che permette anche di avere un raffronto sulle consistenze dei vari livelli attraversati e una correlazione diretta con sondaggi geognostici per la caratterizzazione stratigrafica.

La sonda penetrometrica permette inoltre di riconoscere abbastanza precisamente lo spessore delle coltri sul substrato, la profondità di eventuali falde e le superfici di rottura sui pendii e la consistenza del terreno.

L'utilizzo dei dati dovrà comunque essere trattato con spirito critico e possibilmente dopo esperienze geologiche acquisite in zona.

I dati di uscita principali sono RP (Resistenza alla punta) e RL (Resistenza laterale o fs, attrito laterale specifico che considera la superficie del manicotto di frizione) che il programma calcola automaticamente; inoltre viene calcolato il Rapporto RP/RL (Rapporto Begemann 1965) e il Rapporto RL/RP (Rapporto Schmertmann 1978 – FR %).

I valori sono calcolati con queste formule:

$$Q_c (RP) = (LP \times C_t) / 10 \text{ cm}^2. \text{ Resistenza alla punta}$$

$$Q_l (RL) (fs) = [(LT - LP) \times C_t] / 150 \text{ cm}^2. \text{ Resistenza laterale}$$

Con

$$Q_c (RP) = \text{Lettura alla punta } LP \times \text{Costante di Trasformazione } C_t / \text{Superficie Punta } A_p$$

Ql (RL) (fs) = Lettura laterale LT-Lettura alla punta LP x Costante di Trasformazione  
Ct / Am area del manicotto di frizione

N.B.

- $A_p = 10 \text{ cm}^2$  e  $A_m = 150 \text{ cm}^2$
- la resistenza laterale viene conteggiata 20 cm sotto (alla quota della prima lettura della punta)

La metodologia utilizzata permette l'elaborazione statistica dei dati numerici di Static Probing, utilizzando nel calcolo dei valori rappresentativi dello strato considerato un valore inferiore o maggiore della media aritmetica dello strato (dato comunque maggiormente utilizzato); i valori possibili in immissione sono:

- Medio Media aritmetica dei valori della resistenza alla punta sullo strato considerato.
- Media minima Valore statistico inferiore alla media aritmetica dei valori della resistenza alla punta sullo strato considerato.
- Massimo Valore massimo dei valori del numero della resistenza alla punta sullo strato considerato.
- Minimo Valore minimo dei valori del numero della resistenza alla punta sullo strato considerato.
- Media + s Media + scarto (valore statistico) dei valori della resistenza alla punta sullo strato considerato.
- Media – s Media – scarto (valore statistico) dei valori della resistenza alla punta sullo strato considerato.

Per quanto riguarda la punta elettrica generalmente tale strumento permette di ottenere dati in continuo con un passo molto ravvicinato (anche 2 cm.) rispetto alla punta meccanica (20 cm.).

Per il piezocono i dati di inserimento, oltre a quelli di LP e LT, sono la pressione neutrale misurata ed il tempo di dissipazione (tempo intercorrente misurato tra la misura della sovrappressione neutrale e la pressione neutrale o pressione della colonna d'acqua).

Tale misurazione si effettua generalmente verificando la sovrappressione ottenuta in fase di spinta e la pressione neutrale (dissipazione nel tempo) misurata in fase di alleggerimento di spinta (arresto penetrazione).

Il programma usato per le elaborazioni permette di immettere U1 – U2 – U3 cioè la sovrappressione neutrale misurata rispettivamente con filtro poroso posizionato nel cono, attorno al cono o attorno al manicotto a seconda del tipo di piezocono utilizzato.

Tale sovrappressione (che è data dalla somma della pressione idrostatica preesistente la penetrazione e dalle pressioni dei pori prodotte dalla compressione) può essere positiva o negativa e generalmente varia da (-1 a max. + 10-20 kg/cmq) ed è prodotta dalla compressione o dilatazione del terreno a seguito della penetrazione.

Per il calcolo, oltre ai dati strumentali generali, si devono immettere i dati relativi:

- ✓ Area punta del cono (area esterna punta)
- ✓ Area interna punta del cono (area del restringimento in prossimità del setto poroso – interna cono-manicotto).

Generalmente il rapporto tra le aree varia da (0,70 – 1,00).

Il passo del penetrometro e cioè l'intervallo entro cui effettua la lettura, è, generalmente 20 cm per penetrometri normali, mentre per le punte elettriche-piezoconi può essere di 2 cm.

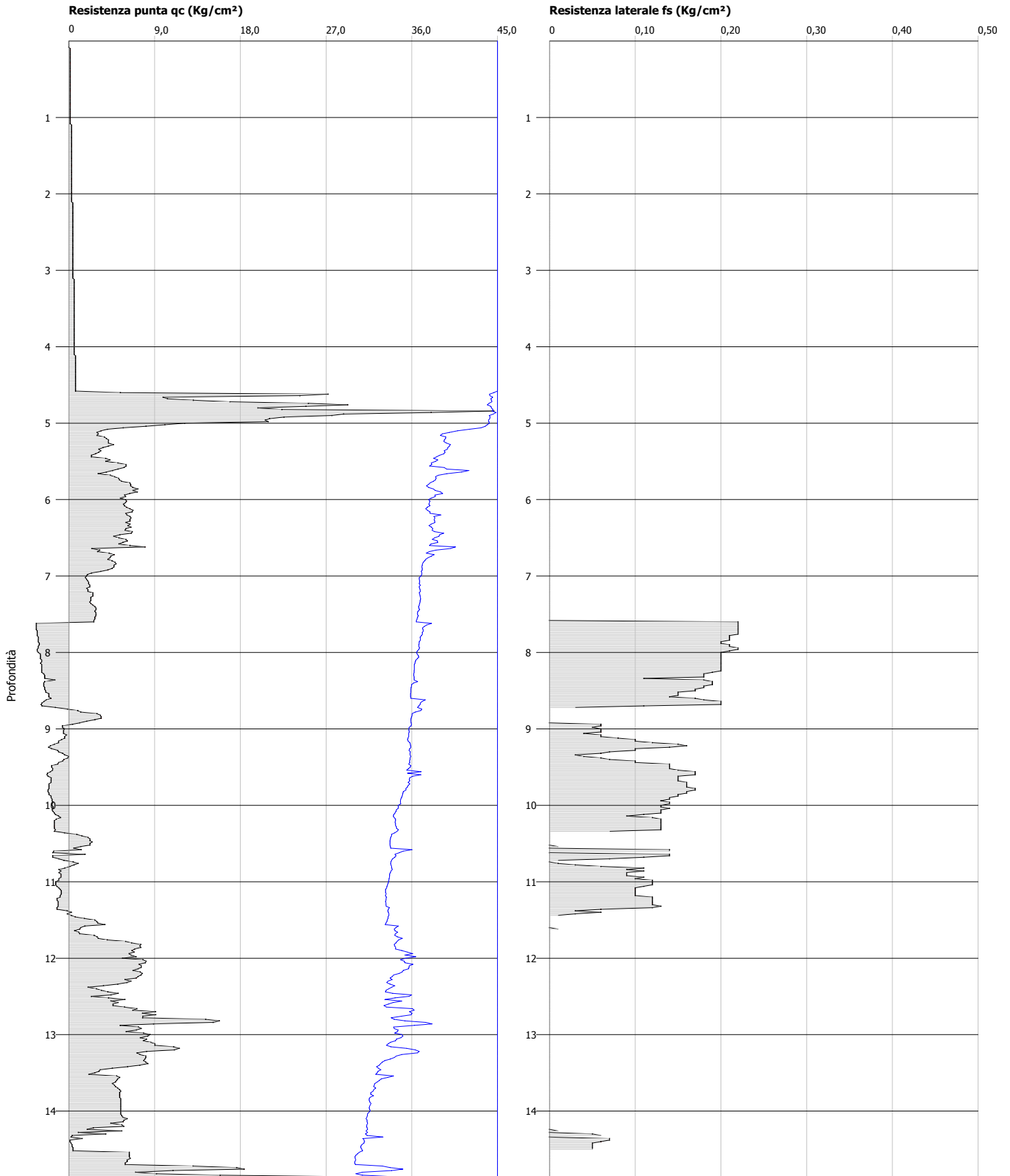
Il programma elabora, quindi, i dati di resistenza alla punta e laterale  $f_s$  con le opportune correzioni dovute alla normalizzazione (con la tensione litostatica e con la pressione dei pori).

Robertson definisce infine il valore caratteristico del  $I_c$  (Indice di tipo dello strato) e Contenuto in materiale fine FC % (cioè la percentuale di contenuto argilloso  $< 2$  micron).

**Probe CPTU - Piezocone Nr.1**  
**Strumento utilizzato... TECNO PENTA TP CPL2IN**  
**Diagramma Resistenze qc fs**

Committente :  
Cantiere :  
Località :

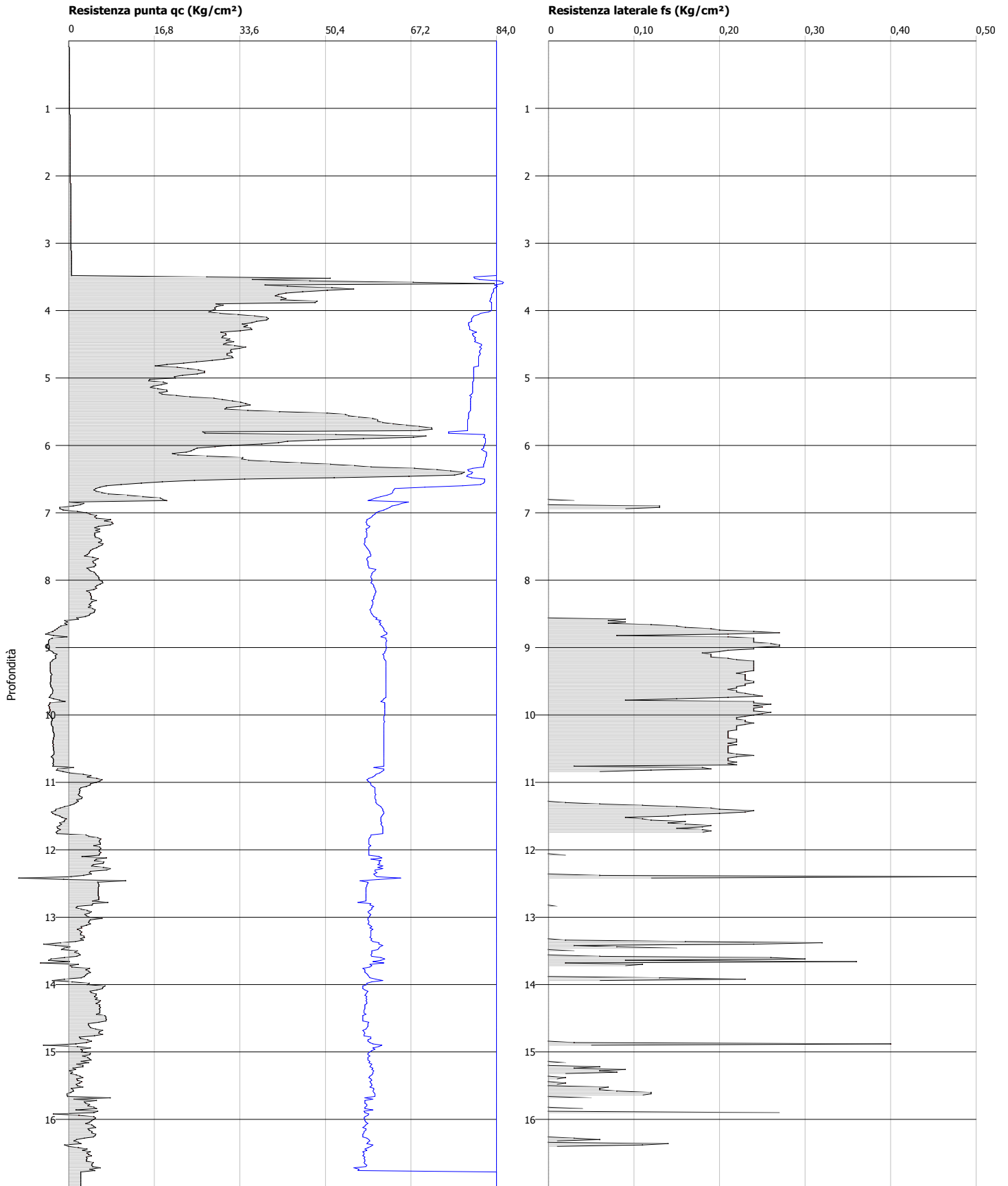
Data :13/02/2010



**Probe CPTU - Piezocone Nr.2**  
**Strumento utilizzato... TECNO PENTA TP CPL2IN**  
**Diagramma Resistenze qc fs**

Committente :  
Cantiere :  
Località :

Data :13/02/2010



*Prova CPTU - 1*



*Prova CPTU - 2*



## **7. INDAGINI GEOFISICHE PER IL CALCOLO DELLE VS30**

### *7.1 Down Hole*

Il presente capitolo espone i risultati ottenuti dall'esecuzione delle indagini di tipo Down Hole in corrispondenza dei sondaggi visibili nella tabella allegata, spinti sino ad una profondità di 30 metri dal piano campagna.

L'indagine è stata eseguita tramite un sismografo PASI LCM-12, gestito da un microprocessore, con dodici canali di acquisizione simultanea, a risoluzione 100 microsec., 8 bits, scale dei tempi variabili ed incremento di segnale variabile per ogni canale.

La sonda utilizzata è prodotta dalla PASI e consiste in un geofono tridimensionale nel quale sono alloggiati due geofoni orizzontali per la misura delle onde "S" ed un geofono verticale per la misura delle onde "P".

L'energizzazione è stata ottenuta tramite una mazza di 9 kg dotata di starter piezoelettrico battente su un piattello in alluminio.

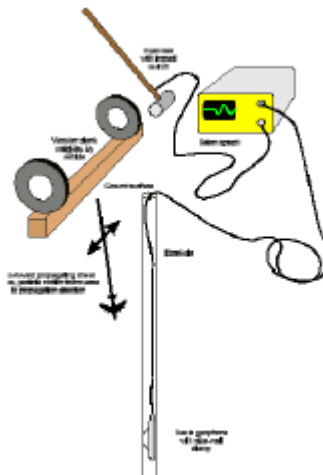
Mediante questa tecnica d'indagine è possibile determinare la velocità di propagazione in senso verticale (media e d'intervallo) delle onde sismiche di compressione (P) e di quelle trasversali (S).

La metodologia Down-Hole, come le altre tecniche di sismica in perforo, ha, rispetto alla sismica a rifrazione, il vantaggio di non avere come condizione che la velocità aumenti con la profondità in quanto si valutano i tempi d'arrivo delle onde elastiche via via che esse penetrano negli strati più profondi senza subire fenomeni di rifrazione; quindi è sempre possibile valutare eventuali inversioni di velocità nell'ambito del pacco di litotipi incontrati nella perforazione e, inoltre, la preventiva conoscenza della stratigrafia permette di scegliere il passo di misura più



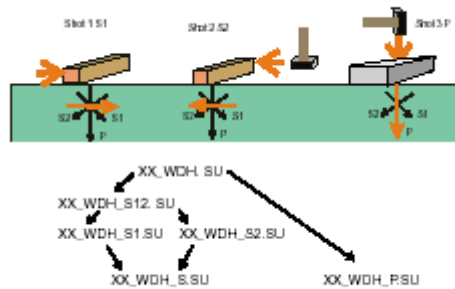
idoneo a caratterizzare anche strati aventi ridotto spessore.

In generale la tecnica Down-Hole consiste nella lettura dei tempi di propagazione delle onde longitudinali  $T_p$  e delle onde trasversali  $T_s$  tra un punto di energizzazione prossimo alla testa del foro di sondaggio ed il geofono tridimensionale ancorato all'interno del foro mediante un dispositivo a pistone.



I modelli e gli algoritmi adottati tengono conto di tutte quelle leggi d'attenuazione ed accelerazione che contribuiscono a modificare un segnale sismico all'interno di un mezzo qualunque. Tale modellizzazioni ed interpretazioni dei segnali restituiti dall'indagine permettono di stimare le caratteristiche elasto-dinamiche della sezione in perforo investigata.

In particolare, l'energizzazione del terreno è stata effettuata mediante massa battente; al fine di facilitare la generazione di onde trasversali, per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite una piastra in ferro infissa in una trave di legno ad una distanza di 1 metro dall'asse del perforo in modo da ridurre la dissipazione in fase d'energizzazione (vedi figura).



Tale dispositivo di energizzazione, in funzione delle profondità operative si è rilevato sufficientemente valido per evidenziare, con buon rapporto segnale-rumore, le onde sismiche generate.

Il foro di sondaggio, interamente condizionato con tubi in P.V.C. del diametro interno di circa 80 mm ed opportunamente attrezzato in modo da essere solidale con le pareti del foro, ha ospitato il geofono tridimensionale, composto da un geofono verticale e due orizzontali, ancorato alle pareti del foro per mezzo di un sistema pneumatico alle varie profondità di lettura.

Il geofono tridimensionale è stato collegato ad un sismografo del tipo E2 digit a LCM-12 canali della PASI con segnale incrementale, che ha permesso di acquisire le tre componenti del segnale.

Durante l'esecuzione dei sondaggi sono state effettuate letture con un intervallo di 2 metri sino ad una profondità di 30 metri. Gli scoppi sono stati effettuati con una distanza dal boccaforo (offset) di 1,5 metri.

L'elaborazione dei dati consiste nell'individuazione dei tempi di "primo arrivo" delle onde sismiche P ed S. Ciò consente di valutare la funzione velocità sismica-profondità, sia per le onde compressive ( $V_p$ ) che per le onde trasversali ( $V_s$ ) e quindi, noto il peso di volume dei terreni investigati, di calcolare i parametri meccanici caratteristici (Moduli Elastici Dinamici).

I tempi scaturiti consentono, in funzione della distanza tra il punto di energizzazione e la ricezione dei segnali, di definire, per i singoli intervalli,

le velocità delle onde P ( $V_p$ ) e delle onde S ( $V_s$ ) ed inoltre di calcolare i rapporti  $V_p/V_s$  e  $V_s/V_p$  per la stima del coefficiente di Poisson.

Dalla valutazione della velocità di propagazione delle onde secondarie ( $V_s$ ) è stato possibile calcolare il  $V_{s30}$ , così come richiesto dalla normativa vigente.

In allegato sono presenti grafici e tabelle dai quali si evince la velocità di propagazione delle suddette onde nei vari intervalli di misura (2 metri) e lo sviluppo dei moduli elastici calcolati.

