

AUTOSTRADA (A14) : BOLOGNA-BARI-TARANTO

TRATTO: BOLOGNA BORGO PANIGALE - BOLOGNA SAN LAZZARO

POTENZIAMENTO IN SEDE DEL SISTEMA
AUTOSTRADALE E TANGENZIALE DI BOLOGNA

"PASSANTE DI BOLOGNA"

PROGETTO DEFINITIVO

DOCUMENTAZIONE GENERALE


GEOLOGIA

INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITO

PROSPEZIONI SISMICHE DI SUPERFICIE PREGRESSE
RIFRAZ. - ELETTR. - HVSR (2009-2010)

IL GEOLOGO Dott. Vittorio Boerio Ord. Geol. Lombardia n.794 RESPONSABILE GEOLOGIA	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068	IL DIRETTORE TECNICO Ing. Andrea Tanzi Ord. Ingg. Parma N. 1154 PROGETTAZIONE NUOVE OPERE AUTOSTRADALI
--	---	---

CODICE IDENTIFICATIVO										ORDINATORE	
RIFERIMENTO PROGETTO			RIFERIMENTO DIRETTORIO				RIFERIMENTO ELABORATO				
Codice Commessa	Lotto, Sub-Prog. Cod. Appalto	Fase	Capitolo	Paragrafo	W B S	Parte d'opera	Tip.	Disciplina	Progressivo	Rev.	--
111465	0000	PD	DG	GEO	SI000	00000	R	G E O	0026	- 2	SCALA -

	PROJECT MANAGER:		SUPPORTO SPECIALISTICO:				REVISIONE	
	Ing. Raffaele Rinaldesi Ord. Ingg. Macerata N. A1068						n.	data
							0	DICEMBRE 2017
	REDATTO:		VERIFICATO:				1	SETTEMBRE 2019
							2	SETTEMBRE 2020
3							-	
						4	-	

VISTO DEL COMMITTENTE  IL RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Fabio Visintin	VISTO DEL CONCEDENTE  Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti <small>DIPARTIMENTO PER LE INFRASTRUTTURE, GLI AFFARI GENERALI ED IL PERSONALE STRUTTURA DI VIGILANZA SULLE CONCESSIONARIE AUTOSTRADALI</small>
---	---

**SISMICA DI SUPERFICIE Fase 1
PEOPLE MOVER**

SIGLA	IMPRESA	ANNO
RFR - ELE	MASINI	2009



ISTITUTO DI RICERCHE E COLLAUDI M. MASINI S.r.l.

Sede amministrativa e laboratori: Via Moscova, 11 - 20017 RHO (MI)

Tel. 02/930.15.17 r.a. - Fax 02/930.81.76 - Internet: www.istitutomasini.it - E-mail istitutomasini@istitutomasini.it

Notificato CE 0068 - Accreditato SINCERT 047A - Accreditato SINAL 0019 - Competent Body: EMC 2004/108/CE e BT 2006/95/CE

Autorizzazioni:

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti per legge 1086 - Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica per Legge 46/82 -
Ministero delle Attività Produttive - Ministero dell'Interno per prove reazione al fuoco, estintori portatili e carrellati, evacuatori di fumo e calore -
Ministero della Salute per analisi in BPL e prove I.S.P.E.S.L. - Regione Lombardia per analisi acque potabili e non - Ministère de l'Industrie, de la
Poste et des Télécommunications per pentole a pressione e verifiche di sorveglianza alla produzione

Certificazione di prodotto - Controlli non distruttivi - Prove tecnologiche - Termografia - Prove termotecniche - Rilievi estensimetrici - Prove calcestruzzi - Geotecnica
Analisi chimica - Agroalimentare - Cosmesi - Metallografia - Microscopia elettronica - Sicurezza - Ecologia - Controllo qualità - Ricerche - Consulenze

RELAZIONE N. 2247-2009

Spett.le

➤ **COOPERATIVA COSTRUZIONI**

Via F. Zanardi, 372 - 40131 BOLOGNA

➤ **CESI Coop. Edil Strade Imolese**

Via L. Sabbatani, 14 - 40026 IMOLA (BO)

INDAGINI GEOFISICHE SUL TRACCIATO

"PEOPLE MOVER"

(Bologna - 21/11/2009)



foglio 1 di 39

Il Direttore



Indice

1	Premessa	3
2	Metodologia di indagine e strumentazione utilizzata.....	4
2.1	Tomografia elettrica	4
2.1.1	Resistività.....	5
2.1.2	Configurazioni elettrodiche	7
2.1.3	Proprietà elettriche dei materiali	9
2.1.4	Tecniche tomografiche	12
2.1.5	Principi base dell'inversione tomografica	13
2.1.6	Problema inverso.....	14
2.1.7	Strumentazione.....	15
2.2	Tomografia sismica 2D	17
2.3	Tomografia sismica.....	20
2.3.1	Sismica a rifrazione da superficie	23
2.3.2	Strumentazione.....	25
2.3.3	Elaborazione dati.....	26
3	Descrizione del rilievo eseguito	31
3.1	Tomografia elettrica	31
3.2	Tomografia sismica.....	32
4	Risultati del rilievo e conclusioni.....	33
5	Documentazione fotografica	35

Allegati (disponibili nel formato digitale)

<i>Rif.</i>	<i>Descrizione</i>
<i>01</i>	<i>Tav. 01 - Planimetria delle indagini geofisiche</i>
<i>02</i>	<i>Modelli tomografici indagini in tomografia elettrica</i>
<i>03</i>	<i>Modelli tomografici indagini in tomografia sismica a rifrazione</i>
<i>04</i>	<i>Ricostruzione stratigrafica lungo il tracciato di progetto</i>



1 Premessa

Le indagini sono state eseguite su indicazione del committente al fine di determinare profondità e spessore dei materiali ghiaiosi.

Il rilievo ha previsto l'impiego di due differenti metodologie:

- tomografia elettrica 2D
- tomografia sismica a rifrazione 2D

Il rilievo con due differenti metodologie permette di definire modelli stratigrafici del sottosuolo basati su parametri fisici dei materiali quali resistività elettrica e velocità delle onde sismiche compressionali (V_p).

NOTA: Le prove down-hole verranno eseguite non appena disponibili i fori di sondaggio opportunamente predisposti.



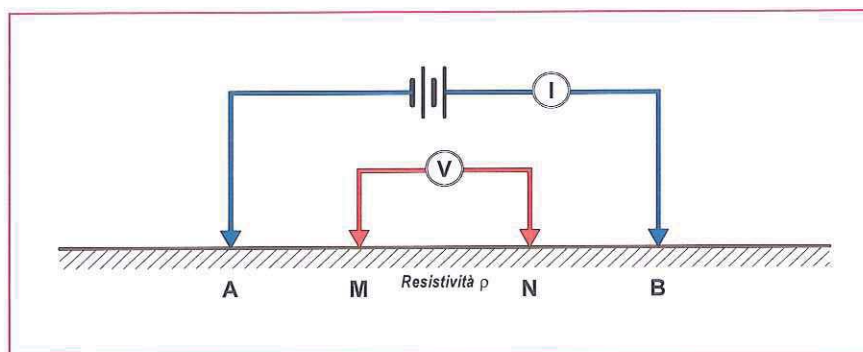
2 Metodologia di indagine e strumentazione utilizzata

2.1 Tomografia elettrica

Le indagini geoelettriche costituiscono un metodo geofisico che permette di ricostruire la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo.

La grandezza che viene comunemente misurata è la resistività elettrica, ma possono essere misurati altri parametri quali il potenziale spontaneo e la polarizzazione indotta.

Il principio sul quale si basa questa metodologia è così schematizzabile: una corrente viene immessa nel mezzo attraverso una coppia di elettrodi AB (dipolo di immissione) e la differenza di potenziale risultante viene misurata attraverso un'altra coppia di elettrodi MN (dipolo di ricezione). Un voltmetro consente la misura della differenza di potenziale.



2.1.1 Resistività

La corrente si propaga nel sottosuolo attraverso:

- **conduzione elettronica**: la corrente si propaga attraverso gli elettroni liberi, come nei metalli;
- **conduzione elettrolitica**: la corrente si propaga attraverso il movimento degli ioni disciolti nell'acqua presente nel sottosuolo.

I metodi geoelettrici si basano sull'immissione di una corrente nel sottosuolo e sulla misura della differenza di potenziale prodotta per determinare la distribuzione della resistività. Queste grandezze sono legate tra loro dalla Legge di Ohm: il rapporto tra la differenza di potenziale ai capi di un conduttore e la corrente che lo attraversa è la resistenza:

$$\Delta V = RI$$

dove :

ΔV = differenza di potenziale (volt)

I = intensità di corrente (ampere)

R = resistenza (ohm)

La resistenza dipende dalle caratteristiche fisiche e geometriche del conduttore e può essere così espressa:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

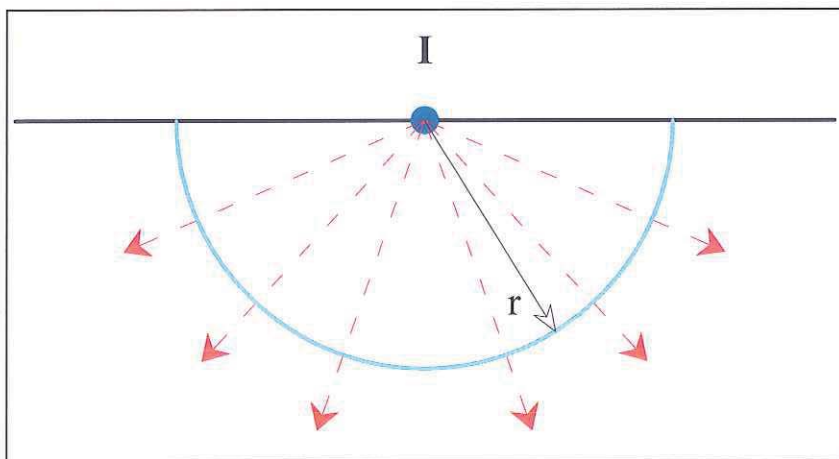
dove :

ρ = resistività (ohm.m)

l = lunghezza del conduttore (m)

A = sezione del conduttore (m²)

Considerando un elettrodo che immette corrente in un mezzo omogeneo, in qualunque superficie semisferica, la corrente si propaga radialmente.



La densità di corrente J immessa da un elettrodo in un semispazio può essere così espressa:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}$$



e la differenza di potenziale:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Considerando i quattro elettrodi utilizzati nelle indagini geoelettriche, è possibile esprimere la differenza di potenziale in questo modo:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

dove :

r_1 = distanza tra M e A

r_2 = distanza tra M e B

r_3 = distanza tra N e A

r_4 = distanza tra N e B

La resistività potrà essere così espressa:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} k$$

dove

$$\frac{1}{k} = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

k è il fattore geometrico specifico per ogni configurazione elettrodica.

La resistività calcolata precedentemente è definita per un mezzo omogeneo, ma il sottosuolo è anisotropo e disomogeneo, pertanto l'equazione definisce una **resistività apparente**, poiché varia in funzione della posizione e/o della direzione dello stendimento. Non rappresenta né la resistività reale, né il valore medio della resistività reale, ma la resistività di un equivalente semispazio omogeneo e isotropo.



2.1.2 Configurazioni elettrodiche

La scelta della migliore configurazione elettrodica dipende dal sito di indagine, dalla sensibilità del resistivimetro e dal rumore di fondo.

Le configurazioni più comunemente utilizzate sono: Wenner, dipolo-dipolo, Wenner-Schlumberger.

I fattori che occorre considerare per la valutazione della tipologia di configurazione elettrodica sono:

- sensibilità alle variazioni verticali e orizzontali di resistività del sottosuolo;
- profondità di investigazione;
- copertura orizzontale dei dati;
- forza del segnale.

Nella tabella di seguito sono riportate le caratteristiche fondamentali delle differenti tipologie di stendimento:

CONFIGURAZIONE	FATTORE GEOMETRICO (k)	z_e/a (per $a=1$)	z_e/L	VANTAGGI	SVANTAGGI
Wenner Alpha	$k = 2\pi a$	0.519	0.173	<ul style="list-style-type: none"> - sensibile alle variazioni verticali di resistività (strutture orizzontali) - intensità di segnale più elevata rispetto alle altre configurazioni (adatta a siti con elevato rumore di fondo) - buona profondità di penetrazione 	<ul style="list-style-type: none"> - non adatto a variazioni orizzontali di resistività (strutture verticali strette) - scarsa copertura orizzontale (soprattutto se gli elettrodi utilizzati sono pochi)
Wenner Beta	$k = 6\pi a$	0.416	0.139	<ul style="list-style-type: none"> - raggiunge la massima profondità di penetrazione in corrispondenza degli elettrodi esterni e non su quelli centrali 	
Wenner Gamma	$k = 3\pi a$	0.594	0.198		
Wenner-Schlumberge r	$k = \pi n(n+1)a$	0.519 (per $n=1$)	0.173 (per $n=1$)	<ul style="list-style-type: none"> - abbastanza sensibile sia alle variazioni orizzontali di resistività sia a quelle verticali 	
Dipolo-Dipolo	$k = \pi n(n+1)(n+2)a$	0.416 (per $n=1$)	0.139 (per $n=1$)	<ul style="list-style-type: none"> - sensibile alle variazioni orizzontali di resistività (strutture verticali quali dicchi o cavità) - buona copertura orizzontale 	<ul style="list-style-type: none"> - non adatto a variazioni verticali di resistività (strutture orizzontali) - scarsa profondità di penetrazione per $n>2$ - scarsa intensità di segnale soprattutto per n elevato (necessità di strumentazione molto sensibile e ottimo accoppiamento terreno-elettrodo)



CONFIGURAZIONE	FATTORE GEOMETRICO (k)	z_e/a (per $a=1$)	z_e/L	VANTAGGI	SVANTAGGI
Polo-Polo	$k = 2\pi a$	0.867		<ul style="list-style-type: none"> - maggiore profondità di penetrazione rispetto a tutte le altre configurazioni - migliore copertura orizzontale 	<ul style="list-style-type: none"> - difficoltà logistiche per il posizionamento degli elettrodi - scarsa risoluzione
Polo-Dipolo	$k = 2\pi n(n+1)a$	0.519 (per $n=1$)		<ul style="list-style-type: none"> - sensibile alle variazioni verticali di resistività (strutture orizzontali) - buona copertura orizzontale 	<ul style="list-style-type: none"> - intensità di segnale non paragonabile a Wenner e Schlumberger
Gradiente	$k = 2\pi a$			<ul style="list-style-type: none"> - sensibile alle variazioni orizzontali di resistività (strutture verticali quali dicchi o cavità) 	

dove:

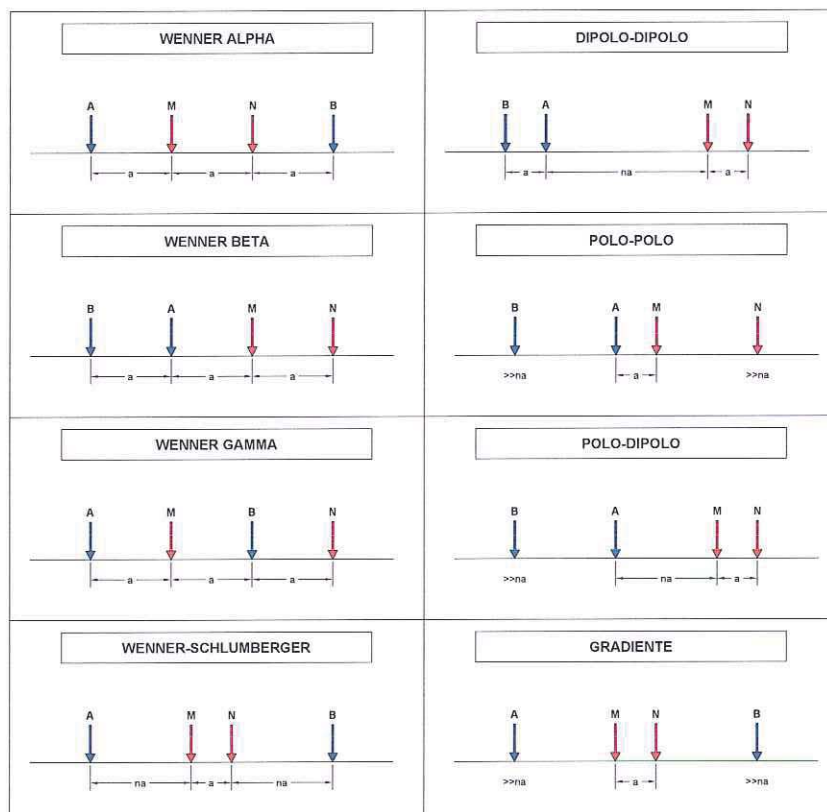
a = lunghezza del dipolo

n = fattore di separazione del dipolo (rapporto tra le distanze AM/AB o MN)

z_e = profondità mediana di investigazione

L = lunghezza totale dello stendimento

Nella figura di seguito riportata, sono rappresentate schematicamente le configurazioni elettrode descritte in tabella:





2.1.3 Proprietà elettriche dei materiali

La resistività elettrica dei terreni e delle rocce dipende da numerosi fattori quali il contenuto di fluidi e di minerali, la porosità e il grado di saturazione del mezzo.

Questa grandezza è funzione essenzialmente della conduzione elettrolitica nei fluidi presenti tra i contatti dei granuli o contenuti in pori, fratture e faglie. La conduzione elettrolitica dipende dai seguenti fattori:

1. **salinità:** sono gli ioni disciolti in acqua a condurre la corrente; ne consegue pertanto che le soluzioni caratterizzate da un elevato contenuto di sali disciolti (ioni) sono quelle maggiormente conduttive;
2. **porosità:** la resistività e la porosità delle rocce sedimentarie sono generalmente correlate attraverso la legge di Archie, che per rocce prive di argilla può essere così espressa:

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = a\phi^{-m}$$

dove:

ρ_r = resistività della roccia

ρ_e = resistività della soluzione presente nei pori della roccia

ϕ = porosità

a = coefficiente di saturazione (compreso tra 0.6 e 1.0)

m = fattore di cementazione (compreso tra 1.4 e 2.2)

3. **presenza di materiali coesivi/argillosi:** le argille hanno una conduttività normalmente elevata poiché possiedono un doppio strato di scambio cationico. Questo strato ha una notevole capacità di assorbimento dei cationi che comporta un aumento della conduttività;
4. **grado di saturazione:** è il rapporto tra il volume dell'acqua presente nei pori e il volume totale dei pori. Maggiore è il grado di saturazione, minore è la resistività dei materiali.

