

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J31H03000180008

**DIREZIONE TECNICA  
U.O. GEOLOGIA TECNICA DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO**

**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA DI 2^ FASE**

**NPP 0258 - GRONDA MERCI DI ROMA**

**GRONDA MERCI DI ROMA CINTURA NORD**

**INDAGINI GEOGNOSTICHE: INDAGINI GEOFISICHE**

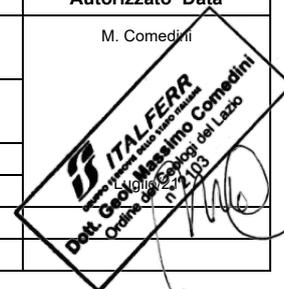
SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA Progr. REV.

N R 4 E 0 0 R 6 9 I G G E 0 0 0 5 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	GIA Consulting	Luglio/21	A. Salvagnini	Luglio/21	T. Paglietti	Luglio/21	M. Comedini



File:

n.Elabor.



**ITALFERR S.P.A.**

**ESECUZIONE DI INDAGINI GEOFISICHE PER IL PTFE GRONDA MERCI DI  
ROMA – CHIUSURA DELL'ANELLO NORD**

il R.U.P.  
dott. A. Salvagnini

**REPORT INDAGINI GEOFISICHE**

**ROMA NORD**

CODICE PROGETTO		DATA	REVISIONE	PAGINE						
G	I	T	F	0	2	2	1	04/02/2021	01	80

**Gruppo di Lavoro**

<b>Dott. Geol.</b> Enzo De Luzio	Geofisico Senior			
<b>Dott. Geol.</b> Antonio Fontana	Geologo Junior			
<b>Dott. Geol.</b> Angela Caccia	Geologo Junior			
rev.	descrizione	data	redatto	verificato
1	Emissione	04/02/2021	Geol. Antonio Fontana	Ph.D. Geol. Salvatore Costabile
2			Geol. Enzo De Luzio	
3			Geol. Angela Caccia	
4				

## Sommario

<b>PREMESSA</b> .....	3
<b>1. METODOLOGIE GEOFISICHE IMPIEGATE</b> .....	4
<b>1.1 Indagine MASW</b> .....	6
1.1.1 <i>Strumentazione utilizzata e tecniche operative</i> .....	8
1.1.2 <i>Elaborazione dei dati</i> .....	9
<b>1.2 Indagine HVSR</b> .....	10
1.2.1 <i>Strumentazione utilizzata ed elaborazione dei dati</i> .....	11
<b>1.3 Indagine DOWN HOLE</b> .....	12
1.3.1 <i>Strumentazione utilizzata e tecniche operative</i> .....	14
1.3.2 <i>Elaborazione dei dati</i> .....	16
<b>2. INDAGINI GEOFISICHE IN SITO</b> .....	17
<b>2.1 SITO 1</b> .....	17
2.1.1 <i>MASW 1</i> .....	17
2.1.2 <i>HVSR 1</i> .....	22
2.1.3 <i>DOWNHOLE S1</i> .....	25
<b>2.2 SITO 2</b> .....	30
2.2.1 <i>MASW 2</i> .....	30
2.2.2 <i>HVSR 2</i> .....	35
<i>DOWNHOLE S6</i> .....	38
<b>2.3 SITO 3</b> .....	43
2.3.1 <i>MASW 3</i> .....	43
2.3.2 <i>HVSR 3</i> .....	48
<b>2.4 SITO 4</b> .....	51
2.4.1 <i>MASW 4</i> .....	51
2.4.2 <i>HVSR 4</i> .....	56
<b>2.5 SITO 5</b> .....	59
2.5.1 <i>MASW 5</i> .....	59
2.5.2 <i>HVSR 5</i> .....	64
2.5.3 <i>DOWNHOLE S7</i> .....	67
<b>2.6 SITO 6</b> .....	72
2.6.1 <i>DOWNHOLE S11</i> .....	72
<b>CONCLUSIONI</b> .....	77

## PREMESSA

A seguito dell'affidamento di incarichi professionali, della Direzione Tecnica U.O. Geologia Tecnica dell'Ambiente e del Territorio di ITALFERR, per l'espletamento delle attività di "Esecuzione campagna indagini geognostiche per il PFTE Gronda merci di Roma-chiusura dell'anello Nord: indagini geofisiche" con atto contrattuale: n. ordine 100040196 del 04/01/2021 di attivazione su A.Q. n. 200001348, la G.I.A. Consulting ha eseguito nell'area in oggetto il seguente piano d'indagine:

