






**INTERVENTI DI ADEGUAMENTO DELLA DIGA DI GIUDEA  
A GELLO NEL COMUNE DI PISTOIA (PT)**



**PROGETTO DEFINITIVO**

Tavola/Elaborato: <b>ET.04I</b>	Nome Elaborato: <b>INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE: PROSPEZIONI SISMICHE MASW</b>	Scala: -
		Data: <b>01/04/2022</b>

Settore:  Sede Firenze Via de Sanctis, 49 Cod. Fiscale e P.I. 06111950488 <small>Organizzazione dotata di Sistema di Gestione Integrato certificato in conformità alla normativa ISO9001 - ISO14001 - OHSAS18001 - SA8000</small>	
PROGETTAZIONE: PROGETTISTA - PROJECT MANAGER:  GEOLOGO: ESPROPRI:	 <b>ING. GIOVANNI SIMONELLI</b>  <b>DOTT. GEOL. FILIPPO LANDINI</b>  <b>GEOM. ANDREA PATRIARCHI</b>
COLLABORATORI:  <b>DOTT. GEOL. CARLO FERRI</b>  <b>GEOM. MATTEO MASI</b>	
CONSULENTI TECNICI:  <b>ING. DAVID SETTESOLDI</b>  <b>DOTT. GEOL. SIMONE FIASCHI</b>	COMMESSA I.T.:  <b>INGT-TPLPD-PBAAC252</b>
 <b>ING. GIOVANNI CANNATA</b>	RESPONSABILE COMMITTENTE:  <b>ING. CRISTIANO AGOSTINI</b>
DIRETTORE TECNICO INGEGNERIE TOSCANES:  <b>ING. ANDREA DE CATERINI</b>	RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:  <b>ING. LEONARDO ROSSI</b>

Rev.	Data	Descrizione / Motivo della revisione	Redatto	Controllato / Approvato
03	01/04/2022	Terza Emissione	Fiaschi / Ferri	Settesoldi
02	09/09/2020	Seconda Emissione	Fiaschi / Ferri	Settesoldi
01	27/12/2019	Prima Emissione	Fiaschi / Ferri	Settesoldi

Proprietà riservata. Vietata la riproduzione e la diffusione

**PROSPEZIONI SISMICHE MASW – CAMPAGNA 2007**



# COMUNE DI PISTOIA

(Provincia di Pistoia)

**Oggetto:**

**INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE SISTEMA MASW  
SUL PARAMENTO DEL "BACINO DELLA GIUDEA"  
IN LOCALITA' GELLO**

**Committente:** *Consorzio Ombrone e Bisenzio*

**Responsabili  
indagini Geofisiche:** *Dott. Geol. Andrea Melone*  
*Dott. Geol. Susanna Milani*

**Data:** *13/03/2007*

## **1. PREMESSA**

Su incarico del Consorzio Ombrone e Bisenzio di Pistoia la presente indagine geofisica riguarda la determinazione del profilo stratigrafico e sismico alla luce del D.M.14/07/2005, sul paramento del corpo diga del bacino denominato della "Giudea" in località Gello – Comune di Pistoia.

Allo scopo di determinare il profilo stratigrafico di fondazione l'indagine si è articolata in:

1. esecuzione di n.3 profili di sismica a rifrazione in acquisizione onde si superficie (Masw);
2. elaborazione dei dati e modellazione del profilo di Vs in "1D" e "2D".

## **2. DETERMINAZIONE DEL PROFILO DI $[V_s]$ - METODO MASW**

Il profilo verticale delle Vs può essere ricavato per inversione o per modellazione diretta della velocità di fase delle onde di superficie (Rayleigh e/o Love) (Dorman e Ewing, 1962).

Le onde di Rayleigh (1885) costituiscono un particolare tipo di onde di superficie che si trasmettono sulla superficie libera di un mezzo isotropo e omogeneo e sono il risultato dell'interferenza tra onde di pressione (P-waves) e di taglio verticali ( $S_v$ -waves).

In un mezzo stratificato queste onde sono di tipo guidato e dispersivo, e vengono definite pseudo-Rayleigh. Per questioni di esposizione, nel testo qui presentato, verranno chiamate semplicemente di Rayleigh o di superficie.

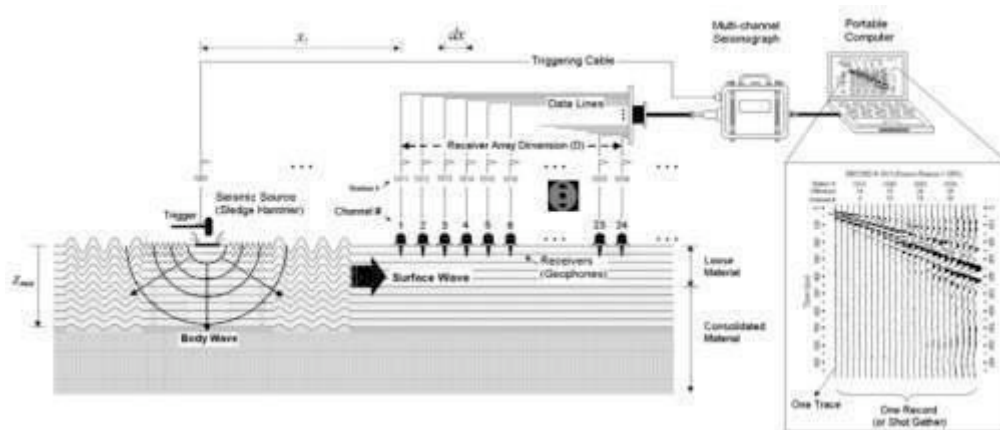
La dispersione è una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza. Le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità rispetto a quelle a frequenza maggiore, per un dato modo, e presentano normalmente più elevate velocità di fase.

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde di Rayleigh,  $V(\text{fase})/\text{frequenza}$ , può essere convertito nel profilo di Vs/profondità.

Le velocità di fase sono ricavate per confronto diretto degli spettri di ampiezza e fase di ciascuna coppia di sismometri, ottenuti istantaneamente in sito tramite un oscilloscopio che esegue una trasformata veloce di Fourier. Poiché il metodo non prevede il salvataggio delle tracce temporali e l'interpretazione è svolta nel dominio delle frequenze, si suppone che gli arrivi più energetici appartengano al treno d'onde di Rayleigh. Nelle situazioni in cui il rumore sovrasta la potenza della sorgente artificiale, o in cui gli arrivi delle onde di pressione sono più energetici, questa metodologia non porta a risultati soddisfacenti per il fatto che, nel dominio delle frequenze, non è possibile separare le onde di Rayleigh da quelle di altra natura.

Il MASW (Park et al., 1999) è stato sviluppato in parte per superare le difficoltà dell'applicazione del sistema di acquisizione delle onde S attraverso un normale profilo di acquisizione in rifrazione semplice.

Inoltre lo sviluppo di tale metodologia permette di evidenziare all'interno del profilo investigato, inversioni di velocità date da particolari condizioni stratigrafiche (strati molli e/o con caratteristiche meccaniche scadenti, presenza di acqua ecc.), cosa non risolvibile con il sistema di acquisizione tradizionale, se non con prove di tipo Down – Hole dal costo assai oneroso.



Metodo MASW attivo

La metodologia di indagine del profilo di tipo MASW risulta identico, come disposizione sul terreno in fase di acquisizione, ad un profilo di sismica a rifrazione, con la sola differenza nella durata e tipologia di campionamento.

Inoltre per ottenere un segnale più definito, vengono usati geofoni con frequenza di 4.5 Hz.

La disposizione e la modalità di acquisizione è raffigurata nello schema soprastante. Si eseguono tiri coniugati agli estremi dello stendimento; con tale metodologia è possibile evidenziare sul punto di scoppio il profilo verticale e le variazioni della Vs.

Per il lavoro in questione sono stati eseguiti n.3 stendimenti, via via disposti su più quote del paramento del corpo diga, iniziando al coronamento, scendendo via via lungo i gradoni dello sbarramento.

Gli stendimenti sono stati quindi sviluppati secondo la dimensione rispettiva di 80mt e 60mt, utilizzando uno sismografo Pasi 16SG48, a 48 canali. L'interdistanza geofonica è stata di 1.0mt con tiro all'estremo posizionato a circa 10 e 5mt dalla fine del profilo e tiri interni per consentire una restituzione in 2D del profilo.

### **ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE**

La registrazione simultanea di 12 o più canali (separati da 0,5m a 10m) fornisce una ridondanza statistica delle misure di velocità di fase e ne avvalorata la veridicità. Il salvataggio delle tracce nel dominio temporale, previsto dal metodo, permette inoltre di distinguere e evidenziare, durante l'analisi, le onde di Rayleigh presenti nel record che, normalmente, sono caratterizzate da un'elevata ampiezza di segnale (circa il 60% dell'energia prodotta dalla sorgente artificiale si distribuisce in onde di superficie). Una particolare analisi spettrale, "overtone analysis", produce un grafico Velocità di fase/frequenza in cui si può distinguere il modo fondamentale delle onde di superficie da cui ricavare la curva di dispersione ed il profilo delle Vs per successiva inversione 1-D. La tecnica prevede inoltre di eseguire misure ripetute spostandosi nella direzione di allineamento per risalire ad un profilo bidimensionale che evidenzia le variazioni laterali delle Vs. Le modalità esecutive e, di conseguenza, i costi si elevano risultando molto simili a quelli delle indagini di sismica a riflessione ad alta risoluzione.

La sperimentazione di inversione delle curve di dispersione misurate (dati del picking) utilizzando il codice Surfseis<sup>®</sup> ha consentito di verificare la generale buona concordanza dei modelli ottenuti. Nelle situazioni dove l'assenza di conoscenze geologiche rende arbitraria la definizione della struttura del sottosuolo, il supporto di una procedura di calcolo semiautomatica può fornire un buon punto di partenza per contribuire a superare i problemi di equivalenza insiti nella modellazione di tipo diretto.

Inoltre è possibile raggiungere profondità di investigazione ben più elevate rispetto alla definizione dei sondaggi geognostici e attraverso la determinazione della Vs individuare la posizione di strati, profondi, cosa accaduta nel presente lavoro.

### **RISULTATI CONSEGUITI**

Nella tavola fuori testo n.1 sono riportati i le restituzioni in "2D" dei profili Masw, e alcuni dei profili verticali più significativi con i valori di Vs rappresentativi della variazione verticale in profondità della velocità delle onde di taglio.

Insieme sono riportate alcune delle curve di dispersione caratteristiche del sito investigato.

Nella relativa restituzione "2D" dei profili si evince la variazione sia laterale che verticale della Vs, che permette di valutare strutture all'interno del paramento, distinguibili per la netta variazione della velocità e per le peculiari caratteristiche morfologiche.

Analizzando il profilo n.1 eseguito in sommità dello sbarramento si evince la presenza di una zona a bassa velocità caratterizzata da valori della Vs tra 120 e 140 m/sec. La distribuzione in senso orizzontale e la successiva morfologia che si rileva, riconduce a tale zona una possibile fascia di terreni allentati, probabilmente a zone di potenziale scollamento dei terreni, come accaduto sul fianco interno del paramento.

Tale situazione viene inoltre confortata dal rigonfiamenti a valle della scarpata, inclinazioni delle linee aree presenti sul fronte.

Sottostante si evincono nuovamente zona a bassa velocità ed interruzioni dell'omogeneità del paramento. La particolare conformazione di una zona presente all'interno del corpo diga fa presumere all'esistenza di condotte tra cui quella eventualmente presente come scarico di fondo e come linea di adduzione e di approvvigionamento idrico.

Tale evidenza viene individuata in tutti i profili eseguiti, riportando inoltre un allineamento verso la centrale ubicata i torno alla quota di 120 m s.l.m.