Poiché i fattori che possono influenzare la resistività sono numerosi, una stessa tipologia di materiale può essere caratterizzato da un range di resistività piuttosto ampio. In generale è possibile affermare quanto segue:

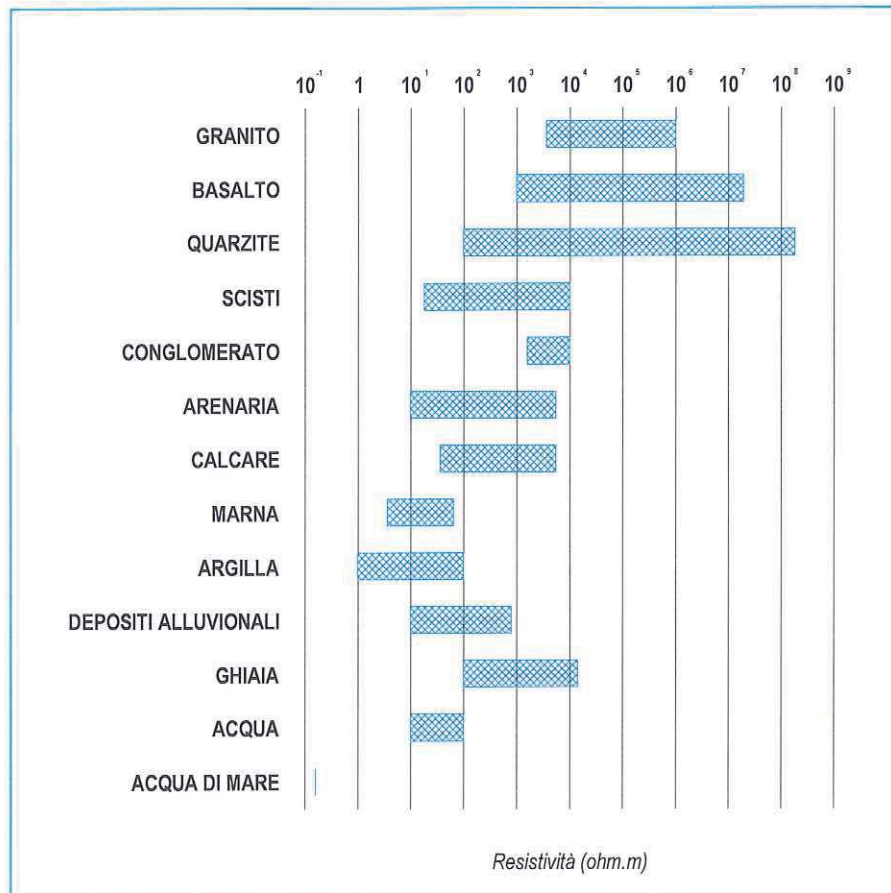
- materiali naturali come le rocce ignee e metamorfiche sono caratterizzate da un comportamento fortemente resistivo che può raggiungere valori dell'ordine di grandezza pari a 10^7 ohm.m (in funzione della porosità e del contenuto di acqua);
- materiali naturali come le rocce sedimentarie presentano range di resistività variabili da qualche decina di ohm.m fino a 10^5 ohm.m (in funzione del grado di fratturazione);
- materiali naturali di tipo granulare (sabbie e ghiaie) sono caratterizzati da un comportamento fortemente resistivo; in funzione della granulometria dei materiali i valori di resistività variano da 100 fino a 3000-4000 ohm.m;
- materiali naturali di tipo coesivo (limi e argille) presentano valori di resistività bassi nell'ordine di qualche decina di ohm.m;



- la resistività dell'acqua nel sottosuolo presenta valori di resistività che variano da 10 a 100 ohm.m (in funzione dei sali disciolti). La presenza di acqua diminuisce i valori di resistività propri del materiale;
 - i processi di alterazione dei materiali naturali provocano una diminuzione dei valori di resistività (as es. aumentano i minerali delle argille);
 - la presenza ad esempio di composti chimici quali il sodio clorido o il potassio clorido possono ridurre notevolmente la resistività dell'acqua con quantità molto ridotte;
 - la presenza di materiali metallici diminuisce notevolmente la resistività essendo essi stessi materiali fortemente conduttivi;
 - la presenza di fanghi o melme diminuisce la resistività poiché questi materiali sono fortemente conduttivi;
 - la presenza di vuoti (es. scavamenti) produce valori di resistività molto elevati avendo il vuoto caratteristiche elettriche di resistività infinita;
 - le macerie (presumibilmente costituite da blocchi di calcestruzzo o mattoni) presentano valori di resistività elevate, simili o superiori a quelli che contraddistinguono le ghiaie;
 - la presenza di idrocarburi provoca un incremento di resistività poiché hanno resistività decisamente elevate come ad esempio lo xilene caratterizzato da un valore pari a $6,998 \times 10^{16}$ ohm.m.
-



Nelle tabelle di seguito si riportano dei range di resistività tipici di alcuni materiali:



Materiale	Resistività (ohm.m)
Basalto	10-10 ⁵
Granito	100-10 ⁵
Marmo	100-10 ⁶
Scisti	10-10 ⁴
Calcere	100-5000
Argilla	1-100
Ghiaia	100-5000
Sabbia	100-10 ³
Arenaria	100-10 ⁴
Marna	1-100
Quarzite	5000-10 ⁵
Acqua	1-100
Acqua di mare	0.2



2.1.4 Tecniche tomografiche

La tomografia elettrica nasce dall'unione dei tradizionali profili elettrici con i metodi di inversione tomografica. Questa metodologia permette di ricostruire attraverso immagini le variazioni di resistività elettrica del sottosuolo.

Come nei tradizionali profili elettrici la tomografia necessita di quattro elettrodi per la misura della resistività: due per l'immissione della corrente nel sottosuolo e due per la misura della differenza di potenziale. La differenza fondamentale consiste nell'utilizzare decine di elettrodi disposti lungo un allineamento alternativamente come elettrodi di corrente e di misura. Il numero di misure che si possono ottenere è pari a $n(n-3)/2$ dove n è il numero degli elettrodi.

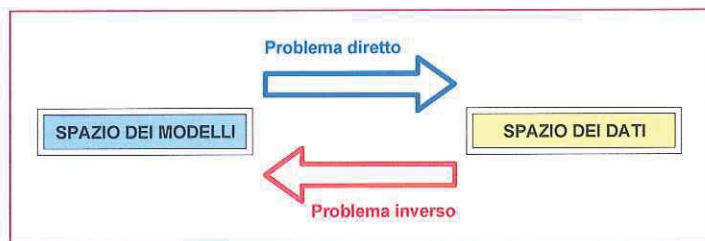
La tomografia elettrica trova numerose applicazioni per indagini di tipo geotecnico-ambientale:

- ricostruzioni stratigrafiche;
- profondità della falda acquifera;
- monitoraggio della falda acquifera;
- monitoraggio di processi di bonifica del sottosuolo;
- localizzazione di pennacchi contaminanti;
- localizzazione di intrusioni di acqua marina;
- localizzazione di cavità.

Il maggiore vantaggio attribuibile alla tomografia elettrica rispetto alle tradizionali indagini 1D o 2D è quello di poter ricostruire non solo le variazioni verticali di resistività nello spazio, ma anche quelle orizzontali.

2.1.5 Principi base dell'inversione tomografica

Obiettivo delle indagini è la ricostruzione della distribuzione nel sottosuolo della resistività. I valori di corrente, di differenza di potenziale, insieme alla disposizione degli elettrodi e al fattore geometrico permettono di ottenere la resistività apparente del sottosuolo. Questi valori costituiscono i dati attraverso i quali è possibile ricostruire un'immagine del sottosuolo (modello 2D) mediante il processo di inversione tomografica.



2.1.5.1 Problema diretto

La posizione degli elettrodi, la distribuzione della resistività apparente nel sottosuolo e la corrente immessa costituiscono i parametri del modello diretto attraverso i quali è possibile ricostruire un modello sintetico del potenziale elettrico.

Il modello diretto può essere ricostruito calcolando il potenziale V attraverso l'equazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -I$$

dove:

V = potenziale elettrico (incognita)

I = corrente immessa

σ = distribuzione della conducibilità (per sezioni 2D $\sigma(x,z)$)

β = parametro che definisce le condizioni al contorno (è uguale a zero in superficie)

con le seguenti condizioni al contorno:

in superficie $\frac{\partial V}{\partial n} = 0$ e in qualunque altro punto del sottosuolo $\frac{\partial V}{\partial n} + \frac{\cos \theta}{r} V = 0$

Per risolvere questo problema si utilizzano comunemente due differenti approcci numerici:

- metodo agli elementi finiti;
- metodo alle differenze finite.

Entrambi i metodi si basano sulla discretizzazione dello spazio in elementi o celle. A ciascuno di questi elementi viene assegnato un valore di resistività. La discretizzazione converte l'equazione differenziale parziale in una serie di equazioni lineari. Ogni elemento o cella è rappresentato da un'equazione lineare a costituire una matrice (\mathbf{m}).

La soluzione della matrice si ottiene mediante processo iterativo:

- metodo della decomposizione di Cholewsky;
- metodo del gradiente coniugato.

Il processo viene reiterato fino a quando la differenza tra i dati misurati e il modello sintetico costruito (diretto) soddisfa un determinato criterio, ad esempio il valore di RMS o L2 è inferiore ad un limite prestabilito.



2.1.6 Problema inverso

L'inversione ha lo scopo di definire a partire dal modello diretto ottenuto, il modello che meglio si adatta ai valori misurati, cioè minimizza le differenze tra valori calcolati e misurati. Il modello calcolato deve corrispondere ai valori misurati entro una percentuale accettabile di errore (valutato come RMS o L2 norm).

I metodi di inversione utilizzati sono:

- A. damped least squares (minimi quadrati smorzati);
- B. smooth model (inversione di Occam);

Il primo metodo **A** ha come obiettivo minimizzare la seguente funzione:

$$S(\mathbf{m}) = (\mathbf{d}_{calc} - \mathbf{d}_{meas})^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{calc} - \mathbf{d}_{meas}) + \lambda (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{R} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)$$

dove:

\mathbf{d}_{calc} = vettore dati calcolati

\mathbf{d}_{meas} = vettore dati misurati

\mathbf{W}_d = matrice di attenuazione dati

\mathbf{R} = parametro per la stima della "roughness"

\mathbf{m}_0 = modello di resistività a-priori utilizzato come modello iniziale

λ = fattore di stabilizzazione (moltiplicatore di Lagrange)

Il secondo metodo **B** si basa su una distribuzione gaussiana degli errori. La funzione che definisce l'inversione è la seguente:

$$S(\mathbf{m}) = (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{m})^T \mathbf{W}_d (\mathbf{d}_{obs} - \mathbf{m}) + \lambda \mathbf{m}^T \mathbf{R} \mathbf{m}$$

Il modello di resistività iniziale utilizzato nel processo di inversione può essere:

1. pseudosezione (rappresentazione 2D dei valori di resistività apparente misurata ottenuta mediante interpolazione geometrica dei dati);
2. valore medio della resistività apparente;
3. modello a-priori definito dall'operatore.

Il processo è iterativo e termina quando soddisfa i criteri stabiliti dall'operatore, che possono essere:

→ il numero delle inversioni

→ la percentuale di riduzione dell'errore $\left| \frac{\text{RMS}_n - \text{RMS}_{n-1}}{\text{RMS}_{n-1}} \right| * 100\%$

→ il valore di RMS $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\mathbf{d}_i^{calc} - \mathbf{d}_i^{meas}}{\mathbf{d}_i^{meas}} \right)^2}{N}} * 100\%$

→ il valore di L2 normalizzata $\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\mathbf{d}_i^{calc} - \mathbf{d}_i^{meas}}{3\% * \mathbf{d}_i^{meas}} \right)^2}{N}$

Poiché la soluzione del problema non è unica è possibile limitare il numero di soluzioni introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di resistività, conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.



2.1.7 Strumentazione

Per il rilievo in esame è stato utilizzato il sistema multielettrodo ARES 200E con elettrodi attivi. Ogni elettrodo è collegato all'unità centrale e contiene l'elettronica di comando per la gestione dell'operazione di switching. L'unità centrale esegue in batch la sequenza di misure secondo la tecnica walk-away: definite le combinazioni di elettrodi di misura e corrente si rilevano profili di resistività con diverse spaziature elettrodiche in corrispondenza di diverse posizioni fino a coprire l'intero stendimento. L'automazione del processo di acquisizione mediante centralina di switch intelligente velocizza le operazioni di acquisizione dati.

Nella tabella di seguito si riportano le caratteristiche tecniche del sistema:

PARAMETRO	CARATTERISTICHE ARES 200E
Tipologie di misura	Resistività apparente, resistenza, voltaggio (PS), polarizzazione indotta (IP), voltaggio batteria alimentazione
Range di misura	da 400 KW a 0.1 milliW (resistenza) 0 – 500 V autorange del voltaggio della scala
Risoluzione delle misure	Massimo 30 nV, in dipendenza del livello del voltaggio
Corrente di output	1-2-5-10-20-50-100-200-500 mA
Voltaggio di output	L'operatore può selezionare tra il limite di alto e basso voltaggio per il trasmettitore (800 Vp-p o 320 Vp-p voltaggio limite). In effetti però il voltaggio elettrodo si setta automaticamente in funzione della corrente trasmessa e dalla resistività del terreno
Input gain ranging	Automatico, utilizza sempre l'intero range dinamico della ricevente
Input di voltaggio	Massimo 500 V
Compensazione dei Potenziali Spontanei	Cancellazione automatica dei voltaggi PS durante le misure di resistività. Cancella completamente variazioni lineari e costanti di PS
Elaborazione del segnale	Media continua dopo ogni ciclo completo. Gli errori relativi al "noise" vengono calcolati e visualizzati come percentuale di lettura. Letture visualizzate come resistenza (D V/ I) e resistività apparente (W m). La resistività viene calcolata utilizzando le coordinate dello stendimento inserite dall'operatore
Eliminazione del "noise"	Superiore a 100 dB per $f > 20$ Hz Superiore a 120 dB a frequenze di linee di potenza (16 2/3, 20, 50 e 60 Hz)
Precisione totale	Superiore a 1% della lettura nella maggior parte dei casi (misure di laboratorio). La precisione delle misure di campo dipende dalla resistività e dal "noise" del terreno. Lo strumento calcolerà e visualizzerà una stima della precisione delle misure correnti



Georesistivometro multielettrodo ARES 200E



Elettrodo collegato ad un picchetto in ottone

2.2 Tomografia sismica 2D

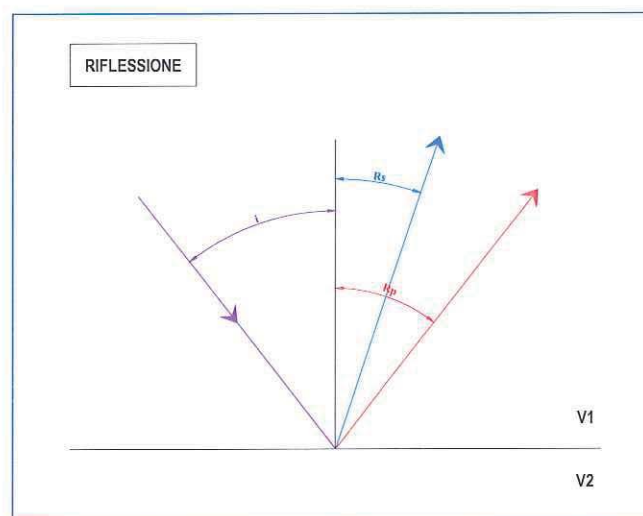
I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e le variazioni che esse ne subiscono permettono di ricostruire le caratteristiche meccaniche e geometriche del sottosuolo.

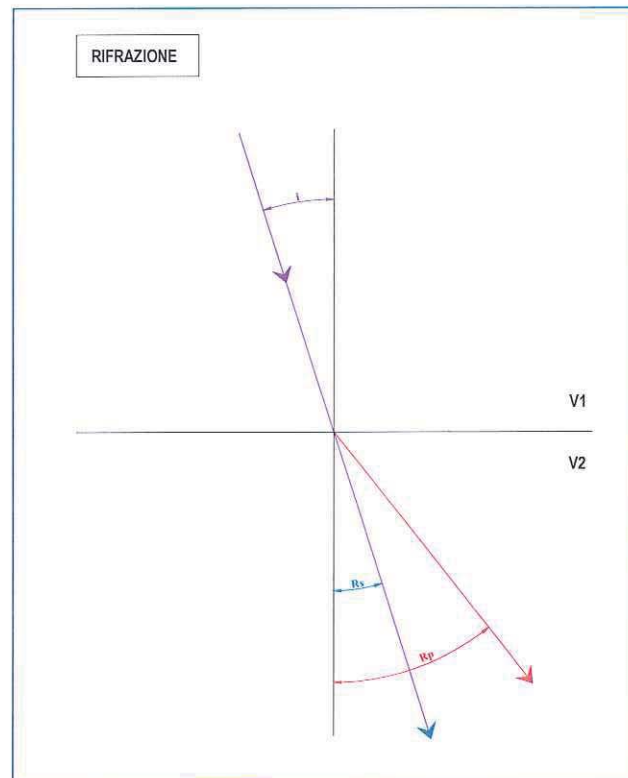
Un qualunque segnale sismico può essere descritto come la sovrapposizione di quattro differenti fasi (fase è il movimento che compie una particella nel mezzo investito dal fronte d'onda sismico):

- onde di volume
 - P: onde primarie o di compressione
 - S: onde secondarie o di taglio
- onde di superficie
 - L: onde di Love (caratterizzate da un movimento longitudinale e trasversale)
 - R: onde di Rayleigh (caratterizzate da un movimento ellittico retrogrado)

Le onde sismiche generate dalla sorgente attraversando il sottosuolo possono incontrare limiti tra materiali con differenti proprietà. Il fronte d'onda potrà essere riflesso, rifratto oppure convertito in una diversa tipologia. Le caratteristiche del mezzo e l'angolo di incidenza dei raggi sismici determineranno la traiettoria dell'onda sismica.

Quando un'onda longitudinale piana incide un'interfaccia tra due materiali con differenti proprietà elastiche, dove il mezzo a profondità maggiore ha una velocità superiore, è possibile applicare i principi dell'ottica e in particolare le leggi di Snell. Il fronte d'onda che incide obliquamente sull'interfaccia genera onde longitudinali e trasversali che si propagano in entrambi i mezzi. Le onde che si propagano nello stesso mezzo del fronte d'onda sono riflesse, mentre quelle che si propagano nel mezzo sottostante sono rifratte.





Riflessione: l'angolo di incidenza (i) è uguale all'angolo di riflessione dell'onda compressionale P (R_p), mentre l'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (R_s) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\sin(R_s) = \frac{V_s}{V_p} \cdot \sin(i)$$

Rifrazione: l'angolo di riflessione dell'onda compressionale P (R_p) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_p)} = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$$

L'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (R_s) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_s)} = \frac{V_{p1}}{V_{s2}}$$

Quando $\sin(i) = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$ il valore di $\sin(R_p)$ risulta pari a 1 e l'angolo pari a 90° ; pertanto le onde

compressionali rifratte non attraversano il mezzo ma si propagano lungo l'interfaccia. In questo caso si parla di angolo critico e di riflessione totale.



La presenza di discontinuità o anisotropie nel mezzo modifica ampiezza e periodo delle onde sismiche. La velocità delle onde dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato, in particolare da: densità (γ), coefficiente di Poisson (ρ), modulo di Young (E) e modulo di taglio (G).