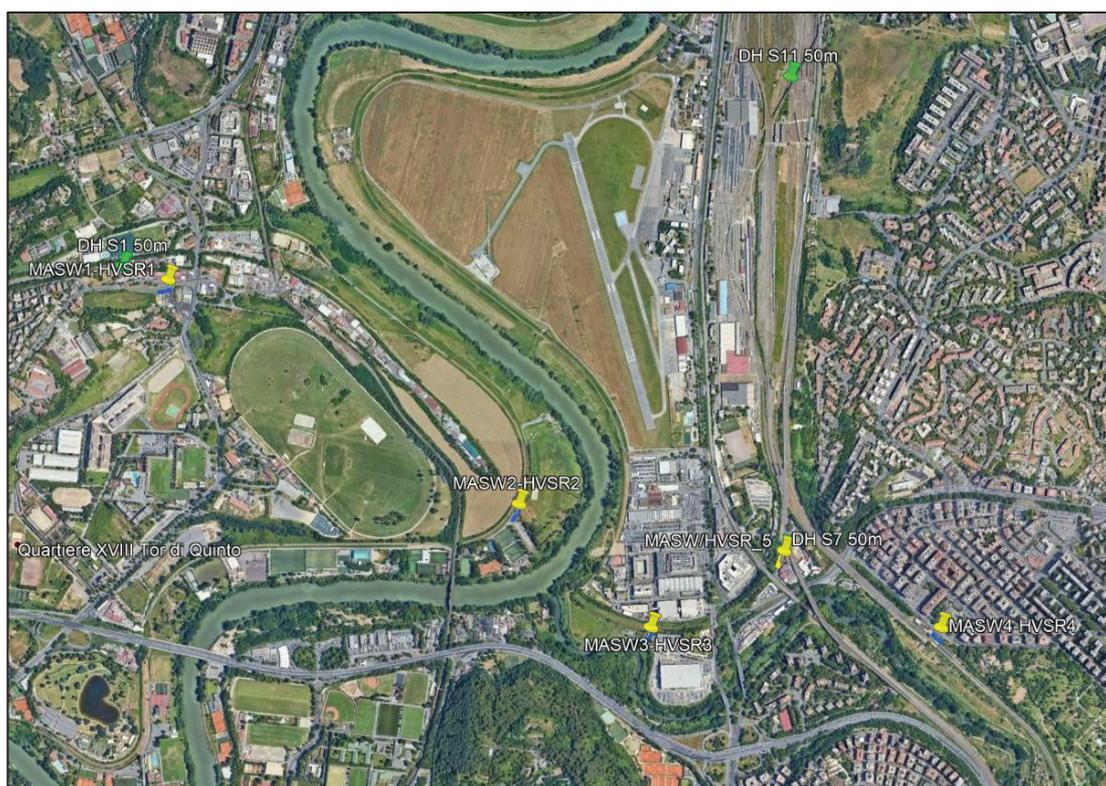
- ✓ n. 5 rilievi sismici per onde superficiali di tipo attivo MASW. Lo stendimento, costituito da n. 24 geofoni, è finalizzato alla ricostruzione del profilo di velocità  $V_s$  per la determinazione del parametro  $V_{seq}$  e la definizione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle NTC 2018;
- ✓ n. 5 registrazione di prove sismiche passiva di tipo HVSR per la definizione della frequenza di risonanza del sito in funzione dei significativi contrasti di impedenza sismica;
- ✓ n. 4 rilievo sismico di tipo DownHole fino alla profondità di 50 m dal piano campagna. La strumentazione utilizzata è costituita da n.1 geofono tridirezionale MAE (Frequenza nominale 14 Hz), il quale viene ancorato alla parete del foro tramite meccanismo di serraggio elettrico.

Le indagini hanno consentito di ottenere una ricostruzione sismo-stratigrafica del sito investigato e la classificazione del sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

## 1. METODOLOGIE GEOFISICHE IMPIEGATE

Le indagini indirette, eseguite per la caratterizzazione sismica del sottosuolo, sono le seguenti:

- ✓ n. 5 rilievi sismici per onde superficiali di tipo MASW. Lo stendimento, costituito da 24 geofoni, è finalizzato alla ricostruzione del profilo di velocità  $V_s$  per la determinazione del parametro  $V_{seq}$  e la definizione della categoria sismica dei suoli di fondazione ai sensi delle NTC 2018.
- ✓ n. 5 registrazioni di prova sismica passiva di tipo HVSR per la definizione della frequenza di risonanza di sito in funzione dei significativi contrasti di impedenza sismica;
- ✓ n. 4 rilievi sismici di tipo DownHole fino alla profondità di 50 m dal piano campagna. La strumentazione utilizzata è costituita da n.1 geofono tridirezionale Ambrogeo (Frequenza nominale 14 Hz), il quale viene ancorato alla parete del foro tramite meccanismo di serraggio elettrico.



**Figura 1** – Ubicazione delle indagini

Le fasi di esecuzione delle indagini sono state condotte in conformità a quanto previsto dalle norme:

- ✓ ASTM D6429 – 99 (2011) e1 Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods.
- ✓ Progetto SESAME (Site Effects Assessment using Ambient Excitations, 2004); European Commission, n. EVG1-CT-2000-00026.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i dettagli delle prove sismiche eseguite:

ID Indagine	Geofoni (nr.)	Distanza Intergeofonica	Frequenza geofoni	Lunghezza Stendimento	Coordinata E	Coordinata N
MASW 1	24	2.5 m	4.5 Hz	60 m	291423,00 m	4647404,00 m
MASW 2	24	2.5 m	4.5 Hz	60 m	292688,00 m	4646665,00 m
MASW 3	24	2.5 m	4.5 Hz	60 m	292953,47 m	4646432,66 m
MASW 4	24	2.5 m	4.5 Hz	60 m	294176,00 m	4646295,00 m
MASW 5	24	2.5 M	4.5 Hz	60 m	293620,00 m	4646539,00 m