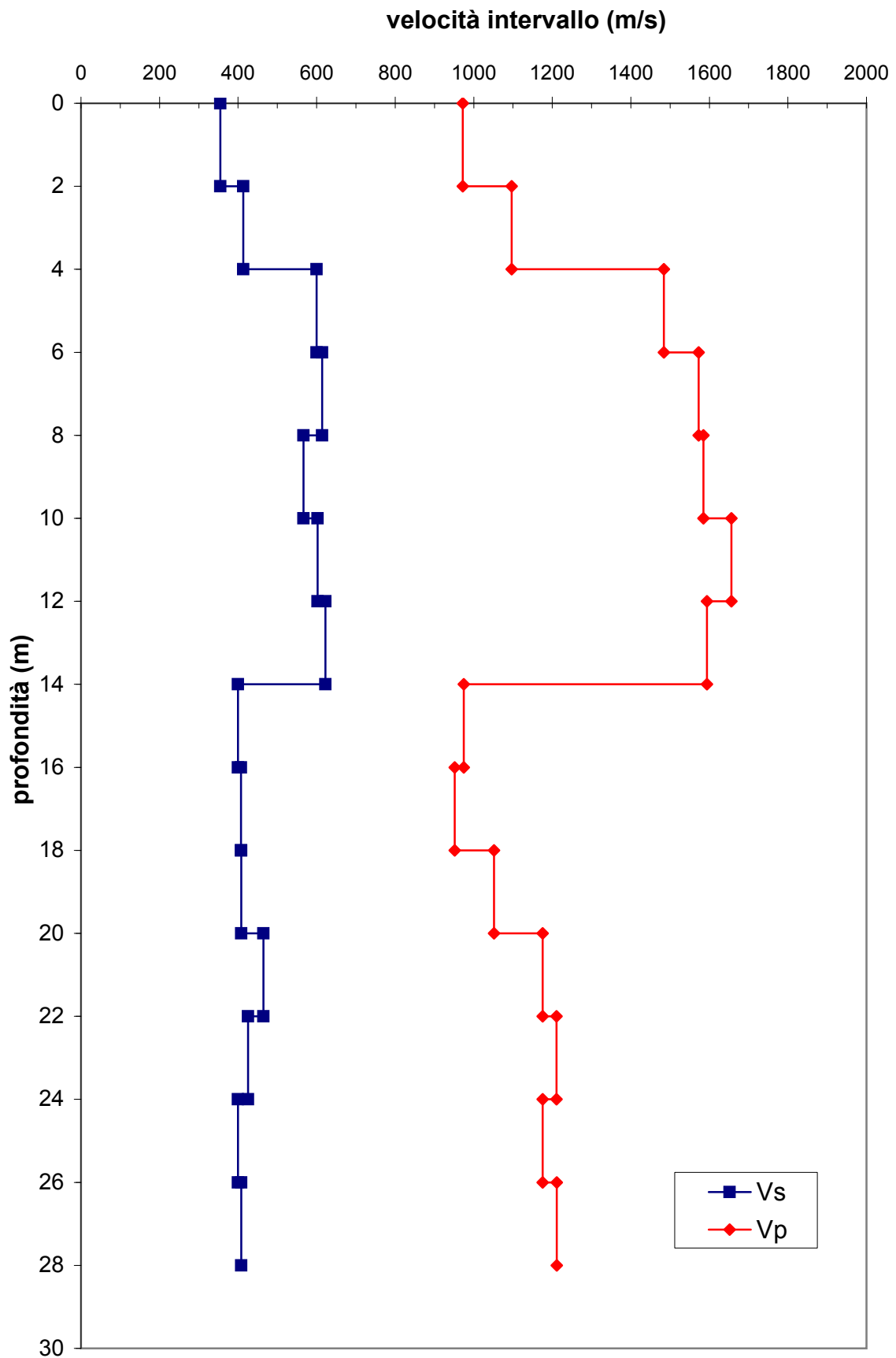
**Sondaggio Down Hole - SE02**

**TABELLA RIEPILOGATIVA DEI MODULI ELASTICI E DELLE VELOCITA' P e S  
CALCOLATI NELL'INTERVALLO**

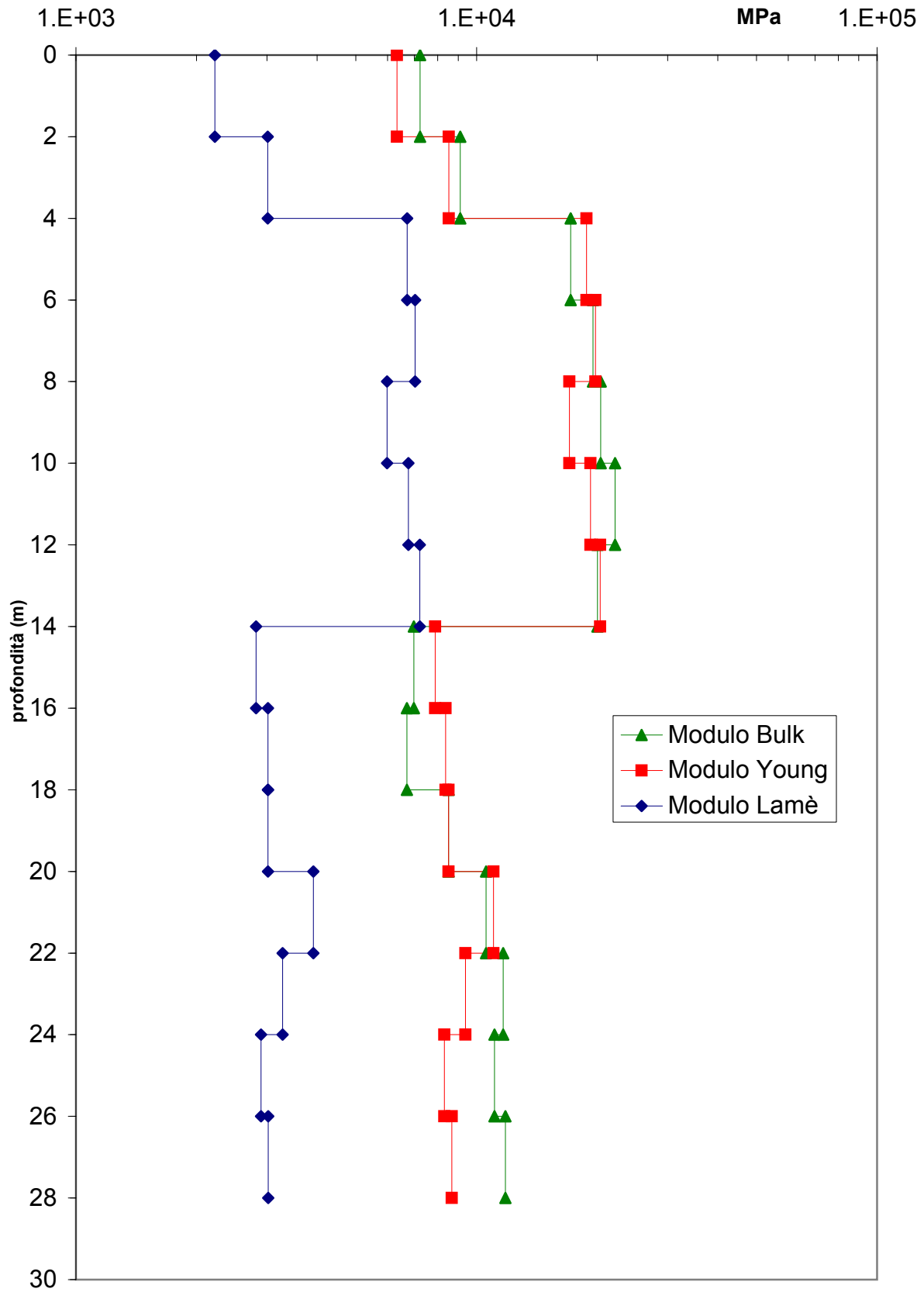
<b>Profondità</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b><math>\gamma</math> (t/mc)</b>	<b>Coeff.Poisson (<math>\nu</math>)</b>	<b>Mod. Young (E - MPa)</b>	<b>Mod. Lamè (<math>\mu</math> - MPa)</b>	<b>Mod. Bulk (k - MPa)</b>
<b>0 - 2</b>	972	355	1.8	0.42	6,329	2,224	7,230
<b>2 - 4</b>	1,097	413	1.8	0.42	8,535	3,011	9,113
<b>4 - 6</b>	1,484	600	1.9	0.40	18,827	6,713	17,172
<b>6 - 8</b>	1,573	614	1.9	0.41	19,807	7,023	19,537
<b>8 - 10</b>	1,585	567	1.9	0.43	17,066	5,981	20,413
<b>10 - 12</b>	1,656	602	1.9	0.42	19,256	6,762	22,172
<b>12 - 14</b>	1,594	622	1.9	0.41	20,350	7,216	20,051
<b>14 - 16</b>	975	399	1.8	0.40	7,882	2,817	6,975
<b>16 - 18</b>	952	408	1.9	0.39	8,369	3,016	6,706
<b>18 - 20</b>	1,052	408	1.9	0.41	8,516	3,017	8,523
<b>20 - 22</b>	1,175	465	1.9	0.41	11,023	3,916	10,571
<b>22 - 24</b>	1,211	425	1.9	0.43	9,379	3,280	11,663
<b>24 - 26</b>	1,176	400	1.9	0.43	8,319	2,899	11,087
<b>26 - 28</b>	1,211	408	1.9	0.44	8,672	3,019	11,800
<b>28 - 30</b>							

N.B.: La virgola è un separatore di migliaia mentre il punto separa i decimali

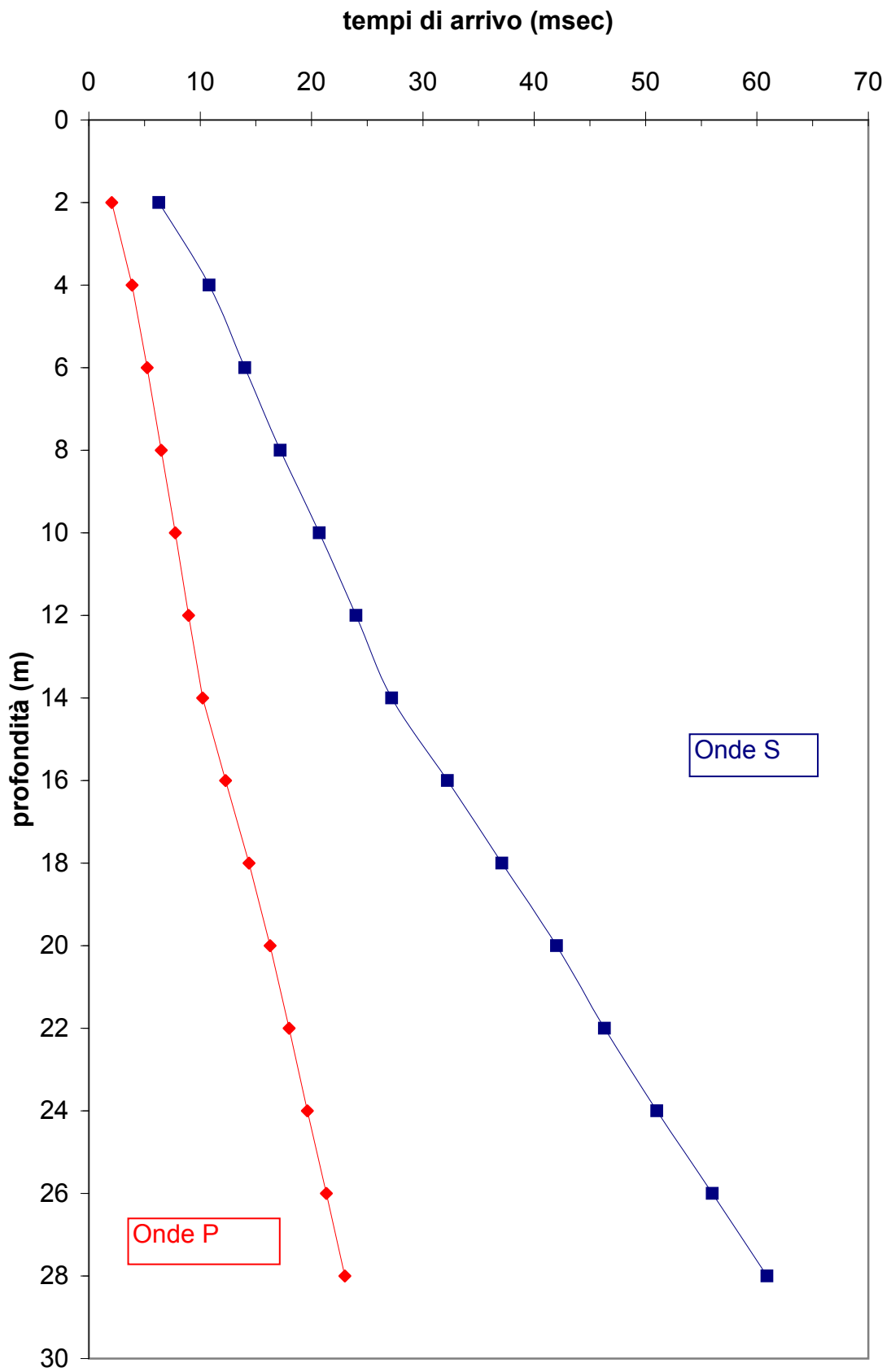
### Sondaggio Down Hole - SE02



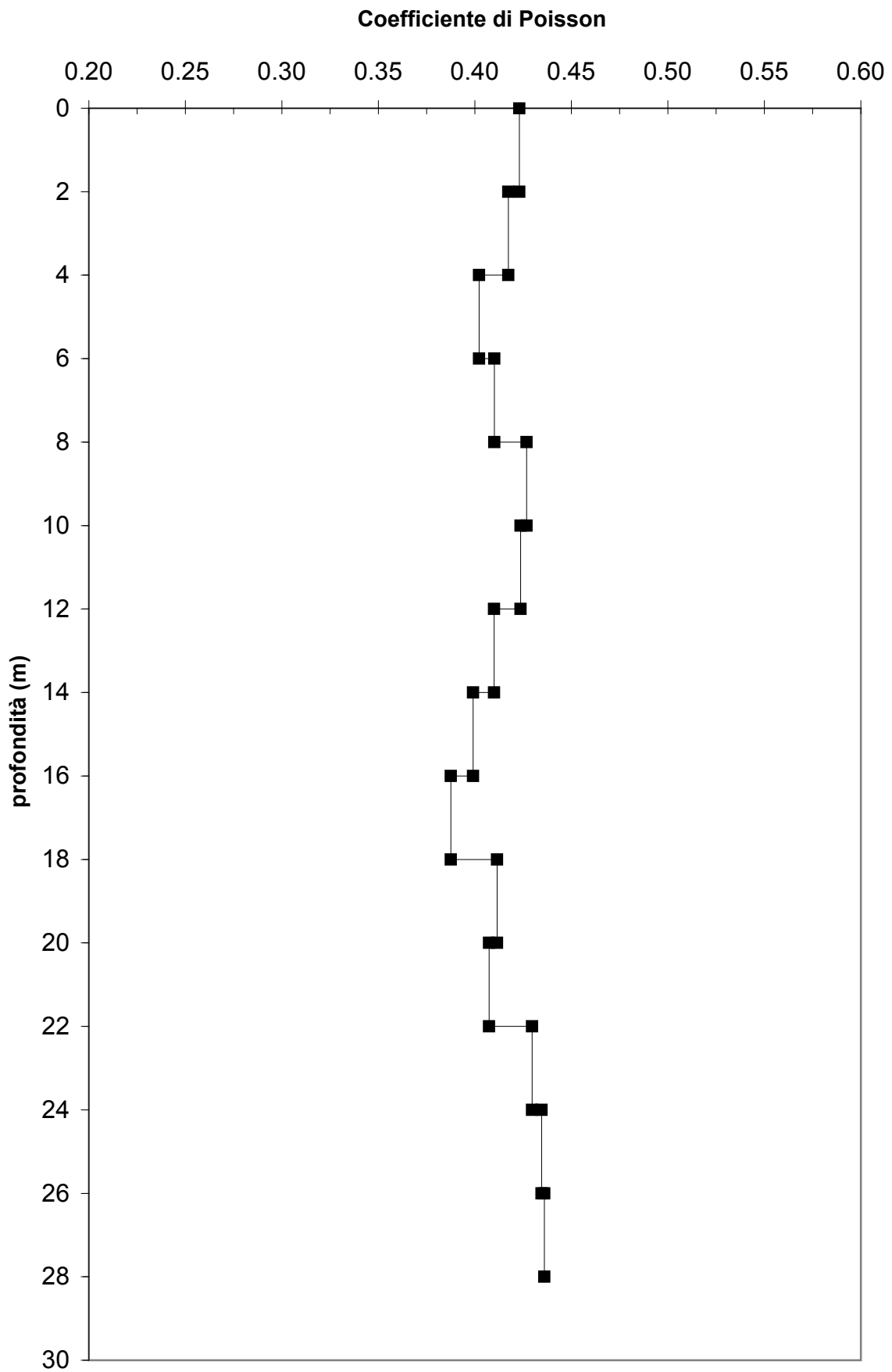
### Sondaggio Down Hole - SE02



Sondaggio Down Hole - SE02



# Sondaggio Down Hole - SE02





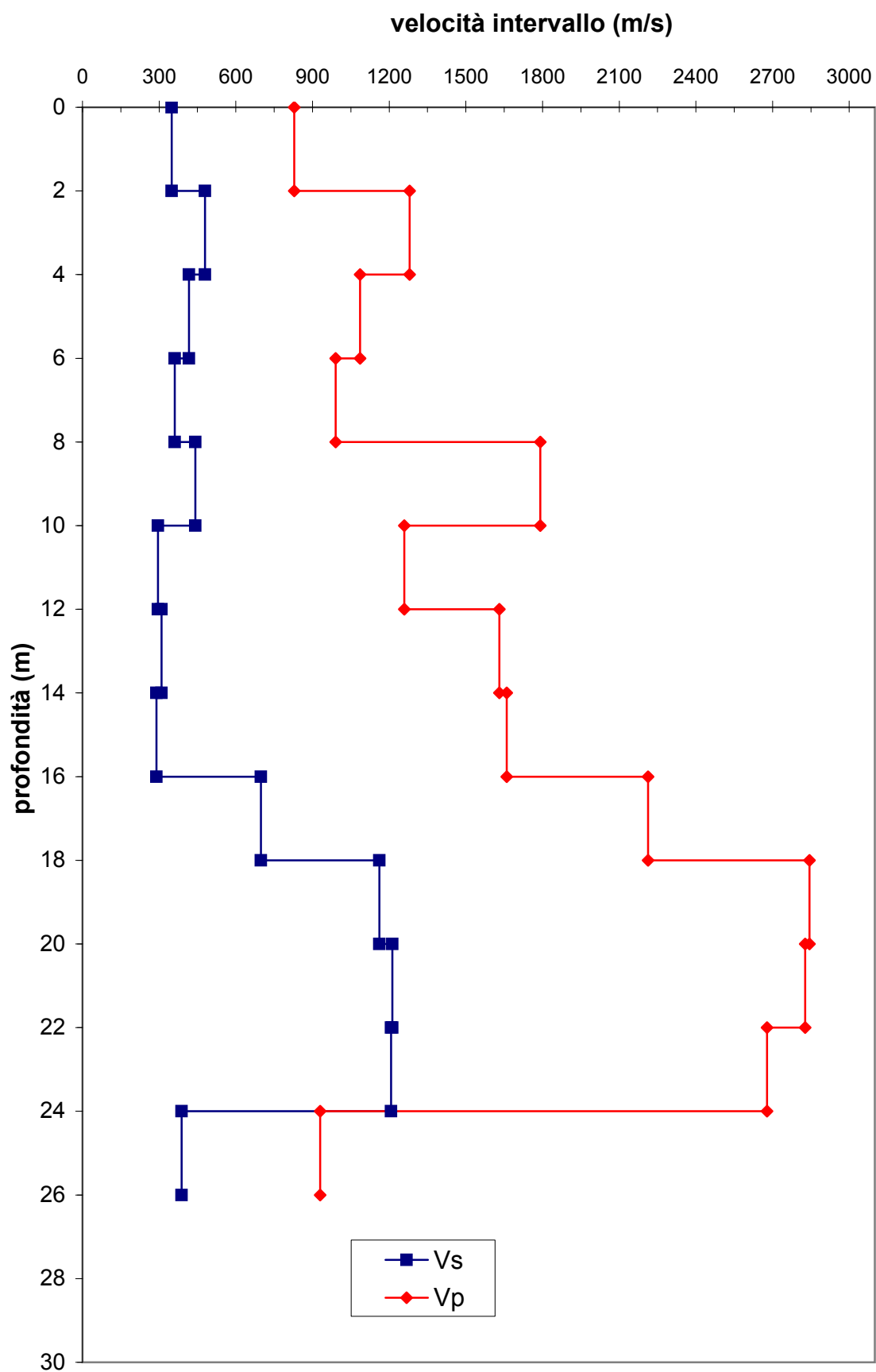
**Sondaggio Down Hole - SE08**

**TABELLA RIEPILOGATIVA DEI MODULI ELASTICI E DELLE VELOCITA' P e S  
CALCOLATI NELL'INTERVALLO**

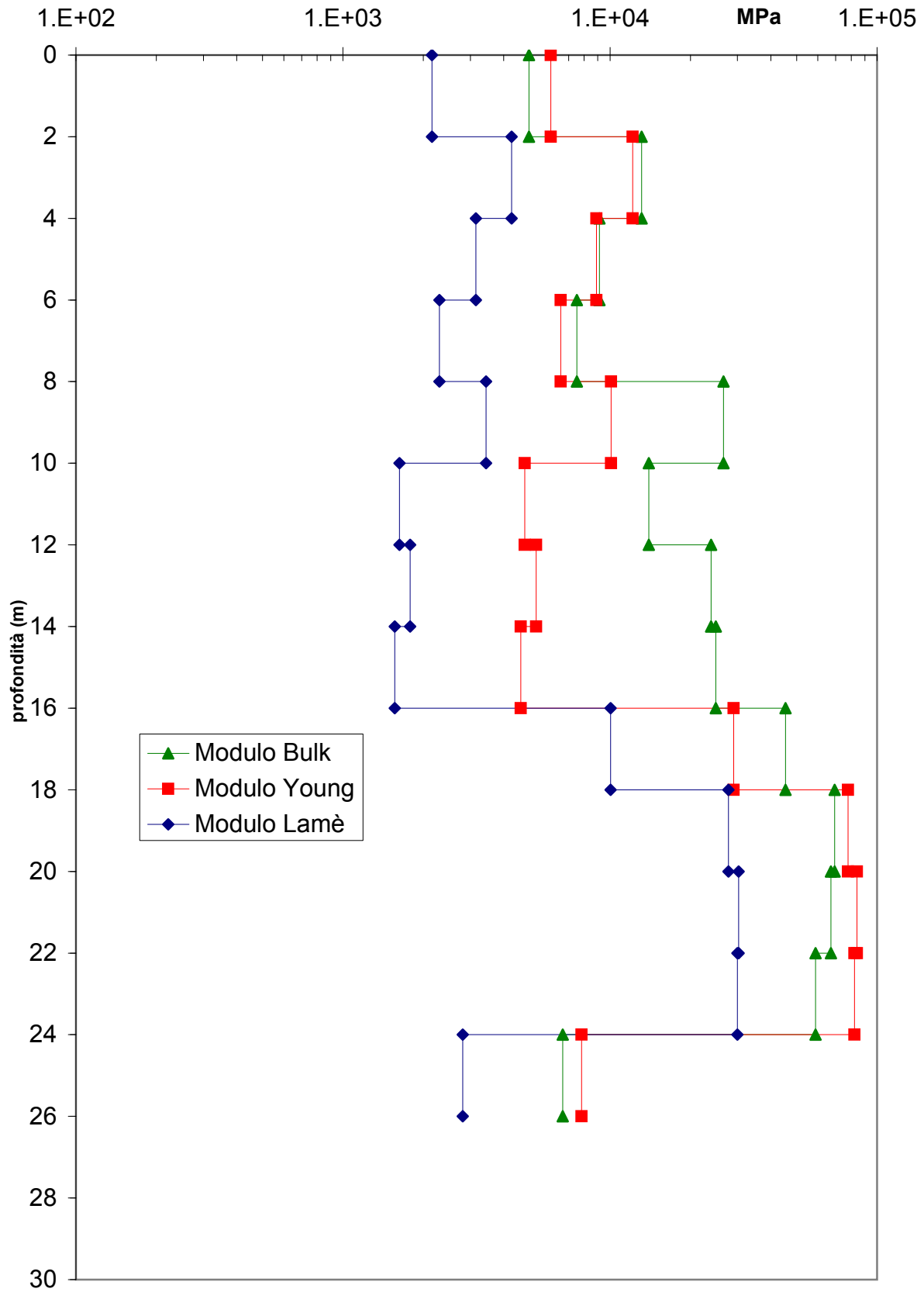
<b>Profondità</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b><math>\gamma</math> (t/mc)</b>	<b>Coeff.Poisson (<math>\nu</math>)</b>	<b>Mod. Young (E - MPa)</b>	<b>Mod. Lamè (<math>\mu</math> - MPa)</b>	<b>Mod. Bulk (k - MPa)</b>
<b>0 - 2</b>	828	349	1.8	0.39	5,998	2,155	4,976
<b>2 - 4</b>	1,280	479	1.9	0.42	12,152	4,284	13,119
<b>4 - 6</b>	1,086	417	1.9	0.41	8,899	3,147	9,119
<b>6 - 8</b>	990	361	1.8	0.42	6,538	2,296	7,510
<b>8 - 10</b>	1,792	441	1.8	0.47	10,083	3,435	26,612
<b>10 - 12</b>	1,259	296	1.9	0.47	4,792	1,629	13,961
<b>12 - 14</b>	1,631	309	1.9	0.48	5,287	1,785	23,878
<b>14 - 16</b>	1,660	289	1.9	0.48	4,635	1,561	24,898
<b>16 - 18</b>	2,213	698	2.1	0.44	29,018	10,043	45,388
<b>18 - 20</b>	2,844	1,162	2.1	0.40	77,794	27,785	69,405
<b>20 - 22</b>	2,827	1,213	2.1	0.39	84,047	30,293	67,154
<b>22 - 24</b>	2,678	1,207	2.1	0.37	82,358	30,003	58,836
<b>24 - 26</b>	930	388	1.9	0.39	7,829	2,807	6,655
<b>26 - 28</b>							
<b>28 - 30</b>							