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E = V_p^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \rho) \cdot (1 - 2\rho)}{1 - \rho}$$

$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g}$$

V_p = velocità delle onde P

V_s = velocità delle onde S

g = accelerazione di gravità

Nella tabella di seguito vengono indicati valori di riferimento della velocità P per i vari materiali:

MATERIALE	Vp (m/s)
Granito	5.000
Calcere	1.500-4.200
Arenaria	1.400-4.000
Sabbie	1.200-1.800
Argilla	1.100-2.500



2.3 Tomografia sismica

La tomografia è una tecnica di ricostruzione per immagini che permette di caratterizzare un'area non accessibile per mezzo di impulsi di energia che attraversano l'area oggetto di indagine. L'esempio più efficace di tecnica tomografica è la TAC (tomografia assiale computerizzata) di largo impiego nel settore medicale.

I metodi di inversione tomografica applicati a metodologie di prospezione sismica attiva trovano numerose applicazioni per indagini di tipo geotecnico:

- ricostruzione stratigrafica;
- caratterizzazione di contrasti di impedenza;
- caratterizzazione delle zone a gradiente di velocità o attenuazione;
- individuazione di faglie e fratture;
- localizzazione di oggetti sepolti, massi erratici.

Gli obiettivi elencati possono essere raggiunti poiché la velocità sismica è un parametro che dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale quali: porosità, resistenza al taglio, compressibilità, quantità di fratture, saturazione e contenuto di argilla.

Misurando i tempi di arrivo o le ampiezze delle onde sismiche è possibile ottenere la distribuzione nel mezzo indagato di velocità sismica (modello di velocità) o attenuazione (modello cinematico); parametri che permettono di definire le caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

Esistono differenti geometrie di acquisizione comunemente utilizzate per le elaborazioni tomografiche:

- sismica superficiale a riflessione o rifrazione;
- VSP (Vertical Seismic Profile);
- cross-hole.

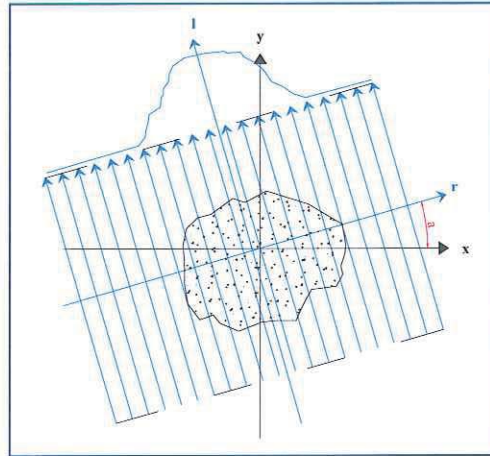
L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

Le serie di proiezioni utilizzate in tomografia corrispondono a integrali lineari di alcune funzioni del mezzo. Nelle indagini sismiche i parametri misurati sono il tempo di arrivo e l'ampiezza delle onde sismiche, mentre la funzione può essere lo smorzamento (reciproco della velocità) o il fattore di attenuazione. Per un'analisi bidimensionale il problema tomografico è rappresentato dalla seguente equazione:

$$p(r, \alpha) = \int f(x, y) dl$$

(una serie completa di somme di raggi ad un determinato angolo è definita proiezione o profilo)

Dove x , y , r , l e α sono rappresentati nello schema di seguito:



Dal punto di vista teorico $f(x,y)$ è una funzione 2D continua e per essere ricostruita necessita di un numero infinito di proiezioni. Per ovvi motivi di discretizzazione $f(x,y)$ è calcolata per un numero finito di punti attraverso un numero finito di proiezioni.

Il mezzo da ricostruire viene quindi discretizzato in un grid a elementi rettangolari (celle) in ciascuno dei quali il valore di smorzamento si suppone costante. Il tempo di arrivo calcolato per un raggio (impulso sismico - perturbazione ondulatoria) che attraversa le celle del grid può essere espresso dalla formula:

$$t_k^{calc} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j$$

t_k^{calc} = tempo di arrivo calcolato per il raggio k_{esimo}

d_{kj} = lunghezza del percorso del raggio k_{esimo} nella cella j_{esima}

s_j = smorzamento della cella j_{esima}

N = numero di elementi del grid

I tempi di arrivo di tutti i raggi possono essere tradotti in forma matriciale:

$$T = D * S$$

T = vettore di lunghezza M (tempi di arrivo)

S = vettore di lunghezza N (celle)

D = matrice (MxN) con lunghezza dei raggi in ogni cella

Ricostruire una funzione attraverso il suo integrale comporta una soluzione non unica poiché un infinito numero di integrali possono essere misurati. Il numero di soluzioni può essere ridotto introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di velocità, limiti di gradiente delle velocità (damping), conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.



Esistono differenti approcci alla risoluzione del problema:

- Back Projection (BP);
- Matrice di inversione;
- Ricostruzione analitica;
- Ricostruzioni iterative (ART, SIRT).

I processi di tipo iterativo risultano più appropriati per l'ambito geologico poiché i dati geofisici possono essere distorti dal rumore di fondo, oppure essere campionati irregolarmente e discontinuamente.

I metodi iterativi si basano sulla definizione di un modello iniziale di velocità del sottosuolo (modello a priori) costruito attribuendo un valore di velocità a tutte le celle del grid. Attraverso il modello iniziale è possibile calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Successivamente è possibile calcolare i tempi residui, ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, e pertanto definire l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale/reale:

$$D_i = t_{obs_i} - t_{calc_i} \text{ dove } i = 1, 2 \dots N$$

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. La soluzione del sistema di equazioni, che risulta sovradeterminato poiché ha un numero di equazioni superiore al numero di incognite, definisce la variazione da applicare al modello iniziale (matrice di risoluzione). L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta compresa in un range di errore accettabile.

La risoluzione delle sezioni tomografiche è proporzionale al numero e alla dimensione delle celle del grid ed è limitata dalla media della lunghezza d'onda del segnale che determina la dimensione minima della cella. Una anomalia può essere individuata solamente se l'effetto prodotto sul tempo di arrivo è maggiore della precisione della lettura del tempo di arrivo stesso. La dimensione minima (Δl) che un'anomalia dovrebbe avere per generare una variazione misurabile nei tempi di arrivo dei raggi che vi passano attraverso può essere calcolata con la seguente equazione:

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{\Delta V} \cdot (v_a \cdot v_m)$$

v_a = velocità dell'anomalia

v_m = velocità media nel mezzo

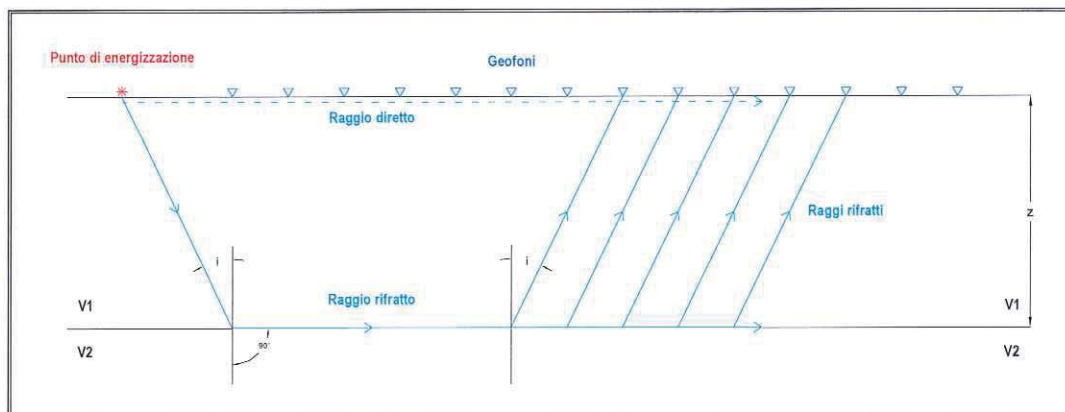
$$\Delta V = |v_a - v_m|$$

Δt = errore nella lettura dei primi arrivi

Al fine di evitare artefatti matematici senza corrispondenza fisica e geologica, le dimensioni della cella devono risultare inferiori alle dimensioni dell'anomalia, inoltre occorre tenere in considerazione il numero di raggi che attraversano le celle, i quali a loro volta dipendono dalla distanza sorgente-ricevitore, dal numero di sorgenti e ricevitori e dalla loro distribuzione.

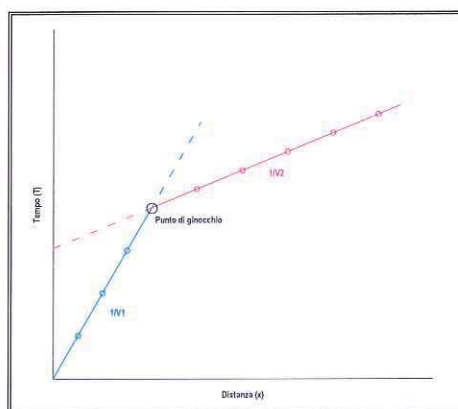
2.3.1 Sismica a rifrazione da superficie

Il metodo sismico a rifrazione utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo ad es. l'interfaccia tra due mezzi a differente velocità (si ipotizza che la velocità aumenti con la profondità).



Schema sismica a rifrazione

Misurando i tempi di primo arrivo (FBP First Break Point) degli impulsi ai geofoni e le distanze tra gli stessi viene costruito un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse vengono rappresentate le distanze e in ordinate i tempi.



Dromocrona

Le onde dirette viaggiano dalla sorgente al ricevitore con velocità V_1 (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea che dall'origine ha una pendenza pari a $1/V_1$) e raggiungono i ricevitori in un tempo:

$$t = \frac{x}{V_1}$$



Le onde rifratte viaggiano lungo l'interfaccia a una profondità z (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea retta con pendenza $1/V_2$ che intercetta l'asse dei tempi a $x=0$) e raggiungono i ricevitori in un tempo (tempo di intercetta):

$$T_i = \frac{x}{V_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 * V_1}$$

Il punto di intersezione tra le due rette, definito come punto di ginocchio, permette di calcolare la profondità del rifratte.



2.3.2 Strumentazione

2.3.2.1 Acquisizione dati

I dati sono stati acquisiti con il sismografo GEODE della Geometrics dotato di 24 canali a 24 bit, possibilità di stacking, filtri analogici e digitali. Nella tabella si riportano le caratteristiche tecniche del sismografo.

A/D Conversion	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling
Dynamic Range	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB
Sample Interval	0.02, 0.3125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
Record Length	16,000 samples
Maximum Input Signal	2.8 VPP
Distortion	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
Bandwidth	1.75 Hz to 20 kHz
Common Mode Rejection	>-100 dB at <=100 Hz, 36 dB
Crosstalk	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
Noise Floor	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
Stacking Accuracy	1/32 of sample interval
Input Impedance	20 kOhm, 0.02 uf
Anti-alias Filters	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
Delay	0 to 9999 ms in 1 ms steps
Acquisition and DisplayFilters	<ul style="list-style-type: none">- LowCut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth.- Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency.- HighCut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.
Triggering	Positive, negative or contact closure, software adjustable threshold
Power	12V external battery



2.3.2.2 Sorgenti

In base alle condizioni logistiche del sito di indagine sono state utilizzate due differenti tipologie di sorgente di energia: cannoncino sismico e massa battente.

Cannoncino sismico

La sorgente è costituita da un cannoncino sismico di tipo industriale calibro 8 con cartucce dotate di pallettone in piombo di peso pari a 92 grammi. L'innesco della polvere nera tramite cane manuale determina l'espulsione dalla canna del pallettone il cui impatto con il terreno determina l'impulso sismico. Il cannoncino deve essere posizionato con la porzione inferiore della canna collocata in un foro nel terreno eseguito mediante palanchino. La canna è appoggiata ad una piastra metallica che ostruisce il foro. Il contrappeso per il rinculo della canna, e quindi per l'ottimizzazione della velocità di espulsione, è fornito dal peso proprio dell'operatore.

L'istante di trigger è dato dalla rottura di un filo di rame posto davanti alla bocca della canna.

Massa battente

La sorgente è costituita da un martello avente massa da 10 kg utilizzato da un operatore. L'impulso viene generato attraverso il colpo del martello su una piastra in teflon appoggiata al terreno.

L'istante di trigger è fornito da un geofono posizionato in prossimità del punto di battuta.

2.3.2.3 Ricevitori

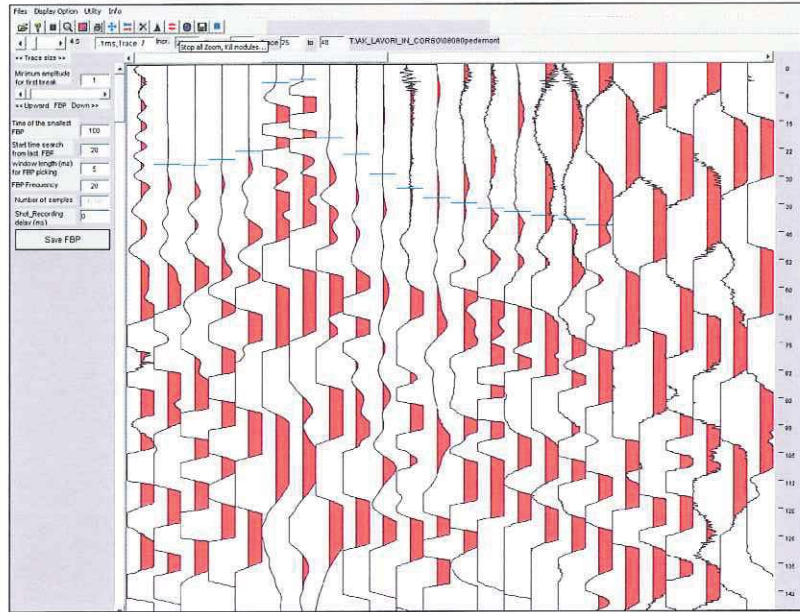
Sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 14 Hz. I geofoni sono sensori di tipo elettromagnetico che generano una tensione proporzionale alla velocità della perturbazione sismica.

I cavi utilizzati per l'acquisizione del dato sismico sono cavi con guaina in polipropilene schermati con connettori tipo militare Bendix o Cannon a 36 pin.

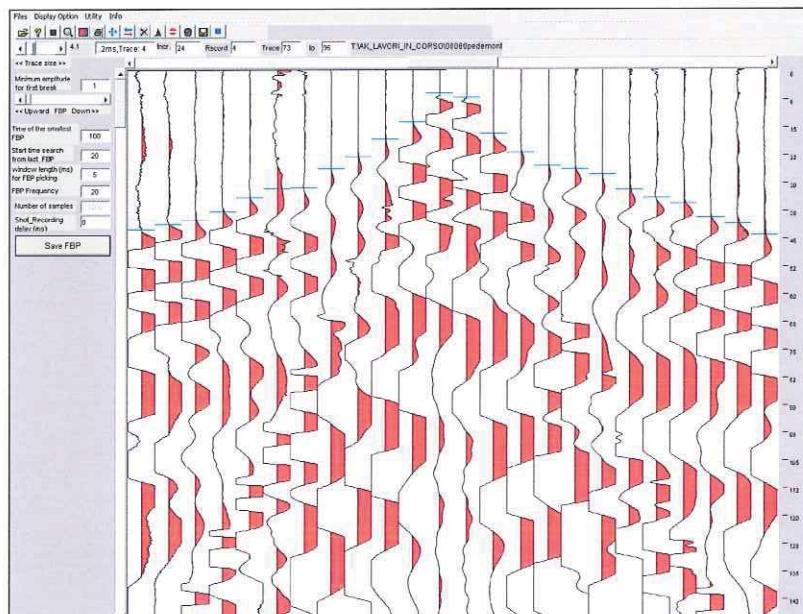
2.3.3 Elaborazione dati

I dati acquisiti sono stati convertiti da formato SEG 2 a SU (Seismic Unix) con il software SeisOpt Picker. Utilizzando lo stesso software, sono stati analizzati i film sismici acquisiti e successivamente determinati per ogni traccia i tempi di primo arrivo delle onde compressionali P (FBP - First Break Peak).

Le immagini riportate di seguito mostrano un film sismico con basso rapporto segnale/disturbo (FBP identificabile solo per una parte dello stendimento geofonico) e un film con buona qualità del dato in ricezione (FBP identificabile per l'intero stendimento geofonico):



Film sismico caratterizzato da FBP identificabile solo per una parte dello stendimento geofonico.



Film sismico caratterizzato da FBP identificabile per l'intero stendimento geofonico.

I dati delle tabelle obs-rec-src sono riportati su supporto digitale in formato ASCII.



2.3.3.1 Elaborazione tomografica

L'elaborazione tomografica è stata effettuata con il software Rayfract che utilizza il metodo di inversione WET (Wavepath Eikonal Traveltime).

L'algoritmo di inversione utilizza l'approccio basato sulle zone di Fresnel che costituisce un'alternativa ai metodi di inversione basati sul ray tracing.

Gli assunti di base di tale modellizzazione sono:

- i raggi sismici sono considerati come fronti d'onda sferici;
- il range di frequenza dell'impulso sismico è considerato finito (condizione rappresentativa della realtà);
- la perturbazione sismica indotta si propaga in uno spazio finito 3D (zona di Fresnel) attorno al raggio sismico.

L'analisi dei tempi di primo arrivo permette di definire il modello iniziale di velocità (gradiente), attraverso il quale calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Calcolando i tempi residui (T_r), ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, viene definita l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale.

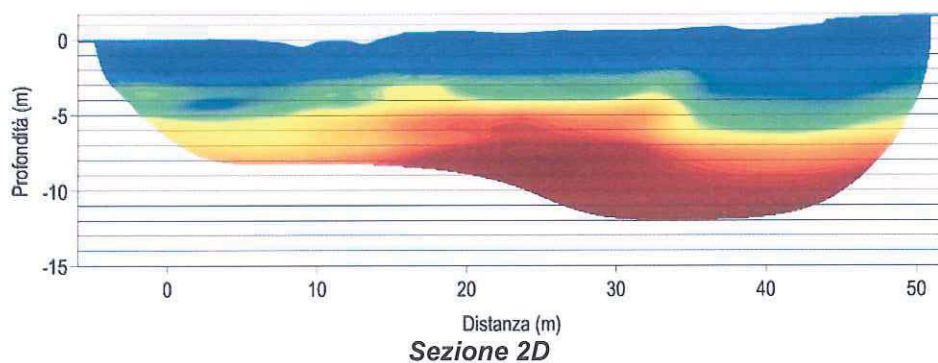
Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui (T_r) e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta accettabile.