ID Indagine	Durata	Frequenza Campionamento	Coordinata E	Coordinata N
HVSR 1	30 min	512 Hz	291395,00 m	4647383,00 m
HVSR 2	30 min	512 Hz	292688,00 m	4646665,00 m
HVSR 3	30 min	512 Hz	292953,47 m	4646432,66 m
HVSR 4	30 min	512 Hz	294197,00 m	4646278,00 m
HVSR 5	30 min	512 Hz	293620,00 m	4646539,00 m

ID Indagine	Geofono triassiale (nr.)	Distanza Scoppio - Foro	Frequenza geofono	Profondità indagine	Coord. E	Coord. N
DOWNHOLE S 1	1	2 m	14 Hz	50 m	291262,00 m	4647444,00 m
DOWNHOLE S 7	1	2 m	14 Hz	50 m	293619,00 m	4646544,00 m
DOWNHOLE S 11	1	2 m	14 Hz	50 m	293577,00 m	4648214,00 m
DOWNHOLE S 6	1	2,5 m	14 Hz	55 m	292688,00 m	4646665,00 m

## 1.1 Indagine MASW

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame sono state effettuate una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio).

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle norme tecniche per le costruzioni del DM 17 gennaio 2018. 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:

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

con:

$h_i$  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 30.0 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$ , ottenuto ponendo  $H=30.0$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Il rilievo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (geofoni) 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.

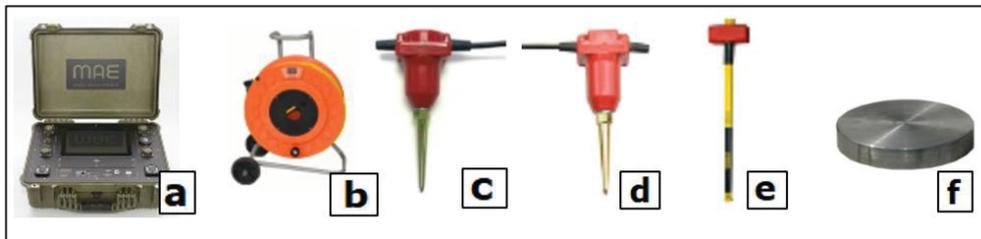
La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi.

Il metodo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30.0 m-50.0 m, in funzione della rigidità del suolo.

### 1.1.1 Strumentazione utilizzata e tecniche operative

La strumentazione utilizzata per la registrazione del segnale (vedi **Figura 2**) è costituita da:

- a) Sismografo digitale MAE X820S a 24 bit 24-96 canali.
- b) Cavo sismico MAE con 24 multi coppie per collegamento dei geofoni al sismografo.
- c) 24 geofoni AMBROGEO a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz.
- d) Geofono verticale trigger completo di cavo e connettore da 4.5 Hz.
- e) Mazza battente non strumentata di 8 Kg per energizzare onde compressionali.
- f) Piastra di battuta in alluminio con diametro = 210 mm e spessore = 28 mm.



**Figura 2.** Attrezzatura utilizzata per effettuare le indagini sismiche di tipo MASW

Il profilo sismico eseguito ha una lunghezza di 60 metri ed è costituito da 24 geofoni distanziati di 2.5 m.

Per lo stendimento sono state effettuate molteplici registrazioni a 3, 4 e 5 volte la distanza intergeofonica (2.5m) ad entrambi gli estremi dello stendimento ottenendo 6 registrazioni di onde superficiali.

### 1.1.2 Elaborazione dei dati

Dopo l'acquisizione dei dati, l'elaborazione con il metodo MASW prevede tre fasi di lavoro:

- la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale.
- la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica.
- la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , modificando opportunamente lo spessore  $h$ , le velocità delle onde di taglio  $V_s$  e di compressione  $V_p$  (o in maniera alternativa alle velocità  $V_p$  è possibile assegnare il coefficiente di Poisson), la densità di massa degli strati che costituiscono il modello del suolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

Tramite il processo di picking dei massimi di ampiezza del modo fondamentale e degli eventuali modi superiori. Successivamente mediante il processo di inversione, si ottiene il profilo di velocità con la profondità che permette di definire i parametri  $V_{seq}$  e  $V_{s30}$ .

I dati delle prove MASW sono stati elaborati con il software WinMASW 2018 Lite ([www.eliosoft.it](http://www.eliosoft.it)).

## 1.2 Indagine HVSR

Il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) utilizza segnali sismici ottenuti da stazione sismica singola: Tromografo digitale TROMINO, che misura il tremore sismico. Attraverso i rapporti spettrali di tali segnali, si ha la possibilità di effettuare la misura immediata della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo, parametro che può essere correlato con gli effetti di sito.

La prova sismica passiva a stazione singola mette in luce le frequenze alle quali il moto del terreno viene amplificato per risonanza stratigrafica locale, in quanto il rumore sismico agisce come sorgente di eccitazione dei terreni costituenti il sub-strato. In particolare, un suolo vibra con maggiore ampiezza a specifiche frequenze (per l'appunto di risonanza) non solo quando è eccitato da un terremoto, ma anche quando è eccitato da un tremore di qualsiasi origine.