N.B.: La virgola è un separatore di migliaia mentre il punto separa i decimali

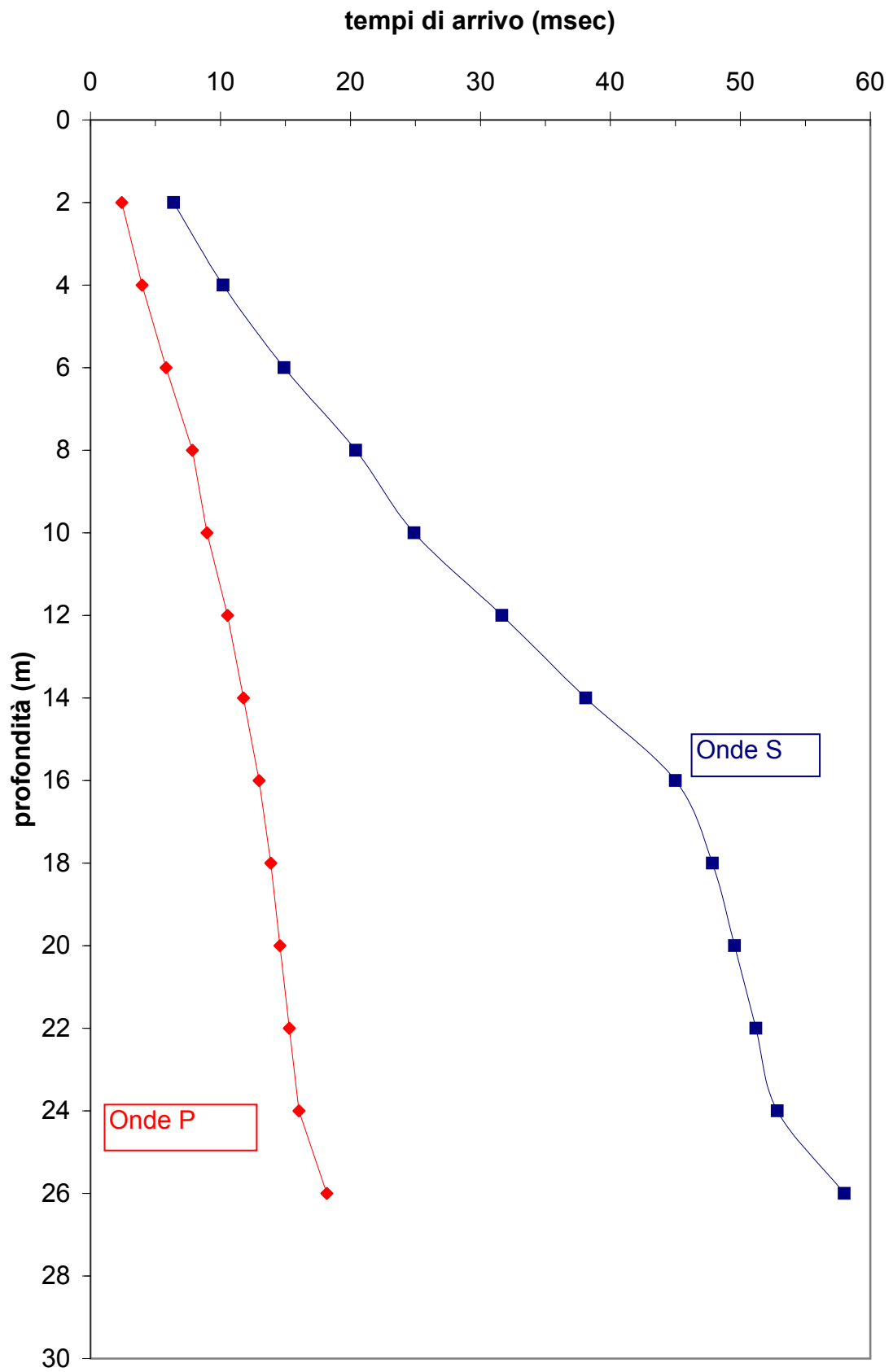
# Sondaggio Down Hole - SE08



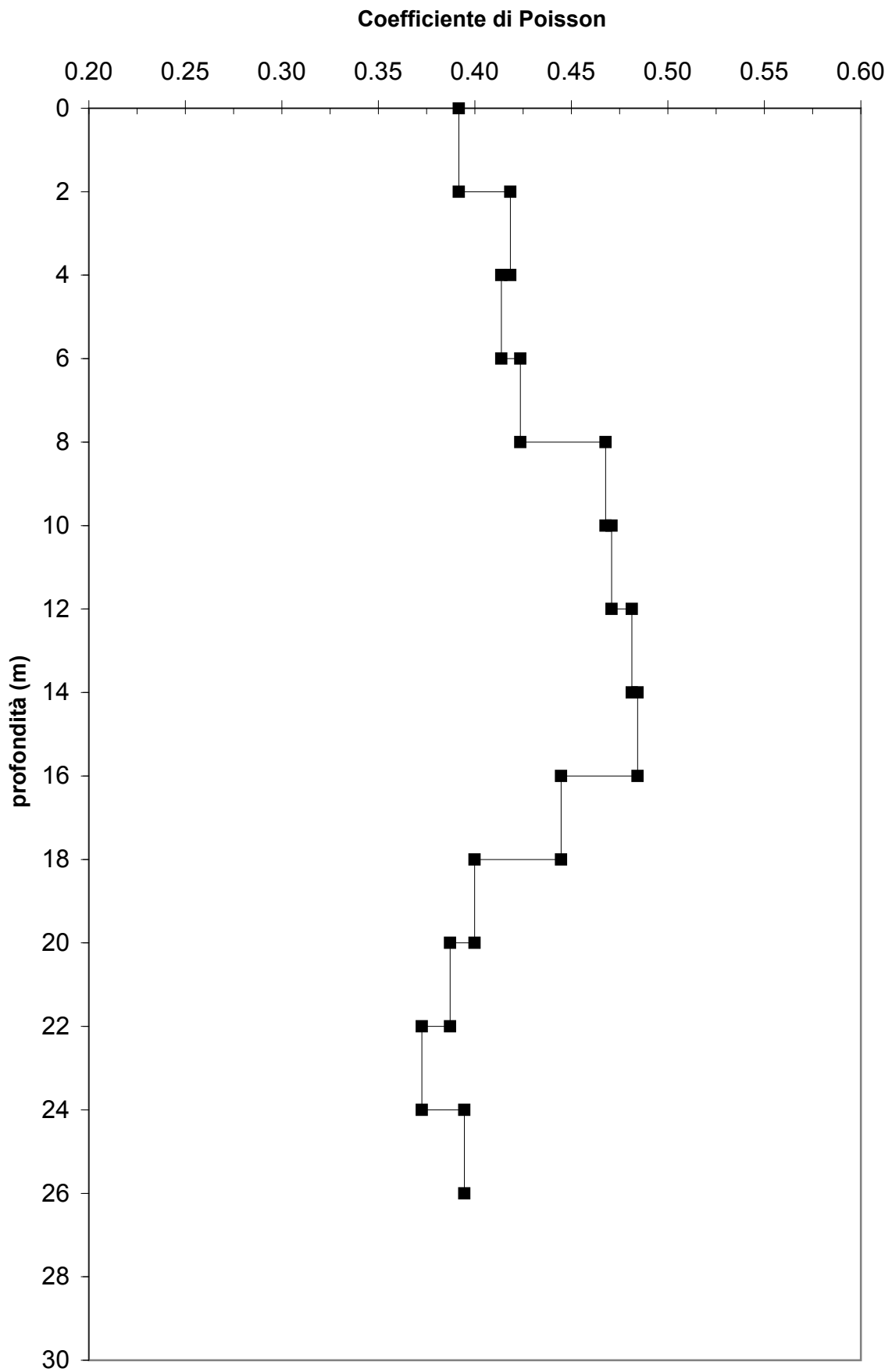
### Sondaggio Down Hole - SE08



Sondaggio Down Hole - SE08



### Sondaggio Down Hole - SE08



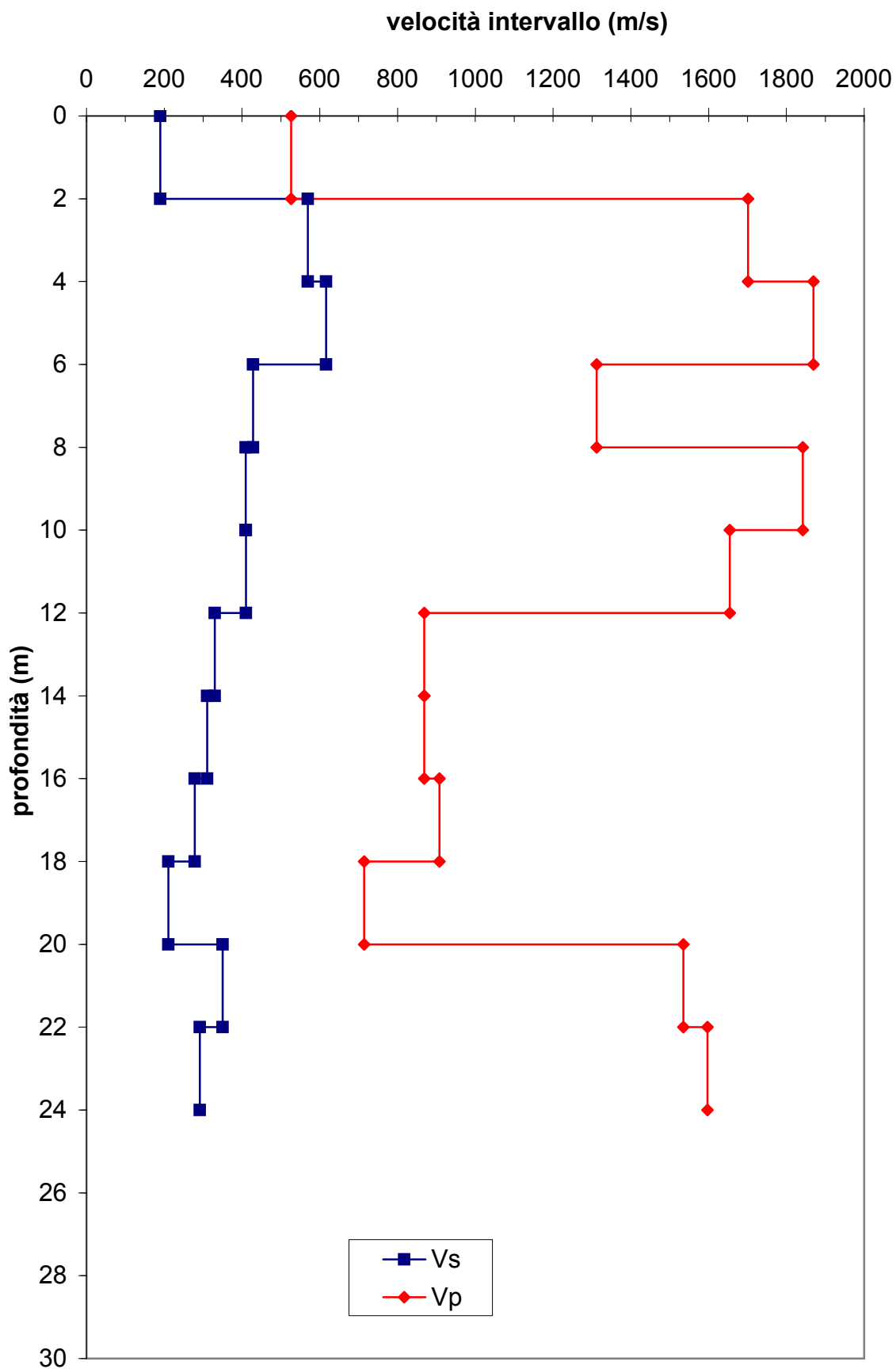
**Sondaggio Down Hole - SE12**

**TABELLA RIEPILOGATIVA DEI MODULI ELASTICI E DELLE VELOCITA' P e S  
CALCOLATI NELL'INTERVALLO**

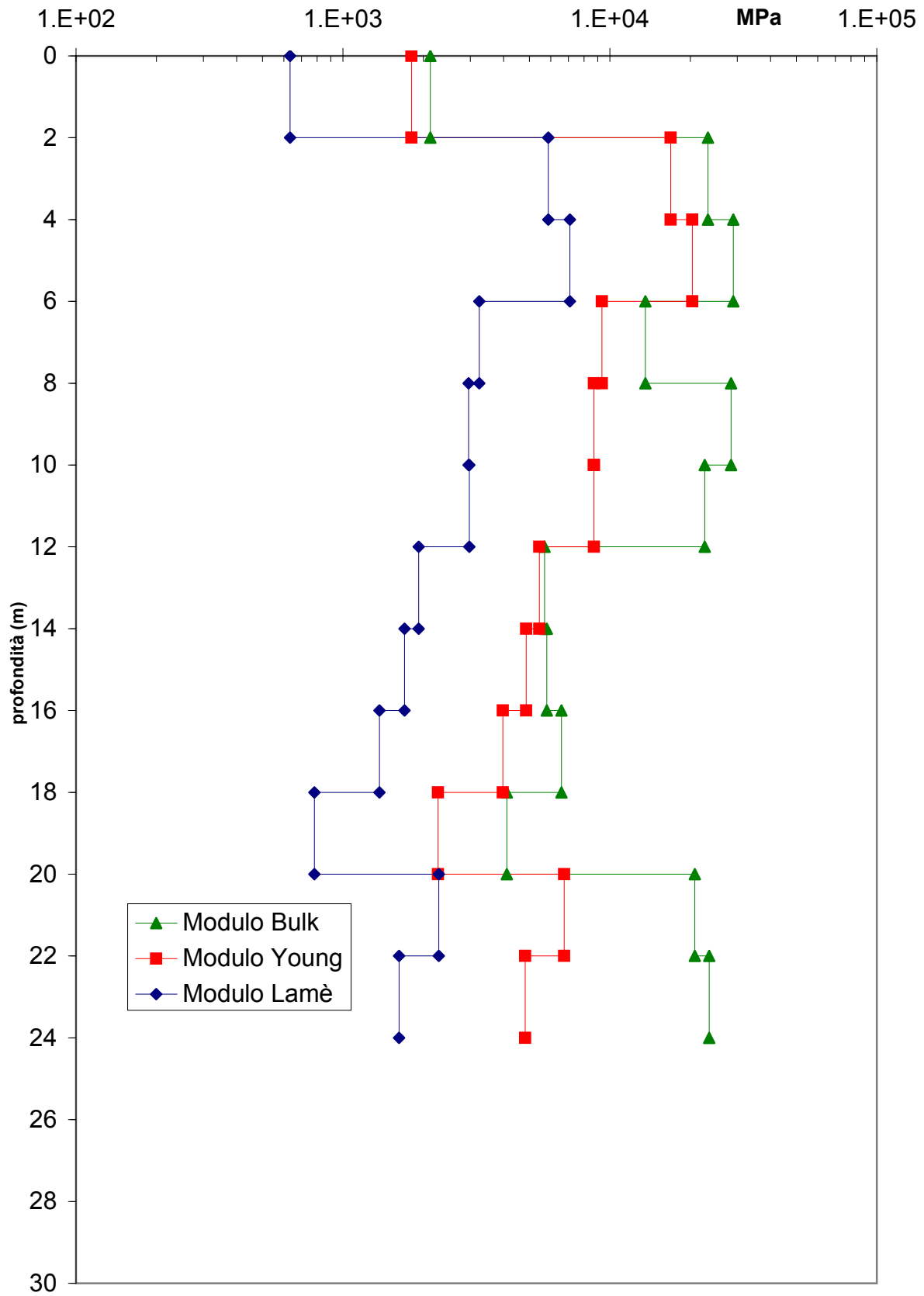
<b>Profondità</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>	<b><math>\gamma</math> (t/mc)</b>	<b>Coeff.Poisson (<math>\nu</math>)</b>	<b>Mod. Young (E - MPa)</b>	<b>Mod. Lamè (<math>\mu</math> - MPa)</b>	<b>Mod. Bulk (k - MPa)</b>
<b>0 - 2</b>	526	189	1.8	0.43	1,807	634	2,126
<b>2 - 4</b>	1,701	569	1.9	0.44	16,901	5,881	23,318
<b>4 - 6</b>	1,870	616	1.9	0.44	20,381	7,082	29,023
<b>6 - 8</b>	1,312	428	1.8	0.44	9,335	3,241	13,570
<b>8 - 10</b>	1,842	409	1.8	0.47	8,716	2,956	28,470
<b>10 - 12</b>	1,654	410	1.8	0.47	8,722	2,972	22,668
<b>12 - 14</b>	868	330	1.8	0.42	5,437	1,920	5,695
<b>14 - 16</b>	869	311	1.8	0.43	4,858	1,702	5,806
<b>16 - 18</b>	908	279	1.8	0.45	3,970	1,371	6,592
<b>18 - 20</b>	714	210	1.8	0.45	2,271	782	4,108
<b>20 - 22</b>	1,535	350	1.9	0.47	6,738	2,288	20,809
<b>22 - 24</b>	1,597	291	2.0	0.48	4,813	1,623	23,575
<b>24 - 26</b>							
<b>26 - 28</b>							
<b>28 - 30</b>							