I risultati dell'inversione tomografica sono:

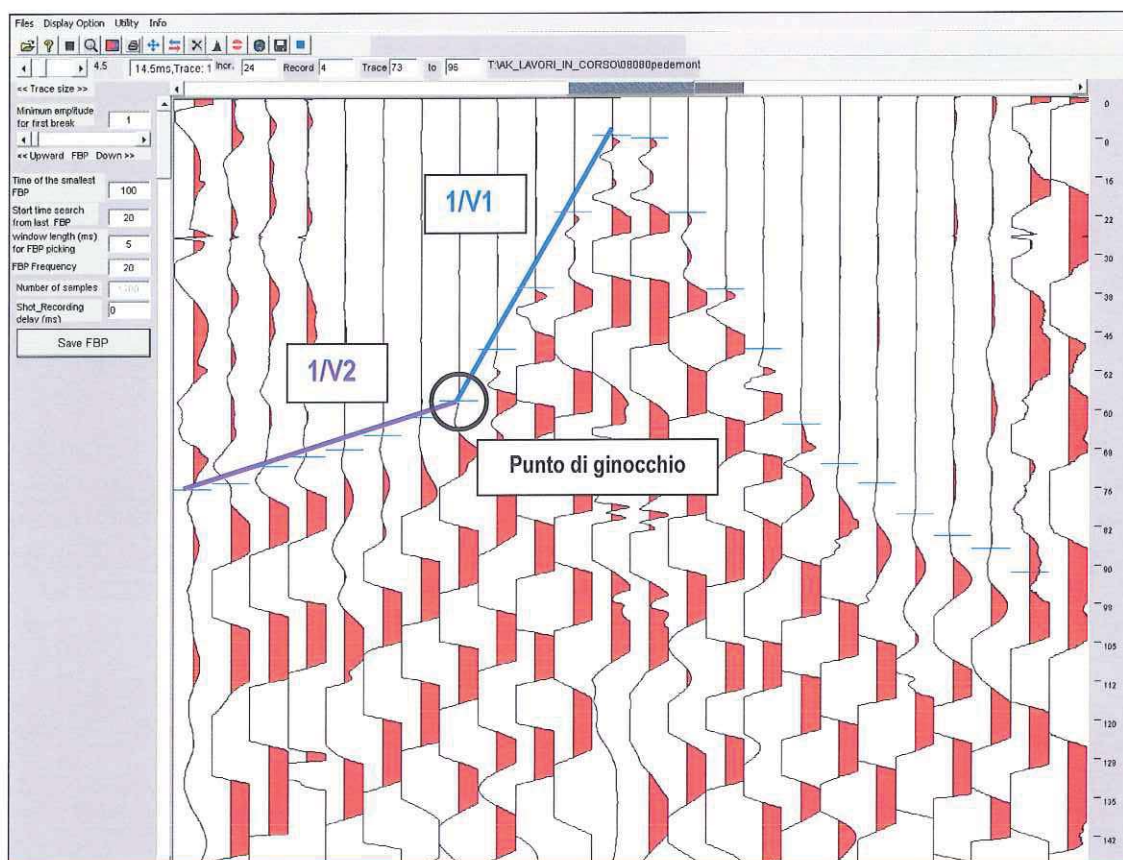
- matrice V_p ;
 - dromocrone calcolate;
 - valori di RMS dei tempi residui;
 - matrice di copertura (coverage): copertura dei raggi sismici nello spazio indagato;
 - matrice di risoluzione: scostamento del modello finale dal modello iniziale (variazione apportata dal processo tomografico al modello iniziale).
-

2.3.3.2 Restituzione e interpretazione e delle sezioni sismiche

I dati della matrice V_p sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer. L'algoritmo utilizzato per tale rappresentazione è il kriging con un valore di smoothing (filtro spaziale) basso. Questa funzione di interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione della grandezza (in questo caso la velocità V_p), cioè l'assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità.

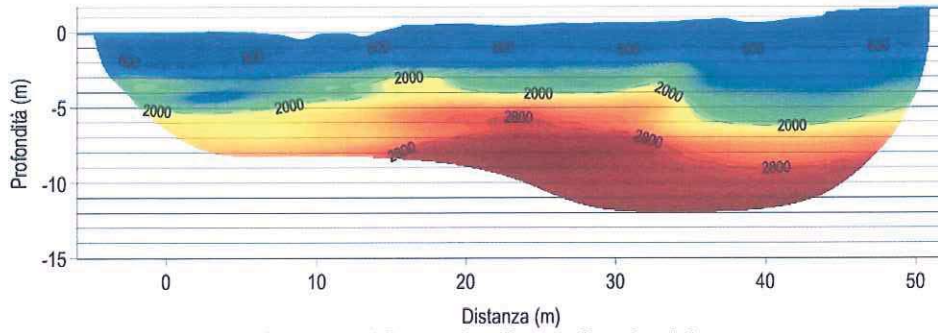


L'analisi delle sezioni sismiche ha permesso la ricostruzione di un modello a strati identificati dalla variazione di pendenza nelle dromocrone. L'applicazione del metodo plus-minus ha permesso la definizione dello spessore e delle velocità dei singoli strati.





Il passaggio tra gli strati è stato rappresentato sulle sezioni tomografiche con isolinee di velocità il cui valore è definito dal metodo plus-minus. I valori di velocità scelti corrispondono, a ulteriore conferma dell'attendibilità del risultato, alle massime variazioni di gradiente nel modello tomografico.



Sezione 2D con isolinee di velocità

3 Descrizione del rilievo eseguito

Il rilievo ha previsto l'esecuzione delle indagini geofisiche lungo tutto il tracciato di progetto per l'indagine sismica mentre per l'indagine in tomografia elettrica il rilievo è stato eseguito (come da accordi) solo sulla prima parte del tracciato (circa 2/3).

Per entrambe le metodologie sono state eseguite sezioni (sismiche e elettriche) con parziale sovrapposizione al fine di migliorare la continuità dell'informazione restituita alle profondità richieste.

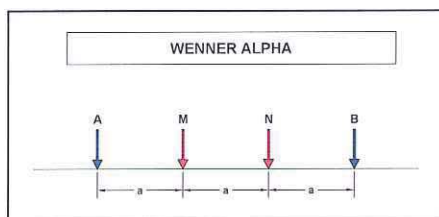
La disposizione planimetrica delle singole linee è riportata alla tavola 1 allegata.

3.1 Tomografia elettrica

Il rilievo è stato effettuato con 4 linee disposte come riportato sulla tavola 01 allegata. Sono stati utilizzati 64 elettrodi con interdistanza tra pari a 5m.

IDENTIFICATIVO LINEA	NUMERO ELETTRODI	INTERDISTANZA ELETTRODICA (m)	LUNGHEZZA (m)
L1	64	5	315
L2	64	5	315
L3	64	5	315
L4	64	5	315
Totale			1260

Il rilievo è stato eseguito con configurazione elettrodica Wenner Alpha che prevede una eguale spaziatura tra gli elettrodi di corrente e quelli di misura.



In fase di acquisizione lo strumento è stato impostato con il seguente setup:

- stack: 4
- durata dell'impulso: 1sec
- valore minimo di lettura in V: 10mV
- deviazione standard massima per singola misura: 4% (qualora la misura non rispetti questo criterio, viene ripetuta)



3.2 Tomografia sismica

Nella tabella si riportano le lunghezze di ogni singola sezione, il numero di punti di ricezione (geofoni) e di energizzazione:

SEZION E	PUNTI DI RICEZION E	INTERDISTANZ A GEOFONICA	PUNTI DI ENERGIZZAZION E ESTERNI	PUNTI DI ENERGIZZAZION E INTERNI	LUNGHEZZ A (m)
RF1	24	5	4	5	135
RF2	24	5	4	5	135
RF3	24	5	4	5	135
RF4	24	5	4	5	135
RF5	24	5	4	5	135
RF6	24	5	4	5	135
RF7	24	5	4	5	135
RF8	24	5	4	5	135
RF9	24	5	4	5	135
RF10	24	5	4	5	135
RF11	24	5	4	5	135
RF12	24	5	4	5	135
RF13	24	5	4	5	135
RF14	24	5	4	5	135
RF15	24	5	4	5	135
RF16	24	5	4	5	135
RF17	24	5	4	5	135
RF18	24	5	4	5	135
RF19	24	5	4	5	135

Ogni tiro è stato ripetuto almeno una volta per migliorare mediante operazione di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (diminuzione del rumore di fondo).

Il rilievo ha pertanto previsto l'esecuzione di linee sismiche per complessivi 2.185m (2.565m comprese le posizioni di tiro esterne).



4 Risultati del rilievo e conclusioni

Ai fini dell'interpretazione del rilievo geofisico è opportuno ricordare alcune delle osservazioni fatte in precedenza riguardanti le proprietà dei materiali:

→ **Rilievo geoelettrico (parametro resistività elettrica dei materiali)**

- materiali naturali di tipo granulare (sabbie e ghiaie) sono caratterizzati da un comportamento fortemente resistivo; in funzione della granulometria dei materiali i valori di resistività variano da 100 fino a 3000-4000 ohm.m;
- le sabbie presentano valori di resistività inferiori alle ghiaie;
- materiali naturali di tipo coesivo (limi e argille) presentano valori di resistività bassi nell'ordine di qualche decina di ohm.m;
- l'aumento della frazione fine (limo e argilla) nei sedimenti provoca una diminuzione dei valori di resistività.

→ **Rilievo sismico (parametro velocità delle onde compressionali V_p)**

- Materiali sciolti presentano valori di velocità inferiori rispetto a materiali lapidei
- Materiali sciolti presentano velocità proporzionali al materiale costituente i grani e alla percentuale di vuoti
- Le velocità sono proporzionali in modo diretto allo stato di addensamento dei materiali

Per le diverse indagini è possibile pertanto verificare la presenza di modelli del sottosuolo così costituiti:

1. tomografia elettrica:

- **strato 1:** presenta valori di resistività tra 30 e 200 ohm.m e si estende da piano campagna sino a d un massimo di 10m da piano campagna con un valore medio di circa 5m. E' riferibile a materiali scioltisuperficiali
 - **strato 2:** presenta valori di resistività tra 200 fino a oltre 1500 ohm.m e si presenta non continuo con valori di spessore medi di circa 15m. sono spesso presenti infatti discontinuità laterali e passaggi a resistività inferiori. Sono riferibili a materiali ghiaiosi che pertanto si estendono mediamente da 5m a 25m di profondità con estensione laterale non continua. Ovviamente il passaggio agli strati a tessitura più fine sono presenti in maniera graduale. Nella tavola di riferimento tale strato è perimetrato con linea tratteggiata.
 - **strato 3:** presenta valori di resistività simili allo strato 1 e si estende dall'orizzonte inferiore dello strato ghiaioso sino alle profondità massime di indagine raggiunte (oltre 50m). Si presenta spesso in continuità con lo strato 1 (in tali zone è presente quindi un modello sostanzialmente a singolo strato). Sono valori di resistività riferibili a materiali a prevalente componente sabbiosa.
-



2. tomografia sismica

- **strato 1:** è lo strato cosiddetto aerato ed ha valori di velocità sismiche molto bassi (inferiori a 900m/sec). Si estende da piano campagna sino ad una profondità di circa 10m
- **strato 2:** è posto inferiormente allo strato precedente e raggiunge valori di velocità di circa 1500m/sec (raramente superiori). Lo strato 2 non presenta una discontinuità netta con il soprastante ma piuttosto un passaggio graduale ad elevato gradiente

Dalla tomografia elettrica si desume pertanto che lo strato ghiaioso appare a una profondità di circa 5-10m e si estende in profondità fino a circa 25-30m.

I modelli da tomografia sismica presentano un modello del sottosuolo caratterizzato da un orizzonte di 10m circa con caratteristiche meccaniche molto scadenti. A profondità maggiori il valore di velocità sismica è superiore, pur senza raggiungere mai valori significativamente elevati (pur trattandosi di ghiaie).

Ovviamente il modello stratigrafico verrà ritarato secondo i dati provenienti dai sondaggi diretti e dai materiali da essi rinvenuti. Sarà inoltre da tenere in considerazione (per il modello geoelettrico) la profondità della falda che, come specificato in precedenza, abbassa i valori di resistività elettrica propri dei materiali asciutti.



5 Documentazione fotografica

Di seguito viene riportata una breve documentazione fotografica dei rilievi eseguiti.

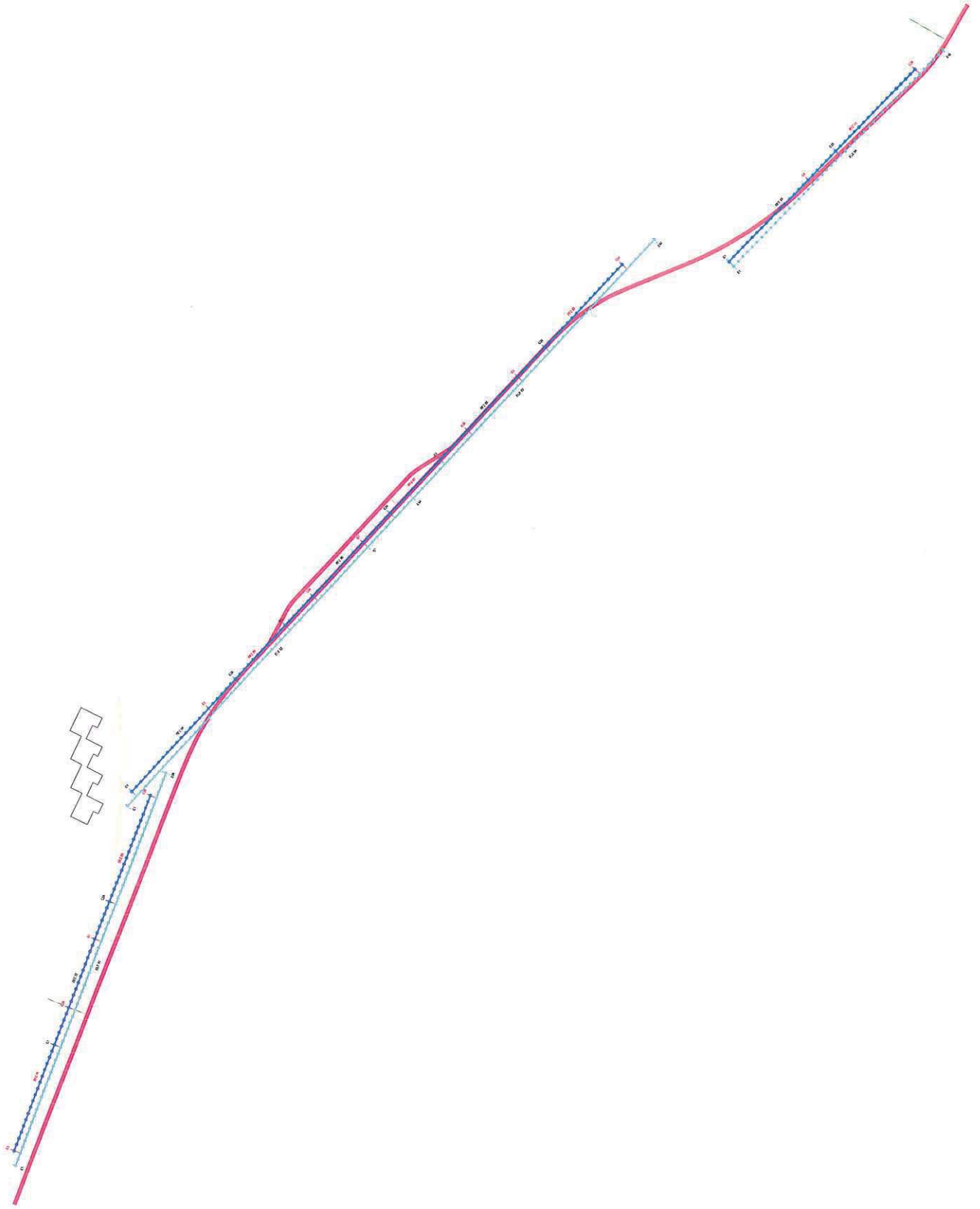












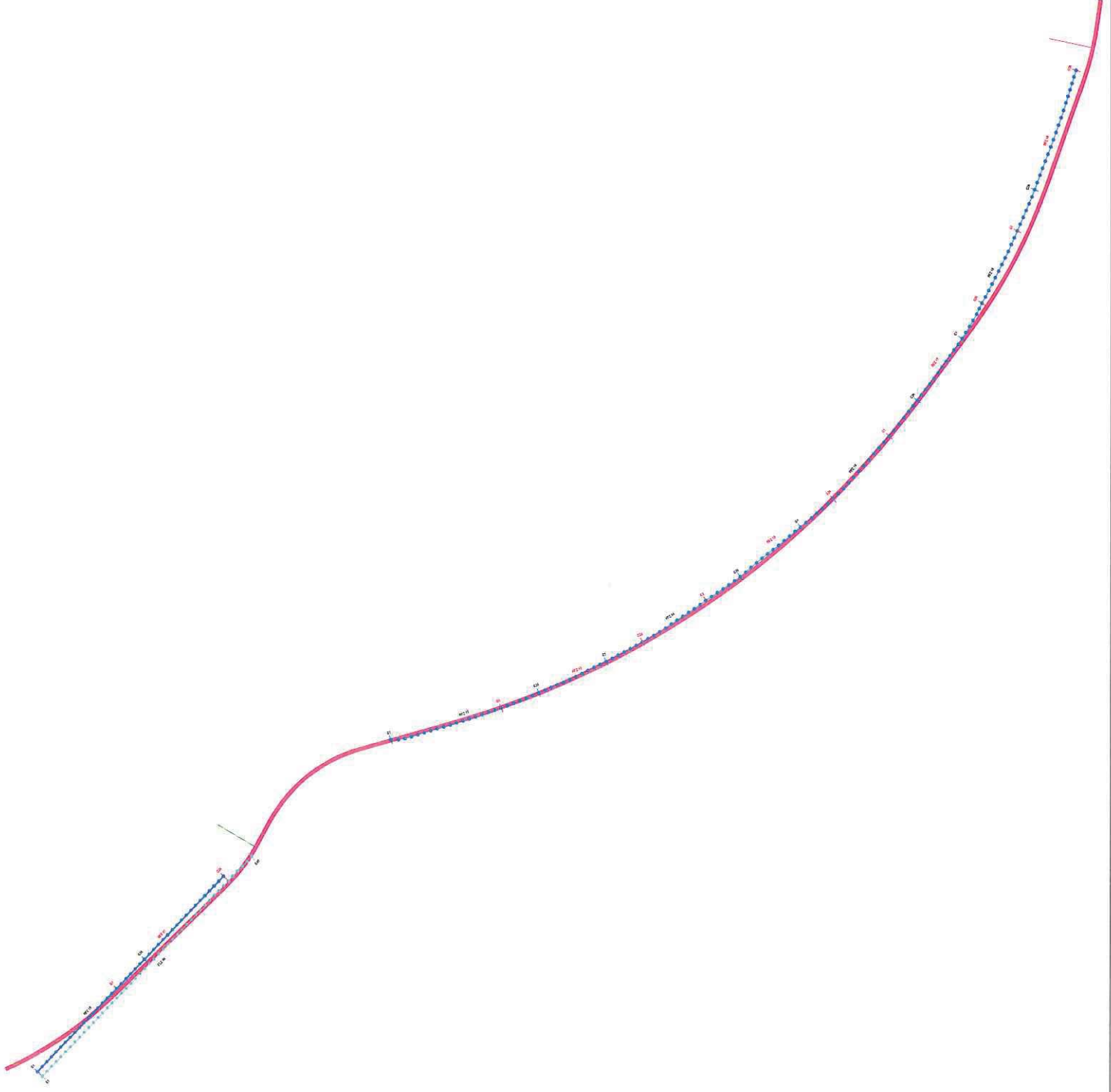
LEGENDA

- R.F.C. - Linea Integrata Usata a Direzione
- - - E.L.E. - Sezione Topografica (1:10000)

PLANNIMETRIA DELLE INDAGINI ESEGUITE					
ST. P.	ST. A.	ST. B.	ST. C.	ST. D.	ST. E.
1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