Questo fa sì che la misura delle frequenze di risonanza dei terreni sia possibile ovunque ed in modo semplice, anche in assenza di terremoti. Le frequenze a cui si manifesta la risonanza sono descritte dalla relazione:  $f=V_s/4h$  (formula semplificata) dove  $V_s$  è la velocità delle onde di taglio nello strato che risuona e  $h$  è lo spessore di detto strato. La prova, comunemente nota con il termine H/V o HVSR (rapporto tra le componenti spettrali orizzontali H e verticale V) fu applicata per la prima volta da Nogoshi e Igarashi(1970) e resa popolare da Nakamura (1989). Infatti è proprio dal grafico del rapporto tra le componenti spettrali orizzontale e verticale che viene evidenziata la frequenza (o più frequenze se si è in presenza di un profilo stratigrafico multistrato con contrasti di impedenza significativi) attraverso un "picco" della curva (in genere dovuto ad un minimo della componente verticale, riscontrabile negli spettri delle singole componenti).

### 1.2.1 Strumentazione utilizzata ed elaborazione dei dati

Per eseguire le indagini HVSR è stato utilizzato un tromografo digitale TROMINO (**Figura 3**). Lo strumento è dotato di tre sensori velocimetrici elettrodinamici ortogonali ad alta risoluzione, i quali trasmettono il segnale ad un sistema di acquisizione digitale a basso rumore.

L'ancoraggio al suolo avviene tramite infissione di appositi piedini; l'orizzontalità è controllata per mezzo di una bolla sferica.

Il TROMINO viene posizionato con il suo asse maggiore allineato nella direzione N-S e messo in opera nel punto considerato più opportuno nel sito oggetto di indagine. Ottenuto il miglior accoppiamento dei sensori con il terreno viene messo in acquisizione per un lasso di tempo compreso tra 20-30 min. con una frequenza di campionamento di 512 Hz. Su memoria interna vengono salvati in un unico file i dati rilevati in automatico; si tratta delle velocità misurate secondo le direzioni ortogonali est-ovest, nord-sud (dello strumento) e sulla verticale.

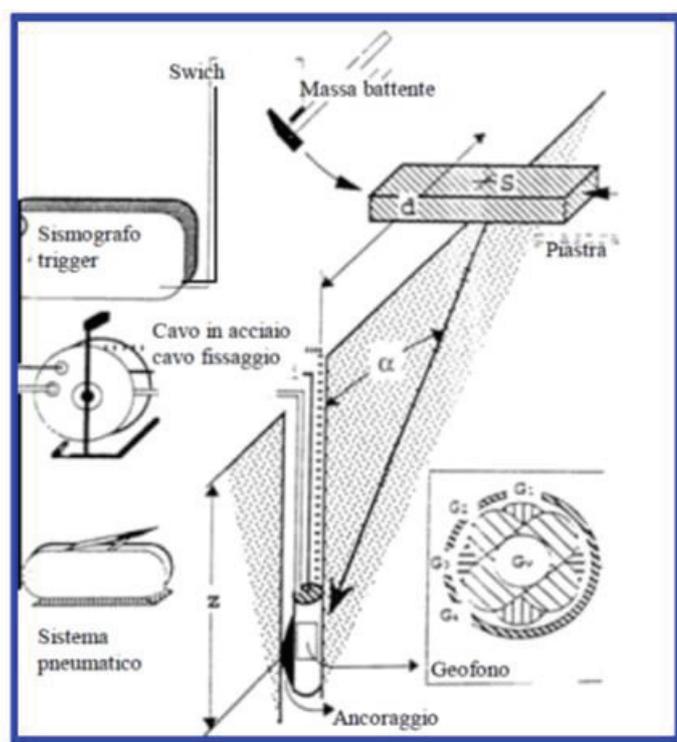
I dati registrati sono stati successivamente elaborati mediante il software *Grilla*.



**Figura 3.** Tromino utilizzato per effettuare le indagini di sismica passiva di tipo HVSR.

### 1.3 Indagine DOWN HOLE

Le prove sismiche Down-Hole (**Figura 4**), sono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette, che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità, energizzando il terreno in direzione verticale oppure in direzione trasversale (parallelamente al suolo). Nel primo caso sono generate prevalentemente onde di compressione (onde P) che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale (asse z). Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio (onde S) visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente (assi x e y).



**Figura 4** - Schema tecnico delle indagini Down-Hole

Il sistema di ricezione, costituito da un geofono tridimensionale da foro ad ancoraggio pneumatico, viene calato nel foro, sino alla profondità massima di investigazione e progressivamente sollevato dell'interdistanza propria di ciascuna indagine (nel caso in esame 1 m). Le onde di taglio hanno velocità inferiori rispetto a quelle di compressione e quindi raggiungeranno il geofono triassiale quando il primo fronte d'onda di compressione è già transitato. Questo passaggio purtroppo costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale o di taglio. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda di compressione e l'energia dell'onda trasversale (di taglio) a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto. La sottrazione delle forme d'onda relative a queste due acquisizioni, riduce sensibilmente la componente di compressione presente nel segnale. La misura dei tempi dei primi arrivi delle onde sismiche deve essere realizzata con precisione e con un dettaglio non superiore al decimo di millisecondo. Ogni ritardo fra il momento dell'energizzazione fornita al terreno e l'inizio della registrazione sul sismografo si traduce in un errore nei valori di velocità misurati.