Grosseto li, 13/03/2007

***Dott. Geol. Andrea Melone***

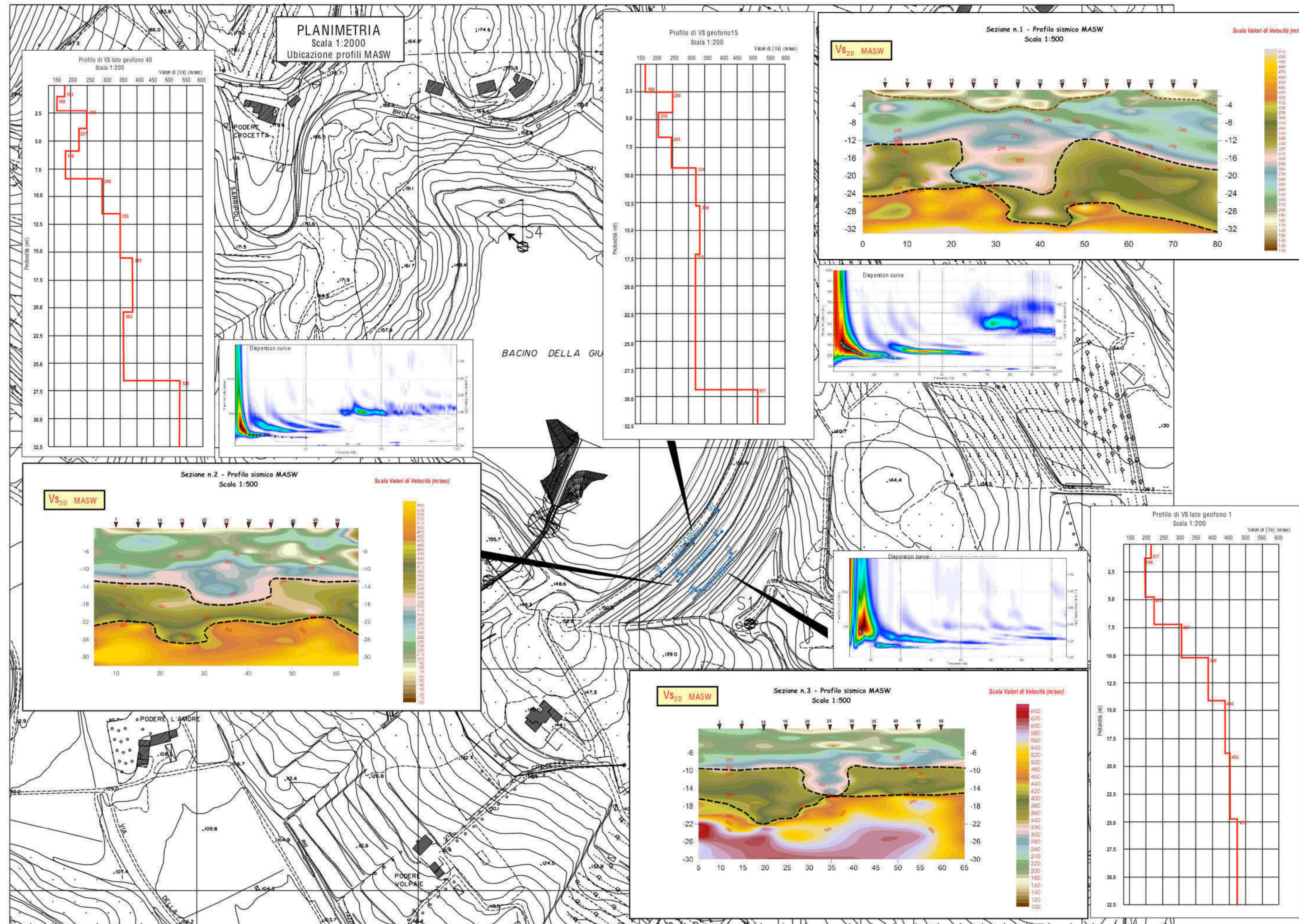
***Dott. Geol. Susanna Milani***

COMUNE DI PISTOIA

PROVINCIA DI PISTOIA

INDAGINE GEOFISICA MEDIANTE SISTEMA  
MASW SUL PARAMENTO DEL "BACINO  
DELLA GIUDEA" IN LOCALITA' GELLO

Committente:  
Consorzio di Bonifica Ombrone Pistoiese -  
Bisenzio



Dott. Geol. Andrea Melone  
Dott. Geol. Susanna Milani

STUDIO DI GEOLOGIA E GEOFISICA  
PROVE PENETROMETRICHE - ANALISI TERRE  
PROVE DI CARICO SU PIASTRA - PROVE DI CARICO  
SU PALI E MICROPALI - SONDAGGI A CAROTABGIO  
CONTINUO

Via IV Novembre, 7 - 58100 - Grosseto  
Tel. 0564/25883 - 338/7730336

**PROSPEZIONI SISMICHE MASW – CAMPAGNA 2018-2019**



OGGETTO:		<b>INDAGINI GEOFISICHE PER LA CARATTERIZZAZIONE DELL'ASSETTO SISMOSTRATIGRAFICO DEI LIVELLI PIU' SUPERFICIALI DEL SOTTOSUOLO</b>
TIPOLOGIA:	<b>INDAGINI IN SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e SH MASW HVSR</b>	DATA
		<b>Giugno 2019</b>
LOCALITA':		<b>COMUNE DI PISTOIA (PT) Rif. Invaso di Gello</b>
COMMITTENTE:		<b>PUBLIACQUA S.P.A.</b>

codice documento:	<b>j19068.06.11_gll.doc</b>
versione /revisione:	<b>01</b>
stato documento:	<b>definitivo</b>
autore:	<b>a.benvenuti</b>
revisione:	<b>v.carnicelli</b>
approvazione:	<b>v.carnicelli</b>
data:	<b>Luglio 2019</b>

## SOMMARIO

1	PREMESSA .....	2
2	TIPO D'INDAGINE .....	2
2.1	STRUMENTAZIONE UTILIZZATA .....	2
3	INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE .....	3
3.1	INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE.....	7
3.2	INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE.....	9
4	RISULTATI .....	11
4.1	INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh: RISULTATI.....	11
4.1.1	SEZ.1 .....	11
4.1.2	SEZ.2 .....	12
4.1.3	SEZ.3 .....	13
4.1.4	SEZ.4 .....	13
4.2	INDAGINI MASW .....	14
4.3	INDAGINE IN SISMICA PASSIVA HVSR - RISULTATI .....	15

## **1 PREMESSA**

Su incarico di Publiacqua S.p.A. è stata eseguita un'indagine geofisica nel Comune di Pistoia, all'interno dell'invaso di Gello, finalizzata alla caratterizzazione dell'assetto sismostratigrafico dei livelli più superficiali del sottosuolo e alla determinazione del profilo verticale di velocità delle onde di taglio (Onde S) ed al calcolo del parametro  $V_{s,eq}$ .

La campagna di indagini, svolta nel mese di Giugno 2019, è stata condotta conformemente alla vigente normativa sismica.

Nella fattispecie particolare le procedure adottate sono state eseguite in accordo con le norme tecniche per le costruzioni del DM 17 Gennaio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».

L'ubicazione delle prove è riportata nelle tavole allegate; le indagini sono state posizionate sulla base CTR - Fonte dei dati Regione Toscana:

dataset "sezione di Carta Tecnica Regionale scala 1:10.000: Sezione 262030 Titolo: Cireglio; dataset "sezione di Carta Tecnica Regionale scala 1:2.000": Fogli 21I42 e 21I50.

## **2 TIPO D'INDAGINE**

La caratterizzazione geofisica del sottosuolo è stata effettuata mediante prospezioni geofisiche di tipo sismico.

In particolare sono stati eseguiti n.4 stendimenti in sismica a rifrazione in onde P e Sh, denominati in seguito Sez.1, Sez.2, Sez.3 e sez.4;

Sugli stendimenti in sismica a rifrazione Sez.1, Sez.2 e Sez.4 sono inoltre state impostate prospezioni sismiche superficiali mediante la tecnica MASW ("Multichannel Analysis of Surface Waves") sia in onde di Rayleigh che in onde di Love.

In corrispondenza degli stendimenti MASW sono state eseguite indagini puntuali in sismica passiva a stazione singola (HVSr 1, HVSr 2 e HVSr 3).

Attraverso la metodologia della sismica a rifrazione è possibile determinare il profilo di rigidità del sito tramite la misura diretta della velocità di propagazione delle onde di volume compressionali (vP) e delle onde di taglio (vSh) e quindi individuare le strutture sepolte delle litologie attraversate.

L'elaborazione delle indagini in sismica a rifrazione ha permesso di ricostruire le geometrie sepolte delle strutture presenti; i dati ottenuti sono stati restituiti con elaborazione tomografica.

Le acquisizioni MASW hanno avuto come scopo ricostruire il profilo verticale di velocità delle onde S e calcolare il parametro  $V_{s,eq}$ .

La metodologia HVSr è totalmente non invasiva, molto rapida, si può applicare ovunque e non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi, né di energizzazioni esterne diverse dal microtremore ambientale che in natura esiste ovunque.

### **2.1 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA**

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata per le indagini in sismica a rifrazione e per le

indagini eseguite è costituita da:

- un sistema di acquisizione dati costituito da:

un sismografo Ambrogeo mod. ECHO 48/2012 Seismc Unit a 48 canali + 1, 24 bits; due cavi sismici telemetrici di 55 m ciascuno; un notebook PC Windows XP con software di acquisizione Ambrogeo (indagini in sismica a rifrazione Sez.1 e Sez.2, MASW 4 e MASW 5);

- un sistema di energizzazione in grado di produrre onde elastiche ricche di energia, con forme d'onda ripetibili e direzionali:

Onde P / MASW Rayleigh - Sistema di energizzazione ad impatto verticale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 kg battente verticalmente su piastra quadrata in Teflon® di dimensioni di 20 x 20 x 5 cm posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche compressionali;

Onde Sh / MASW Love - Sistema di energizzazione ad impatto orizzontale: la sorgente è costituita da una mazza del peso di 8 kg battente orizzontalmente su traversina in legno posta direttamente sul piano di campagna per la generazione di onde sismiche di taglio.

- un sistema di ricezione costituito da:

24 geofoni verticali con frequenza propria di 4.5 Hz ( sismica a rifrazione in onde P / MASW Rayleigh);

24 geofoni orizzontali con frequenza propria di 4.5 Hz (sismica a rifrazione in onde Sh / MASW Love).

- un sistema di trigger: consistente in un circuito elettrico che viene chiuso nell'istante in cui si colpisce la base di battuta.

La strumentazione utilizzata per le misure dei microtremori ambientali, elaborati attraverso la tecnica HVSR, è costituita da un tromografo digitale (Tromino® di *Moho srl*) dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e UP-DOWN.

### **3 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE**

Il metodo sismico a rifrazione si basa sul concetto della bi-rifrazione delle onde elastiche. Data una sorgente di onde elastiche e uno stendimento di geofoni lungo un profilo, giungeranno in superficie ai geofoni onde dirette, onde riflesse ed onde bi-rifratte (head wave): le onde analizzate sono quelle birifratte, cioè quelle che giungono sulla superficie di separazione con un angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell) e che quindi vengono rifratte con un angolo di 90° propagandosi parallelamente alla superficie rifrangente e venendo nuovamente rifratte verso la superficie con lo stesso angolo di incidenza. I contrasti di proprietà fisiche rilevabili con la sismica a rifrazione possono essere legati a cause stratigrafiche, strutturali, idrogeologiche.

La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in prossimità del sito da investigare, sollecitazioni dinamiche verticali per la generazione delle onde P e orizzontali per la generazione di onde S e nel registrare le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate mediante sensori solidali col terreno (geofoni).

L'interpretazione dei segnali rilevati e la conseguente stima del profilo di velocità delle onde sismiche è articolata nelle seguenti fasi fondamentali:

- Individuazione dei primi arrivi attraverso l'osservazione dei sismogrammi e l'operazione di picking, previa elaborazione dei segnali ed operazioni di filtraggio anche consecutivo con diverse tipologie di filtro digitale;
- Ricostruzione delle dromocrone e relativa interpretazione;
- Linearizzazione delle dromocrone, inversione dei dati e output tomografico.

Per le analisi interpretative è stato utilizzato il software Rayfract 3.32 (Intelligent Resources Inc.) sia per la restituzione tomografica che per l'elaborazione tradizionale.