PROF. G. B. C. S. I.
 Comune di Bologna
INDAGINI GEODISICHE
01 a

SCALA: 1:500
 DATA: 2011-08-10
 AUTORE: CESI



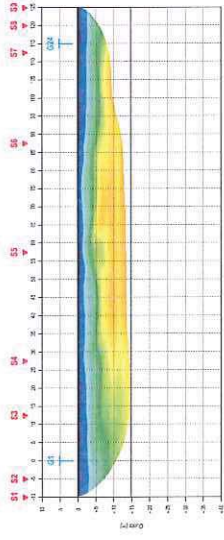
LEGENDA

- P.P.Z. - Soloni fotografati aerea e fotografati
- P.P.Z. - Soloni fotografati aerea e fotografati

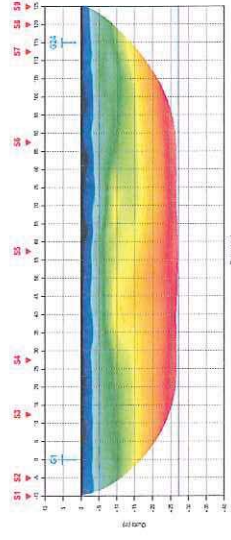
PLANIMETRIA DELLE INDAGINI ESEGUITE					
DATA	SCALE	ST.	ES.	M.	
1952	1:500	1	1		
1953	1:500				
1954	1:500				
1955	1:500				
1956	1:500				
1957	1:500				
1958	1:500				
1959	1:500				
1960	1:500				
1961	1:500				
1962	1:500				
1963	1:500				
1964	1:500				
1965	1:500				
1966	1:500				
1967	1:500				
1968	1:500				
1969	1:500				
1970	1:500				
1971	1:500				
1972	1:500				
1973	1:500				
1974	1:500				
1975	1:500				
1976	1:500				
1977	1:500				
1978	1:500				
1979	1:500				
1980	1:500				
1981	1:500				
1982	1:500				
1983	1:500				
1984	1:500				
1985	1:500				
1986	1:500				
1987	1:500				
1988	1:500				
1989	1:500				
1990	1:500				
1991	1:500				
1992	1:500				
1993	1:500				
1994	1:500				
1995	1:500				
1996	1:500				
1997	1:500				
1998	1:500				
1999	1:500				
2000	1:500				
2001	1:500				
2002	1:500				
2003	1:500				
2004	1:500				
2005	1:500				
2006	1:500				
2007	1:500				
2008	1:500				
2009	1:500				
2010	1:500				
2011	1:500				
2012	1:500				

01 b

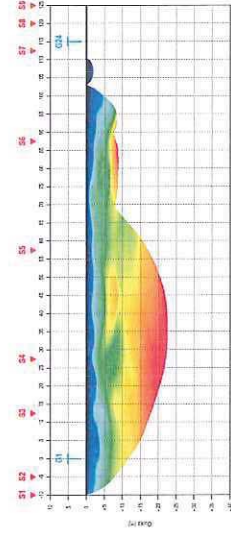
INDAGINI GEOFSICHE
 C.E.S.I.
 1500
 2010/04/09
 09/12



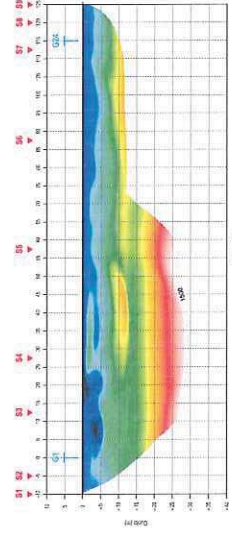
RF201
SEZIONE TOMOGRAFICA



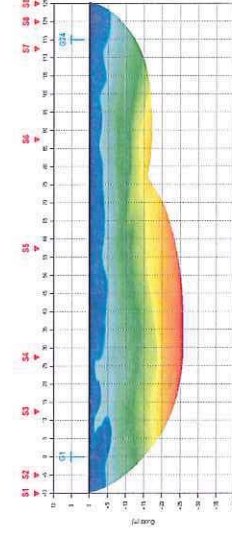
RF203
SEZIONE TOMOGRAFICA



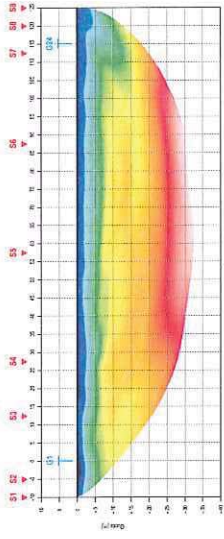
RF205
SEZIONE TOMOGRAFICA



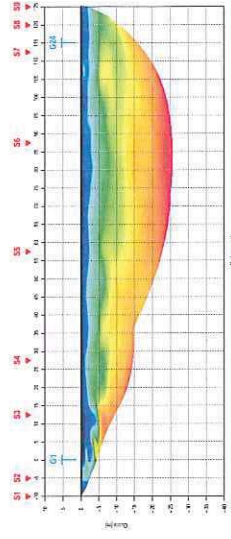
RF207
SEZIONE TOMOGRAFICA



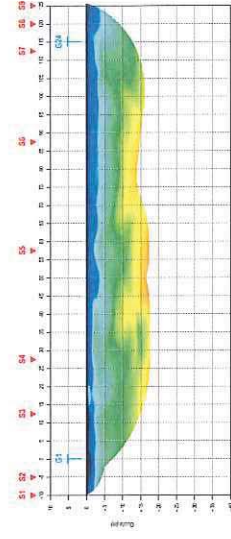
RF209
SEZIONE TOMOGRAFICA



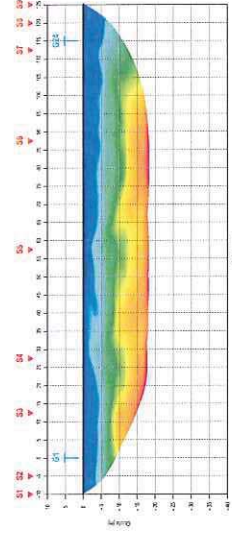
RF202
SEZIONE TOMOGRAFICA



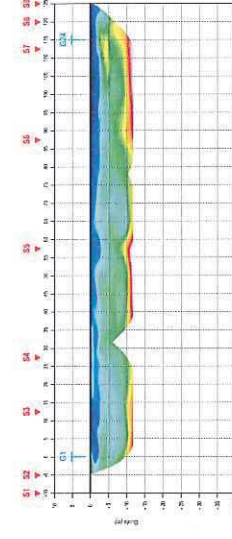
RF204
SEZIONE TOMOGRAFICA



RF206
SEZIONE TOMOGRAFICA



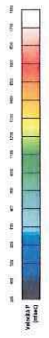
RF208
SEZIONE TOMOGRAFICA



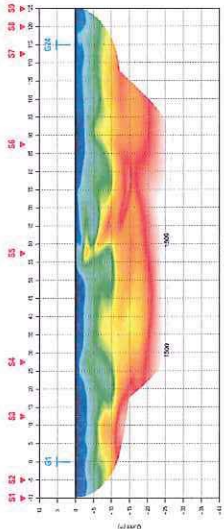
RF210
SEZIONE TOMOGRAFICA

LEGENDA

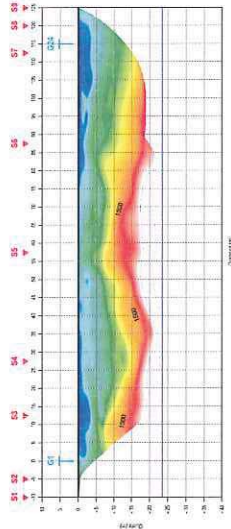
- ▽ velocità tomografica
- ↑ pWH



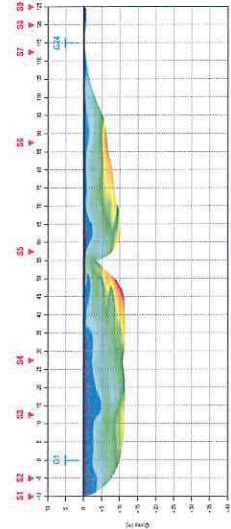
TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE
Sezioni tomografiche RFR0201-0210



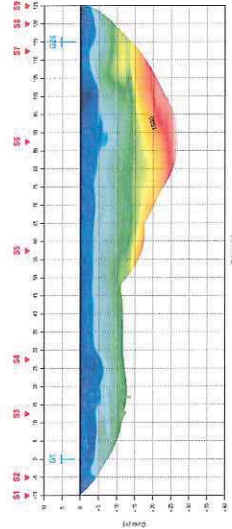
RFZ11
SEZIONE TOMOGRAFICA



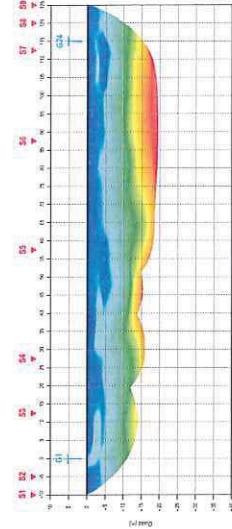
RFZ13
SEZIONE TOMOGRAFICA



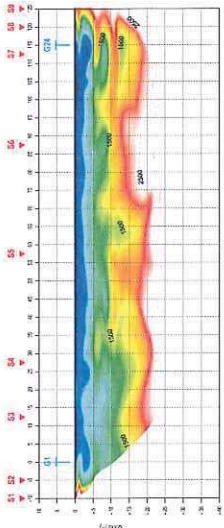
RFZ15
SEZIONE TOMOGRAFICA



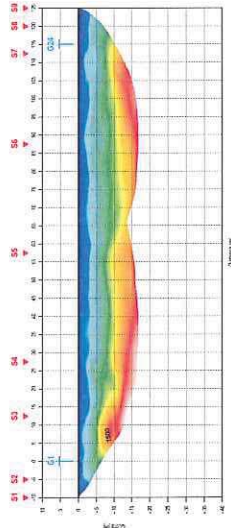
RFZ17
SEZIONE TOMOGRAFICA



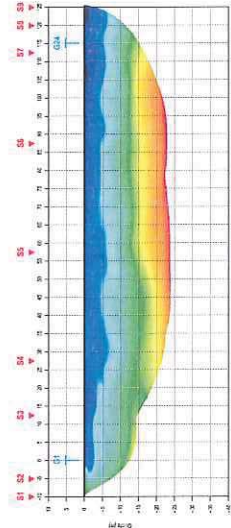
RFZ19
SEZIONE TOMOGRAFICA



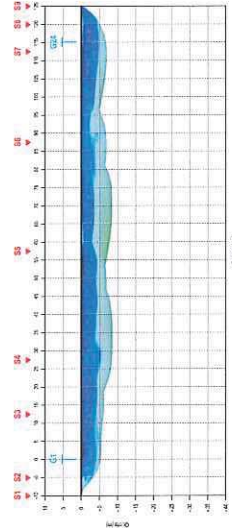
RFZ12
SEZIONE TOMOGRAFICA



RFZ14
SEZIONE TOMOGRAFICA



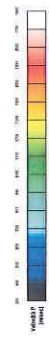
RFZ16
SEZIONE TOMOGRAFICA



RFZ18
SEZIONE TOMOGRAFICA

LEGENDA

- ▽ Punt. sismologici
- Punt. GPS



TOMOGRAFIA SISMICA A SFRONZIONE
Sezione tomografica in direzione RFZ03

DATA	2012-06-20	ORA	11:00
PROGETTO	RFZ03	SCALE	1:500
PROFESSORE	PIRELLA	COORDINATORE	PIRELLA

03

PIRELLA G. & S. P.
CENTRO DI RICERCA
INDAGINI GEOPHISICHE

CENTRO DI RICERCA

ESCA: 1500
SIT: 2012/06/20
CONT. SCA: 09112

CESI

SISMICA DI SUPERFICIE Fase 2
PEOPLE MOVER

SIGLA	IMPRESA	ANNO
HVSR	PROGEO	2010



SOGEO[®]
S.R.L.

Sondaggi - Indagini geologiche e geotecniche
Via Edison, 1/1 48022 Lugo (RA)

**INDAGINI GEOFISICHE PER
CONCESSIONE DI PROGETTAZIONE,
COSTRUZIONE E GESTIONE
DI UN SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO
AD AUTOMAZIONE INTEGRALE
PER IL COLLEGAMENTO TRA
L'AEROPORTO E LA STAZIONE FF.SS.
DI BOLOGNA**

**PROSPEZIONE GEOFISICA
PROVE SISMICHE HVSR**

Impresa esecutrice delle indagini



PROGEO S.r.l.

Via Talete 10/8
47100 Forlì
tel. 0543 723580
fax. 0543 721486
Email: mail.progeo@gmail.com
Web:www.progeo.info



DATA: Luglio 2010

IL DIRETTORE TECNICO PER L'IMPRESA
Dott. Gabriele Pulelli





INDICE

1. INDICAZIONI GENERALI	3
2. RISPOSTA SISMICA LOCALE (HVSR tecnica Nakamura)	6
MODALITA' OPERATIVE	6
ELABORAZIONE DATI	8
3. ELABORATI CARTOGRAFICI	9
4. CONCLUSIONI	10

SOGEO

INDAGINI GEOFISICHE PER LA PROGETTAZIONE DI UN SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO FRA L'AEROPORTO DI BOLOGNA E LA STAZIONE FF.SS. DENOMINATO "PEOPLE MOVER".

RISPOSTA SISMICA LOCALE (H.V.S.R.)

1. INDICAZIONI GENERALI

Su incarico della società Sogeo di Lugo nel mese di luglio 2010 sono state eseguite indagini geofisiche per la caratterizzazione sismica del suolo per la progettazione e la realizzazione di un sistema di trasporto pubblico per il collegamento fra l'aeroporto di Bologna e la stazione FF.SS. denominato "People Mover".

Per lo studio del sito in esame con finalità di microzonazione si sono applicate le procedure definite nella delibera dell'Assemblea legislativa progr. N° 112 – oggetto n° 3121 del 2 maggio 2007 – "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia-Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica".

Allo scopo di valutare gli elementi sopra indicati, in accordo con la Committenza, si è perciò realizzato in questa fase geognostica n° 11 prove di sismica passiva (H.V.S.R.) conosciuta anche come "Tecnica Nakamura" tali prove sono state realizzate in corrispondenza di prove (Sondaggi e prove penetrometriche) geomeccaniche.

AZIONE SISMICA

Categorie di suolo di fondazione

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi.

Per la definizione dell'azione sismica si può anche fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III).

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Deposit</i> i di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Deposit</i> i di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente V_{s30} di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità.

Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera.

Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

La misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata.

Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, la classificazione può essere effettuata in base ai valori del numero equivalente di colpi della prova penetrometrica dinamica (Standard Penetration Test) SPT_{30N} nei terreni prevalentemente a grana grossa e della resistenza non drenata equivalente c_{u30} nei terreni prevalentemente a grana fina.

Per sottosuoli appartenenti alle ulteriori categorie S1 ed S2 di seguito indicate (Tab. 3.2.III), è necessario predisporre specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di terreni suscettibili di liquefazione e/o di argille d'elevata sensibilità possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

Tabella 3.2.III – *Categorie aggiuntive di sottosuolo.*

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

La velocità equivalente delle onde di taglio V_{s30} è definita dall'espressione:

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

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Il sito verrà classificato sulla base del valore di V_{s30} , se disponibile, altrimenti sulla base del valore di $NSPT$.

2. RISPOSTA SISMICA LOCALE (HVSr tecnica Nakamura)

MODALITA' OPERATIVE

Generalità

La metodologia, anche chiamata tecnica di Nakamura (1989), è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka del 1961.

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti locali di sito.

La tecnica proposta da Nakamura assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrastante su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alla geologia, geofisica e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca SESAME (**S**ite **E**ffect **S** assessment using **A**mbient **E**xcitations) ed a questo si rimanda per le linee guida della tecnica H/V spectral ratio (<http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>).

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni di indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

Basi teoriche

Le basi teoriche dell'HVSr in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice. Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2). Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati, e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente (λ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore h del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza (f_r) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{p1}/(4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{s1}/(4h)$$

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

Questo, insieme ad una stima della velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore h degli strati.

Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto ma la prassi di usare il rapporto degli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per *a)* il contenuto in frequenza, *b)* la risposta strumentale e *c)* 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.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S. L'applicabilità pratica della semplice formula [2] è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito delle prospezioni geofisiche che nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

Attrezzature e modalità esecutive

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcun strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. in quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e della rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento sarà da orientare secondo le direzioni geografiche (E e W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Sarà da fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza edifici, vento ecc. in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta di sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

1. Trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (< 1-2 Hz);
2. Amplificatori;
3. Digitalizzatore;
4. Frequenza di campionamento: > 50 Hz;
5. Convertitore A/D (analogico digitale) a 24 bit.
6. Durata registrazione: >10 minuti.
7. Collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software (**Geopsy**) in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200-400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. Operatore di Smoothing (Konno & Ohmachi)
3. Merging dei componenti orizzontali
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata (>10)
5. Media degli spettri H/V
6. Valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di f_0 – Frequenza/e di risonanza e la sua deviazione standard.

Il certificato finale della prova presenta:

(<http://www.geo.uib.no/seismo/REPORTS/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.doc>):

1. I criteri di attendibilità della misura;
2. I criteri di validità del picco di f_0 ;
3. I valori di soglia delle condizioni di stabilità;
4. Analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alla frequenza del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
5. Interpretazione di f_0 e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Frequenze

Per quanto riguarda la prima la mappatura delle frequenze principali di risonanza permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali di sito.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

Spessori

L'assunzione di base è che, per un modello di sottosuolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza f_r dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$f_r = \frac{V_s}{4Z}$$

dove Z è lo spessore dello strato di sedimenti e V_s dipende dalla velocità delle onde di taglio al suo interno.

In base a tale relazione, quindi, a partire da valori misurati di f_r e V_s è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia non essendo sempre presente la misura di V_s come profilo sismico fino al bedrock geofisico allora si può far riferimento alla relazione Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999).

Poiché l'andamento del log in V_s in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidezza al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire dai valori di V_s per la porzione più superficiale del terreno, è possibile estrapolare l'andamento delle V_s a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

3 ELABORATI CARTOGRAFICI

Al termine della presente relazione tecnica sono riportati gli elaborati cartografici (Planimetrie certificate rapporto H/V e log della stima delle V_s) delle risultanze ottenute dalla prospezione geofisica così suddivisi:

- elaborato cartografico planimetrico dell'ubicazione delle indagini da foto aerea suddivise in tre tavole;
- elaborati cartografici del certificato di ciascuna prova H.V.S.R. realizzata.
- elaborati cartografici della stima del profilo di velocità delle onde di taglio di ciascuna prova H.V.S.R. realizzata.

4. CONCLUSIONI


Per la progettazione del “People Mover” ovvero del sistema di trasporto pubblico tra l’Aeroporto di Bologna e la stazione Ferroviaria si sono eseguite, fra l’altro, indagini geofisiche per valutare la geometria del sottosuolo entro una profondità di una trentina di metri dal piano campagna.