N.B.: La virgola è un separatore di migliaia mentre il punto separa i decimali

# Sondaggio Down Hole - SE12

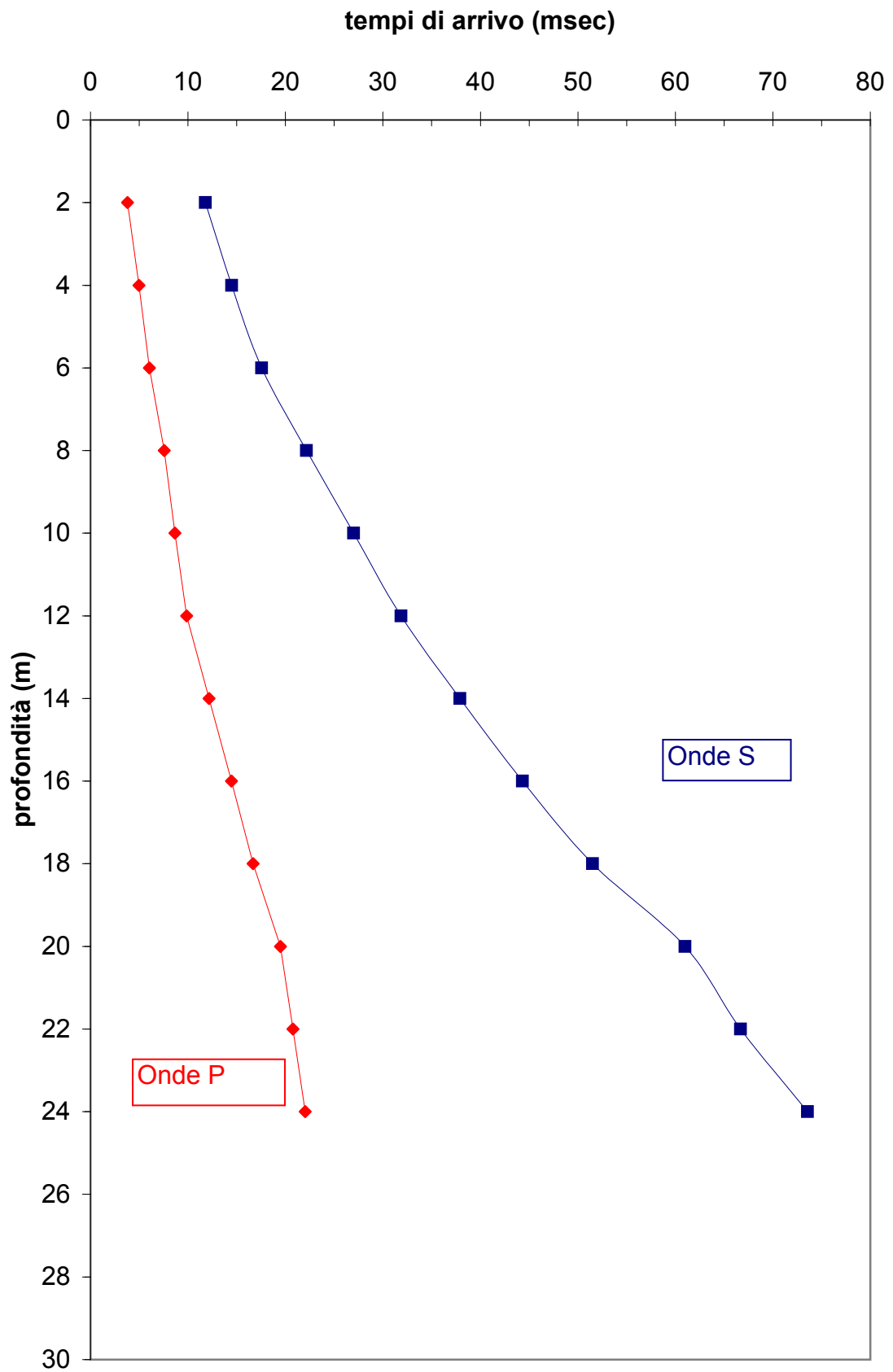


### Sondaggio Down Hole - SE12

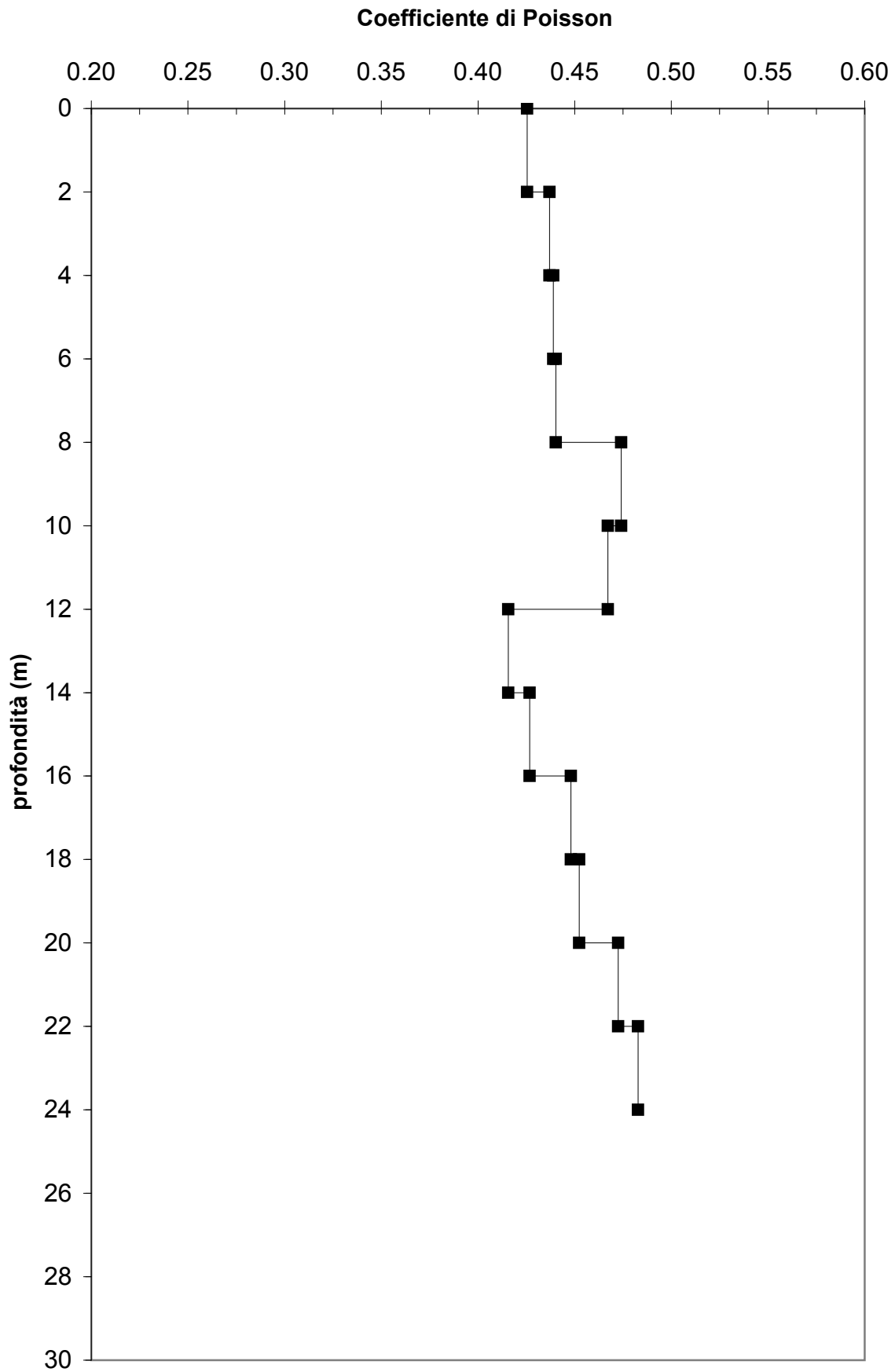




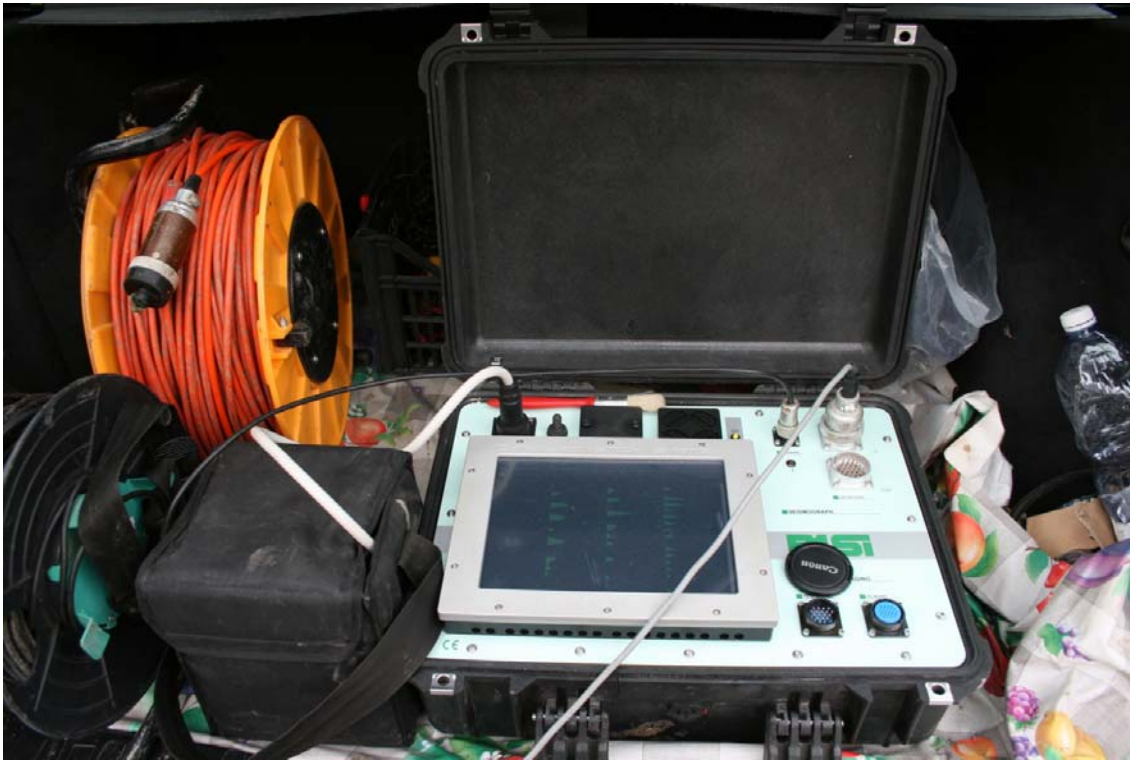
Sondaggio Down Hole - SE12



# Sondaggio Down Hole - SE12



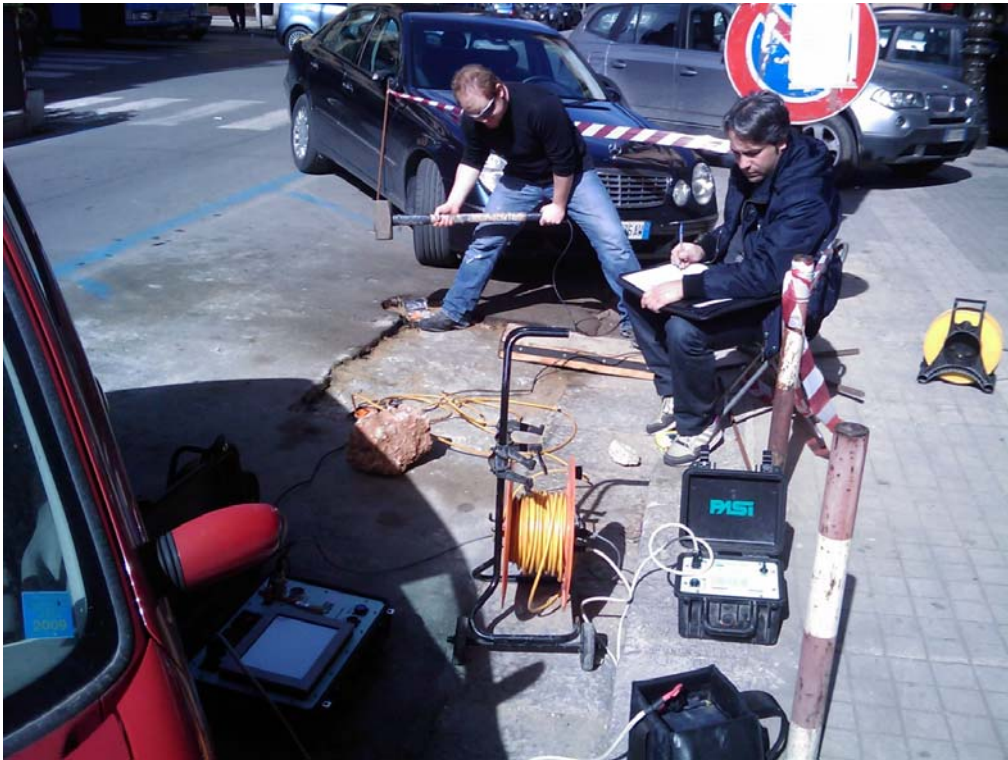
*Strumentazione utilizzata PASI*



*Sondaggio Down Hole DHSE02*



*Sondaggio Down Hole DHSE08*



## *Sondaggio Down Hole DHSE12*



## *7.2 Indagini di sismica passiva a stazione singole – Tromografia*

Allo scopo di determinare le velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) dei terreni presenti, si è ritenuto necessario l'utilizzo della tecnica di sismica passiva a stazione singola HVSR.

In particolare sono state eseguite numerose misure di microtremore ambientale, la cui ubicazione è visibile nelle planimetrie allegate, con un sismografo digitale progettato specificatamente per l'acquisizione del rumore sismico.

Di seguito vengono riportati alcuni cenni riguardo la metodologia utilizzata.

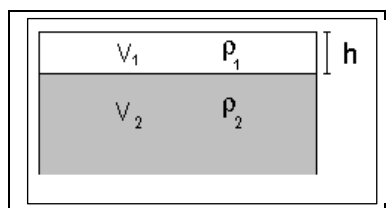
La sismica passiva è una tecnica che permette di definire la serie stratigrafica locale basandosi sul concetto di contrasto di impedenza dove per strato si intende un'unità distinta in relazione al rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

I primi studi su questa tecnica sono da attribuire a Kanai (1957) e da allora diversi metodi sono stati proposti per estrarre utili informazioni sul sottosuolo a partire dagli spettri del rumore sismico registrati in sito.

Tra tutte le tecniche messe a punto quella che si è maggiormente consolidata è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (HVSR), applicata da Nogoshi e Igarashi (1970). Successivamente Nakamura (1989) ha applicato tale metodo come strumento per la determinazione dell'amplificazione sismica locale.

Le basi teoriche dell'HVSR sono relativamente semplici in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D).

Considerando lo schema illustrato nella Figura 1 si osserva che sono presenti due strati (1 e 2) che si differenziano per le densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).



**Figura 1. Modello di suolo costituito da due strati a diverse velocità delle onde sismiche e densità.**

In questo caso un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dalla superficie di strato.

L'onda riflessa interferendo con quelle incidenti si somma e raggiunge le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore H del primo strato.

Ne consegue che la frequenza di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{P1}/(4 H) \quad [1]$$

mentre quella relativa alle onde S è

$$f_r = V_{S1}/(4 H) \quad [2]$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra, come massimi relativi, le frequenze di risonanza dei vari strati.

Questo dato, insieme alla stima delle velocità, è in grado di fornire utili previsioni sullo spessore H degli strati.

Questa informazione è contenuta principalmente nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto tra gli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per:

- ❖ il contenuto in frequenza;
- ❖ la risposta strumentale;



- ❖ l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Da evidenziare, inoltre, che i microtremori sono costituiti da onde di volume, P o S, ed in misura maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh.

Tale inconveniente è facilmente superabile sia perché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva, sia perché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

D'altro canto l'applicabilità pratica della formula [2] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica che nell'ambito ingegneristico.

La strumentazione utilizzata per l'acquisizione dei dati sperimentali, consiste in un tromografo digitale denominato "Tromino", dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente alimentato da 2 batterie AA da 1.5 V, fornito di GPS interno e senza cavi esterni. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

Dalle registrazioni del rumore sismico sono state ricavate e analizzate due serie di dati:

- le curve HVSR che sono state ottenute col software Grilla eseguendo un processing con i seguenti parametri:
  - ⇒ larghezza delle finestre d'analisi pari a 20 s per tempi di acquisizione di 20 minuti;
  - ⇒ lisciamento secondo finestra triangolare con ampiezza pari al 10% della frequenza centrale;

- ⇒ rimozione delle finestre con rapporto STA/LTA (media a breve termine/media a lungo termine) superiore ad 2;
- ⇒ rimozione manuale di eventuali transienti ancora presenti.
- le curve dello spettro di velocità delle tre componenti del moto sono state ottenute dopo l'analisi con gli stessi parametri sopra riportati.

Le profondità  $H$  delle discontinuità sismiche sono state ricavate tramite la formula sotto riportata, in cui:

- ❖  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato;
- ❖  $a$  un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione, ecc.);
- ❖  $\nu$  la frequenza fondamentale di risonanza.

$$H = \left[ \frac{V_0(1-a)}{4\nu} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1$$

Le ubicazioni dei sondaggi eseguiti sono visibili nella planimetria allegata.

Di seguito sono riportate, in dettaglio, le interpretazioni dei dati sperimentali ottenuti.

I dati sperimentali ricavati dalle indagini di sismica passiva a stazione singola permettono di ricavare una stima delle velocità delle onde di taglio  $V_s$ .

In generale, la frequenza di risonanza delle onde S che viaggiano all'interno di uno strato è legata al tempo di tragitto delle onde S nello strato stesso dalla relazione:

$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

Dove  $T_H$  è il tempo di tragitto dall'interfaccia risonante e  $f_r$  è la frequenza di risonanza.

A partire dalla formula precedente e conoscendo la profondità  $h$  dell'interfaccia risonante è definibile la velocità media delle onde S nella struttura risonante

$$V = \frac{H}{T_H}$$

e

$$f_r = \frac{1}{4T_H}$$

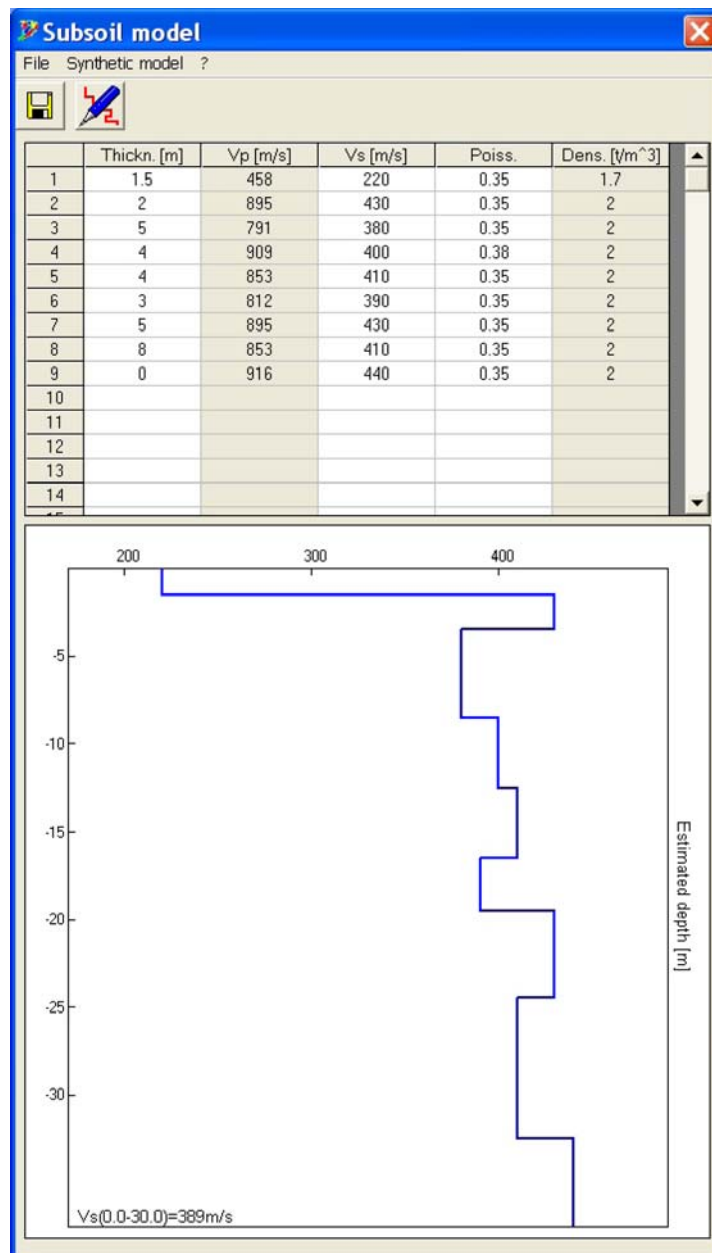
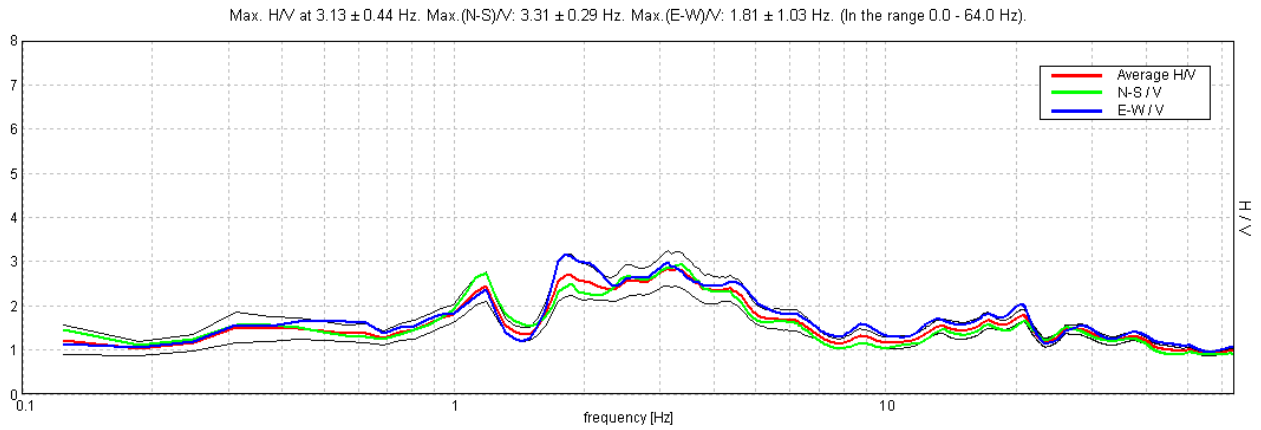
da cui si ricava

$$V = 4 f_r h$$

Nelle tabelle seguenti sono riportati i valori delle velocità delle onde trasversali per i primi 30 m di profondità dal piano compagna, registrate durante l'esecuzione dei sondaggi, nonché una tabella con le  $V_s$  caratteristiche per ogni tipo litologico interessato dalla realizzazione delle opere.