### 1.3.1 Strumentazione utilizzata e tecniche operative

L'attrezzatura e la strumentazione utilizzata è costituita da:

- •un sistema di energizzazione sia per le onde P che per le onde S è stata effettuata mediante massa battente. Al fine di facilitare la generazione delle onde trasversali per la valutazione della velocità di propagazione delle onde di taglio, il terreno è stato sollecitato tangenzialmente tramite una traversina di legno bloccata da una Dacia Duster 4X4 e posizionata ad una distanza di circa 1,0 metri dall'asse del foro, in modo da ridurre la dissipazione in fase d'energizzazione, inoltre la registrazione delle onde di taglio per ogni campionamento, è avvenuta mediante due battute aventi opposte direzioni di impatto;
- •un sistema di ricezione costituito da un geofono tridimensionale inserito all'interno del foro del sondaggio geognostico a c.c. opportunamente attrezzato, rivestito adeguatamente con un tubo PVC, mentre è stato cementato lo spazio esistente tra le pareti e il tubo di rivestimento, in modo da garantire la continuità di contatto terreno-tubazione. Il passo di lettura è stato di 1,0 metri e ad ogni acquisizione il geofono è stato reso solidale alla parete del foro, mediante un sistema ad espansione pneumatica. Ogni campionamento è stato caratterizzato da 3 tracce sismiche, relative alla misura della terna di geofoni all'interno del foro;
- •sistema di acquisizione dati: con memoria dinamica a 24 bit composto da 24 dataloggers a 4 canali ciascuno per un totale di 96 canali, sismografo multicanale **M.A.E. modello X 820 S (Figura 5)**, avente le seguenti caratteristiche tecniche:



**Figura 5** - Sismografo multicanale M.A.E. modello X820 S.

Risoluzione campione	ADC Delta-Sigma @24 bit (Fc max 50000 Hz)
Numero di canali	n. 24 - 48 - 72- 96
Banda passante	0-25000Hz / selezionabile Low Pass Filter max.2000Hz
Distorsione massima	0.0005%
Range dinamico	128dB
Common mode rejection	110 dB a 60 Hz
Diafonia	-128dB a 20 Hz
Frequenza di campionamento	Selezionabile da 60 Hz a 52000 Hz
Soglia di rumore dell'amplificatore	1 $\mu$ V
Filtro anti alias	-3dB, 80% della frequenza di Nyquist, -80dB
Range massimo segnale in ingresso	+/-1.25V
Impedenza di ingresso	39KOhm

**Tabella 1** - Caratteristiche tecniche del sismografo utilizzato

### 1.3.2 Elaborazione dei dati

L'elaborazione della Down-Hole è stata eseguita svolgendo le seguenti fasi:

- picking dei primi arrivi delle onde P e delle onde S;
- misura dei tempi di ricezione dei primi impulsi rilevati (t)
- calcolo dei tempi verticali (t)

L'elaborazione dei dati acquisiti in campagna è stata effettuata con il software *DownHole 2020* della *Geostru*. Gli elaborati relativi sono riportati sia in forma grafica che numerica.

## 2. INDAGINI GEOFISICHE IN SITO

### 2.1 SITO 1

#### 2.1.1 MASW 1

La MASW numero 1 è ubicata in un'area adiacente Via Flaminia Vecchia come riportato in **Figura 6**, in cui è rappresentata anche la posizione dei 6 shots effettuati. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 60 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. Al fine di rendere i geofoni solidali con il terreno, sono state impiegate delle apposite basette per l'utilizzo su asfalto.



**Figura 6.** Ubicazione della MASW n.1 (a) e relativo stendimento (b).

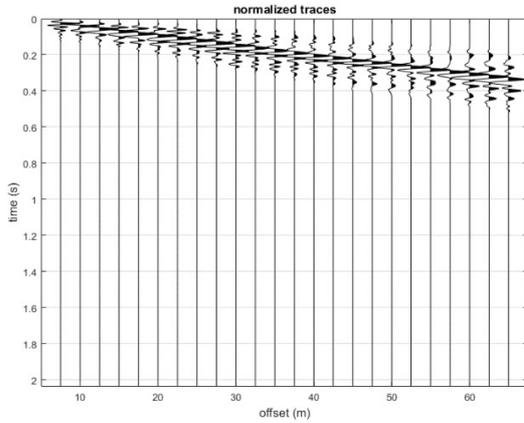
Ai fini dell'elaborazione delle tracce acquisite, sono stati considerati i parametri riportati nella seguente tabella.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	50
Velocità minima di elaborazione [m/s]	120
Velocità massima di elaborazione [m/s]	1500