Le indagini geofisiche sono consistite nella realizzazione di 11 misure di sismica passiva (H.V.S.R.) conosciuta come “Tecnica Nakamura” che ha consentito di determinare le frequenze di sito e la stima delle velocità delle onde di taglio per circa 30 metri dal piano campagna.

La caratterizzazione dei materiali in oggetto può quindi soddisfare i requisiti relativi alla entrata in vigore del nuovo decreto ministeriale.

Come risulta dai singoli certificati di prova relativa alla prove Nakamura si è evidenziato che nel sito in esame le frequenze principali sono estremamente variabili da valori inferiori ad 1 Hz a valori superiori a 10 Hz.

In ogni caso in tutti i siti indagati la stima dei profili di velocità delle onde di taglio risulta essere sempre entro i range della categoria C ovvero i valori di V_{s30} sono sempre compresi fra 180 e 360 m/sec.

PROGEO S.r.l.
Dott. Gabriele Pulelli




● S9
HVSR 234

● CPT5
HVSR 232

● S11
HVSR 253

● S2
HVSR 234

● S14
HVSR 235

● CPT11
HVSR 236

200 m



● CPT 11
HVSr 236

● S 16
HVSr 237

● S 17
HVSr 238

200 m



COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 231

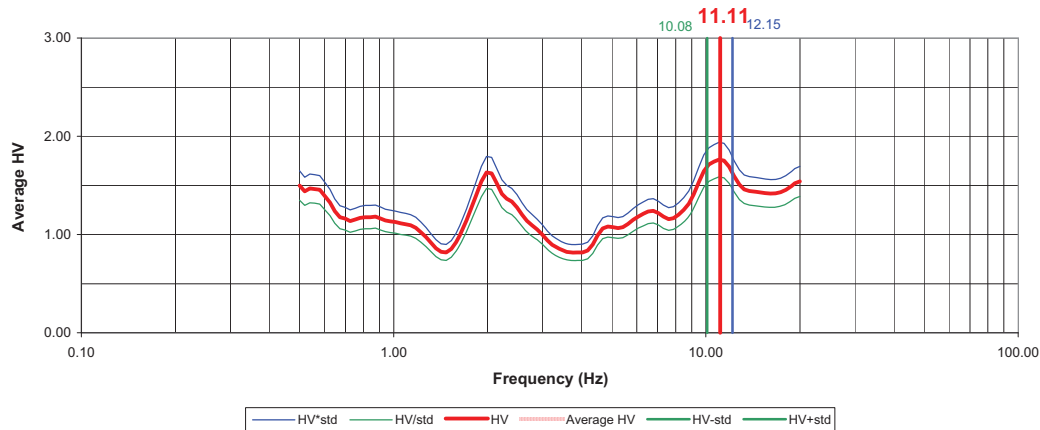
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	7.20.00
End recording	7.50.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	69

Max HVSr 11.11 ± 1.03 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	11.11		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	11.11 > 10/20	<input checked="" type="checkbox"/>	
nc (f0) > 200	15776.2 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times	<input checked="" type="checkbox"/>	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

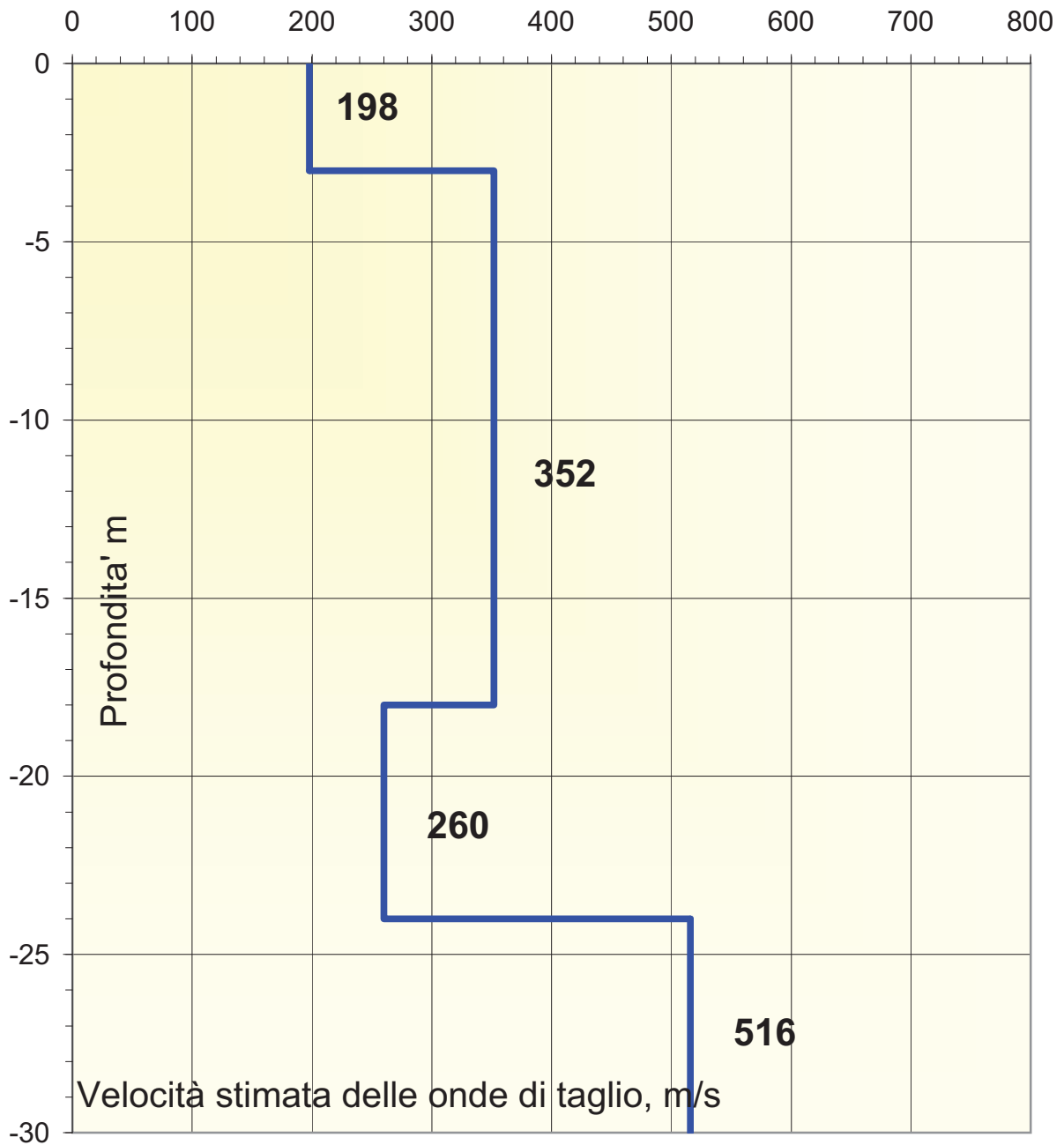
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	4.18 Hz	<input checked="" type="checkbox"/>	
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	0 Hz		<input checked="" type="checkbox"/>
A0 > 2	1.76 > 2		<input checked="" type="checkbox"/>
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.0917999999999992 <	<input checked="" type="checkbox"/>	
σf < g(f0)	1.0339 < 0.5555		<input checked="" type="checkbox"/>
σA(f0) < θ(f0)	0.204295 < 1.58	<input checked="" type="checkbox"/>	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
σ(f0)	Threshold value for the stability condition σf < σ(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
σ(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

**STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 231**



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 324 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 232

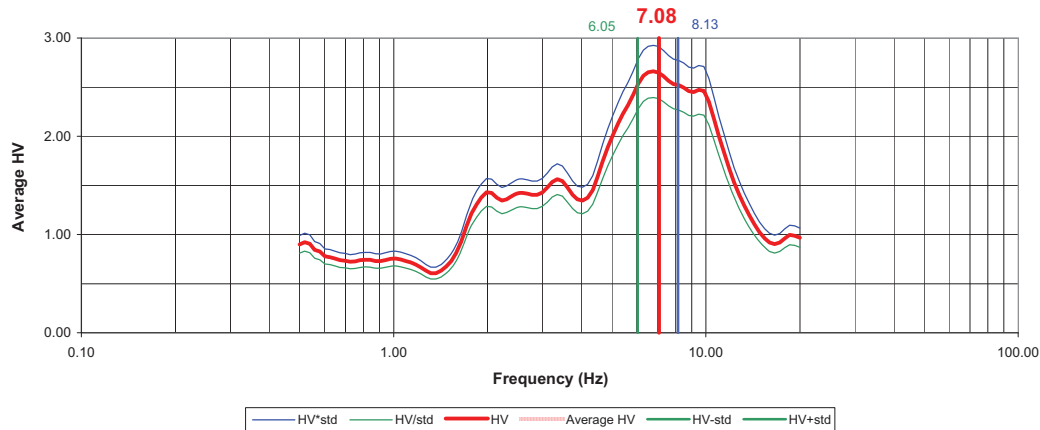
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	7.58.00
End recording	8.28.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	71

Max HVSr 7.08 ± 1.04 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	7.08		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	7.08 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	10053.6 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

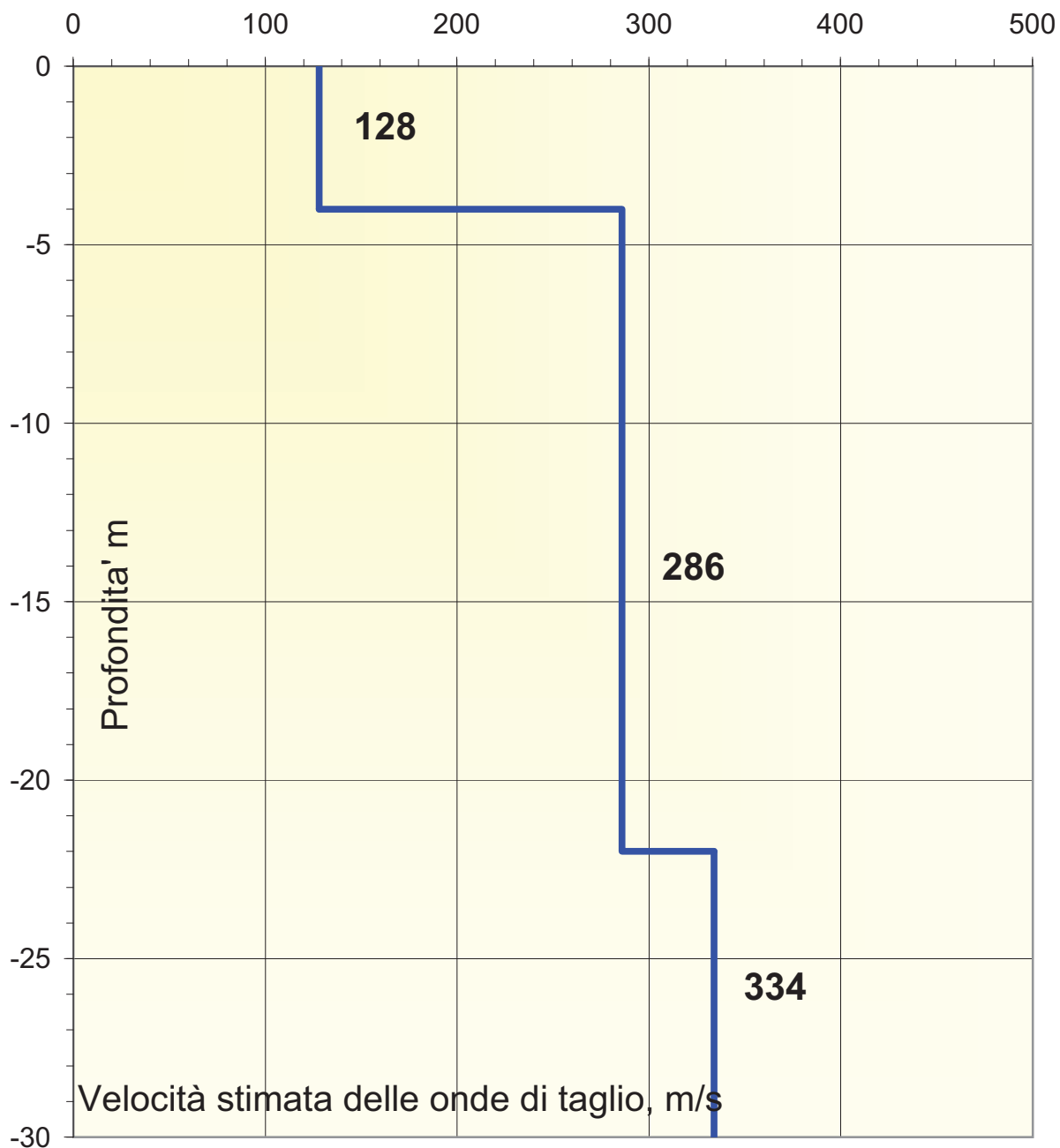
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	1.84 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	13.27 Hz		✓
A0 > 2	2.66 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.29203 < 0.05		✓
σf < ε(f0)	1.04022 < 0.354		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.291235 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO - 950-25- People Mover - PROVA N° 232



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 254 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 233

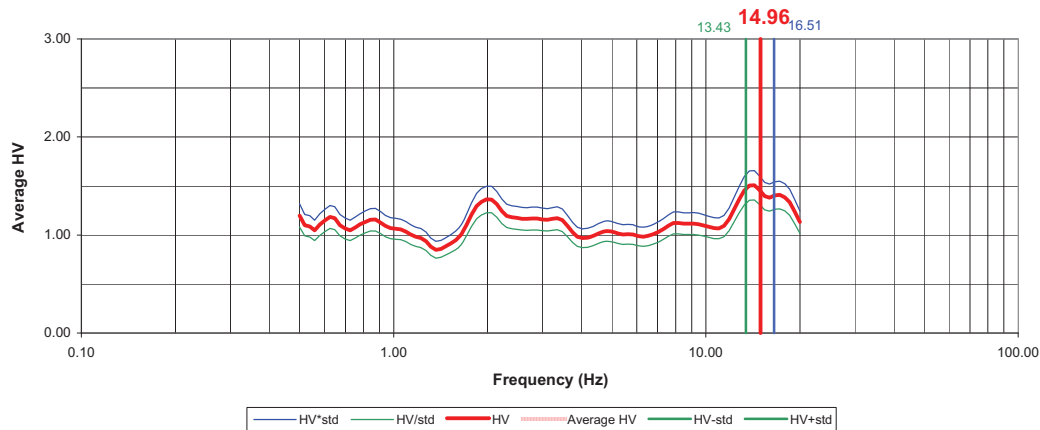
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	8.32.00
End recording	9.02.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	71

Max HVSR 14.96 ± 1.53 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	14.96		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	14.96 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	21243.2 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

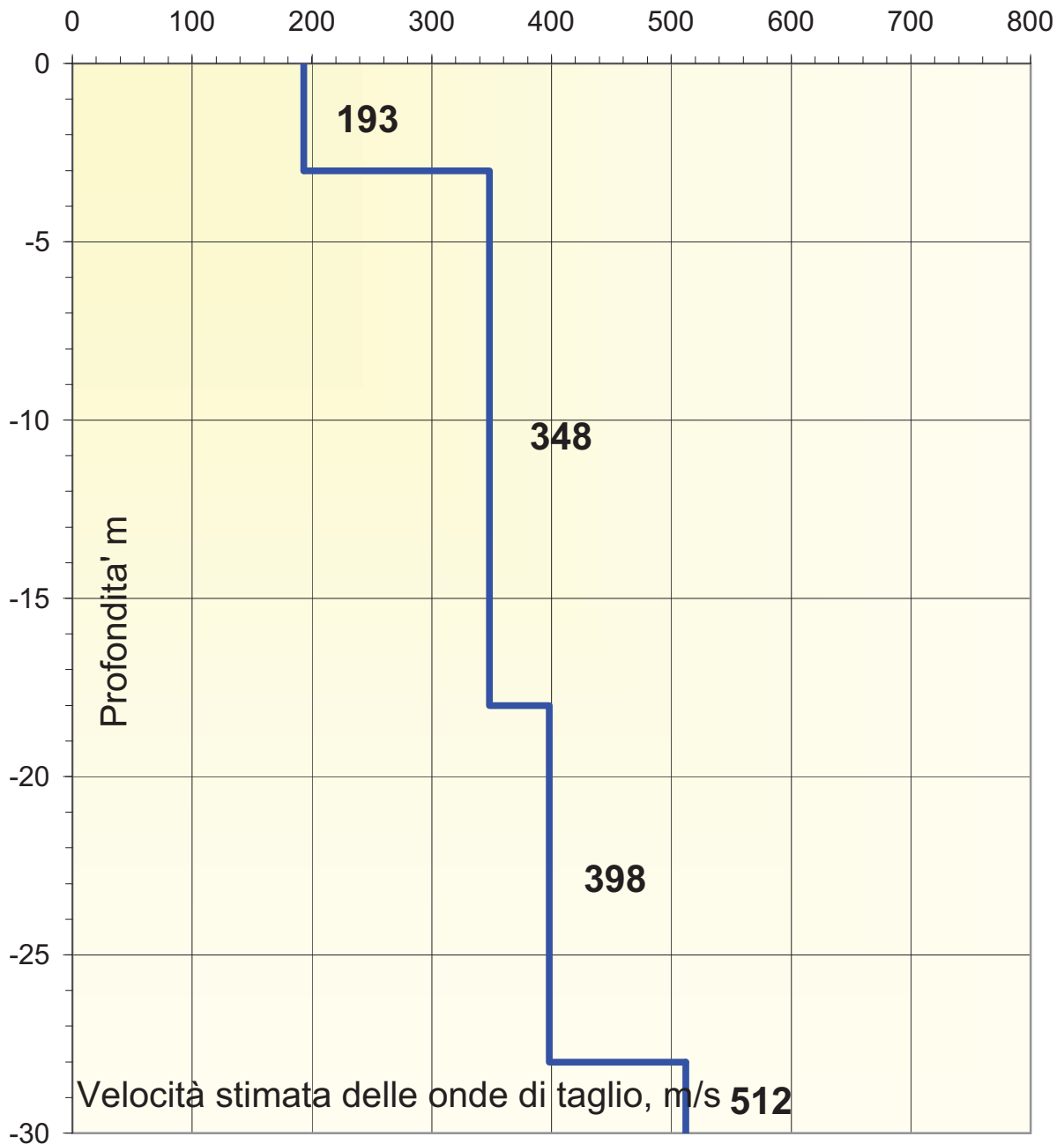
Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	0 Hz		✗
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	0 Hz		✗
A0 > 2	1.5 > 2		✗
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.658300000000001 <		✓
σf < g(f0)	1.5398 < 0.748		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.12237 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
g(f0)	Threshold value for the stability condition σf < g(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
σf (f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 233



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 342 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 234