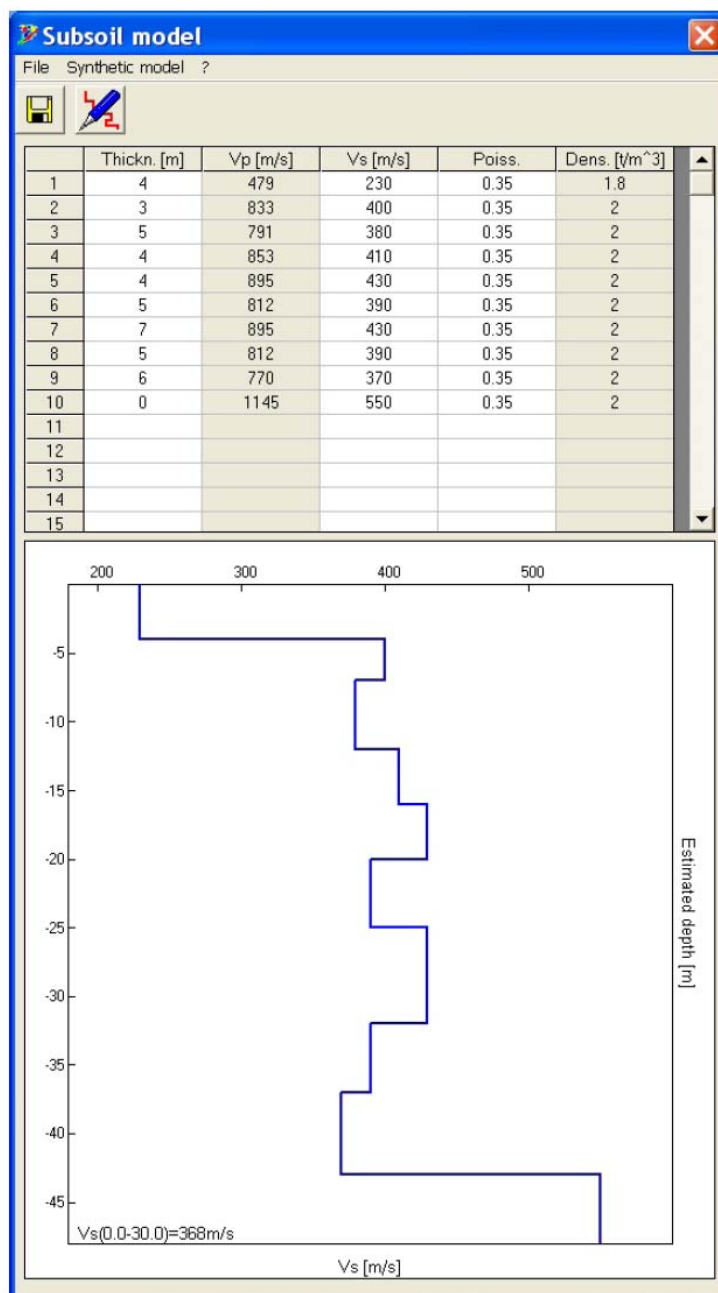
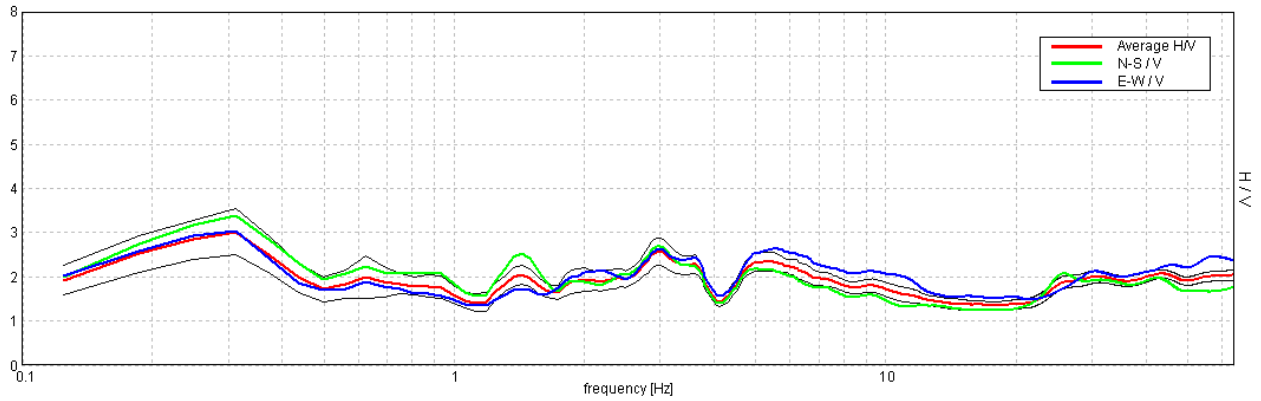
SONDAGGIO TROMOGRAFICO	Vs30 (m/sec)
T1	389
T13	368
T3	357
T4	180
T5	352
T5 bis	305
T6	309
T7	377
T9	366
T10	363
T11	372
T11 bis	419

# Sondaggio tromografico T1 in corrispondenza SE01 – Stazione Libertà



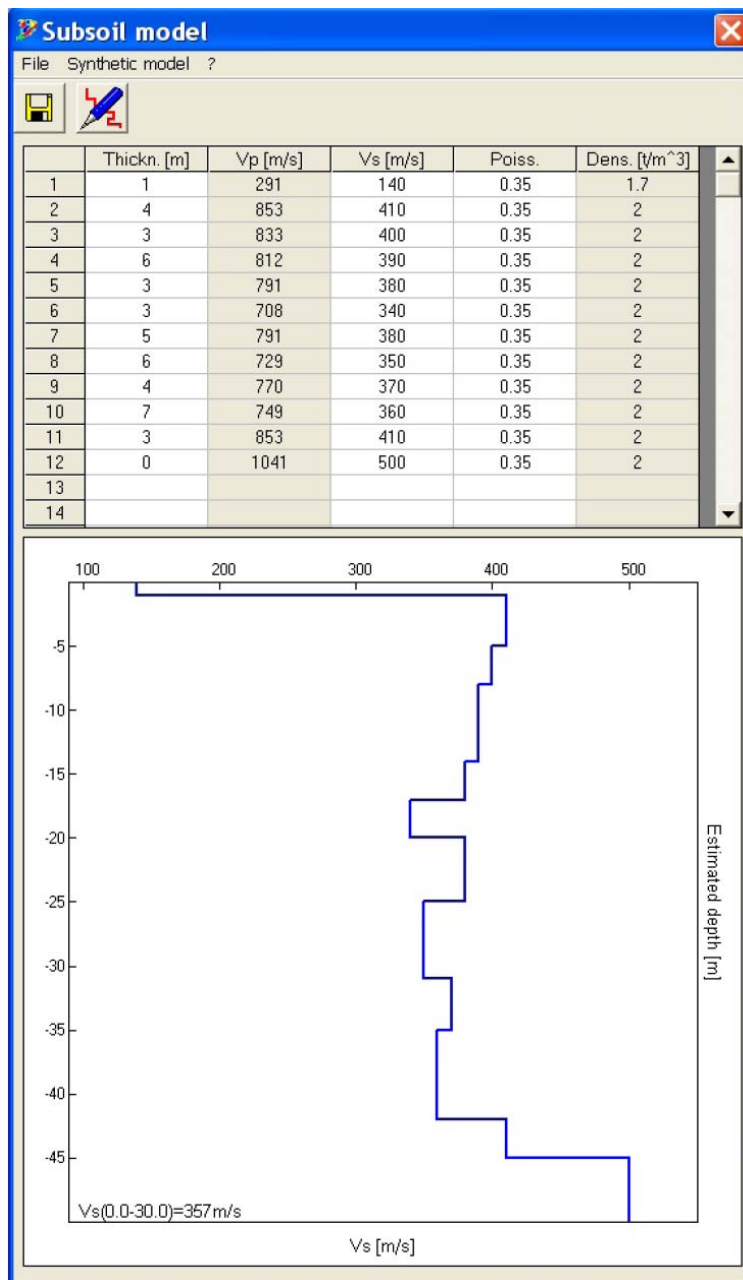
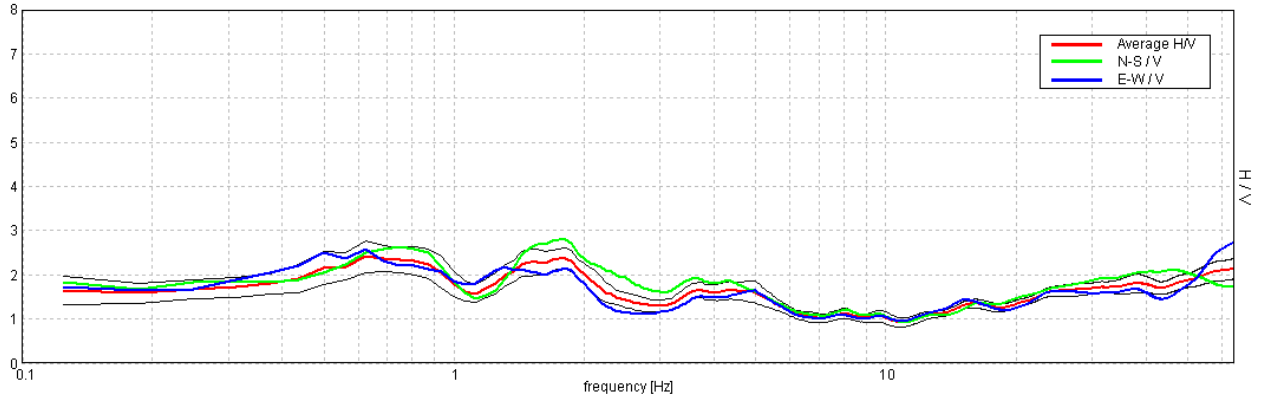
# Sondaggio tromografico T13 - Trincea Ucciardone

Max. HV at 0.31 ± 0.08 Hz. Max. (N-S)/V: 0.31 ± 0.14 Hz. Max. (E-W)/V: 0.31 ± 0.74 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



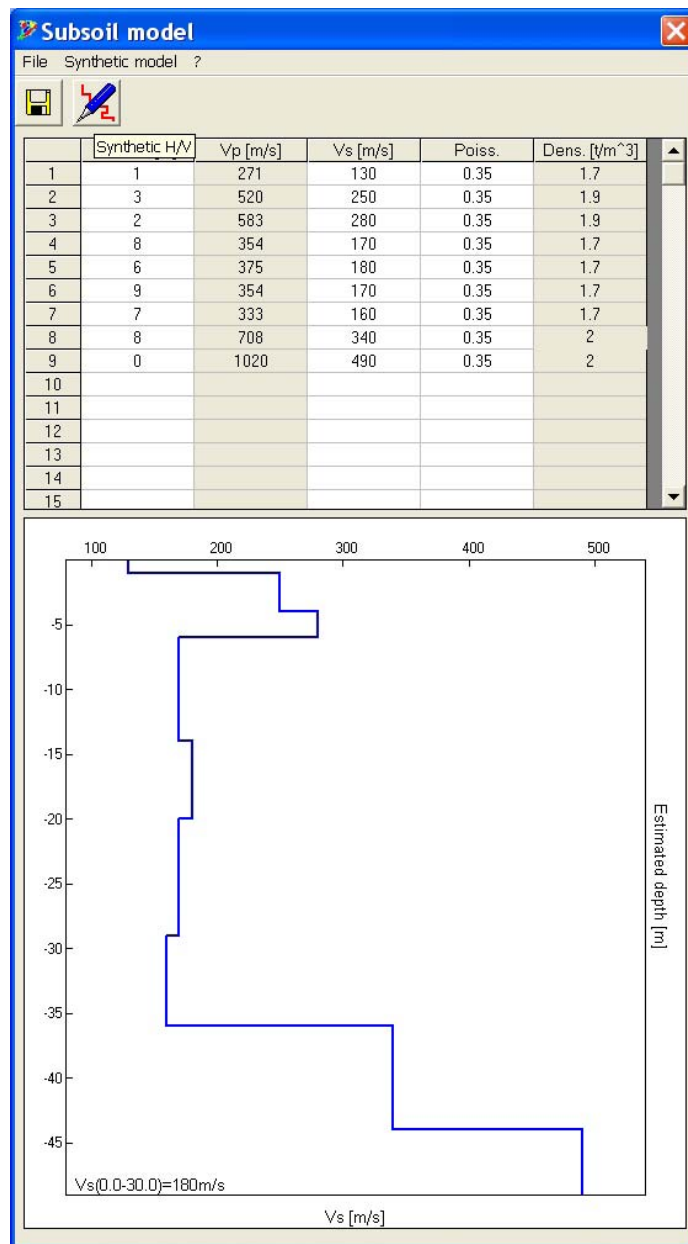
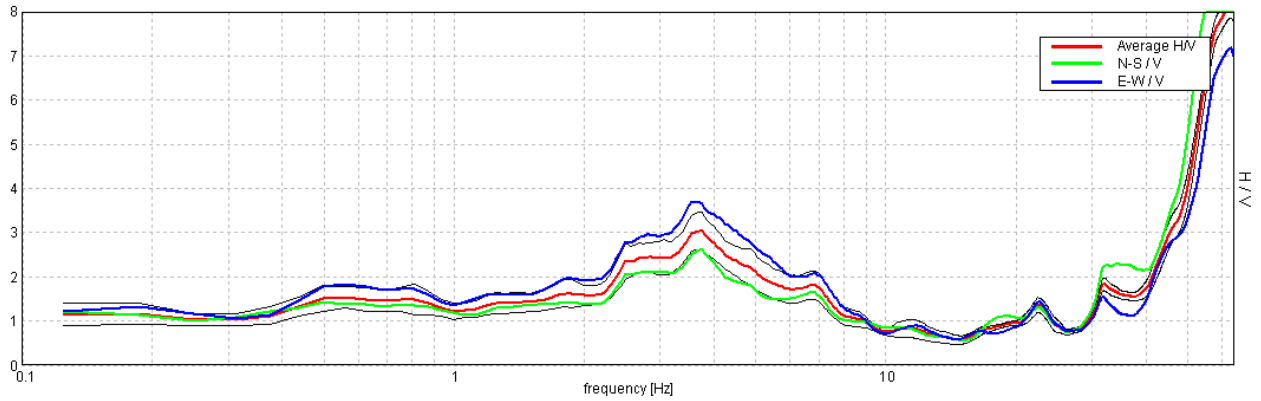
# Sondaggio tromografico T3 in corrispondenza SE03

Max. HV at 0.63 ± 3.88 Hz. Max.(N-S)/V: 1.75 ± 0.23 Hz. Max.(E-W)/V: 63.94 ± 11.26 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



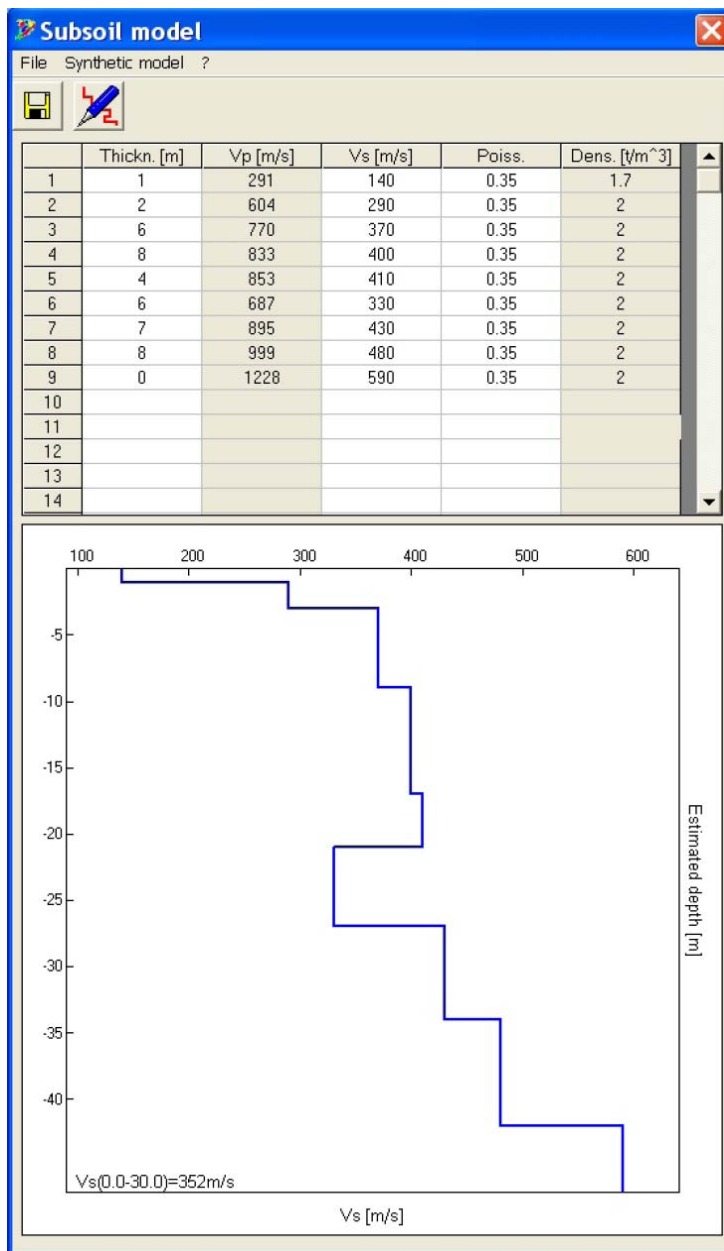
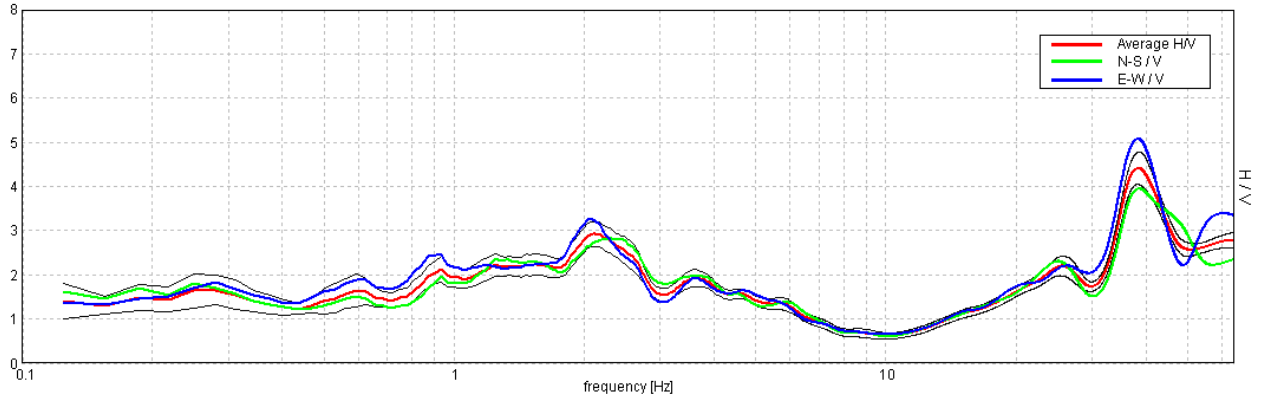
# Sondaggio tromografico T4 in corrispondenza SE04

Max. HV at 63.0 ± 0.11 Hz. Max.(N-S)/V: 63.94 ± 0.42 Hz. Max.(E-W)/V: 62.63 ± 0.49 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



# Sondaggio tromografico T5 in corrispondenza SE05

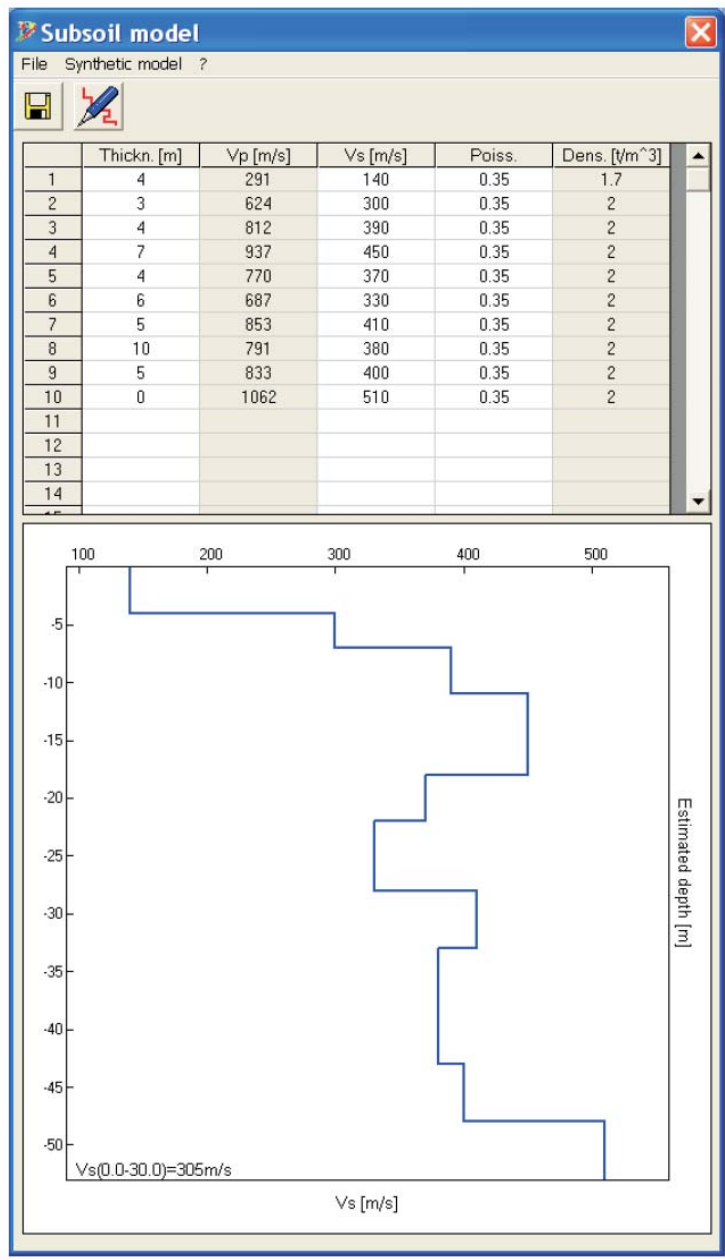
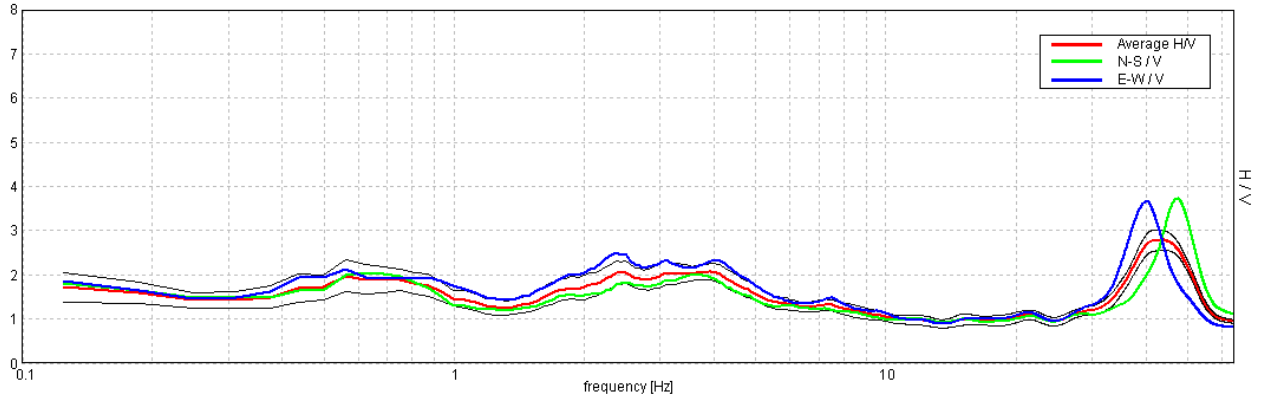
Max. HV at 38.44 ± 0.21 Hz. Max. (N-S)/V: 38.44 ± 1.73 Hz. Max. (E-W)/V: 38.44 ± 0.32 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).