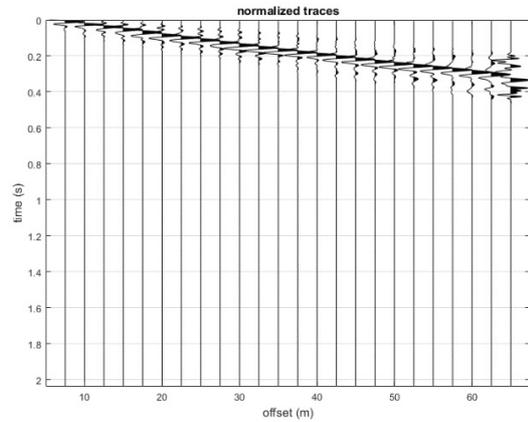
**Tabella 2** – Parametri utilizzati per l'elaborazione dei dati

*Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati:*

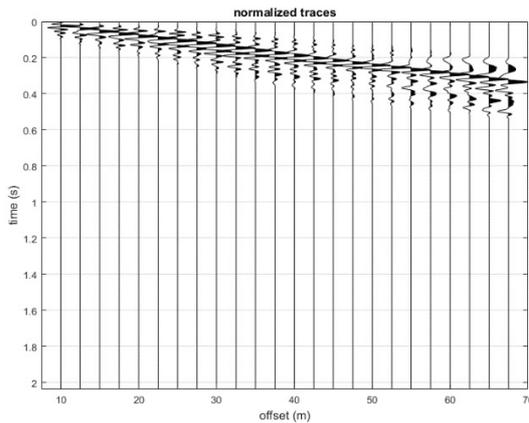
dataset: S1.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



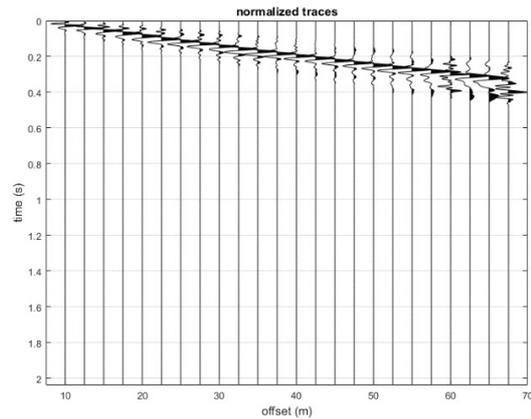
dataset: S4.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



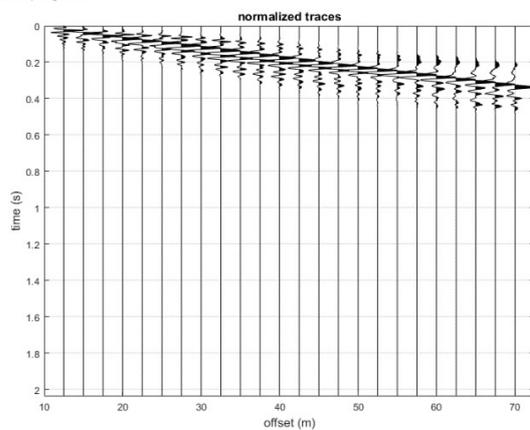
dataset: S2.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



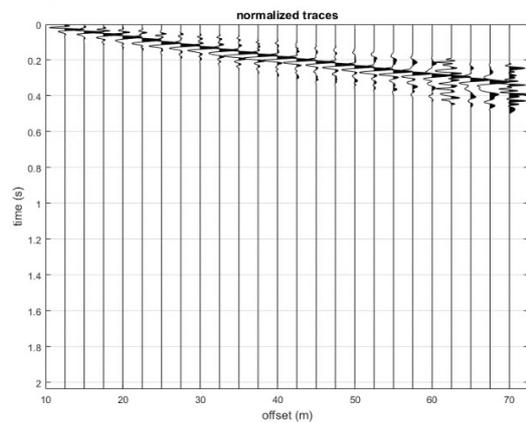
dataset: S5.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: S3.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m