Di seguito si riportano in modo sintetico i parametri configurazionali (spaziali e temporali) delle acquisizioni in sismica a rifrazione effettuate:

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P - Sez.1</b>			
Coordinate GB geofono G1	1651210.4	4869185.2	135.6
Coordinate GB geofono G24	1651288.0	4869145.8	143.3
Orientazione	NW-SE (N117)		
Lunghezza stendimento	92 m		
Numero Geofoni	24		
Distanza intergeofonica	4 m		
Numero punti di energizzazione lungo lo stendimento	9		
Sorgenti	s2: - 2 m G1; s2: G3-G4; s3: G6-G7; s4: G9-G10; s5: G12-G13; s6: G15-G16; s7: G18-G19; s8: G21-G22; s9: +2 m G24		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P - Sez.2</b>			
Coordinate GB geofono G1	1651229.6	4869233.7	135.5
Coordinate GB geofono G24	1651311.0	4869203.1	143.1
Orientazione	NW-SE (N111)		
Lunghezza stendimento	92 m		
Numero Geofoni	24		
Distanza intergeofonica	4 m		
Numero punti di energizzazione lungo lo stendimento	9		
Sorgenti	s2: - 2 m G1; s2: G3-G4; s3: G6-G7; s4: G9-G10; s5: G12-G13; s6: G15-G16; s7: G18-G19; s8: G21-G22; s9: +2 m G24		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P - Sez.3</b>			
Coordinate GB geofono G1	1651213.4	4869377.5	145.0
Coordinate GB geofono G24	1651267.1	4869276.3	141.5
Orientazione	NW-SE (N152)		
Lunghezza stendimento	115 m		
Numero Geofoni	24		
Distanza intergeofonica	5 m		
Numero punti di energizzazione lungo lo stendimento	9		
Sorgenti	s2: - 2.5 m G1; s2: G3-G4; s3: G6-G7; s4: G9-G10; s5: G12-G13; s6: G15-G16; s7: G18-G19; s8: G21-G22; s9: +2.5 m G24		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P - Sez.4</b>			
Coordinate GB geofono G1	1651212.9	4869334.0	139.5
Coordinate GB geofono G24	1651260.2	4869362.7	151.4
Orientazione	SW-NE (N59)		
Lunghezza stendimento	57.5 m		
Numero Geofoni	24		
Distanza intergeofonica	2.5 m		
Numero punti di energizzazione lungo lo stendimento	9		
Sorgenti	s2: - 1.25 m G1; s2: G3-G4; s3: G6-G7; s4: G9-G10; s5: G12-G13; s6: G15-G16; s7: G18-G19; s8: G21-G22; s9: +1.25 m G24		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

Nelle tabelle seguenti, relativamente agli stendimenti in sismica a rifrazione eseguiti, sono riportate le coordinate nel sistema Gauss Boaga dei geofoni e degli scoppi effettuati nonché le quote in metri s.l.m..

<b>s1</b>	<b>1651208.7</b>	<b>4869186.0</b>	<b>135.5</b>		<b>s1</b>	<b>1651227.6</b>	<b>4869234.4</b>	<b>135.4</b>
<b>G1</b>	<b>1651210.4</b>	<b>4869185.2</b>	<b>135.6</b>		<b>G1</b>	<b>1651229.6</b>	<b>4869233.7</b>	<b>135.5</b>
<b>G2</b>	<b>1651214.0</b>	<b>4869183.4</b>	<b>135.7</b>		<b>G2</b>	<b>1651233.4</b>	<b>4869232.4</b>	<b>135.6</b>
<b>G3</b>	<b>1651217.6</b>	<b>4869181.6</b>	<b>135.9</b>		<b>G3</b>	<b>1651237.1</b>	<b>4869231.0</b>	<b>135.8</b>
<b>s2</b>	<b>1651219.4</b>	<b>4869180.7</b>	<b>136.0</b>		<b>s2</b>	<b>1651239.0</b>	<b>4869230.3</b>	<b>135.9</b>
<b>G4</b>	<b>1651221.2</b>	<b>4869179.8</b>	<b>136.0</b>		<b>G4</b>	<b>1651240.8</b>	<b>4869229.7</b>	<b>136.1</b>
<b>G5</b>	<b>1651224.7</b>	<b>4869178.0</b>	<b>136.2</b>		<b>G5</b>	<b>1651244.6</b>	<b>4869228.3</b>	<b>136.3</b>
<b>G6</b>	<b>1651228.2</b>	<b>4869176.1</b>	<b>136.3</b>		<b>G6</b>	<b>1651248.3</b>	<b>4869226.9</b>	<b>136.5</b>
<b>s3</b>	<b>1651230.0</b>	<b>4869175.2</b>	<b>136.4</b>		<b>s3</b>	<b>1651250.2</b>	<b>4869226.2</b>	<b>136.6</b>
<b>G7</b>	<b>1651231.7</b>	<b>4869174.3</b>	<b>136.5</b>		<b>G7</b>	<b>1651252.1</b>	<b>4869225.5</b>	<b>136.7</b>
<b>G8</b>	<b>1651235.4</b>	<b>4869172.5</b>	<b>136.7</b>		<b>G8</b>	<b>1651255.8</b>	<b>4869224.1</b>	<b>137.0</b>
<b>G9</b>	<b>1651239.0</b>	<b>4869170.8</b>	<b>136.8</b>		<b>G9</b>	<b>1651259.5</b>	<b>4869222.7</b>	<b>137.4</b>
<b>s4</b>	<b>1651240.8</b>	<b>4869169.9</b>	<b>137.0</b>		<b>s4</b>	<b>1651261.4</b>	<b>4869222.1</b>	<b>137.6</b>
<b>G10</b>	<b>1651242.6</b>	<b>4869169.0</b>	<b>137.3</b>		<b>G10</b>	<b>1651263.3</b>	<b>4869221.4</b>	<b>137.9</b>
<b>G11</b>	<b>1651246.1</b>	<b>4869167.2</b>	<b>137.9</b>		<b>G11</b>	<b>1651266.9</b>	<b>4869220.0</b>	<b>138.6</b>
<b>G12</b>	<b>1651249.6</b>	<b>4869165.3</b>	<b>138.4</b>		<b>G12</b>	<b>1651270.5</b>	<b>4869218.6</b>	<b>139.6</b>
<b>s5</b>	<b>1651251.3</b>	<b>4869164.5</b>	<b>138.6</b>		<b>s5</b>	<b>1651272.3</b>	<b>4869218.0</b>	<b>140.1</b>
<b>G13</b>	<b>1651252.9</b>	<b>4869163.6</b>	<b>139.8</b>		<b>G13</b>	<b>1651274.1</b>	<b>4869217.5</b>	<b>140.6</b>
<b>G14</b>	<b>1651256.0</b>	<b>4869162.2</b>	<b>141.8</b>		<b>G14</b>	<b>1651277.4</b>	<b>4869216.2</b>	<b>143.0</b>
<b>G15</b>	<b>1651259.1</b>	<b>4869160.6</b>	<b>143.9</b>		<b>G15</b>	<b>1651280.5</b>	<b>4869214.8</b>	<b>145.1</b>
<b>s6</b>	<b>1651260.7</b>	<b>4869159.8</b>	<b>144.6</b>		<b>s6</b>	<b>1651282.1</b>	<b>4869214.1</b>	<b>146.1</b>
<b>G16</b>	<b>1651262.2</b>	<b>4869159.1</b>	<b>145.3</b>		<b>G16</b>	<b>1651283.7</b>	<b>4869213.4</b>	<b>147.0</b>
<b>G17</b>	<b>1651265.4</b>	<b>4869157.6</b>	<b>147.8</b>		<b>G17</b>	<b>1651287.2</b>	<b>4869212.1</b>	<b>148.7</b>
<b>G18</b>	<b>1651268.4</b>	<b>4869156.1</b>	<b>149.2</b>		<b>G18</b>	<b>1651290.5</b>	<b>4869210.7</b>	<b>150.2</b>
<b>s7</b>	<b>1651270.1</b>	<b>4869155.2</b>	<b>150.0</b>		<b>s7</b>	<b>1651292.3</b>	<b>4869210.0</b>	<b>150.8</b>
<b>G19</b>	<b>1651271.8</b>	<b>4869154.3</b>	<b>150.8</b>		<b>G19</b>	<b>1651294.2</b>	<b>4869209.4</b>	<b>150.9</b>
<b>G20</b>	<b>1651275.1</b>	<b>4869152.6</b>	<b>149.5</b>		<b>G20</b>	<b>1651297.8</b>	<b>4869208.0</b>	<b>150.1</b>
<b>G21</b>	<b>1651278.2</b>	<b>4869151.0</b>	<b>147.7</b>		<b>G21</b>	<b>1651301.1</b>	<b>4869206.7</b>	<b>148.2</b>
<b>s8</b>	<b>1651279.8</b>	<b>4869150.1</b>	<b>146.8</b>		<b>s8</b>	<b>1651302.7</b>	<b>4869206.1</b>	<b>147.3</b>
<b>G22</b>	<b>1651281.4</b>	<b>4869149.3</b>	<b>145.9</b>		<b>G22</b>	<b>1651304.3</b>	<b>4869205.5</b>	<b>146.3</b>
<b>G23</b>	<b>1651284.5</b>	<b>4869147.5</b>	<b>144.1</b>		<b>G23</b>	<b>1651307.6</b>	<b>4869204.3</b>	<b>144.4</b>
<b>G24</b>	<b>1651288.0</b>	<b>4869145.8</b>	<b>143.3</b>		<b>G24</b>	<b>1651311.0</b>	<b>4869203.1</b>	<b>143.1</b>
<b>s9</b>	<b>1651289.9</b>	<b>4869145.0</b>	<b>143.1</b>		<b>s9</b>	<b>1651312.8</b>	<b>4869202.5</b>	<b>143.2</b>

**Sez. 1 coordinate geofoni e scoppi**

**Sez. 2 coordinate geofoni e scoppi**

<b>s1</b>	<b>1651212.5</b>	<b>4869379.6</b>	<b>145.6</b>		<b>s1</b>	<b>1651211.8</b>	<b>4869333.4</b>	<b>139.4</b>
<b>G1</b>	<b>1651213.4</b>	<b>4869377.5</b>	<b>145.0</b>		<b>G1</b>	<b>1651212.9</b>	<b>4869334.0</b>	<b>139.5</b>
<b>G2</b>	<b>1651215.9</b>	<b>4869373.1</b>	<b>144.7</b>		<b>G2</b>	<b>1651215.0</b>	<b>4869335.3</b>	<b>139.6</b>
<b>G3</b>	<b>1651218.2</b>	<b>4869368.8</b>	<b>144.4</b>		<b>G3</b>	<b>1651217.1</b>	<b>4869336.6</b>	<b>139.7</b>
<b>s2</b>	<b>1651219.4</b>	<b>4869366.5</b>	<b>144.2</b>		<b>s2</b>	<b>1651218.1</b>	<b>4869337.2</b>	<b>139.8</b>
<b>G4</b>	<b>1651220.6</b>	<b>4869364.3</b>	<b>143.9</b>		<b>G4</b>	<b>1651219.2</b>	<b>4869337.9</b>	<b>139.9</b>
<b>G5</b>	<b>1651222.9</b>	<b>4869360.0</b>	<b>143.3</b>		<b>G5</b>	<b>1651221.3</b>	<b>4869339.3</b>	<b>140.1</b>
<b>G6</b>	<b>1651225.4</b>	<b>4869355.7</b>	<b>143.2</b>		<b>G6</b>	<b>1651223.4</b>	<b>4869340.6</b>	<b>140.3</b>
<b>s3</b>	<b>1651226.5</b>	<b>4869353.4</b>	<b>143.1</b>		<b>s3</b>	<b>1651224.5</b>	<b>4869341.2</b>	<b>140.6</b>
<b>G7</b>	<b>1651227.7</b>	<b>4869351.2</b>	<b>143.1</b>		<b>G7</b>	<b>1651225.5</b>	<b>4869341.8</b>	<b>140.9</b>
<b>G8</b>	<b>1651230.0</b>	<b>4869346.8</b>	<b>143.0</b>		<b>G8</b>	<b>1651227.6</b>	<b>4869343.1</b>	<b>141.5</b>
<b>G9</b>	<b>1651232.3</b>	<b>4869342.5</b>	<b>142.8</b>		<b>G9</b>	<b>1651229.6</b>	<b>4869344.3</b>	<b>142.5</b>
<b>s4</b>	<b>1651233.5</b>	<b>4869340.2</b>	<b>142.7</b>		<b>s4</b>	<b>1651230.6</b>	<b>4869344.8</b>	<b>142.8</b>
<b>G10</b>	<b>1651234.7</b>	<b>4869338.0</b>	<b>142.6</b>		<b>G10</b>	<b>1651231.7</b>	<b>4869345.4</b>	<b>143.0</b>
<b>G11</b>	<b>1651237.0</b>	<b>4869333.6</b>	<b>142.4</b>		<b>G11</b>	<b>1651233.8</b>	<b>4869346.5</b>	<b>144.0</b>
<b>G12</b>	<b>1651239.3</b>	<b>4869329.2</b>	<b>142.3</b>		<b>G12</b>	<b>1651235.8</b>	<b>4869347.7</b>	<b>144.7</b>
<b>s5</b>	<b>1651240.5</b>	<b>4869327.0</b>	<b>142.2</b>		<b>s5</b>	<b>1651236.8</b>	<b>4869348.3</b>	<b>145.2</b>
<b>G13</b>	<b>1651241.6</b>	<b>4869324.7</b>	<b>142.1</b>		<b>G13</b>	<b>1651237.8</b>	<b>4869348.9</b>	<b>145.8</b>
<b>G14</b>	<b>1651244.0</b>	<b>4869320.3</b>	<b>141.8</b>		<b>G14</b>	<b>1651239.8</b>	<b>4869350.2</b>	<b>146.5</b>
<b>G15</b>	<b>1651246.2</b>	<b>4869315.9</b>	<b>141.7</b>		<b>G15</b>	<b>1651241.9</b>	<b>4869351.4</b>	<b>146.5</b>
<b>s6</b>	<b>1651247.4</b>	<b>4869313.7</b>	<b>141.7</b>		<b>s6</b>	<b>1651243.0</b>	<b>4869352.1</b>	<b>146.7</b>
<b>G16</b>	<b>1651248.6</b>	<b>4869311.5</b>	<b>141.6</b>		<b>G16</b>	<b>1651244.1</b>	<b>4869352.7</b>	<b>146.8</b>
<b>G17</b>	<b>1651250.9</b>	<b>4869307.1</b>	<b>141.5</b>		<b>G17</b>	<b>1651246.2</b>	<b>4869354.0</b>	<b>147.1</b>
<b>G18</b>	<b>1651253.3</b>	<b>4869302.7</b>	<b>141.5</b>		<b>G18</b>	<b>1651248.3</b>	<b>4869355.2</b>	<b>147.7</b>
<b>s7</b>	<b>1651254.4</b>	<b>4869300.5</b>	<b>141.5</b>		<b>s7</b>	<b>1651249.4</b>	<b>4869355.8</b>	<b>148.0</b>
<b>G19</b>	<b>1651255.6</b>	<b>4869298.3</b>	<b>141.5</b>		<b>G19</b>	<b>1651250.5</b>	<b>4869356.4</b>	<b>148.3</b>
<b>G20</b>	<b>1651258.0</b>	<b>4869293.9</b>	<b>141.4</b>		<b>G20</b>	<b>1651252.4</b>	<b>4869357.8</b>	<b>149.0</b>
<b>G21</b>	<b>1651260.3</b>	<b>4869289.5</b>	<b>141.3</b>		<b>G21</b>	<b>1651254.4</b>	<b>4869359.1</b>	<b>149.5</b>
<b>s8</b>	<b>1651261.5</b>	<b>4869287.3</b>	<b>141.3</b>		<b>s8</b>	<b>1651255.4</b>	<b>4869359.6</b>	<b>149.6</b>
<b>G22</b>	<b>1651262.7</b>	<b>4869285.2</b>	<b>141.3</b>		<b>G22</b>	<b>1651256.1</b>	<b>4869360.1</b>	<b>150.8</b>
<b>G23</b>	<b>1651264.9</b>	<b>4869280.7</b>	<b>141.2</b>		<b>G23</b>	<b>1651258.1</b>	<b>4869361.4</b>	<b>151.1</b>
<b>G24</b>	<b>1651267.1</b>	<b>4869276.3</b>	<b>141.5</b>		<b>G24</b>	<b>1651260.2</b>	<b>4869362.7</b>	<b>151.4</b>
<b>s9</b>	<b>1651268.2</b>	<b>4869274.0</b>	<b>142.1</b>		<b>s9</b>	<b>1651261.5</b>	<b>4869363.4</b>	<b>151.9</b>