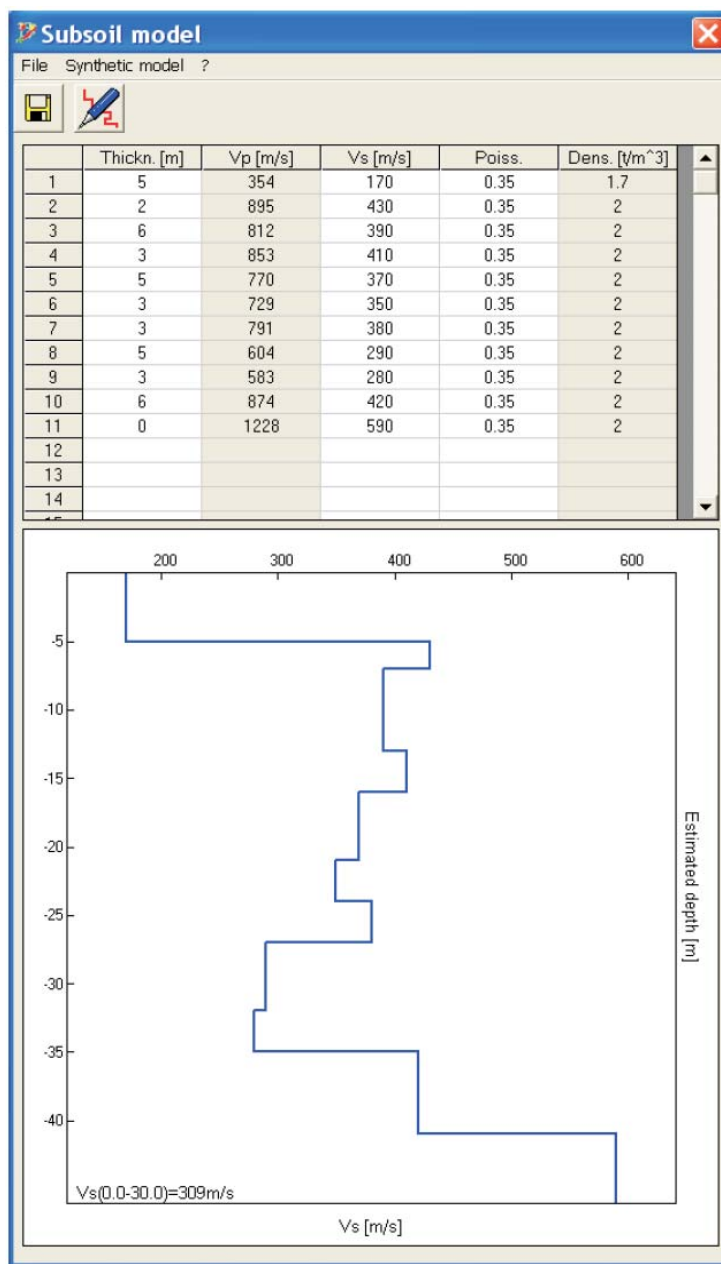
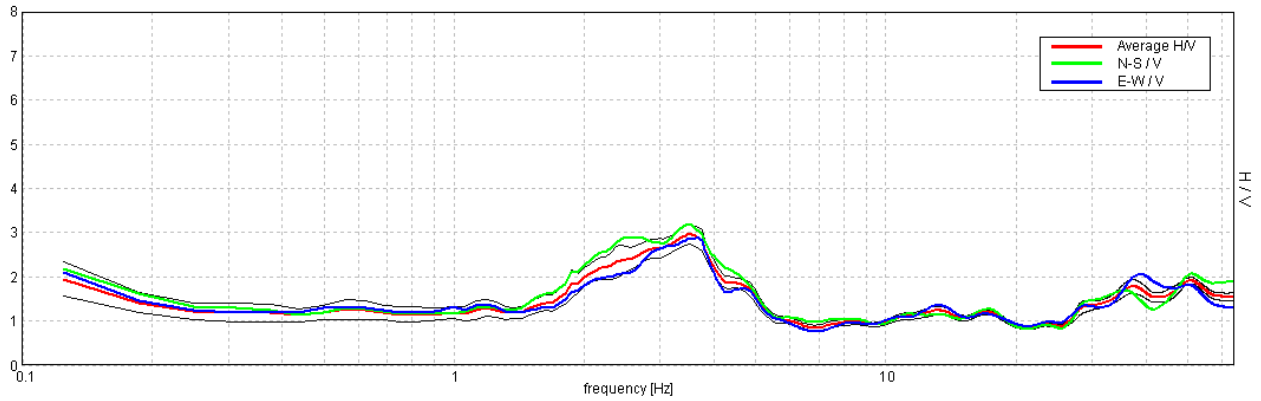
# Sondaggio tromografico T5bis in corrispondenza SE05BIS

Max. H/V at 43.81 ± 0.08 Hz. Max.(N-S)/V: 47.44 ± 0.24 Hz. Max.(E-W)/V: 40.0 ± 0.1 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

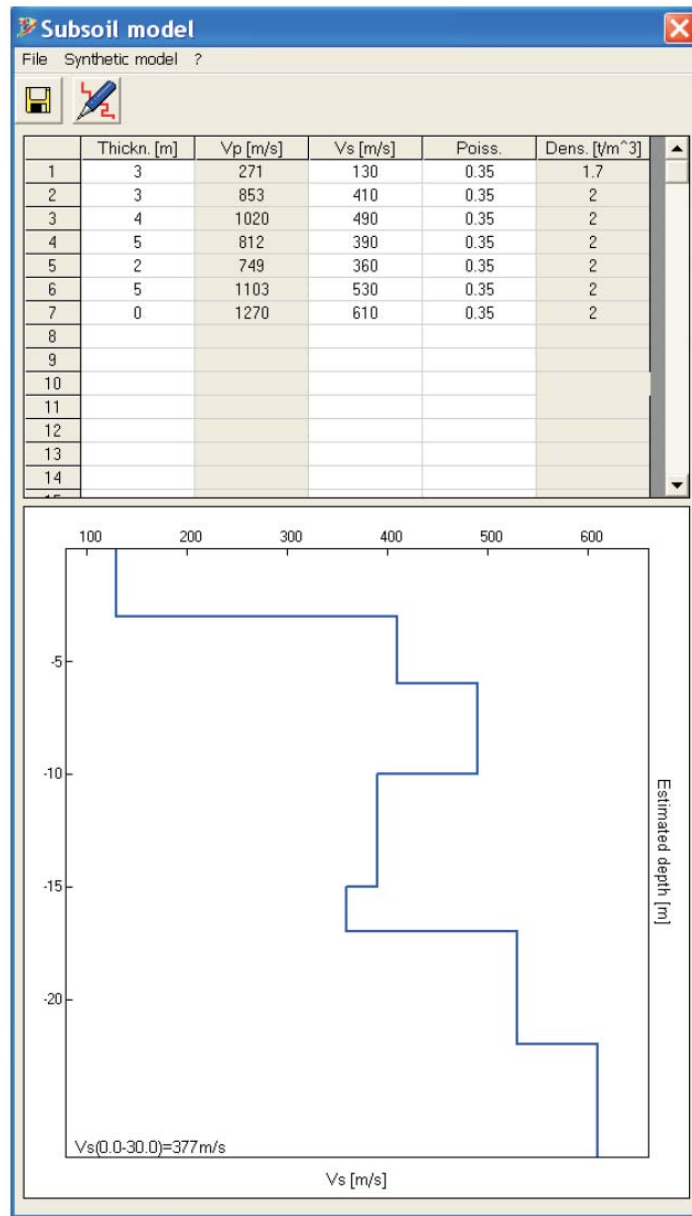
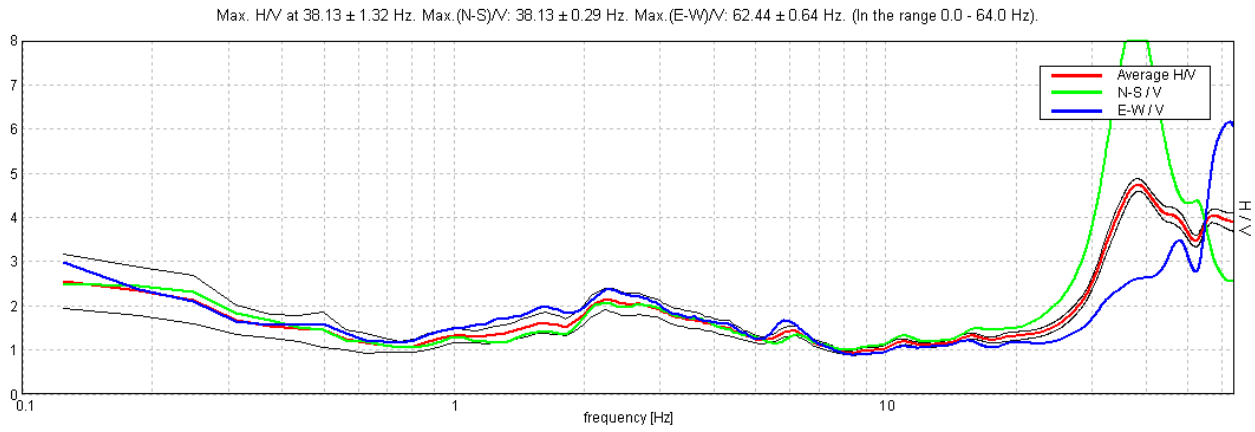


# Sondaggio tromografico T6 in corrispondenza SE06

Max. HV at  $3.5 \pm 0.13$  Hz. Max. (N-S)/V:  $3.5 \pm 0.21$  Hz. Max. (E-W)/V:  $3.63 \pm 0.18$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

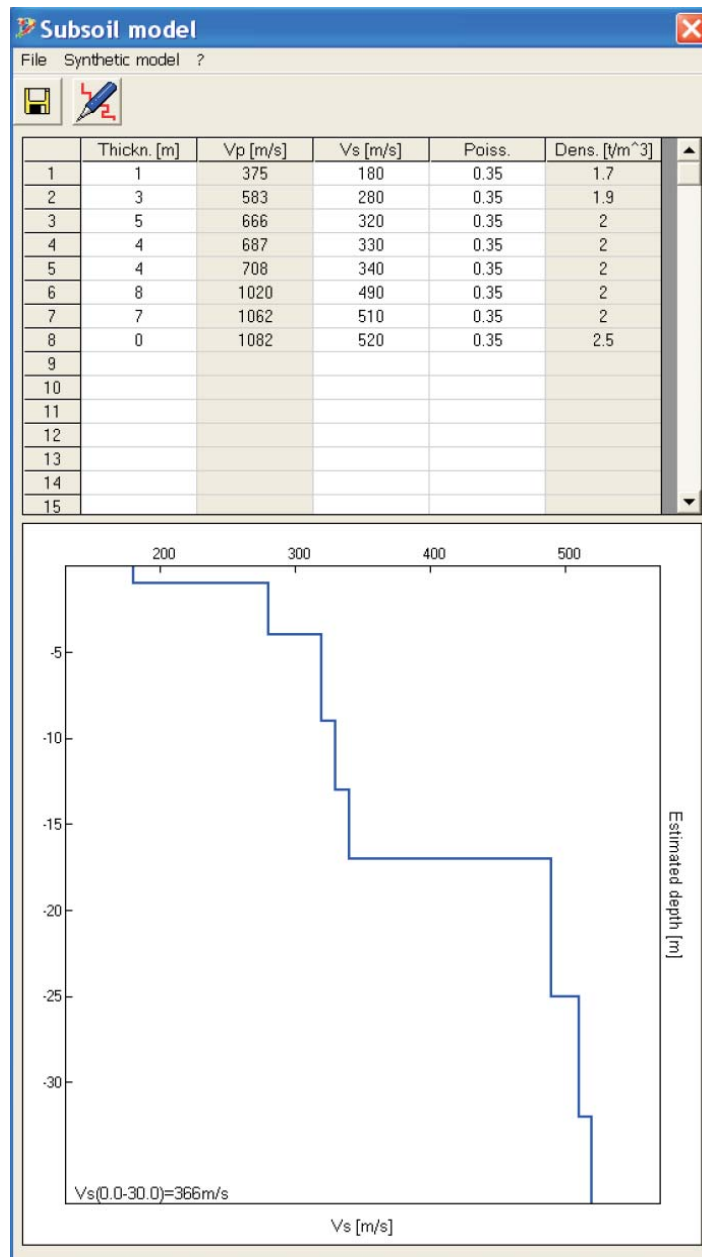
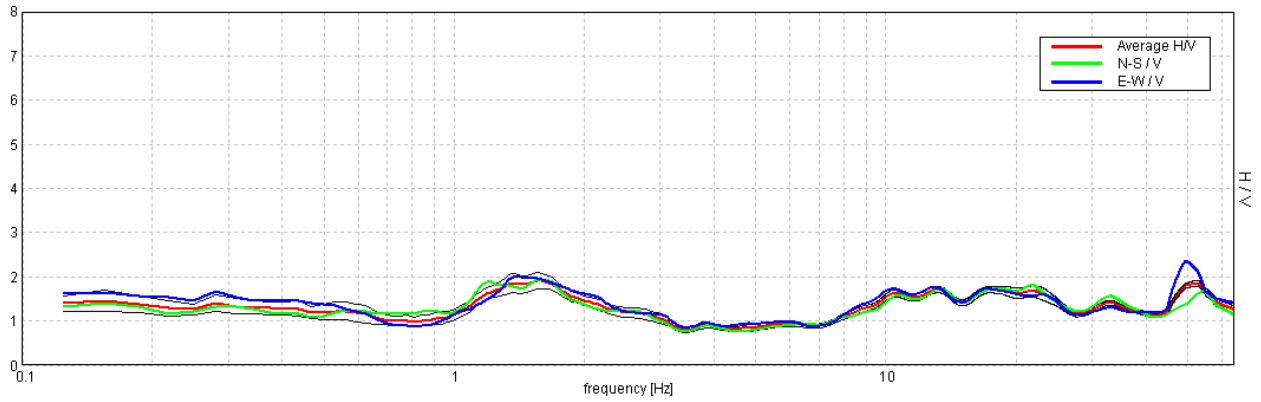


# Sondaggio tomografico T7 in corrispondenza SE07



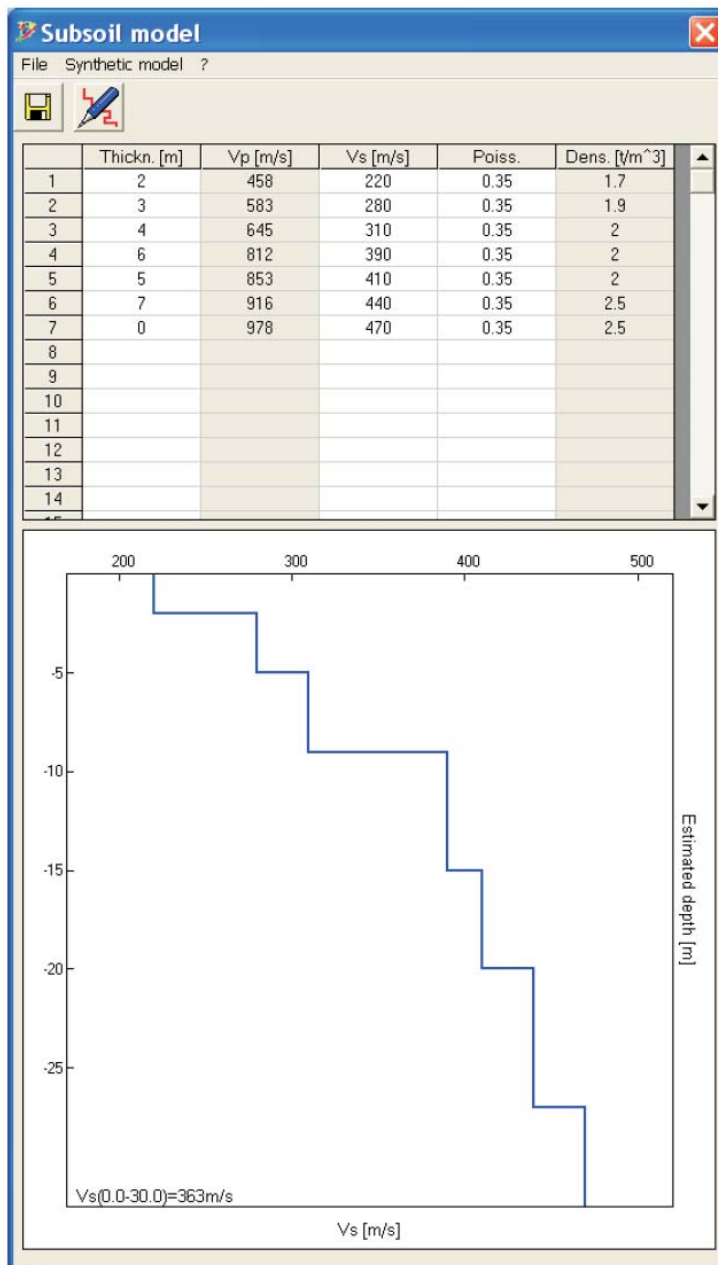
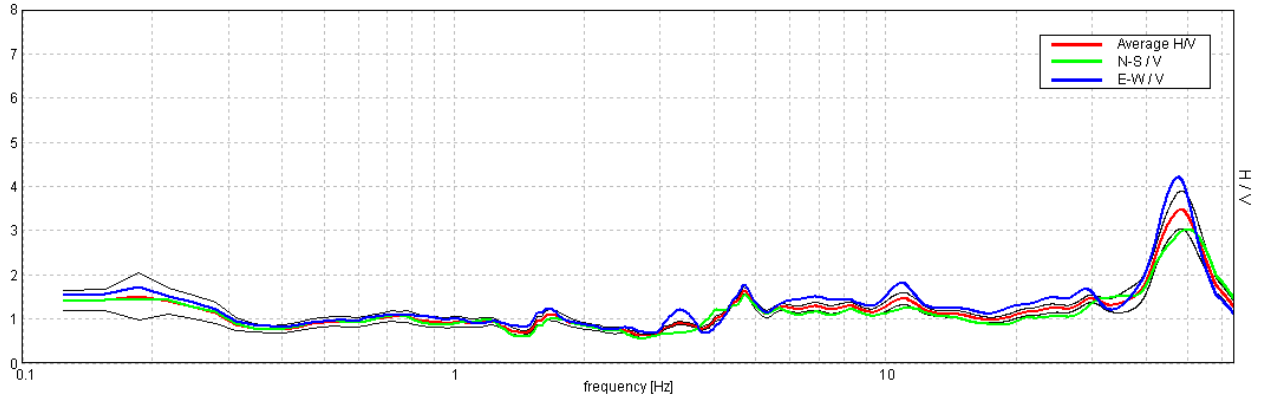
# Sondaggio tromografico T9 in corrispondenza SE09

Max. H/V at 1.56 ± 2.96 Hz. Max. (N-S)/V: 1.56 ± 0.12 Hz. Max. (E-W)/V: 49.38 ± 4.25 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



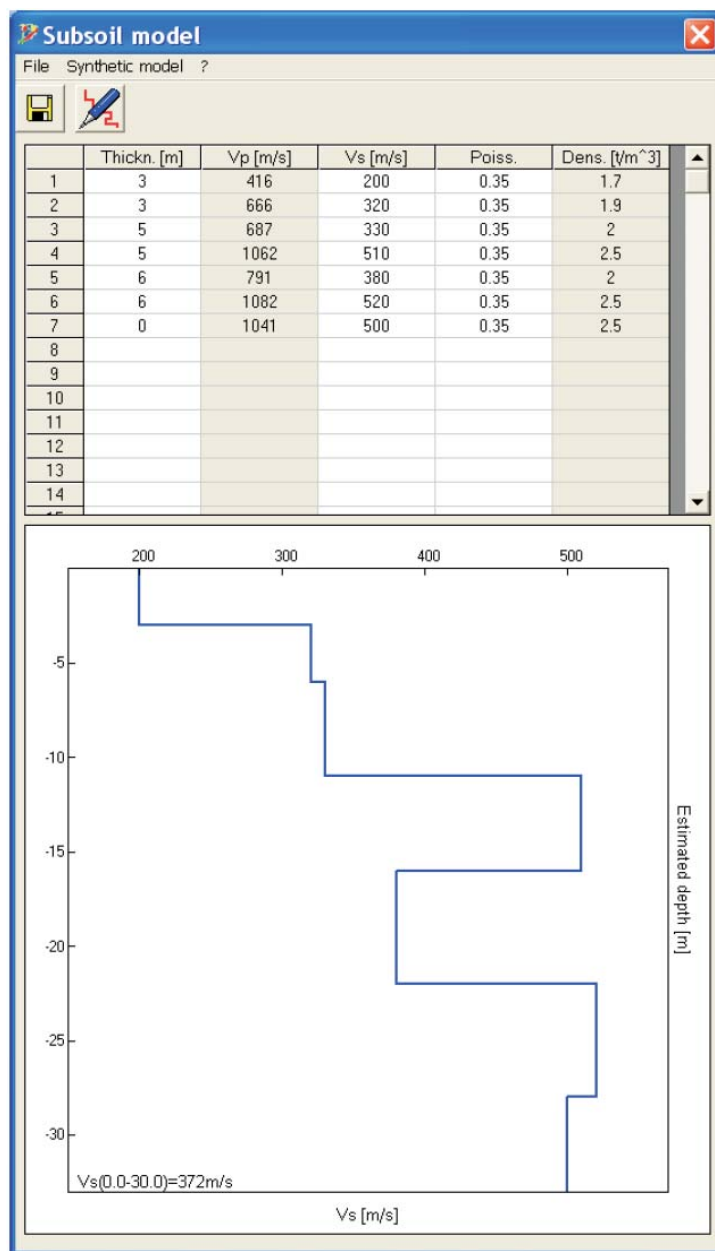
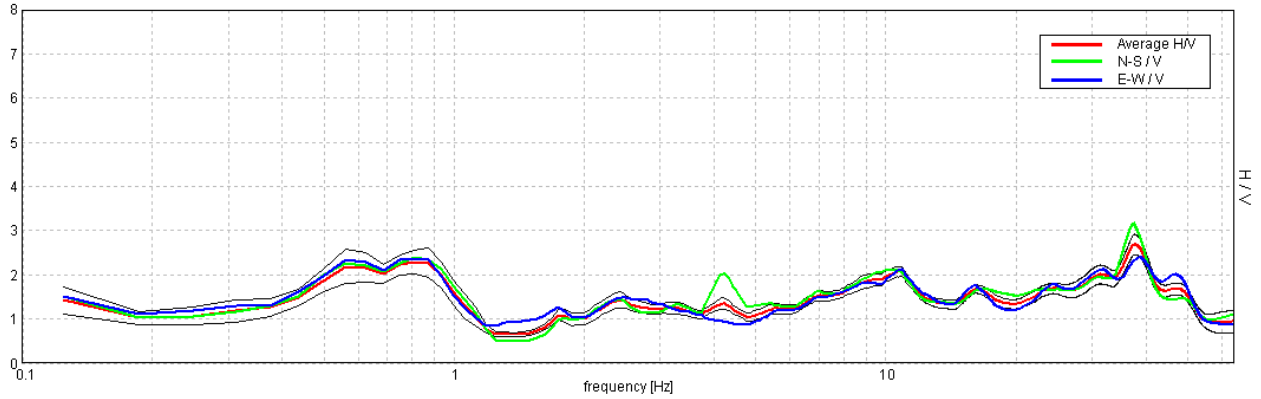
# Sondaggio tromografico T10 in corrispondenza SE10