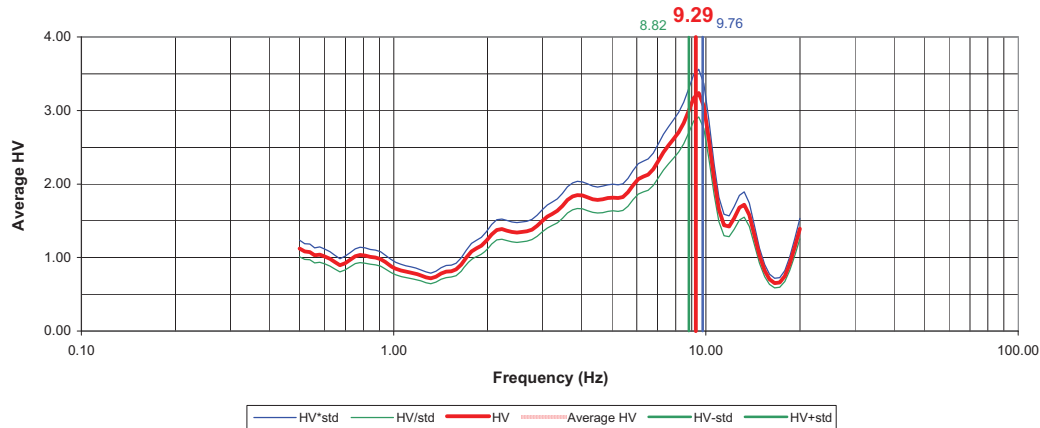
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	9.31.00
End recording	10.01.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	65

Max HVSr 9.29 ± 0.47 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	9.29		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	9.29 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	13191.8 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

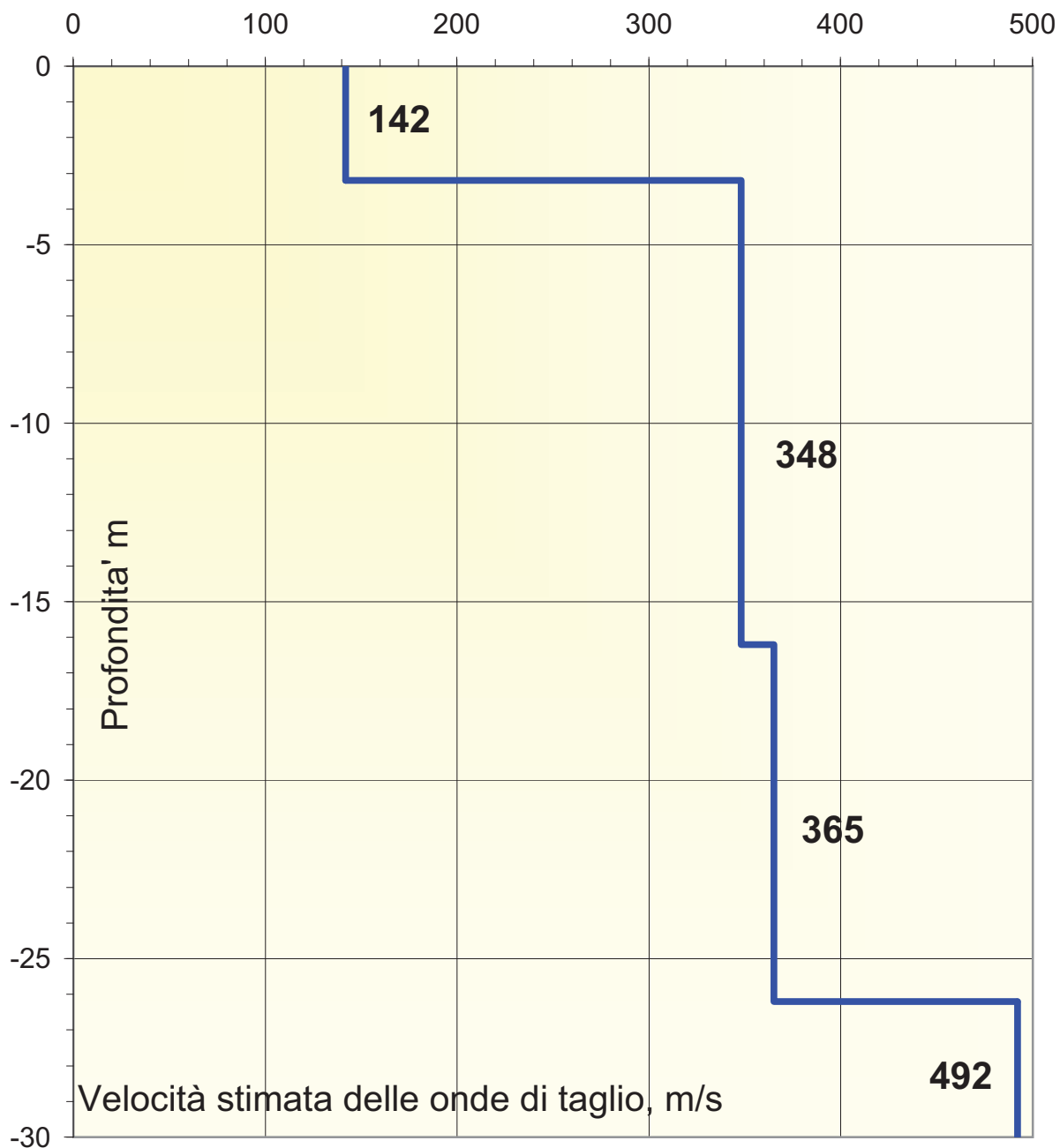
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	3.22 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	11.43 Hz		✓
A0 > 2	3.23 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.202520000000002 < 5		✗
σf < ε(f0)	0.474699999999999 < 0		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.29686 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO - 950-25- People Mover - PROVA N° 234



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 316 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 235

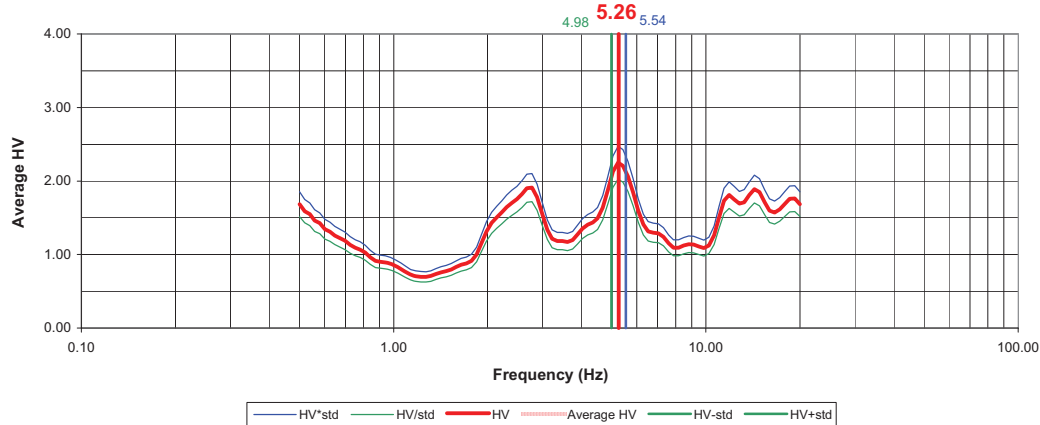
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	10.14.00
End recording	10.44.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	69

Max HVSr 5.26 ± 0.28 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	5.26		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	5.26 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	7469.2 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

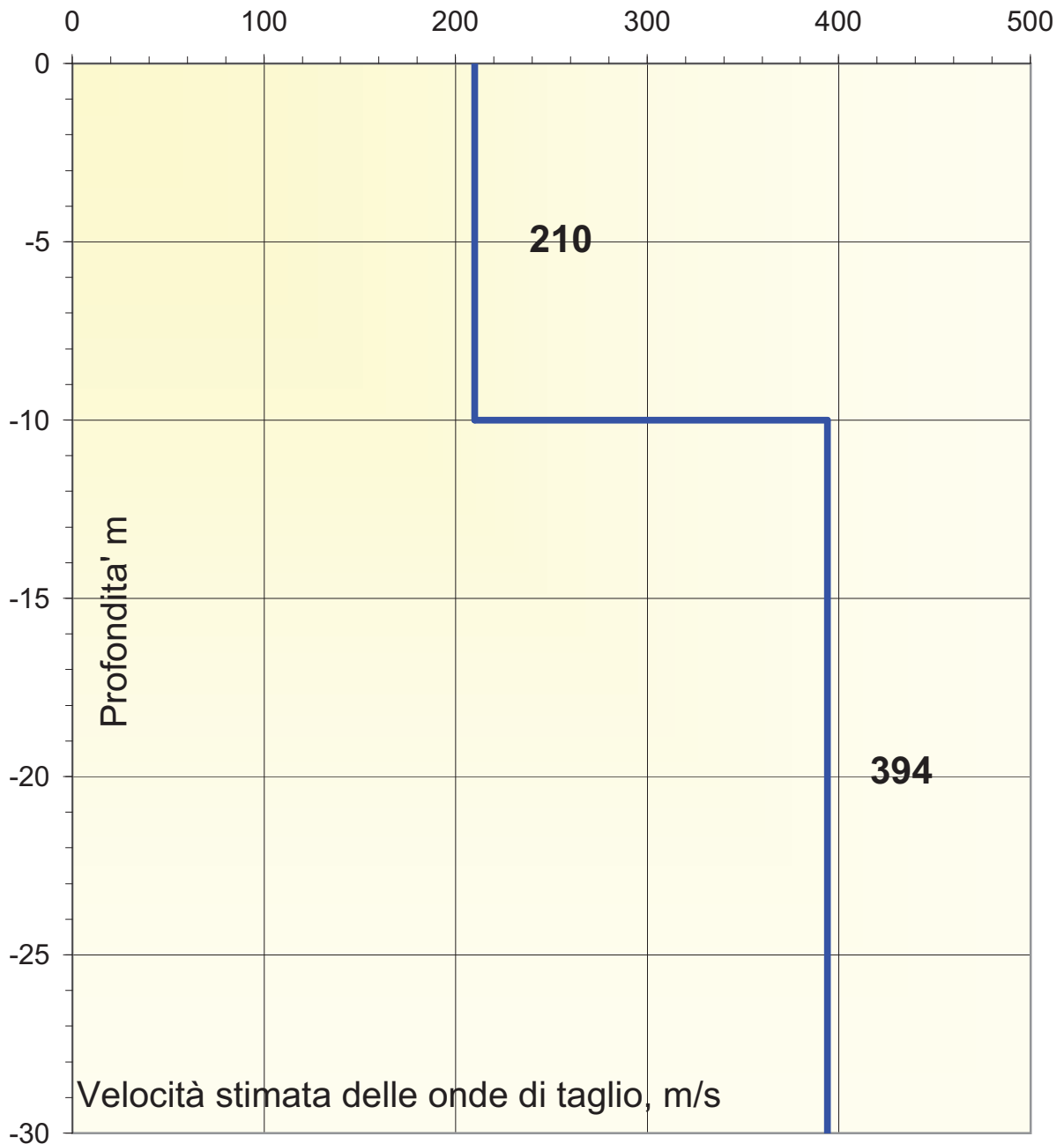
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	1.84 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	7.87 Hz		✓
A0 > 2	2.24 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.030470000000002 <		✓
σf < σ(f0)	0.2808 < 0.263		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.395855 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
σ(f0)	Threshold value for the stability condition σf < σ(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
σ(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 235



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 305 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 236

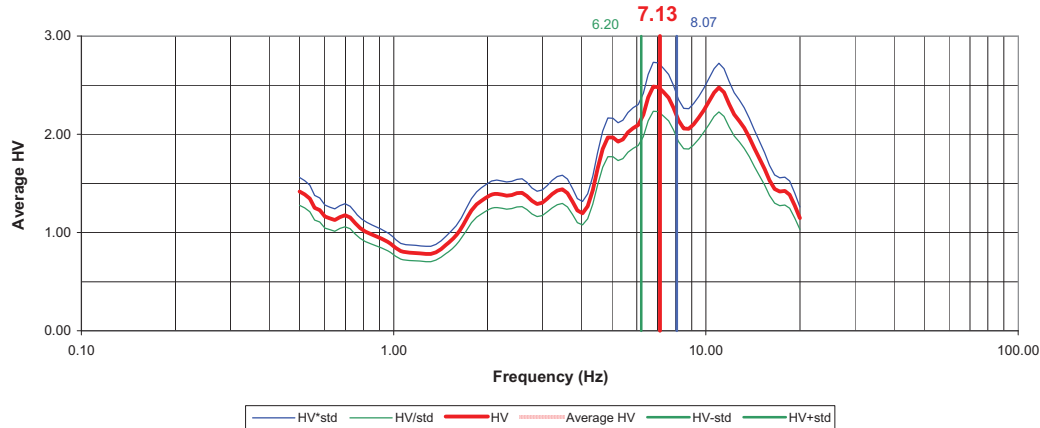
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	11.17.00
End recording	11.47.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	69

Max HVSr 7.13 ± 0.93 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	7.13		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	7.13 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	10124.6 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	4.02 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	20 Hz		✓
A0 > 2	2.48 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.34203 < 0.05		✓
σf < ε(f0)	0.93512 < 0.3565		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.341395 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 237

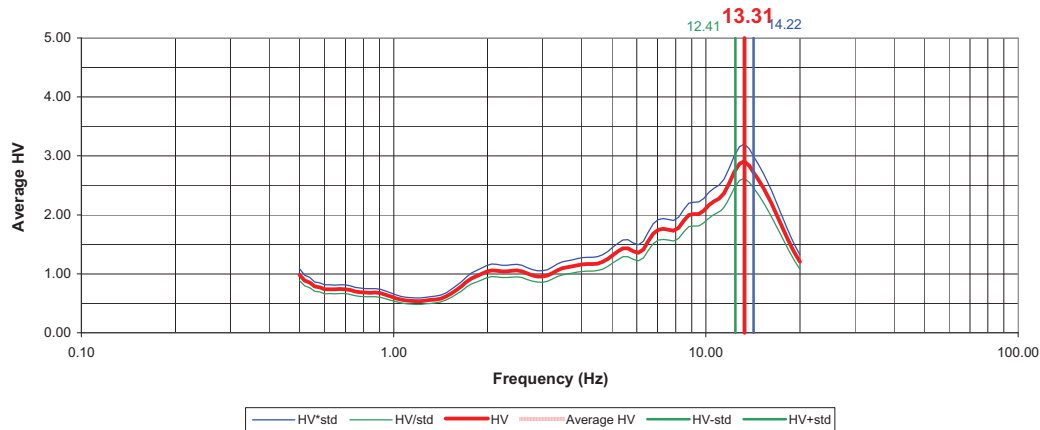
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	11.55.00
End recording	12.25.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	70

Max HVSR 13.31 ± 0.9 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSR curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	13.31		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	13.31 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	18900.2 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

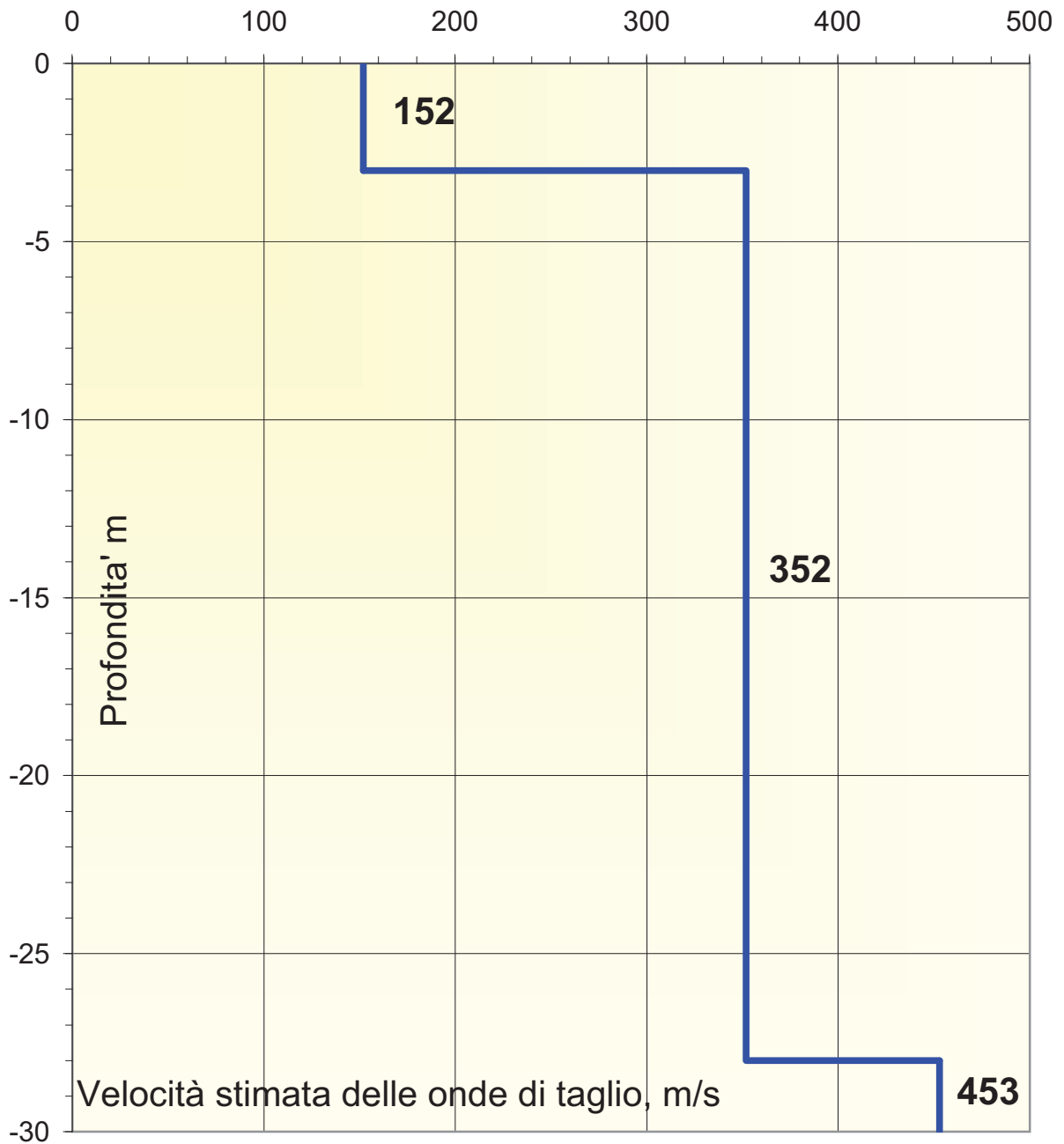
Criteria for a clear HVSR peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	6.3 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	19.26 Hz		✓
A0 > 2	2.91 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.0353000000000012 <		✓
σf < σ(f0)	0.9066999999999999 < 0		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.456565 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
σ(f0)	Threshold value for the stability condition σf < σ(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
σ(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 237



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 315 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 238

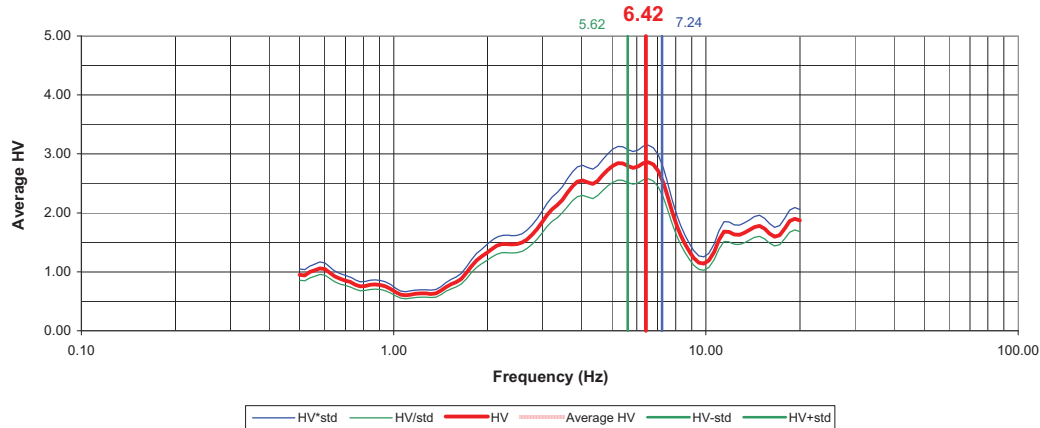
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	12.36.00
End recording	13.06.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	30