**Sez. 3 coordinate geofoni e scoppi****Sez. 4 coordinate geofoni e scoppi****3.1 INDAGINE MASW: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE**

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che permette di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio Vs, sulla base della misura delle onde superficiali eseguita in corrispondenza di diversi sensori (geofoni nel caso specifico) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980 ) o, detto in maniera equivalente, la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi



danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo; onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.

Il metodo di indagine MASW utilizzato è di tipo attivo in quanto le onde superficiali sono generate in un punto sulla superficie del suolo (tramite energizzazione con mazza battente allineata all'array geofonico) e misurate da uno stendimento lineare di sensori. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5-10 Hz e 70-100 Hz, quindi fornisce informazioni sulla parte più superficiale del suolo, generalmente compresa nei primi 30m-50m, in funzione della rigidità del suolo e delle caratteristiche della sorgente.

I fondamenti teorici del metodo MASW fanno riferimento ad un semispazio stratificato con strati paralleli e orizzontali, quindi una limitazione alla sua applicabilità potrebbe essere rappresentata dalla presenza di pendenze significative superiori a 20°, sia della topografia sia delle diverse discontinuità elastiche.

La metodologia utilizzata consiste in quattro fasi:

- acquisizione dei dati di campagna energizzando a più riprese e alternativamente ai due estremi dello stendimento geofonico;
- determinazione dello spettro di velocità sperimentale dal campo di moto acquisito nel dominio spazio-tempo lungo lo stendimento;
- calcolo della curva di dispersione attraverso il picking o la modellazione diretta;
- inversione della curva di dispersione per l'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  e il parametro  $V_{s,eq}$ .

Le elaborazioni sono state effettuate tramite il software winMASW Academy 2018 (Eliosoft).

Le acquisizioni sono state realizzate secondo le seguenti configurazioni spaziali e temporali:

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW_1</b>			
Orientazione	NW-SE (N117)		
Coordinate GB geofono G1	1651210.4	4869185.2	135.6
Coordinate GB geofono G12	1651249.6	4869165.3	138.4
Lunghezza stendimento	44 m		
Numero Geofoni	12		
Distanza intergeofonica	4 m		
Numero punti di energizzazione per estremo	1		
Off-sets sorgenti (da ciascun estremo)	2 m		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW_2</b>			
Orientazione	NW-SE (N111)		
Coordinate GB geofono G1	1651229.6	4869233.7	135.5
Coordinate GB geofono G12	1651270.5	4869218.6	139.6
Lunghezza stendimento	44 m		
Numero Geofoni	12		
Distanza intergeofonica	4 m		
Numero punti di energizzazione per estremo	1		
Off-sets sorgenti (da ciascun estremo)	2 m		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE SISMICA MASW_3</b>			
Orientazione	NW-SE (N152)		
Coordinate GB geofono G1	1651213.4	4869377.5	145.0
Coordinate GB geofono G24	1651239.3	4869329.2	142.3
Lunghezza stendimento	55 m		
Numero Geofoni	12		
Distanza intergeofonica	5 m		
Numero punti di energizzazione per estremo	1		
Off-sets sorgenti (da ciascun estremo)	2.5 m		
Durata acquisizione	0.5 s		
Intervallo di campionamento	0.256 ms		

Per valutare la validità delle ipotesi di monodimensionalità (strati piani e paralleli) sono state eseguite, per ogni singolo stendimento, acquisizioni coniugate con sorgenti poste all'esterno del primo geofono e dell'ultimo geofono.

Le elaborazioni MASW sono state impostate sugli stendimenti in sismica a rifrazione utilizzando la porzione degli stessi che garantisce l'esistenza dei presupposti necessari per effettuare l'elaborazione secondo la tecnica MASW dei dati acquisiti (presenza di litologie mediamente omogenee lateralmente).

Durante il processo di elaborazione, al fine di minimizzare le possibili soluzioni e cercare la più sensata coerenza tra lo spettro di velocità sperimentale e le curve di dispersione teoriche che possono generare tale spettro, ci si è avvalsi dei dati acquisiti con la sismica passiva eseguita in prossimità dei singoli stendimenti (HVSR 1 per MASW 1, HVSR 2 per MASW 2 e HVSR 3 per MASW 3).

In particolare le elaborazioni delle indagini HVSR hanno consentito, unitamente ai risultati ottenuti dalle rispettive indagini MASW, di aumentare la profondità di investigazione delle stesse.

### **3.2 INDAGINE HVSR: METODOLOGIA E ACQUISIZIONE**

Il rumore sismico, generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica, è presente ovunque sulla superficie terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti.

I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

I microtremori sono in parte costituiti da onde di volume, P o S, ma un ruolo fondamentale nella produzione dei microtremori è rivestito dalle onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l'informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell'uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970). La tecnica è universalmente riconosciuta come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo sono:

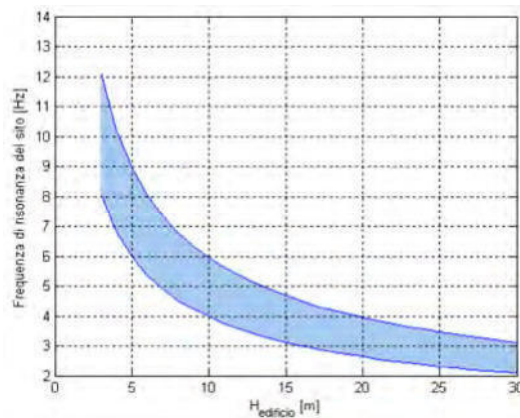
- la frequenza caratteristica di risonanza del sito che rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nell'edificare edifici aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno per evitare l'effetto di "doppia risonanza" estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi;

- la velocità media delle onde di taglio  $V_s$  calcolata tramite un apposito codice di calcolo. È necessario, per l'affidabilità del risultato, conoscere la profondità di un riflettore noto dalla stratigrafia (prova penetrometrica, sondaggio, ecc.) e riconoscibile nella curva H/V. E' possibile calcolare la  $V_{s30}$  e la relativa categoria del suolo di fondazione;

- la stratigrafia del sottosuolo con un range di indagine compreso tra 0.5 e 700 m di profondità anche se il dettaglio maggiore si ha nei primi 100 metri. Il principio su cui si basa la presente tecnica, in termini di stratigrafia del sottosuolo, è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto d'impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

Per quanto concerne il fenomeno della "doppia risonanza" (cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico, così come trasmesso in superficie, e quelle dei manufatti ivi edificati) è noto che, dal punto di vista empirico, la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza.

Nella Figura seguente (tratta da Masi et al., 2007) si riporta, a titolo esemplificativo, una possibile relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza di sito. La fascia azzurra indica l'area più vulnerabile dal punto di vista dei fenomeni di doppia risonanza.



La quantificazione della frequenza caratteristica di sito attraverso misure dirette di microtremore sismico può quindi essere di estremo aiuto nella fase di progettazione.

Durante questa campagna geofisica sono state eseguite tre misure di microtremori ambientali (acquisizioni in sismica passiva a stazione singola) secondo la seguente configurazione spaziale e temporale:

<b>PARAMETRI CONFIGURAZIONALI INDAGINE HVSR</b>					
Denominazione	Coordinate Gauss Boaga			Durata acquisizione	Frequenza di campionamento
<b>HVSR 1</b>	1651239.0	4869170.8	136.8	30 min	128 Hz
<b>HVSR 2</b>	1651261.4	4869222.1	137.6	30 min	128 Hz
<b>HVSR 3</b>	1651230.6	4869344.8	142.8	30 min	128 Hz

Le misure, orientate secondo il Nord e della durata di 30 minuti ciascuna, sono state effettuate con il tromografo digitale Tromino® di *Moho srl*

I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 128 Hz.

I risultati ottenuti dall'esecuzione delle indagini tromografiche sono stati elaborati attraverso il software *Grilla 7.6* (*MoHo srl*).

## 4 RISULTATI

### 4.1 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P e Sh: RISULTATI

#### 4.1.1 SEZ.1

L'elaborazione tomografica della Sez.1, ha raggiunto una profondità d'indagine massima, sulla verticale del coronamento, di poco superiore a 40 m, sia per le onde P che per le onde Sh.

Le sezioni tomografiche sono state restituite in due diverse scale cromatiche sia per l'indagine in onde P (rif. Figg. 5a e 5b) che per l'indagine in onde Sh (rif. Figg. 6a e 6b).

In termini di velocità tomografiche, le onde P, nello spessore di sottosuolo indagato, sono comprese in un range di velocità racchiuso tra 400 m/s in superficie fino a oltre 3000 m/s (rif. Fig. 5a) più in profondità mentre, relativamente alle onde Sh, nello spessore di sottosuolo indagato, le stesse sono comprese in un range di velocità racchiuso tra 200 m/s

in superficie fino a circa 800 m/s più in profondità (Fig. 6a).

L'andamento delle isotachie sismiche, riportate nelle figure di cui sopra, mostra una presenza di terreni piuttosto allentati con poca variabilità laterale: le isolinee seguono grossomodo l'andamento della superficie topografica.

Un primo livello di terreni particolarmente allentati per uno spessore di circa 10 m nella parte piana e superiore a 15 m in corrispondenza del rilevato è individuabile dalle isolinee tomografiche di 1000 m/s (onde P) e 350 m/s (onde Sh).