Max. HV at 48.13 ± 0.19 Hz. Max.(N-S)V: 50.0 ± 0.61 Hz. Max.(E-W)V: 47.5 ± 0.19 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



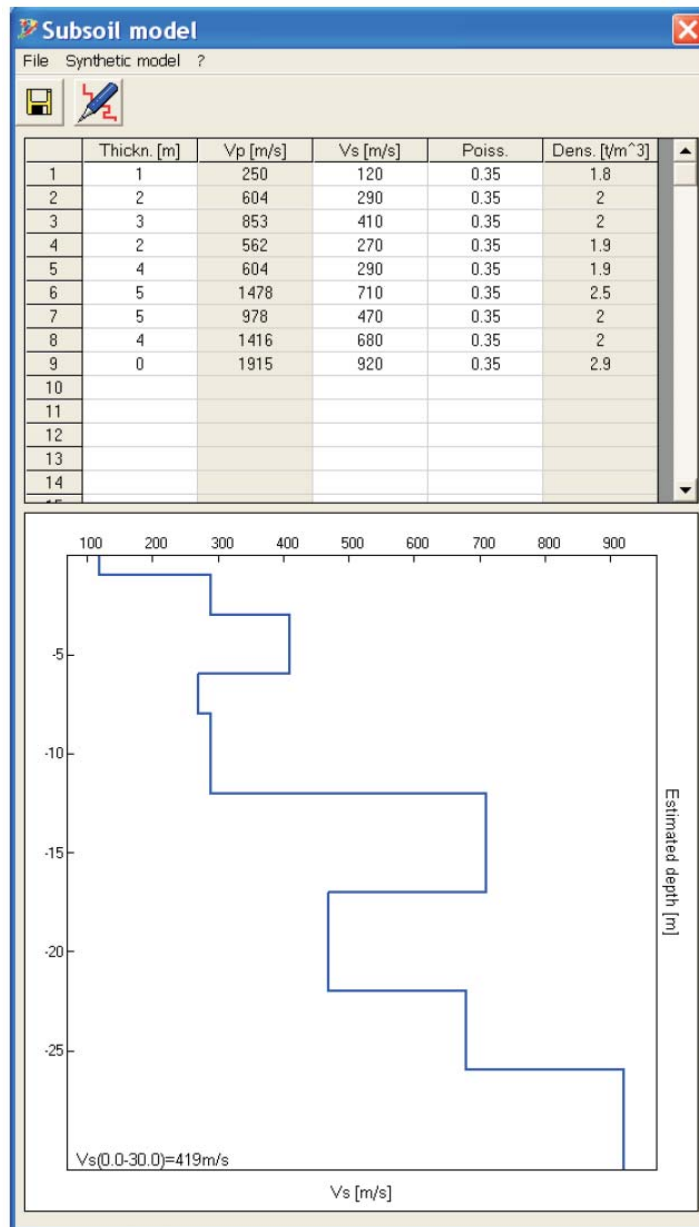
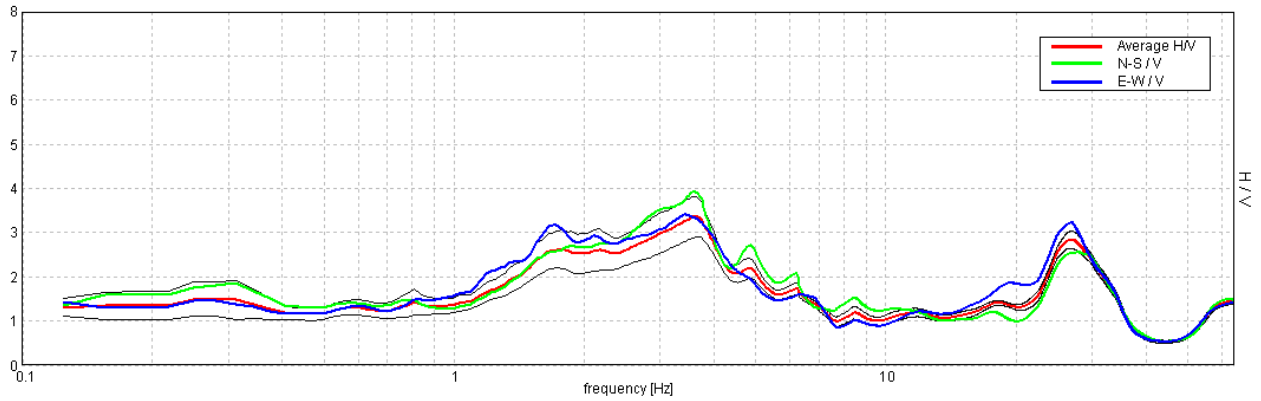
# Sondaggio tromografico T11 in corrispondenza SE11

Max. H/V at 37.5 ± 4.16 Hz. Max. (N-S)/V: 37.44 ± 3.28 Hz. Max. (E-W)/V: 38.75 ± 6.7 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



# Sondaggio tromografico T11bis in corrispondenza SE11BIS

Max. HV at 3.63 ± 1.81 Hz. Max. (N-S)/V: 3.59 ± 1.49 Hz. Max. (E-W)/V: 3.44 ± 2.93 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



*Sondaggio tromografico T1*



*Sondaggio tromografico T13*





*Sondaggio tromografico T3*



*Sondaggio tromografico T4*



*Sondaggio tromografico T5*



*Sondaggio tromografico T5bis*



*Sondaggio tromografico T6*



*Sondaggio tromografico T7*



*Sondaggio tromografico T9*



*Sondaggio tromografico T10*



*sondaggio tromografico T11*



*Sondaggio tromografico T11bis*



## **8. INDAGINI GEOFISICHE PER L'INDIVIDUAZIONE DEL TETTO DEL SUBSTRATO IMPERMEABILE NEL TRATTO COMPRESO TRA LA TRINCEA UCCIARDONE E LA STAZIONE PORTO**

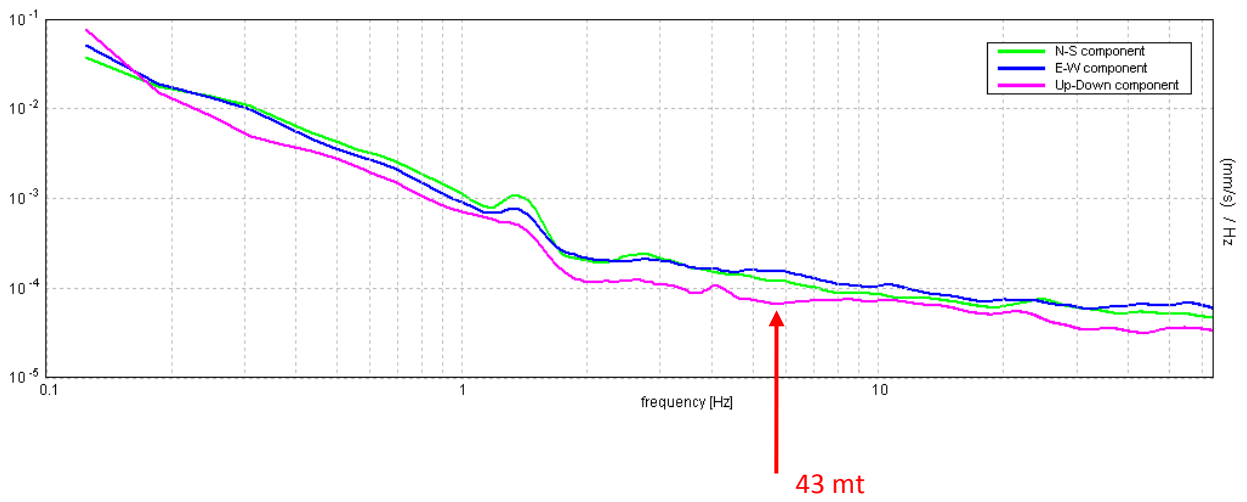
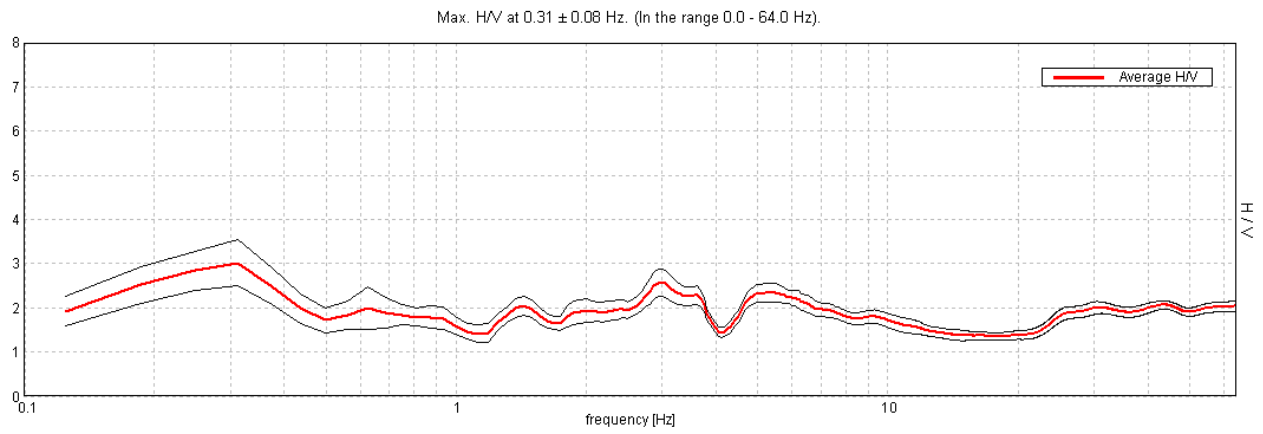
Per un esauriente studio della falda che viene interferita dal tracciato ferroviario, soprattutto nel tratto compreso tra la Trincea Ucciardone e la Stazione Porto, si è reso necessario dare ai progettisti un'idea, quanto più dettagliata possibile, dello spessore della falda.

In tal senso i sondaggi eseguiti e quelli fornitici da Italferr, spinti fino a 30 mt. dal p.c., non hanno intercettato, in questo tratto, il substrato impermeabile, qui rappresentato dai litotipi della Fm. del Flysch Numidico.

Si è reso, quindi, necessario, al fine di dare ai progettisti quanto richiesto per i loro calcoli idraulici, integrare i sondaggi geognostici con una campagna di sondaggi di sismica passiva (tomografia) che con costi limitati ma con un'ottima approssimazione ci ha permesso di individuare lo spessore del complesso Plio-Pleistocenico permeabile e l'andamento del tetto del substrato impermeabile.

Non entrando nel merito della tecnologia utilizzata che è stata esaurientemente descritta nel capitolo precedente, in questo ambito si deve solo dire che la tomografia ci permette di raggiungere spessori di investigazione notevole (circa 100 mt.) e, quindi, ci ha consentito di poter ricostruire il profilo idrogeologico longitudinale allegato da cui è chiaramente visibile l'andamento del tetto del substrato impermeabile e lo spessore della falda che è risultato sempre superiore ai 40 mt.

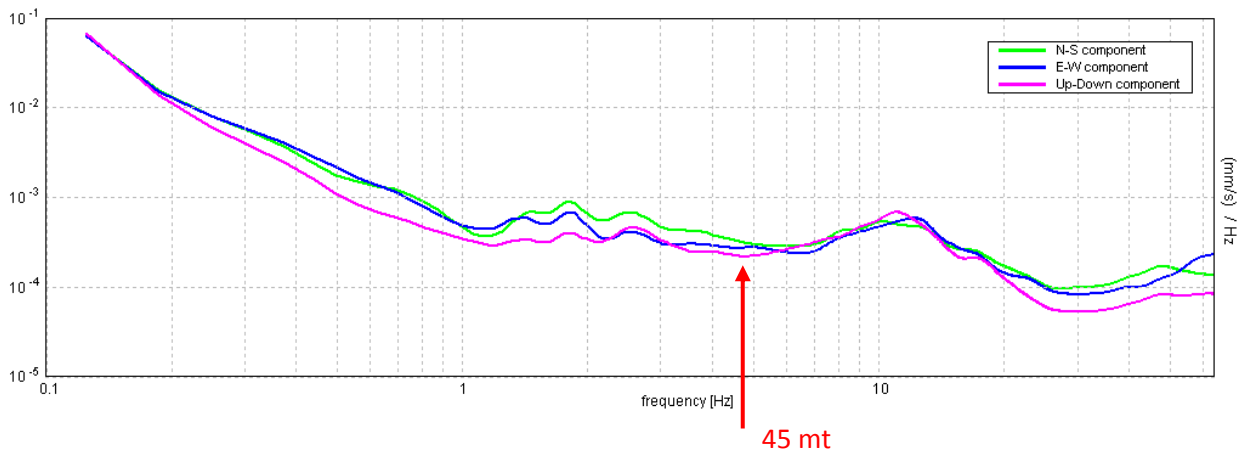
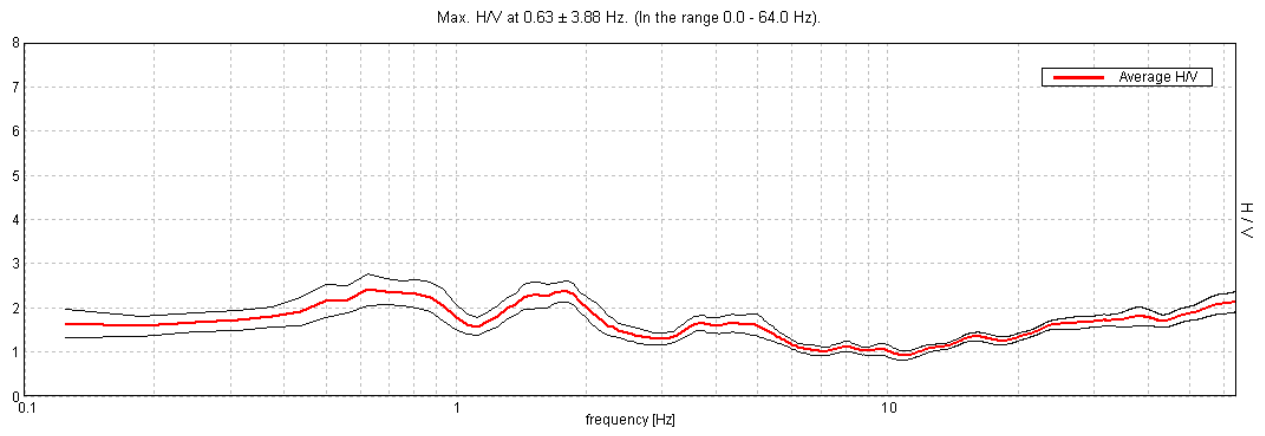
# Sondaggio tromografico T13



## Legenda

↑  
Profondità substrato impermeabile

# Sondaggio tomografico T3 in corrispondenza SE03

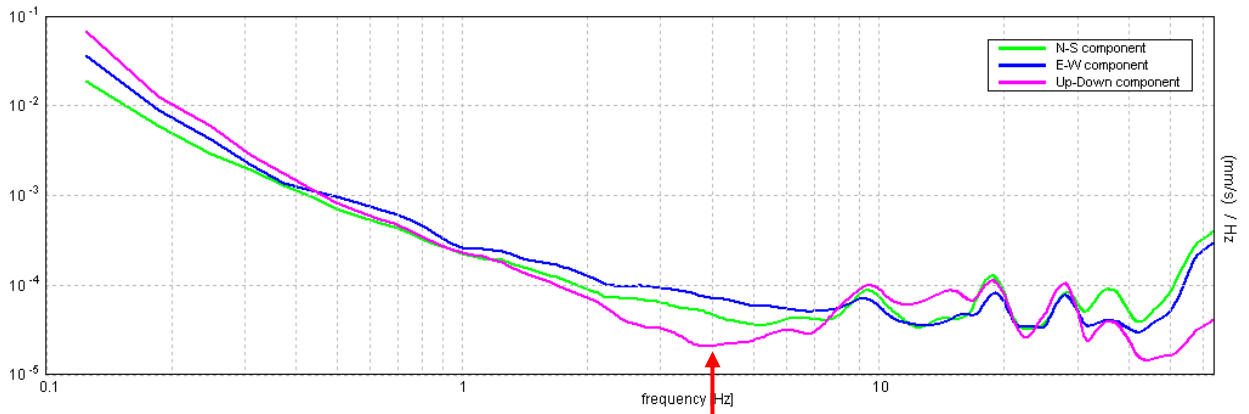
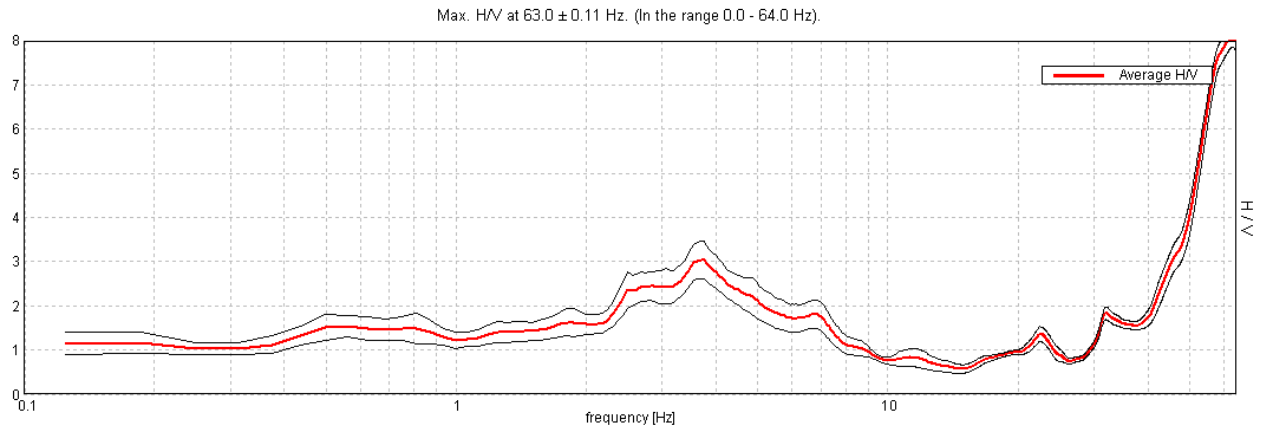


Legenda

↑  
Profondità substrato impermeabile



# Sondaggio tromografico T4 in corrispondenza SE04



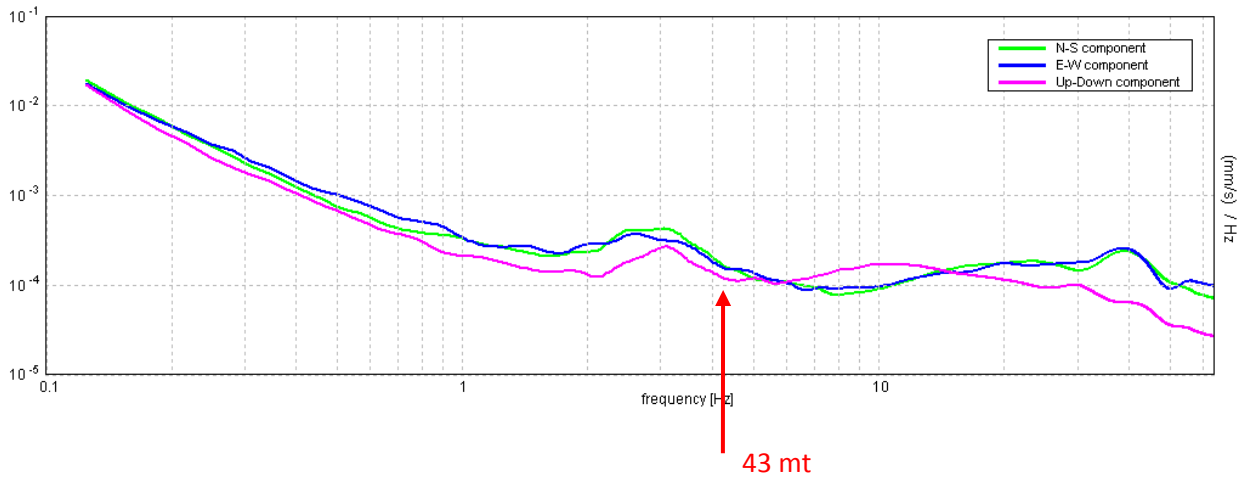
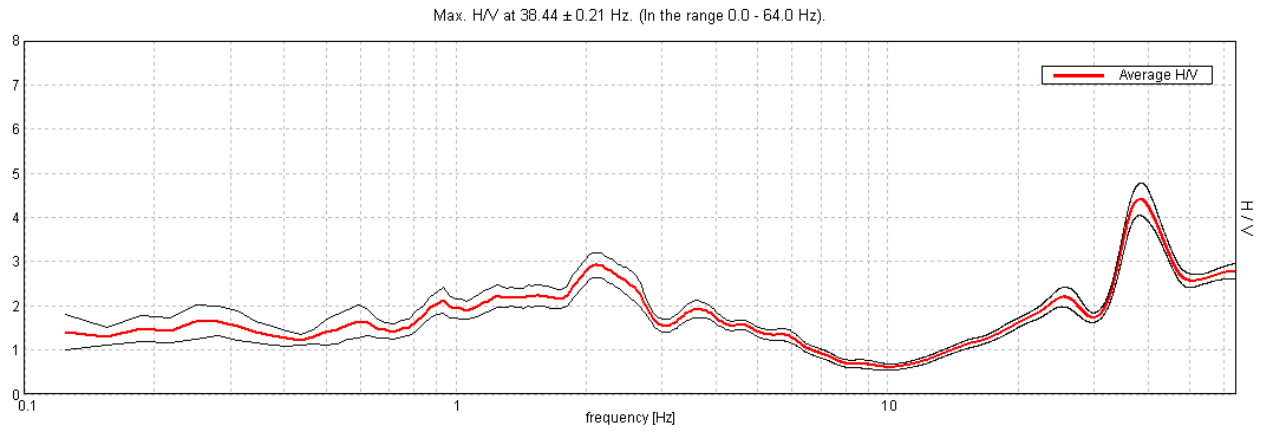
46 mt