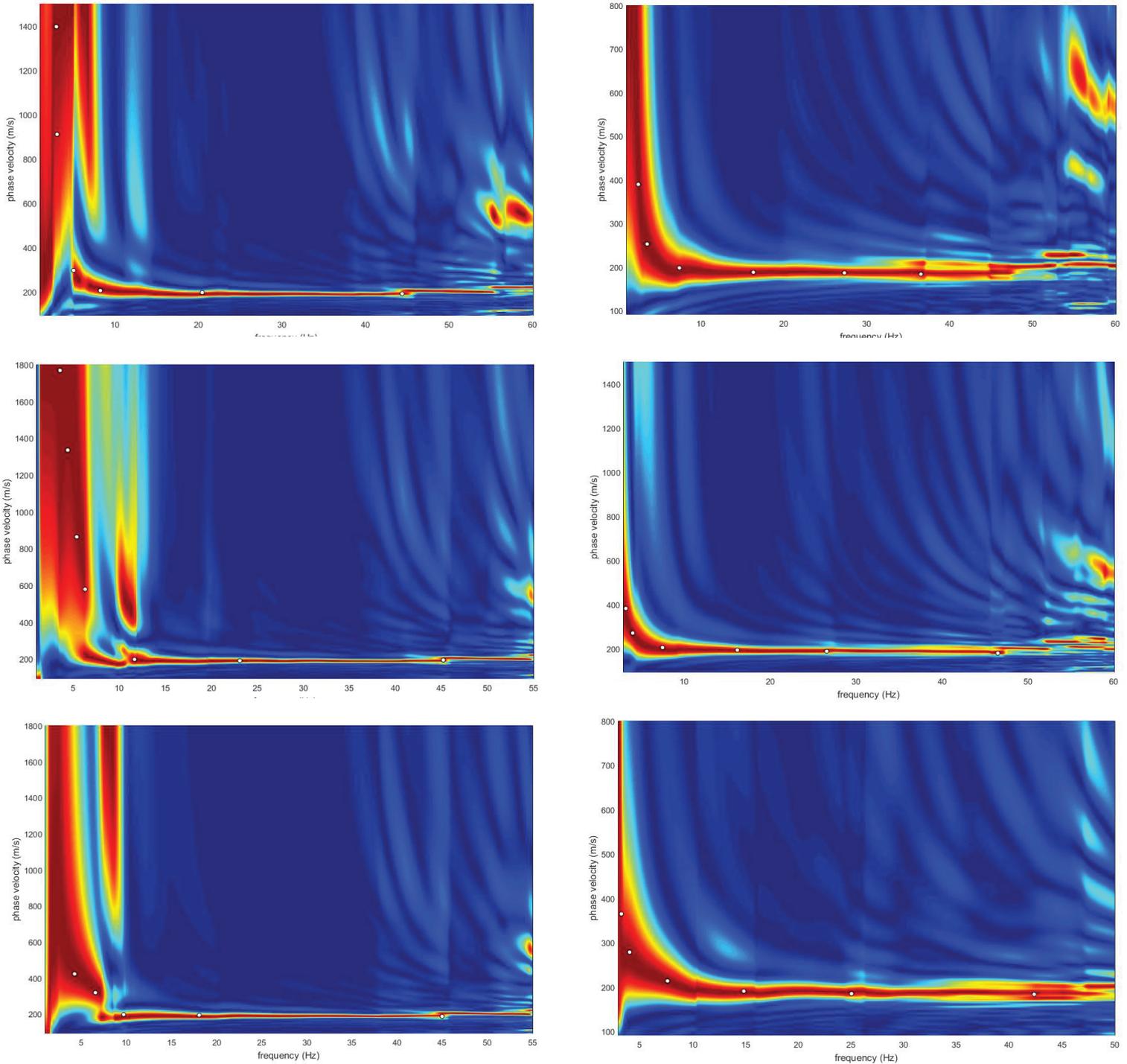


dataset: S6.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



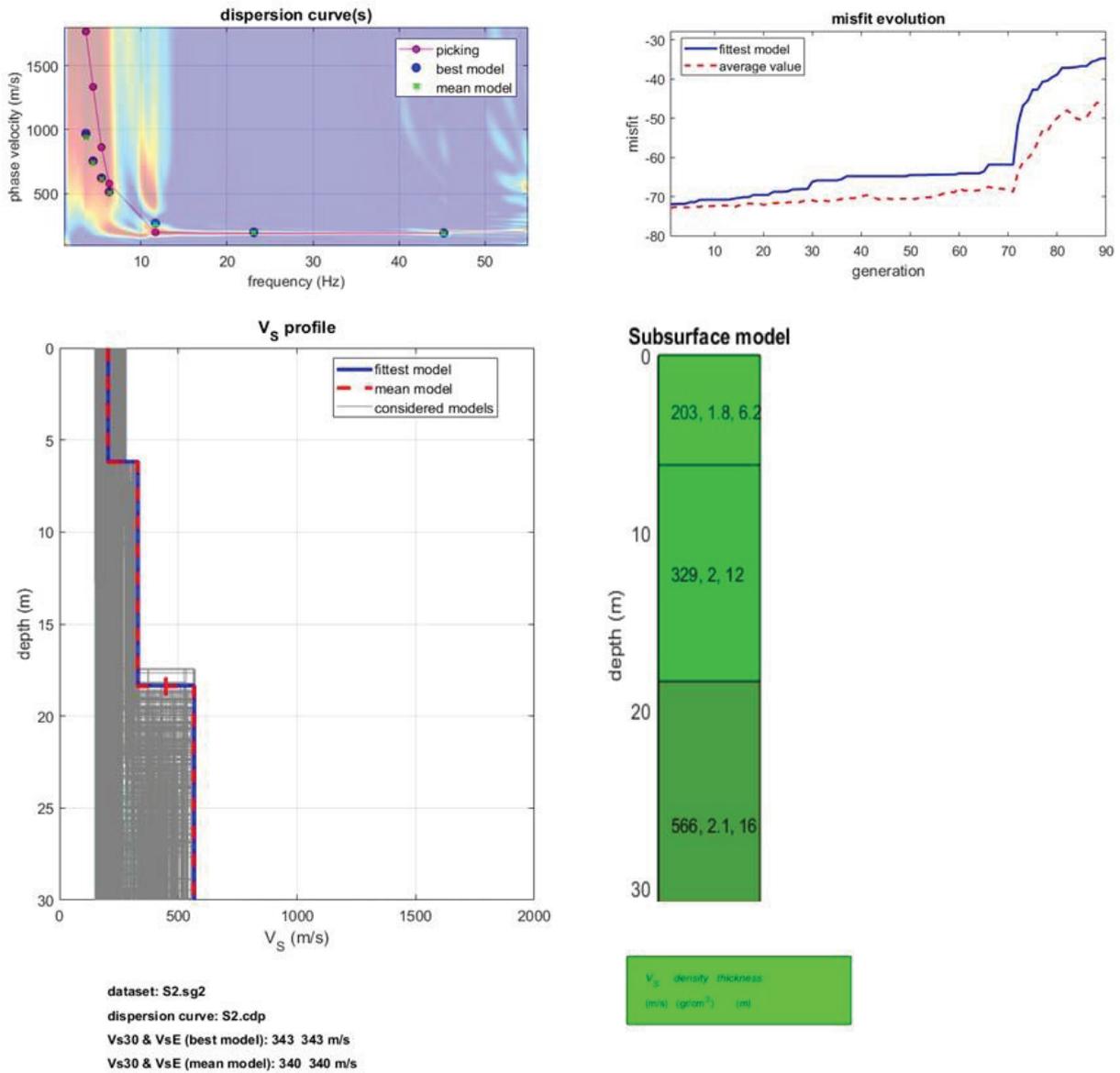
**Figura 7 – Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati.**