Al di sotto di questo primo spessore, le velocità aumentano con la profondità sebbene con gradiente poco significativo, fino a raggiungere l'isolinea di 2800 m/s (onde P) e 800 m/s (onde Sh).

Nel complesso quindi la sezione è caratterizzata, per l'intero spessore, da terreni poco addensati fino al raggiungimento di  $V_p$  tomografica di 1000 m/s e  $V_s$  tomografica di 800 m/s, soprattutto la porzione costituente il rilevato arginale.

Si tratta di velocità caratteristiche di terreni areati / rimaneggiati che sovrastano il substrato roccioso le cui velocità fanno presupporre a uno stato di alterazione/fratturazione.

In termini stratigrafici è possibile ipotizzare la presenza di un livello superficiale costituito da terreno rimaneggiato sovrastante l'ammasso roccioso che, inizialmente, si presenta maggiormente fratturato per poi migliorare le caratteristiche, con la profondità.

#### **4.1.2 SEZ.2**

Anche lo stendimento denominato Sez.2 è stato effettuato trasversalmente alla linea di coronamento.

Sebbene la geometria dello stendimento sia uguale alla sezione 1 (stesso passo intergeofonico e stesso numero di geofoni) le elaborazioni tomografiche della Sez.2, hanno raggiunto una profondità d'indagine massima inferiore, raggiunta sulla verticale del coronamento, di circa 30 m, sia per le onde P che per le onde Sh.

Le sezioni tomografiche sono state restituite in due diverse scale cromatiche sia per l'indagine in onde P (rif. Figg. 7a e 7b) che per l'indagine in onde Sh (rif. Figg. 8a e 8b).

Così come per la Sezione 1, in termini di velocità tomografiche, le onde P, nello spessore di sottosuolo indagato, sono comprese in un range di velocità racchiuso tra 400 m/s in superficie fino a oltre 3000 m/s (rif. Fig. 7a) più in profondità mentre, relativamente alle onde Sh, nello spessore di sottosuolo indagato, le stesse sono comprese in un range di velocità racchiuso tra 200 m/s in superficie fino a circa 800 m/s più in profondità (Fig. 8a).

Anche in questo caso sono presenti terreni allentati che caratterizzano principalmente il rilevato arginale.

A differenza della Sez.1, nella Sez. 2 è apprezzabile una certa variabilità laterale con un approfondimento delle isotachie sismiche che caratterizza la porzione piana della sezione.

Il primo livello di terreni particolarmente allentati, individuabile dalle isolinee tomografiche di 1000 m/s (onde P) e 350 m/s (onde Sh) è pari a circa 12 -13 metri in corrispondenza del coronamento mentre, nella parte piana raggiunge la profondità di circa 5

m dal p.d.c.

L'isotachia di 2800 m/s (onde P) e 800 m/s (onde Sh), ipotizzabile come tetto del substrato roccioso maggiormente integro, è individuabile alla profondità di circa 25 m al di sotto del coronamento e 15 m al disotto della prima porzione della parte piana per approfondirsi in direzione nord - ovest.

#### **4.1.3 SEZ.3**

La sezione 3 è stata eseguita in direzione Nord Ovest – Sud Est ed è quella in cui è stato possibile effettuare lo stendimento di lunghezza maggiore (120 m).

Anche in questo caso le sezioni tomografiche sono state restituite in due diverse scale cromatiche sia per l'indagine in onde P (rif. Figg. 9a e 9b) che per l'indagine in onde Sh (rif. Figg. 10a e 10b).

Rispetto alle sezioni precedenti, lo spessore di sottosuolo indagato ha rilevato la presenza di terreni caratterizzati da valori delle velocità tomografiche superiori.

Le onde P, nello spessore di sottosuolo indagato, sono anche in questo caso comprese in un range di velocità racchiuso tra 400 m/s in superficie fino a oltre 3000 m/s (rif. Fig. 9a) più in profondità mentre, relativamente alle onde Sh, nello spessore di sottosuolo indagato, le stesse sono comprese in un range di velocità racchiuso tra 200 m/s in superficie fino a oltre 800 m/s più in profondità (Fig. 10a).

In questo caso però i livelli superficiali di terreni particolarmente allentati, individuabile dalle isolinee tomografiche di 1000 m/s (onde P) e 350 m/s (onde Sh) sono di circa 3 m per raggiungere un massimo di circa 6m.

Al di sotto del primo livello sopra descritto, le velocità crescono con la profondità con un gradiente piuttosto basso, fino alla profondità di circa 20 m dal p.d.c., profondità a cui vengono intercettate le isotachie di 2800 m/s (onde P) e 800 m/s (onde Sh) a cui è attribuibile il tetto del substrato roccioso maggiormente integro.

Entrambe le elaborazioni non sono caratterizzate da variabilità orizzontali significative e non evidenziano la presenza, nel sottosuolo indagato, di anomalie di velocità.

#### **4.1.4 SEZ.4**

Lo stendimento denominato Sez.4 è stato effettuato perpendicolarmente alla sez.3 e, per motivi logistici, è risultato il più corto di tutti quelli effettuati (57.5 m).

Le sezioni tomografiche (onde P: rif. Figg. 11a e 11b e onde Sh: rif. Figg. 12a e 12b) rivelano la presenza di terreni allentati per uno spessore variabile ma non superiore a 4 m su tutta la lunghezza della sezione.

Come per la Sez.3, all di sotto del primo livello comunque superficiale, le velocità crescono con la profondità con un gradiente piuttosto basso. Alla profondità di circa 15 m dal p.d.c. vengono intercettate le isotachie di 2800 m/s (onde P) e 800 m/s (onde Sh) a cui è attribuibile il tetto del substrato roccioso maggiormente integro.

Entrambe le sezioni evidenziano, nel livello sopra descritto, una certa asimmetria con le velocità più elevate prossime alla superficie tomografica nella metà morfologicamente più

elevata (verso Nord -Est).

Le isotachie prese come riferimento come tetto del substrato roccioso maggiormente integro, 2800 m/s (onde P) e 800 m/s (onde Sh), hanno invece un andamento sub parallelo alla superficie topografica.

#### 4.2 INDAGINI MASW

Nel complesso le prospezioni geofisiche eseguite, per mezzo dell'analisi delle indagini MASW e delle acquisizioni H/V ad esse contigue, ha permesso di ricavare sia il modello medio di distribuzione della velocità delle onde "S" nel sottosuolo del sito indagato sia il parametro  $V_{S,eq}$ : il modello di sottosuolo in termini di  $V_S$  è stato ottenuto dal fit congiunto delle curve H/V e delle curve di dispersione ricavate da ciascuna indagine MASW.

Queste, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_S$ ). L'analisi dei dati ha consentito di definire i valori del profilo verticale delle  $V_S$  e di stimare il parametro  $V_{S,eq}$ .

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{S,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

In cui

- $h_i$  spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$  velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_S$  non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{S,eq}$  è definita dal parametro  $V_{S,30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il profilo verticale delle Onde S, in corrispondenza delle singole indagini MASW, ricavato mediante elaborazione dei dati di campagna è risultato il seguente:

Profondità alla base dello strato [m]	MASW_1	Vs [m/s]
	Spessore [m]	
0.50	0.50	250
5.00	4.50	180
9.50	4.50	220
27.50	18.00	430
61.50	34.00	680
inf.	inf.	1000
<b><math>V_{S,eq}(0.0-30.0)=323m/s</math></b>		

<b>MASW_2</b>		
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
0.50	0.50	160
3.50	3.00	240
8.50	5.00	420
22.50	14.00	470
55.50	33.00	680
inf.	inf.	1000
<b>Vs_eq(0.0-30.0)=439m/s</b>		

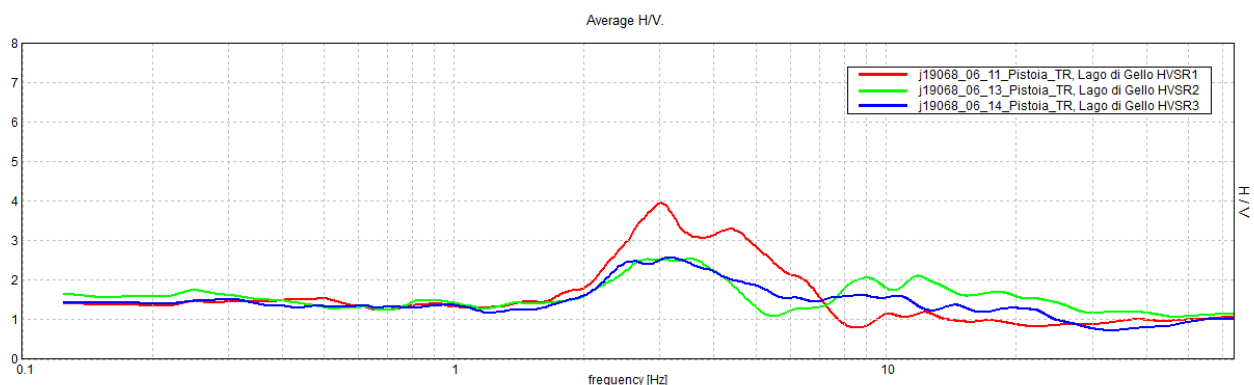
<b>MASW_3</b>		
Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.10	2.10	190
5.60	3.50	310
10.50	4.90	430
22.50	12.00	520
55.50	33.00	750
inf.	inf.	1100
<b>Vs_eq(0.0-30.0)=449m/s</b>		

**I profili MASW 1, MASW 2 e MASW 3 individuano una  $V_{s,eq}$ , riferita al piano di campagna, pari a, rispettivamente, 323 m/s, 439 m/s e 449 m/s.**

#### 4.3 INDAGINE IN SISMICA PASSIVA HVSR - RISULTATI

Il confronto tra le tre misure HVSR evidenzia come le tre verticali di misura presentino curve H/V confrontabili con l'individuazione di un picco diffuso del rapporto H/V a frequenze comprese tra di 2 e 5 Hz circa (HVSR2 e HVSR3) e tra di 2 e 8 Hz circa (HVSR1) con massimo pari a circa 2.5 (HVSR2 e HVSR3) e 4 (HVSR1), imputabile a un contrasto di impedenza presente a qualche decina di metri di profondità (tra 20 e 30 m).

Nella figura sottostante è riportato il confronto tra le curve H/V sperimentali relative alle due misure eseguite.