Legenda



Profondità substrato impermeabile

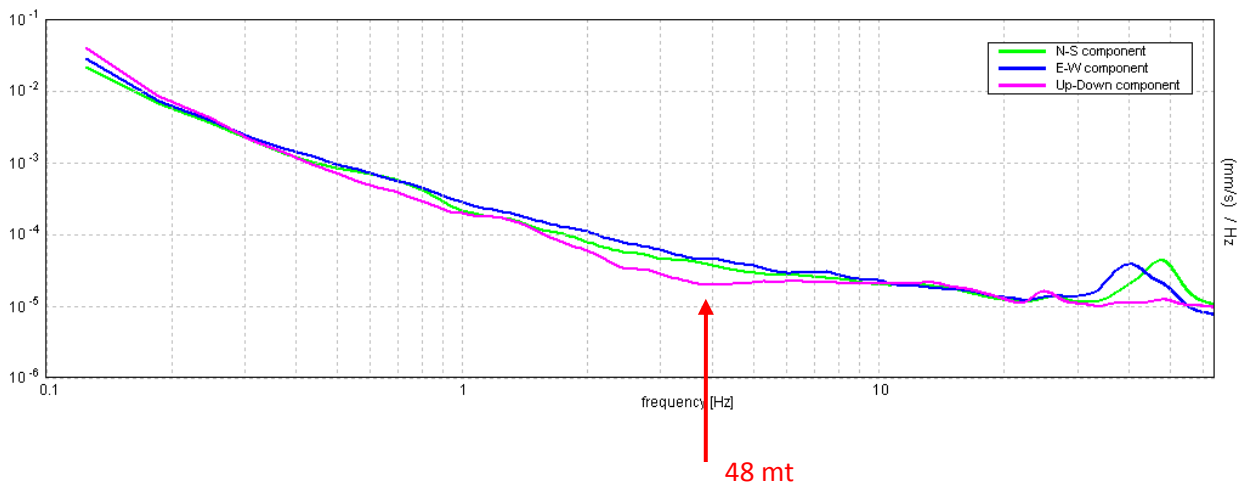
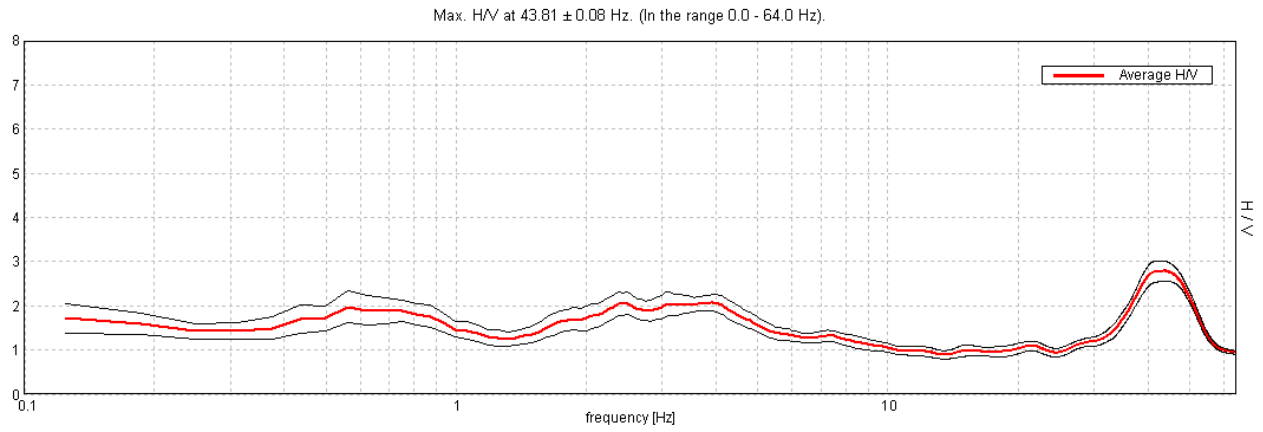
# Sondaggio tromografico T5 in corrispondenza SE05



Legenda

↑  
Profondità substrato impermeabile

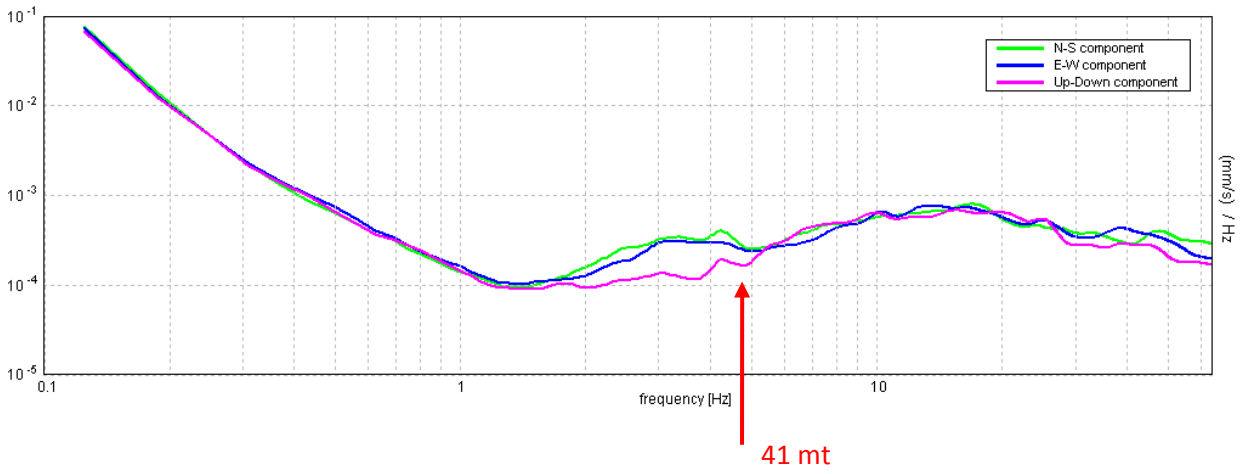
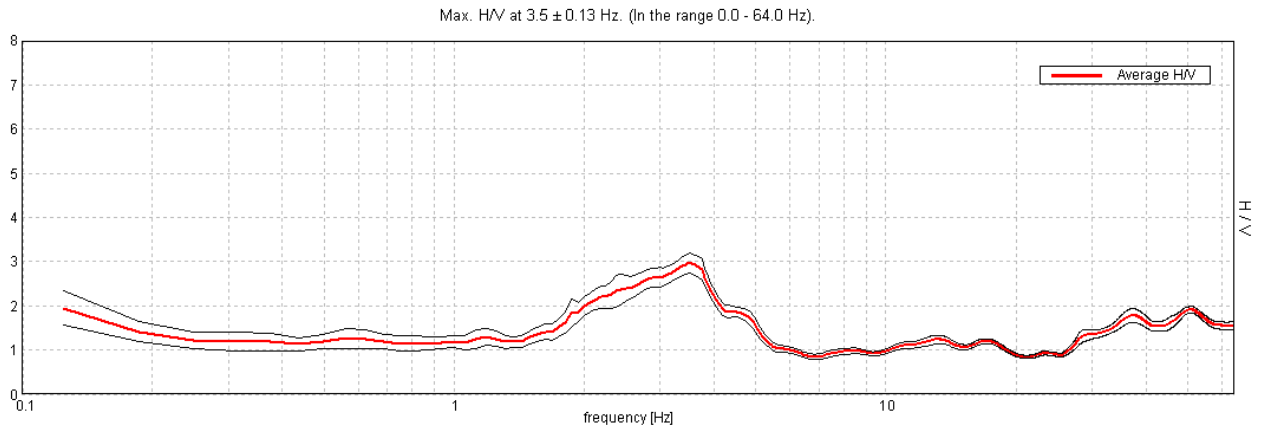
# Sondaggio tromografico T5bis in corrispondenza SE05BIS



Legenda

↑  
Profondità substrato impermeabile

# Sondaggio tromografico T6 in corrispondenza SE06



Legenda

↑  
Profondità substrato impermeabile

## **9. INDAGINI GEOFISICHE PER LA RICERCA DELLE CAVITÀ**

Una parte del tracciato ferroviario (parte iniziale della trincea Ucciardone), la stazione Libertà ed una porzione del sito dove sarà realizzata la stazione Politeama sono interessati, secondo il P.A.I. ed il PRG, da un sito di attenzione per la presenza di cavità sotterranee e, di conseguenza, da un alto rischio di crolli e cedimenti del suolo.

Si tratta di cavità antropiche di vario tipo: a) puntuali (camere dello scirocco, cripte, cave ad imbuto, vecchi ricoveri scavati durante l'ultima guerra, ect.), b) gallerie anche a vari livelli realizzate per la coltivazione della calcarenite utilizzata sino a pochi decenni fa come materiale da costruzione.

Per verificare l'eventuale presenza di cavità in corrispondenza delle opere da realizzare, all'interno dei siti indicati dagli strumenti normativi, si sono utilizzate due tecniche di indagine geofisica: a) georadar; b) tromografia.

Ciò si è reso necessario in quanto la tecnica del georadar, senza dubbio la più efficace per questo tipo di ricerca, ha il limite di poter studiare, con il necessario dettaglio, spessori di terreno non superiori ai 6-8 mt. e comunque sempre lo spessore al di sopra della falda.

Come visto precedentemente, invece, la tecnica tromografica ci permette di studiare spessore decisamente maggiori.

***Il combinato disposto dei risultati delle due tecniche ci permette di escludere che il tracciato ferroviario e le stazioni Libertà e Politeama intercettino cavità.***

Considerato, però, che la tecnica tromografica può essere influenzata negativamente dalla presenza di un certo spessore di asfalto e terreno di riporto mentre la tecnica georadar può essere disturbata dai numerosi

sottoservizi presenti, pur avendo una notevole mole di dati che ci permettono di fare le affermazioni su esposte, si consiglia, per ulteriore sicurezza, di ripetere le prove quando, in fase di realizzazione delle opere, tutto l'asfalto e la massicciata stradale saranno stati completamente asportati.

Sulla tecnica tomografica rimandiamo ai capitoli precedenti mentre diamo di seguito le indicazioni necessarie sulla tecnica georadar, rimandando alle tabelle e agli elaborati allegati i dettagli dei risultati delle indagini eseguite.

Il classico Radar (Radio detecting and ranging, radio misuratore e rivelatore a distanza) è uno strumento che consente di rilevare le informazioni relative alla posizione di un oggetto nello spazio.

Ciò viene realizzato mediante il confronto tra un segnale di riferimento, emesso da un trasmettitore di onde elettromagnetiche e quello riflesso dall'oggetto da localizzare sul quale avviene la riflessione delle onde elettromagnetiche.

Il Georadar, noto con la sigla GPR (Ground Penetrating Radar, radar che penetra nel terreno) è un particolare radar che sfrutta i fenomeni fisici, quali la riflessione, rifrazione e diffrazione che può subire un'onda elettromagnetica quando incontra delle discontinuità all'interno del mezzo indagato legate a variazioni delle proprietà elettriche e magnetiche dei terreni o dei materiali attraversati (cavità, variazioni litologiche, corpi sepolti, ecc.) ed in particolare alla variazione della permittività (o costante dielettrica relativa). Queste ultime dipendono a loro volta dal diverso contenuto d'acqua.

In generale un sistema Georadar è costituito da :

- ✓ un'unità di controllo alla quale tramite cavi caratterizzati da particolari caratteristiche, sono collegate le antenne (trasmittente e ricevente);
- ✓ un sistema di antenne che hanno la funzione di inviare impulsi elettromagnetici e captare i segnali riflessi o rifratti;
- ✓ un'unità di acquisizione, registrazione e visualizzazione dei dati sperimentali ottenuti.

Il Georadar può essere adoperato con varie tecniche applicative:

- ✓ monostatiche se all'unità di controllo è collegata una sola antenna che, alternativamente, funziona sia da antenna trasmittente sia da antenna ricevente. Questa tecnica, detta anche RSAD (Radar Surface Arrival Detection) è molto simile alla tecnica SONAR utilizzata per i rilievi batimetrici;
- ✓ bistatiche se sono collegate due antenne, una trasmittente e l'altra ricevente.

Utilizzando il sistema monostatico, l'antenna trasmittente invia un treno di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza (10÷2500 MHz) e di breve durata ad intervalli regolari; la frequenza di ripetizione di questi impulsi è di circa 50 kHz.

Questa è alimentata da un generatore di impulsi elettrici che, nella stessa antenna, vengono trasformati in impulsi elettromagnetici. Tali impulsi si propagano all'interno del terreno finché non sono riflessi da un'eventuale discontinuità e, se caratterizzati da sufficiente energia, ritornano verso la superficie del terreno dove vengono captati dall'antenna ricevente e dopo essere stati trasformati nuovamente in impulsi elettrici, trasferiti all'unità di controllo digitalizzati, amplificati e registrati in funzione del tempo in modo da potere essere visualizzati come una funzione del loro Two-Way Travel Time (TWTT), cioè il tempo intercorso

dall'istante di trasmissione all'istante di ricezione, nella forma di un radargramma.

Esistono due modalità di visualizzazione del segnale:

- modalità “line scan” a colori , in cui ad ogni ampiezza del segnale viene attribuito un colore in funzione della sua entità e polarità;
- modalità “wiggle”, in cui il segnale è rappresentato con delle tracce, nelle quali nelle quali sono annerite o le ampiezze positive o quelle negative (o entrambe).

Gli impulsi elettromagnetici si propagano nel terreno con una velocità ricavabile dall'espressione:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Dove  $\mu$  è la permeabilità magnetica del mezzo attraversato,  $c$  è la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto ed  $\epsilon_r$  è la costante dielettrica relativa. Gli impulsi si attenuano tanto più rapidamente quanto maggiore è la frequenza dell'onda, la conducibilità elettrica e la permittività del mezzo. Sulle superfici di discontinuità del sottosuolo in cui la permittività varia da un valore  $\epsilon_1$  a un valore  $\epsilon_2$ , l'impulso elettromagnetico subisce una riflessione, con un coefficiente di riflessione  $r$  che risulta definito dalla relazione:

$$r = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

Quindi se è nota la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, utilizzando i tempi di percorso delle onde è possibile calcolare la profondità dei riflettori.



Quando l'antenna passa sopra un oggetto riflettente, essa riceve una riflessione anche quando non è sulla verticale passante per quest'ultimo. Il risultato è una tipica iperbole di riflessione.

Infine i dati sperimentali ottenuti vengono opportunamente processati con filtri ed amplificatori. In particolare, i filtri hanno la funzione di migliorare la qualità dei segnali ricevuti, attenuando le componenti del segnale caratterizzate da frequenze indesiderate (noise o rumore elettromagnetico), mentre gli amplificatori sono utilizzati per amplificare gli impulsi più deboli provenienti da riflessioni da parte di superfici di discontinuità più profonde, o da parte di litotipi particolarmente assorbenti.

Per ottenere buone informazioni, e quindi buoni risultati, è essenziale valutare attentamente le caratteristiche della litologia indagata (proprietà fisiche dei terreni, quantità di acqua in essi contenuta che caratterizza il comportamento conduttivo o dielettrico) e la scelta delle antenne da utilizzare, in base alla loro frequenza principale.

La metodologia Georadar ha il vantaggio di essere molto rapida e di essere assolutamente non distruttiva e non invasiva in quanto consente di ottenere informazioni sul sottosuolo senza alcuna alterazione dello stesso.

La strumentazione GEORADAR utilizzata per l'acquisizione dei dati sperimentali, consiste in un'unità centrale della GSSI – Geological Survey System Inc. – modello SIR 3000 ed in antenne con frequenza centrale da 500 MHz.

Questo sistema è capace di generare, captare, amplificare, filtrare ed archiviare i segnali e permette di visualizzare in tempo reale i dati acquisiti attraverso uno schermo a cristalli liquidi. Ciò consente una valutazione immediata dei dati, permettendo quindi la modifica dei parametri di acquisizione direttamente in sito. In questo modo è possibile ottimizzare la

qualità dell'acquisizione, evitando ulteriori ripetizioni delle misure e riducendo i tempi necessari per le operazioni di indagine.

I profili sono stati eseguiti applicando una tecnica di campionamento denominata RSAD (Radar Surface Arrive Detection), con una configurazione di antenne monostatica.

Questa tecnica prevede che il campionamento dei dati sia effettuato facendo scorrere sulla superficie del mezzo da indagare una antenna che funge alternativamente da trasmittente e da ricevente. In questa maniera il volume indagato è quello posto all'incirca lungo la verticale dal punto di misura.

Si è ritenuto che tale sistema potesse garantire una qualità ed una quantità dei dati sufficiente rispetto al carattere diagnostico desiderato per l'indagine, consentendo, contemporaneamente, una elevata velocità di esecuzione delle operazioni di acquisizione.

Prima di eseguire le sezioni georadar è stato necessario definire le linee di indagine lungo le quali effettuare i profili e scegliere il tipo di antenna da adoperare, in funzione della risoluzione desiderata e della massima profondità di indagine ipotizzata.

In particolare le indagini eseguite sono finalizzate all'individuazione della presenza di anomalie elettromagnetiche compatibili con la presenza di cordoli di collegamento delle fondazioni. Durante l'esecuzione delle indagini sono stati segnati e registrati nei radargrammi con opportuno marker elettronico, alcuni punti del profilo (markers), posti ad intervalli regolari di 1 m (equispaziati lungo i profili).

Questa operazione è stata effettuata per avere riferimenti spaziali nelle sezioni radar, di fondamentale importanza durante la fase di elaborazione, ed in particolare per la normalizzazione delle stesse.

Inoltre, allo scopo di ottimizzare il segnale durante la fase di acquisizione, sono stati eseguiti dei profili di prova, finalizzate alla scelta dei parametri di acquisizione come i parametri dei filtri di frequenza passa-banda del tipo Butterworth, i parametri di Staking orizzontale, il parametro Range Gain che serve a definire una legge di variazione del guadagno in funzione del tempo in modo da compensare approssimativamente l'attenuazione dello spreading geometrico di fondo. Inoltre il parametro Range che stabilisce la durata di registrazione del segnale dopo ogni energizzazione, è ottimizzabile mediante la seguente formula:  $\text{Range} = 1.5 \times (2D/V)$ , dove D è la massima profondità di interesse, V è la velocità media con la quale il segnale attraversa i terreni incontrati e 1.5 è un fattore di sicurezza. Nel caso in esame si è utilizzato un Range di 30-40 ns, , che ha consentito di indagare il terreno per una profondità pari a circa 1 m dal p.c. Il valore della costante dielettrica media  $\epsilon_r$  è stata pari a 6 per tutti i profili effettuati. Tutte le sezioni georadar sono restituiti in formato Line scan (Toni di grigio).

# PLANIMETRIA AREE DI INTERESSE - STAZIONE LIBERTA'



Sito di attenzione (PAI)



Area di interesse

Scala 1/2.000

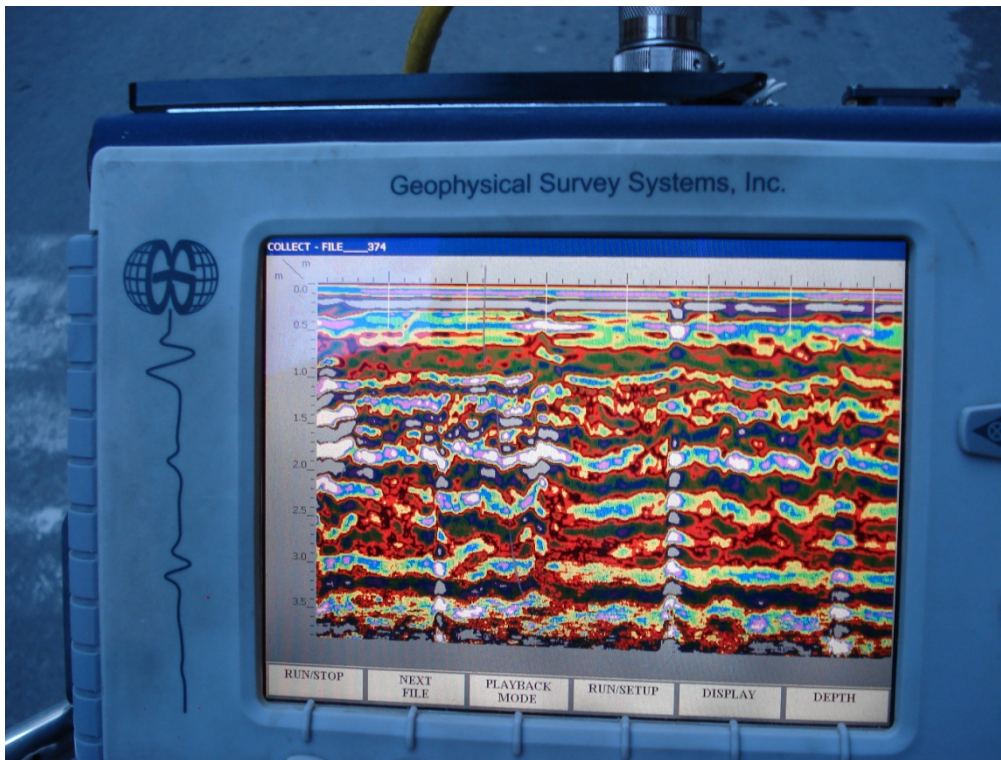
# Planimetria con l'ubicazione delle indagini per la ricerca delle cavità Stazione Libertà



Scala 1:1000

- P1 — Traccia indagine Georadar
- T7 ● Indagine di sismica passiva a stazione singola (Tromografia)
- Sito di attenzione (PAI - 2005)

*Strumentazione utilizzata – Georadar SIR 3000 - GSSI*



*Fase di acquisizione*