Max HVSr 6.42 ± 0.81 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	6.42		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	6.42 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	9116.4 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

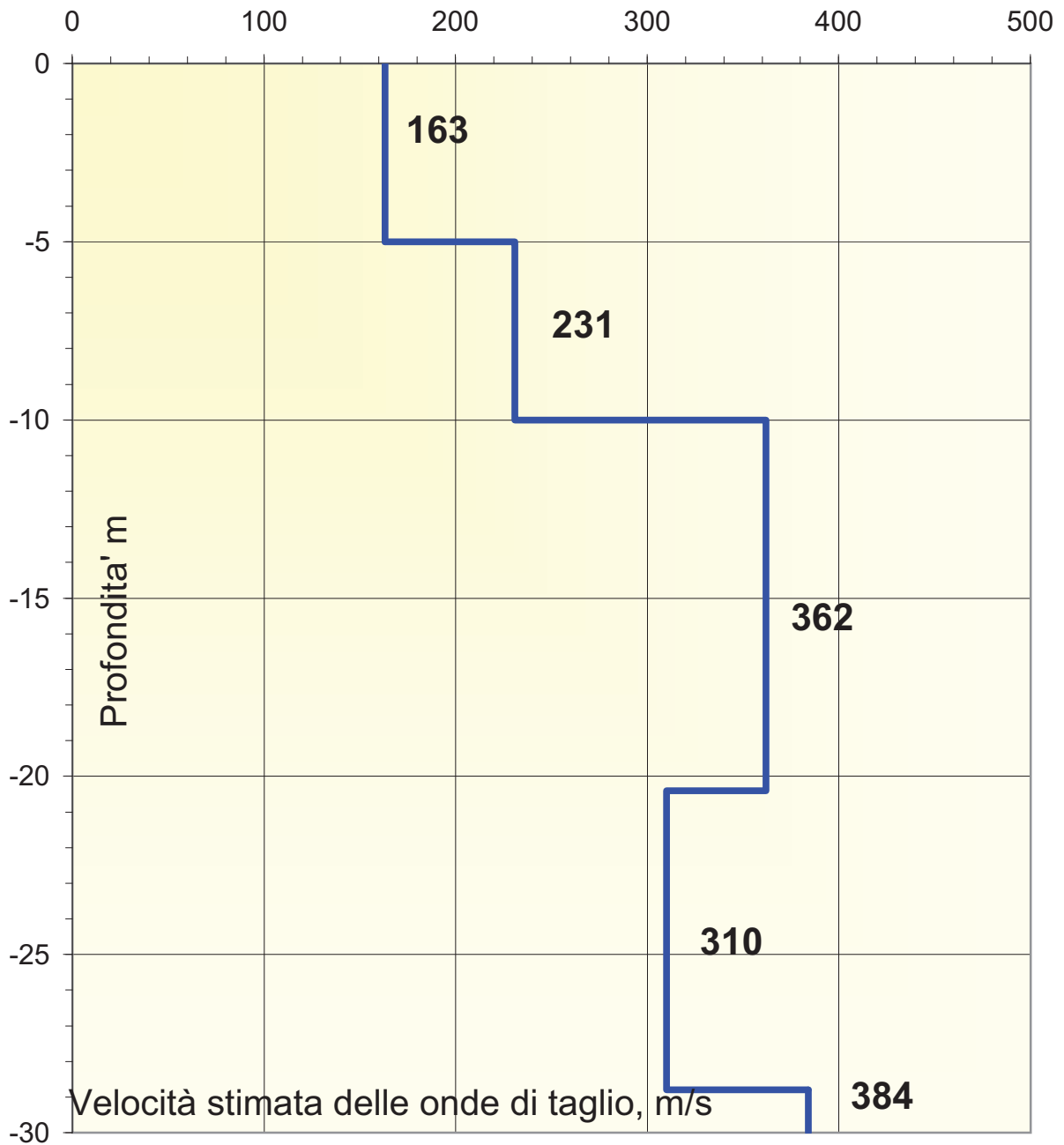
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	2.06 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	8.81 Hz		✓
A0 > 2	2.86 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.11969 < 0.05		✗
σf < ε(f0)	0.81008 < 0.321		✗
σA(f0) < θ(f0)	1.092865 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 238



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 270 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 239

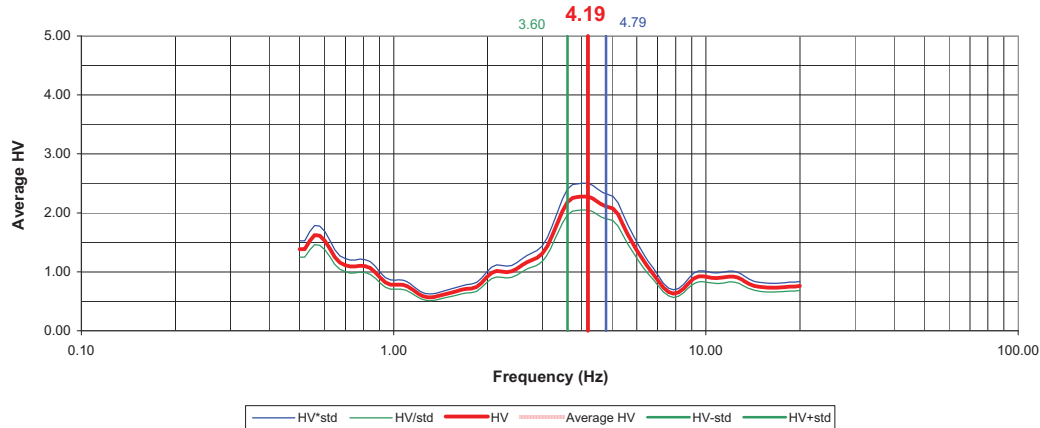
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	13.17.00
End recording	13.47.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	57

Max HVSr 4.19 ± 0.59 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	4.19		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	4.19 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	5949.8 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

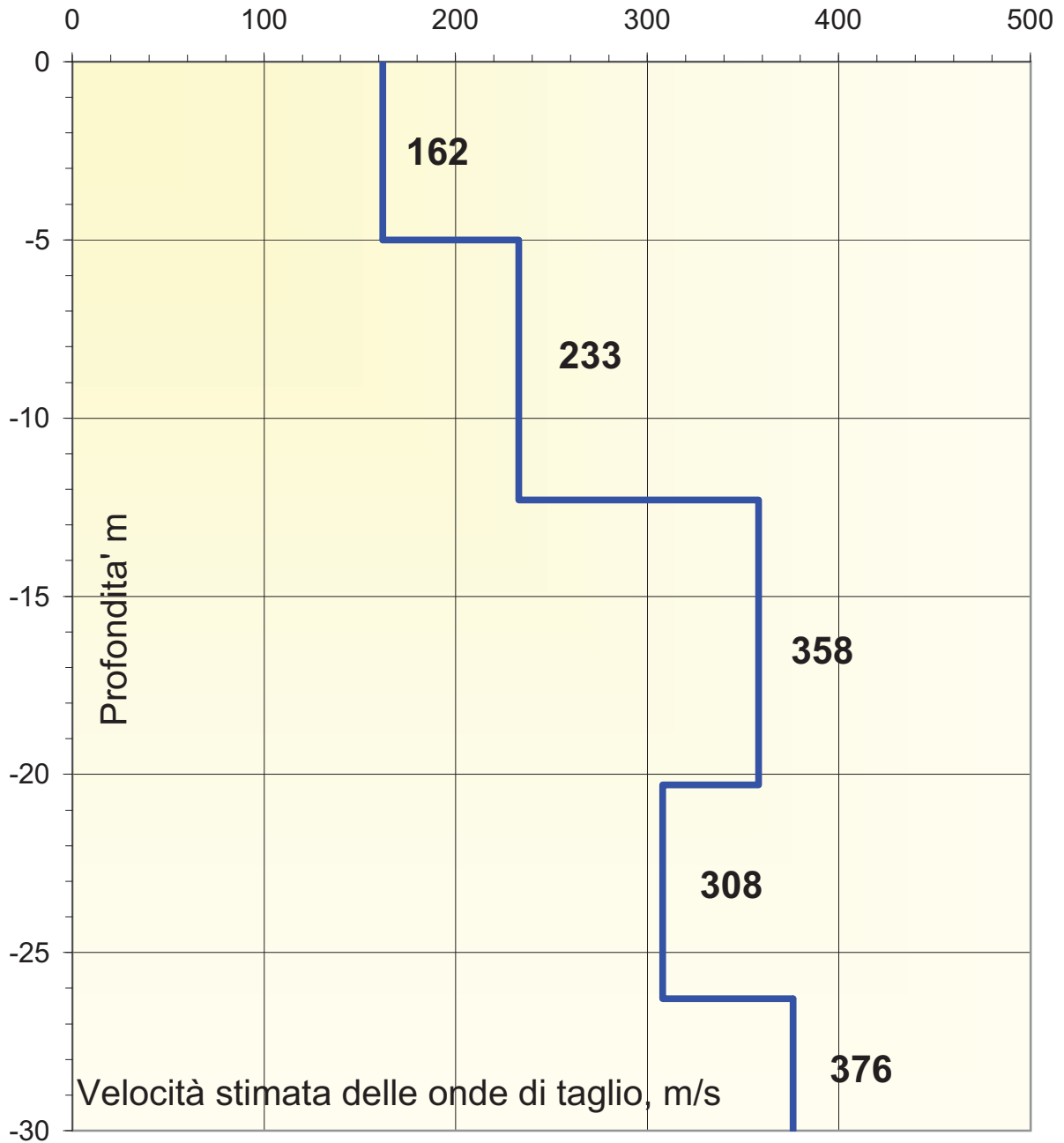
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	2.57 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	6.53 Hz		✓
A0 > 2	2.27 > 2		✓
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-0.00815000000000055		✓
σf < ε(f0)	0.59325 < 0.2095		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.44702 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

**STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 239**



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 263 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 240

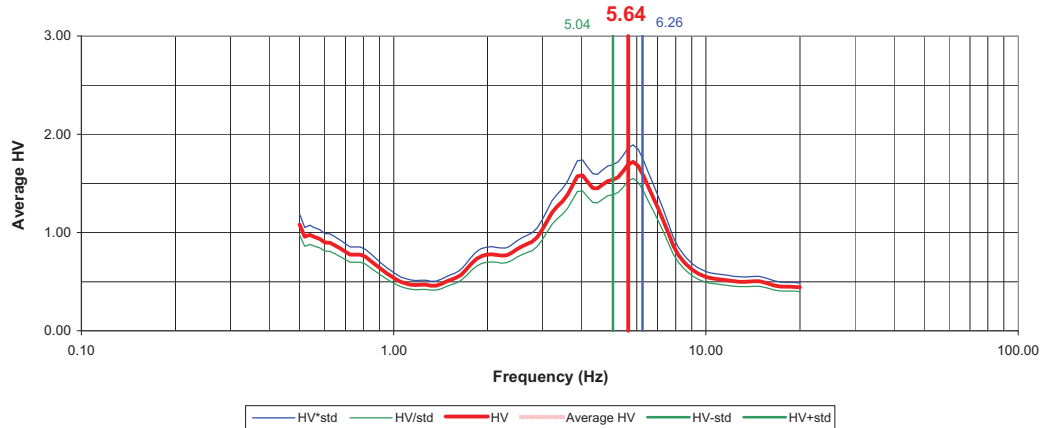
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	13.53.00
End recording	14.23.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	53

Max HVSr 5.64 ± 0.6 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	5.64		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	5.64 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	8008.8 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

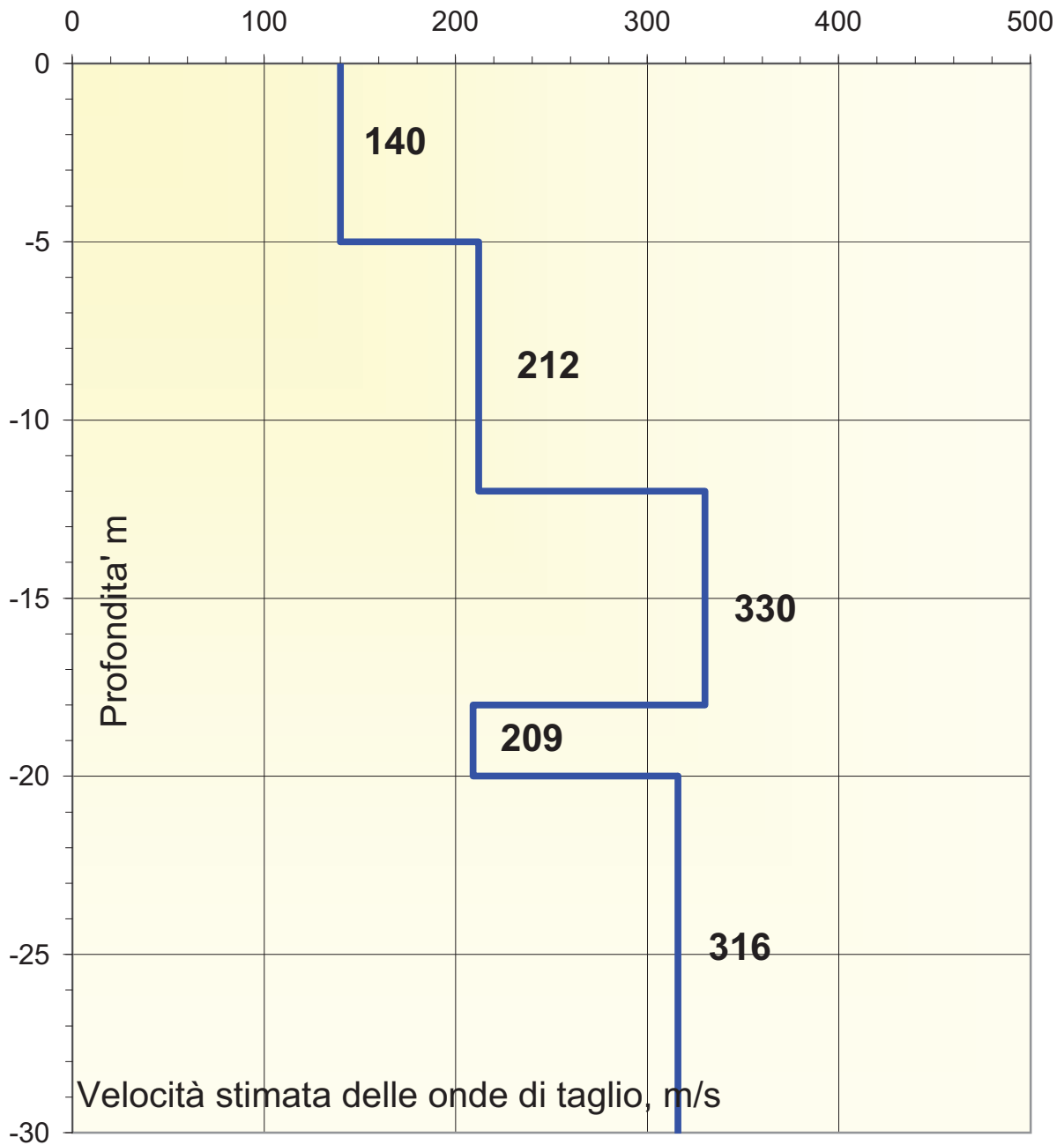
Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	2.48 Hz		✓
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	8.17 Hz		✓
A0 > 2	1.72 > 2		✗
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	0.20804 < 0.05		✗
σf < ε(f0)	0.60925 < 0.282		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.504715 < 1.58		✓

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for σf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005

STIMA DELLE VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO
- 950-25- People Mover - PROVA N° 240



Classificazione sismica dei suoli (D.M. 14/01/2008)

V_{s30} stimata = 234 m/sec

Cat. Suolo C

COMMITTENTE SOGEO S.r.l.

CODICE LAVORO 950-25 People-mover

N° PROVA 241

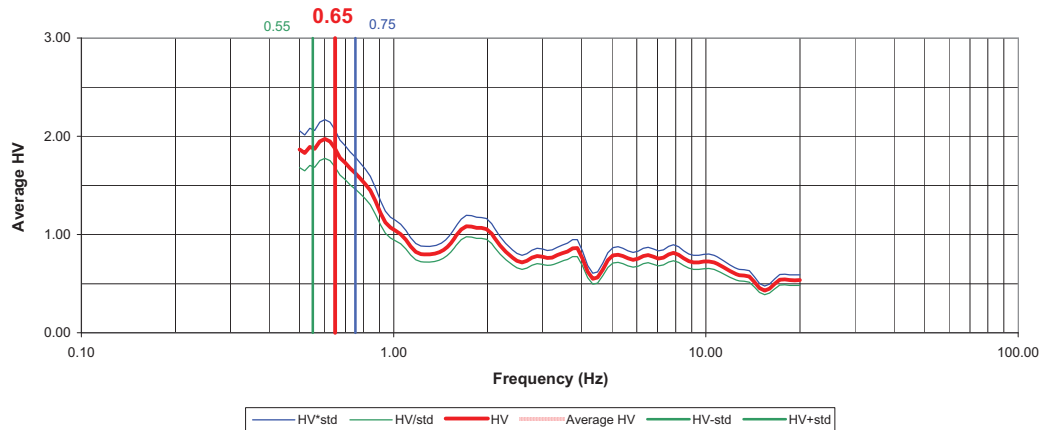
LOCALITA' Bologna
DATA 20/07/2010

Start recording	14.55.00
End recording	15.25.00
Trace lenght	30 m
Sampling frequency	200 Hz

PROCESSING DATA	
Windows lenght (sec)	20
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costante	40
Taper	0.50%
Low Pass	15 Hz
Numero di finestre	68

Max HVSr 0.65 ± 0.1 Hz.

HVSR SPECTRAL RATIO



Criteria for a reliable HVSr curve [All 3 should be fulfilled]			
f0	0.65		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	0.65 > 10/20		✓
nc (f0) > 200	923 > 200		✓
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 100 times		✓
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

Criteria for a clear HVSr peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f' in [f0/4, f0] AH/V(f') < A0/2	0 Hz		✗
Exists f'' in [4f0, f0] AH/V(f'') < A0/2	0 Hz		✗
A0 > 2	1.08 > 2		✗
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	1.05998 < 0.05		✗
σf < g(f0)	0.101626 < 0.0975		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.3196825 < 2	✓	

Lw	Window lenght
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f'	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f') < A0/2
f''	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f'') < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Threshold value for εf and σA(f0)					
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

In accordo con SESAME Guidelines 2005