Pisa, Luglio 2019

**P3 s.n.c.**  
 Piazza Martiri della Libertà, 22/23  
 56127 PISA  
 C.F./P.IVA 01923910507  
*Attilio Benvenuti*



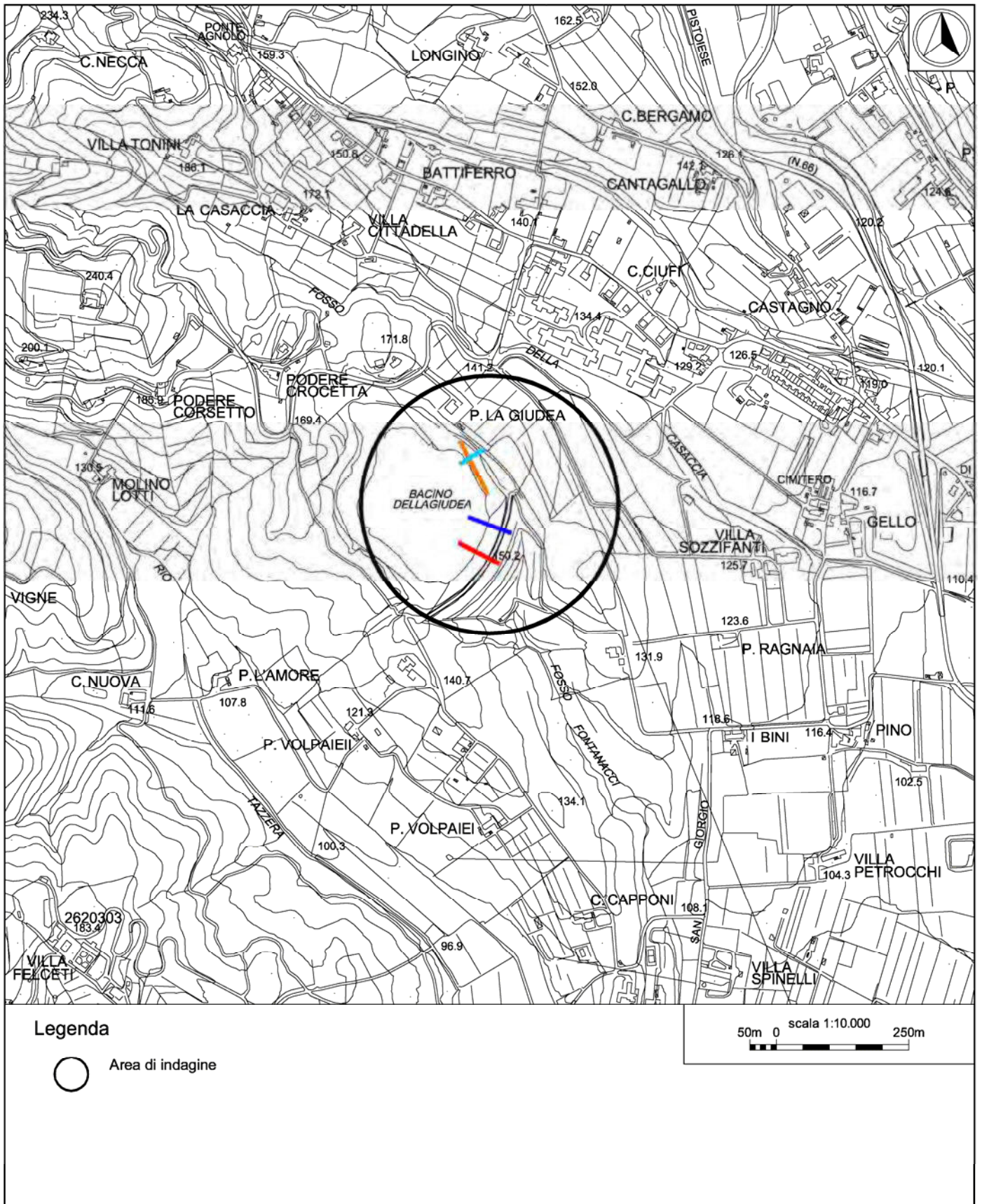


Figura 1: Ubicazione indagini – Inquadramento generale

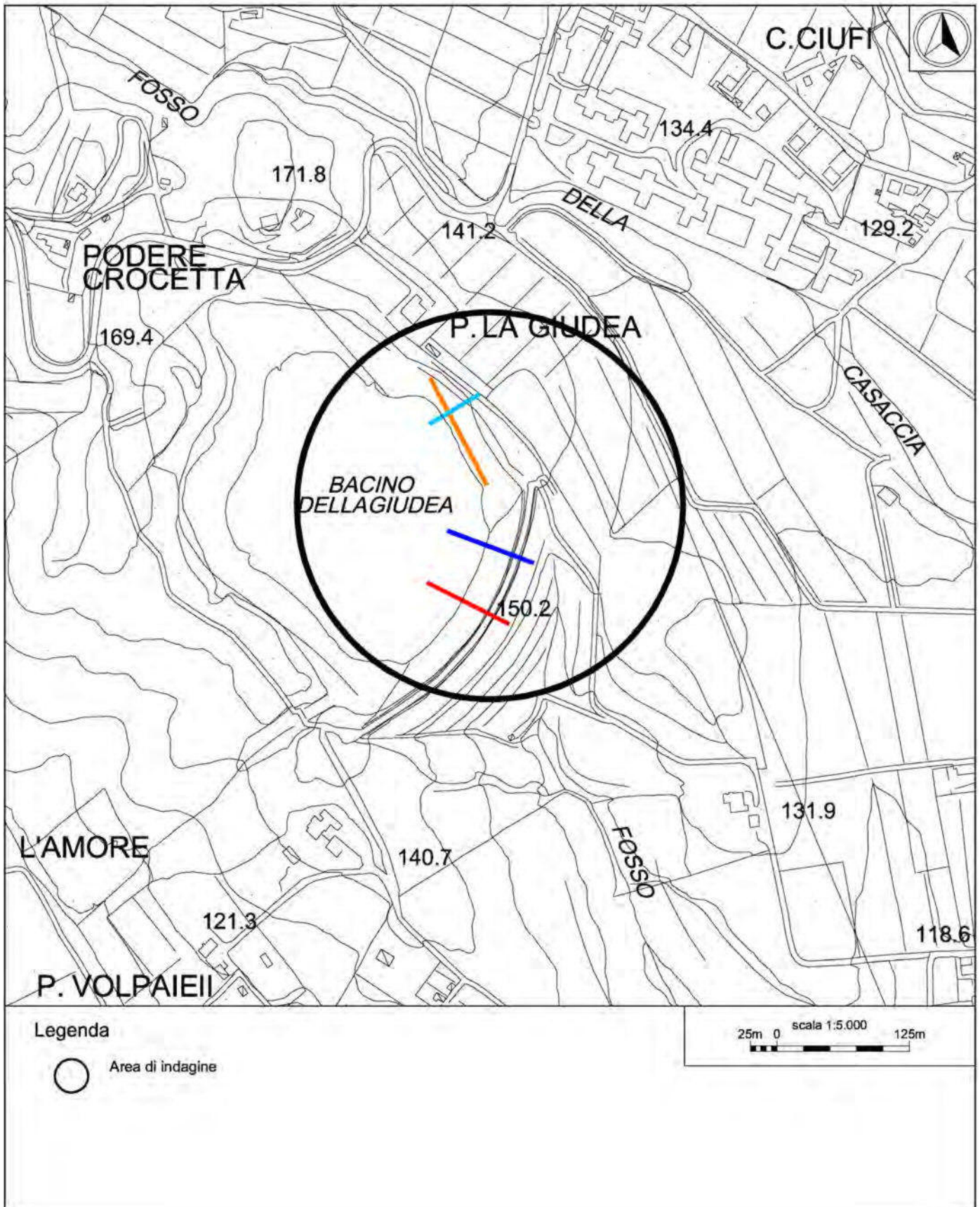


Figura 2: Ubicazione indagini – Inquadramento di dettaglio

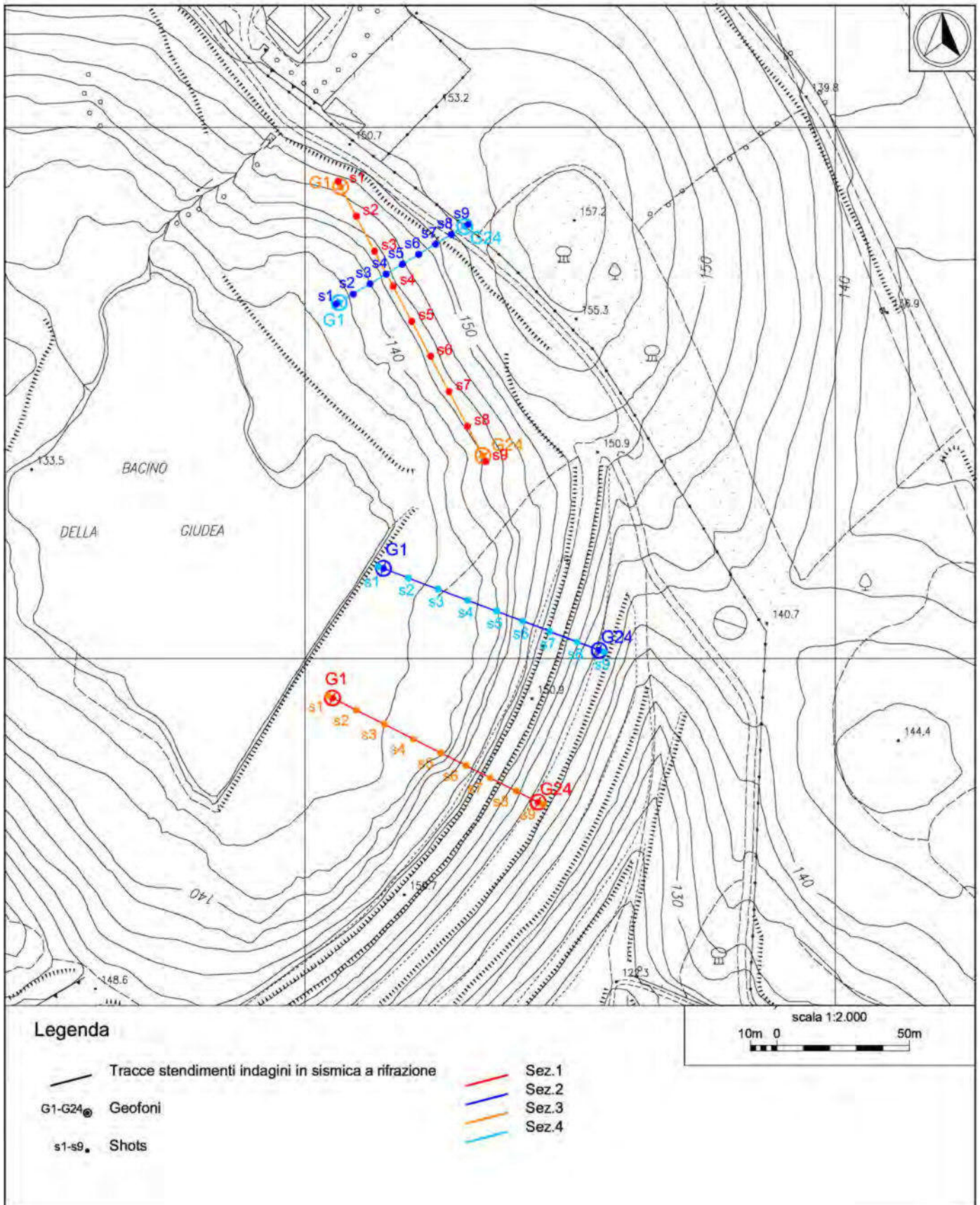
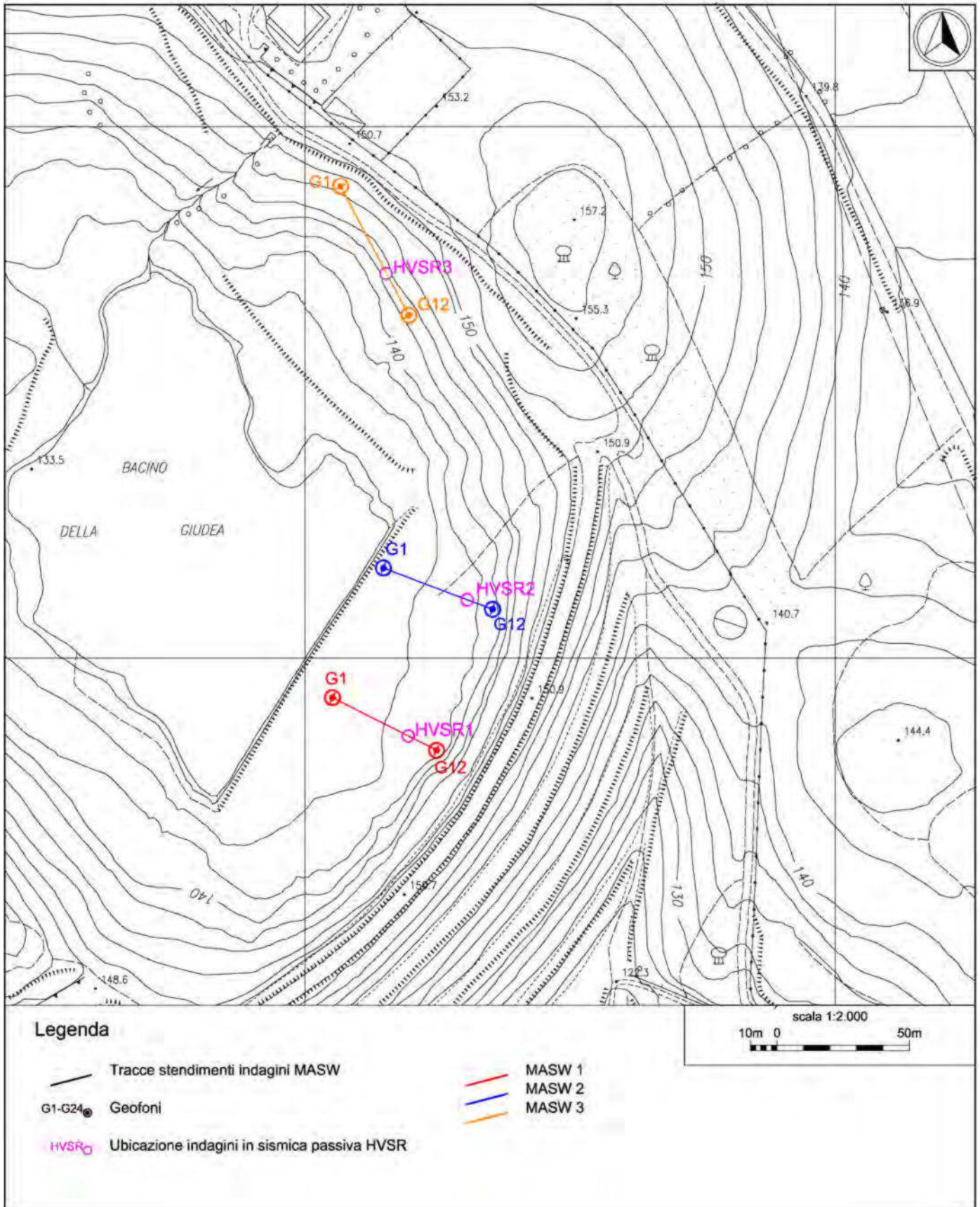


Figura 3: Ubicazione indagini in sismica a rifrazione in onde P e Sh – Particolare



**Figura 4: Ubicazione indagini MASW e indagini in sismica passiva – Particolare**

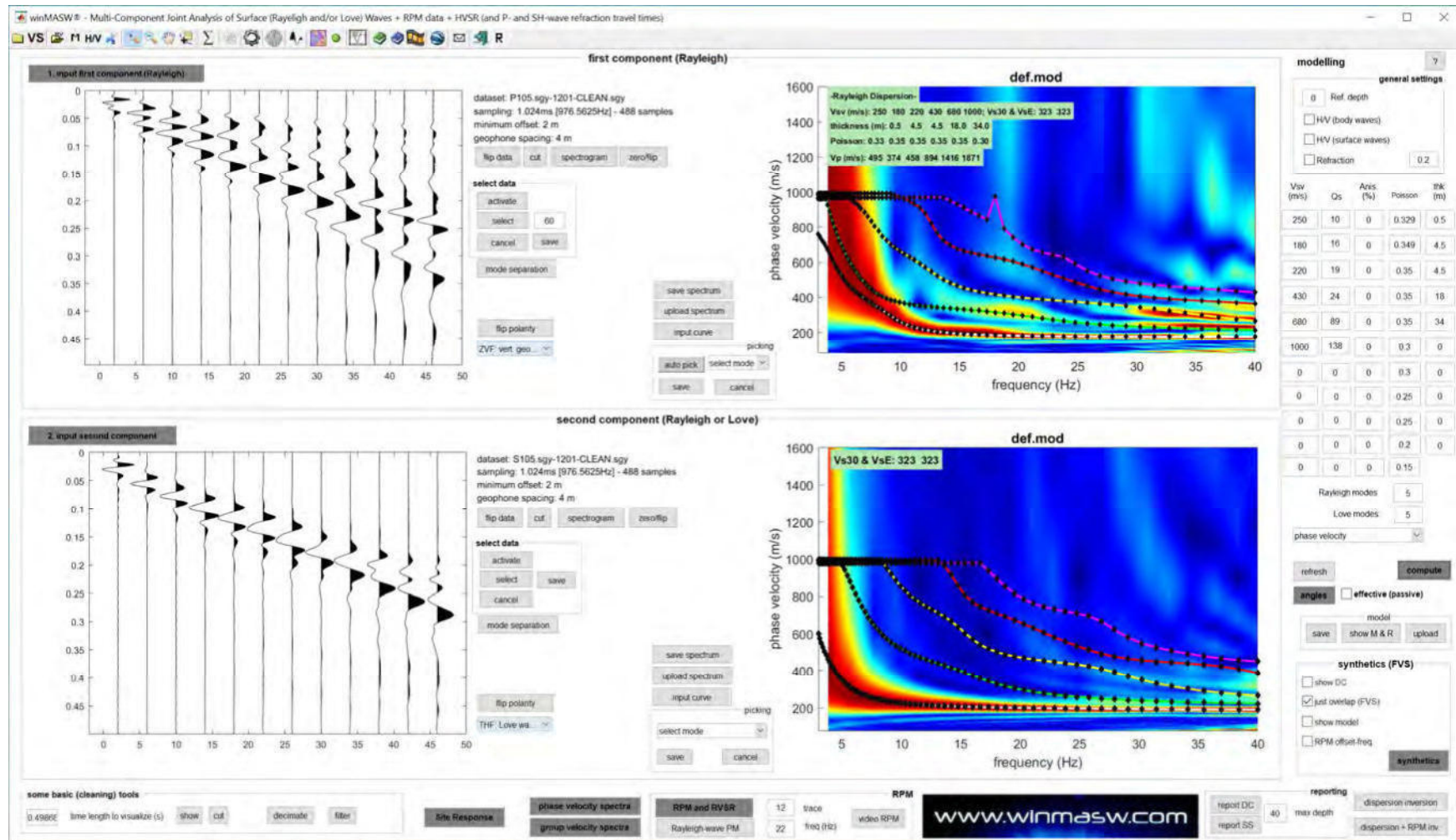
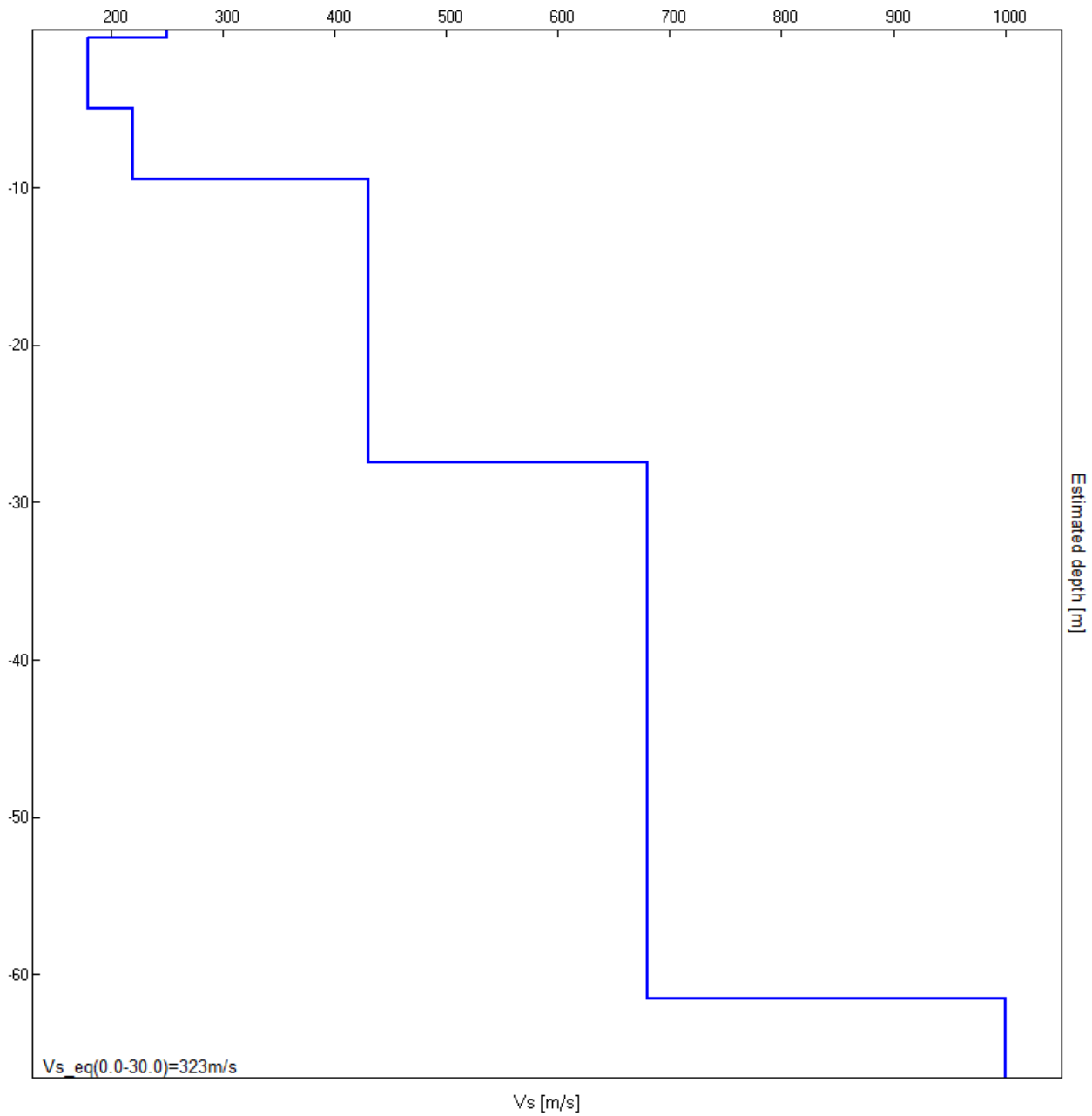


Figura 13: Indagine MASW 1. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione (in alto onde di Rayleigh e in basso onde di Love).



**Figura 14: Indagine MASW 1. Profilo di velocità delle onde S**

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
0.50	0.50	250
5.00	4.50	180
9.50	4.50	220
27.50	18.00	430
61.50	34.00	680
inf.	inf.	1000

Vs\_eq(0.0-30.0)=323m/s

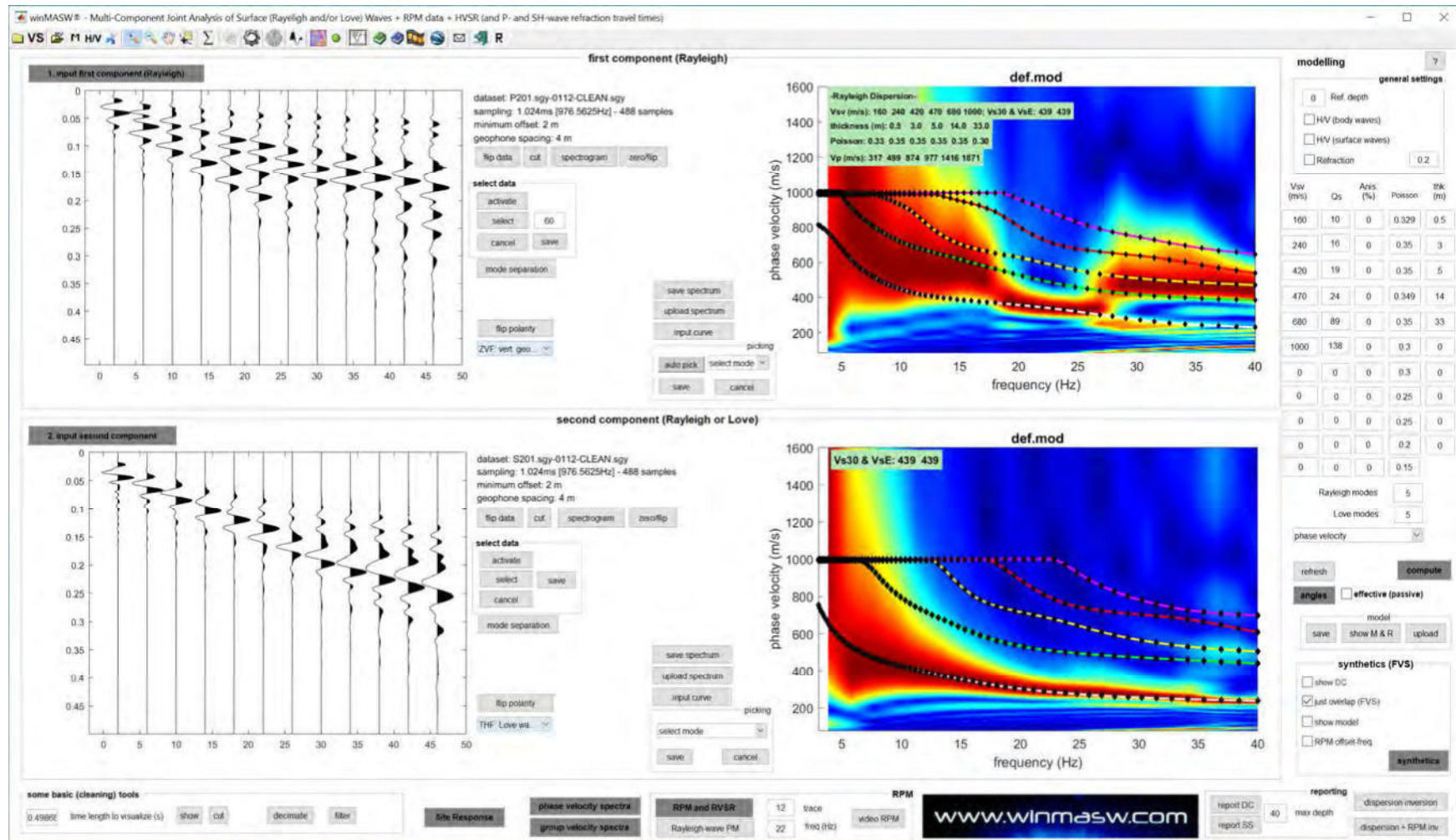
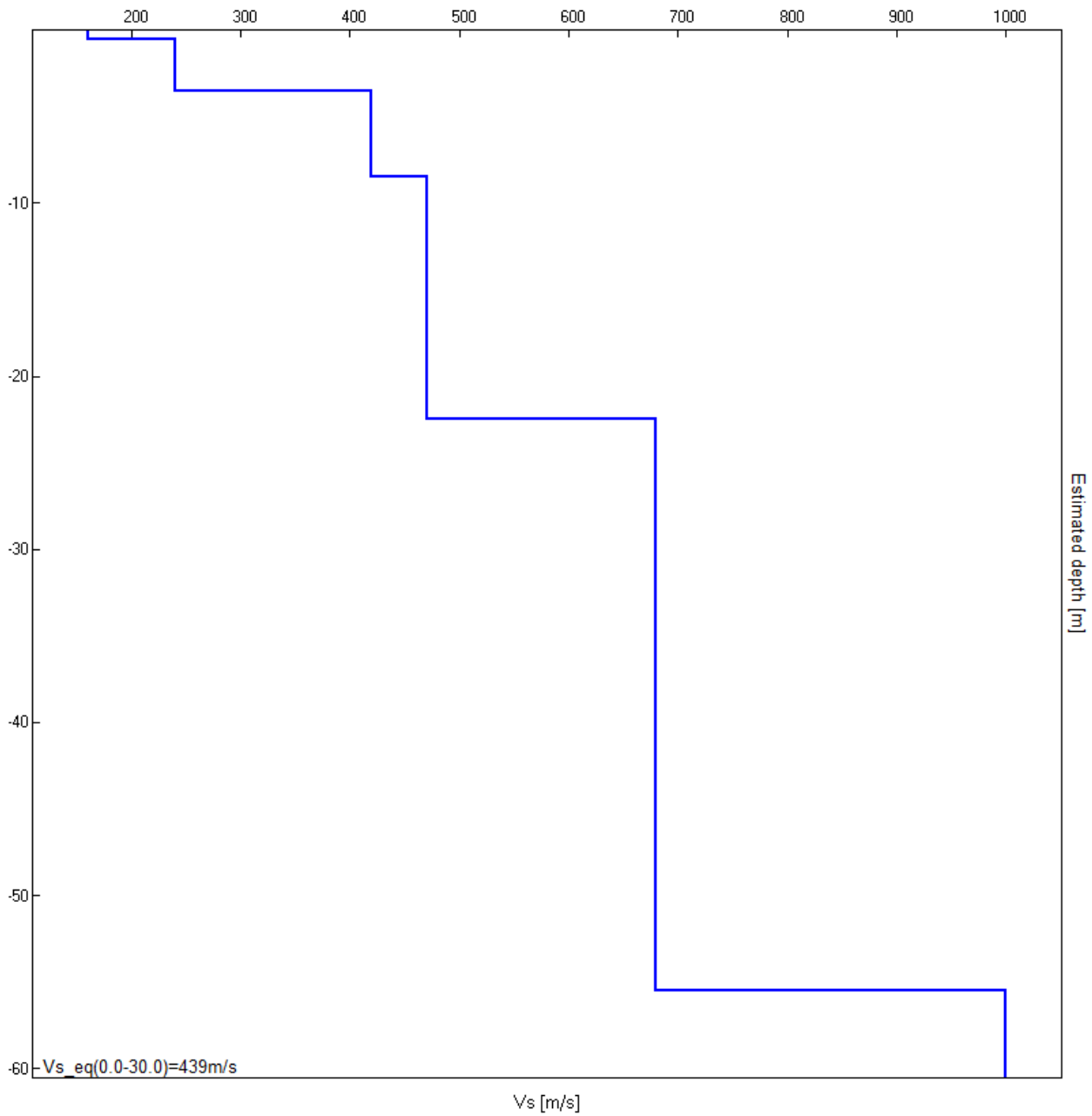


Figura 15: Indagine MASW 2. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione (in alto onde di Rayleigh e in basso onde di Love).



**Figura 16: Indagine MASW 2. Profilo di velocità delle onde S**

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
0.50	0.50	160
3.50	3.00	240
8.50	5.00	420
22.50	14.00	470
55.50	33.00	680
inf.	inf.	1000

Vs\_eq(0.0-30.0)=439m/s



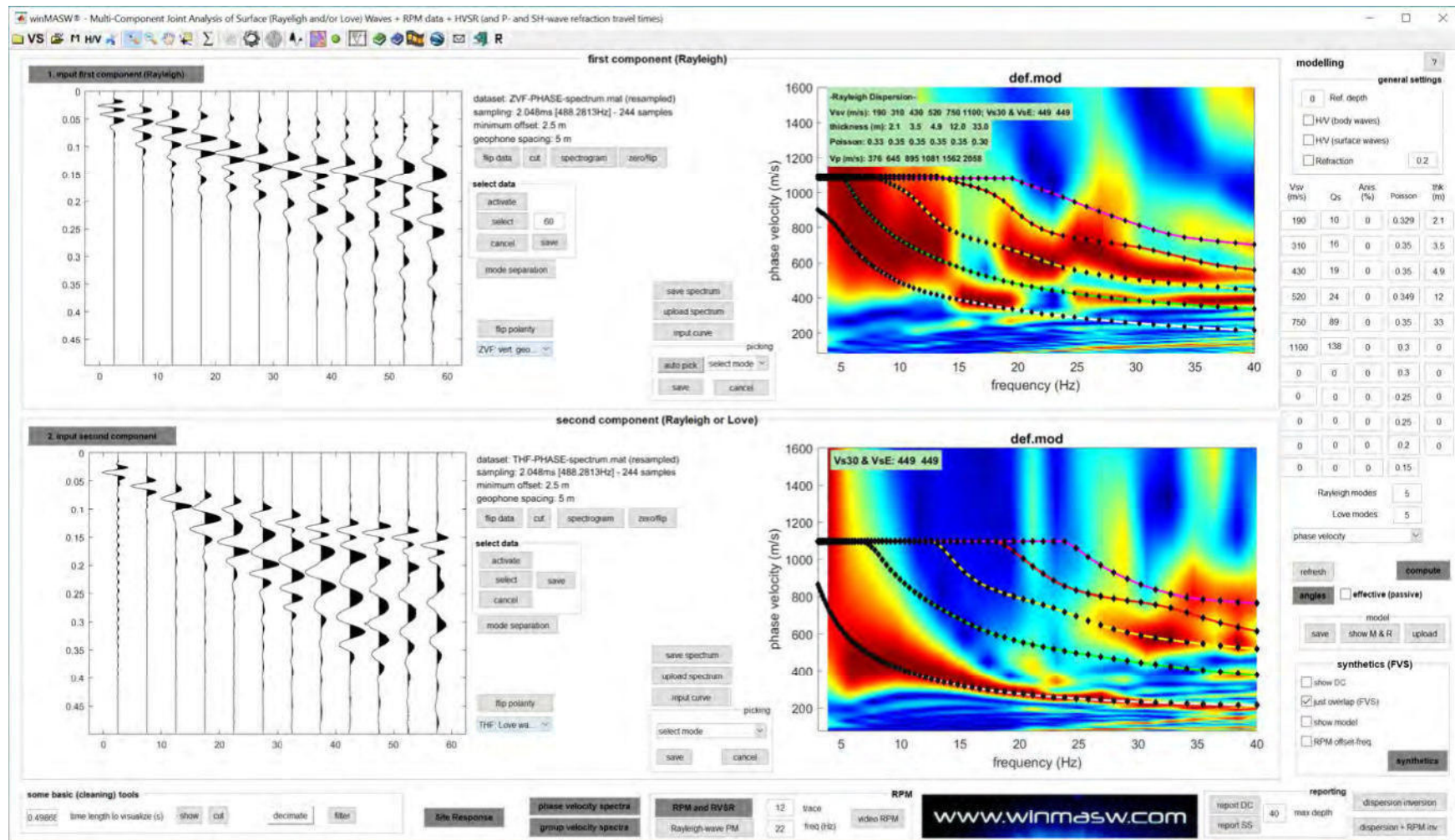
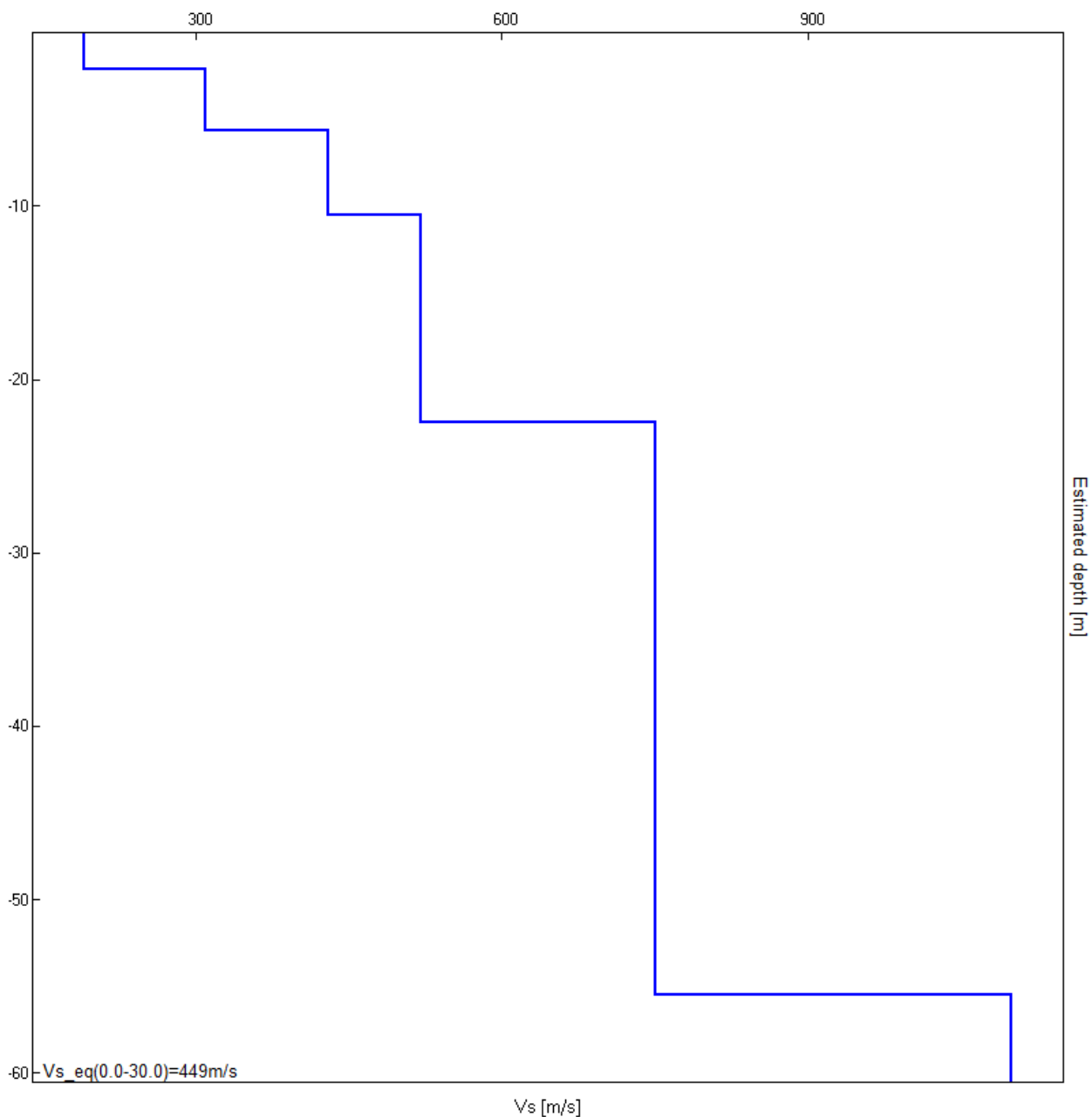


Figura 17: Indagine MASW 3. Sismogrammi, spettri di velocità e modelli di dispersione (in alto onde di Rayleigh e in basso onde di Love).



**Figura 18: Indagine MASW 3. Profilo di velocità delle onde S**

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]
2.10	2.10	190
5.60	3.50	310
10.50	4.90	430
22.50	12.00	520
55.50	33.00	750
inf.	inf.	1100

$Vs_{eq}(0.0-30.0)=449m/s$