*Spettri di frequenza – velocità di fase.*



**Figura 8** – Spettri di velocità di fase – frequenza delle tracce acquisite.

*Risultati dell'inversione e modello sismo stratigrafico del sottosuolo:*



**Figura 9** – Risultati dell’approccio di inversione (in alto) e relativo modello sismo-stratigrafico del sottosuolo (in basso).

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo ritenuto rappresentativo dell'area investigata. E' stato determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{s30}$  e  $V_{s,eq} = 343$  m/s

Categoria di suolo: C

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

### 2.1.2 HVSR 1

Le indagini HVSR sono state svolte in un'area adiacente Via Flaminia Vecchia, come indicato in **Figura 10**. Il TROMINO è stato posizionato al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche del sito, e lasciato acquisire in modo manuale per un tempo di 30 minuti.



**Figura 10** – Ubicazione indagine HVSR 1.

### Risultati

Instrument: TEB-0504/01-19

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 89

Start recording: 12/01/2021 13:26:01      End recording: 12/01/2021 13:56:01

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 92% trace (manual window selection)

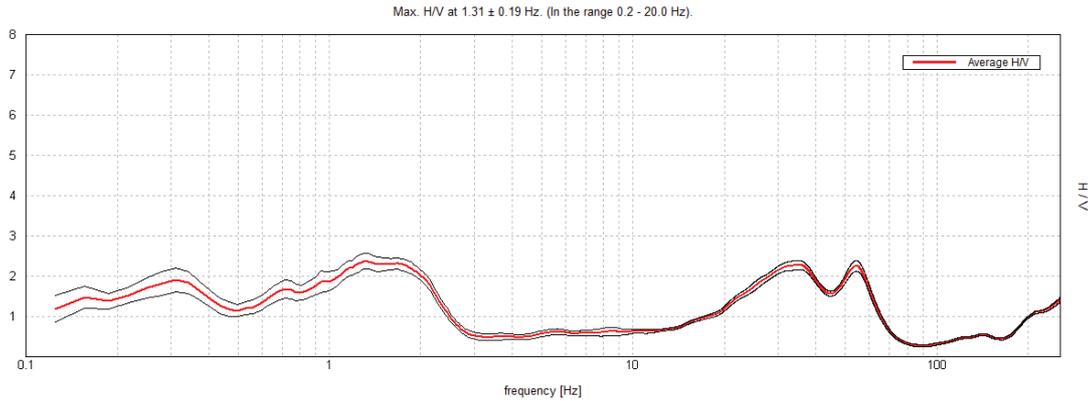
Sampling rate: 512 Hz

Window size: 20 s

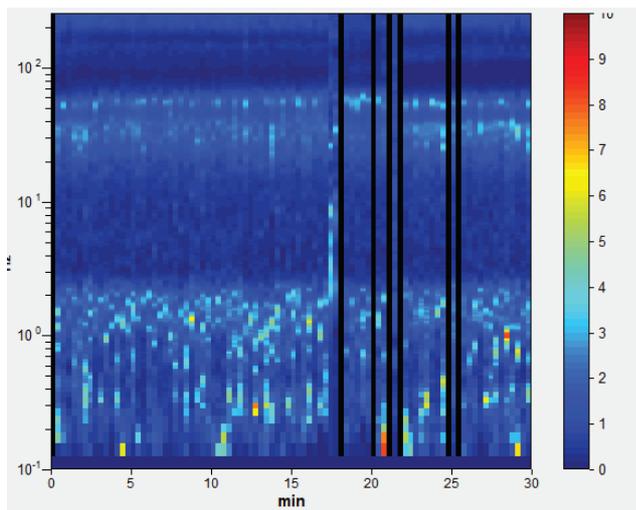
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

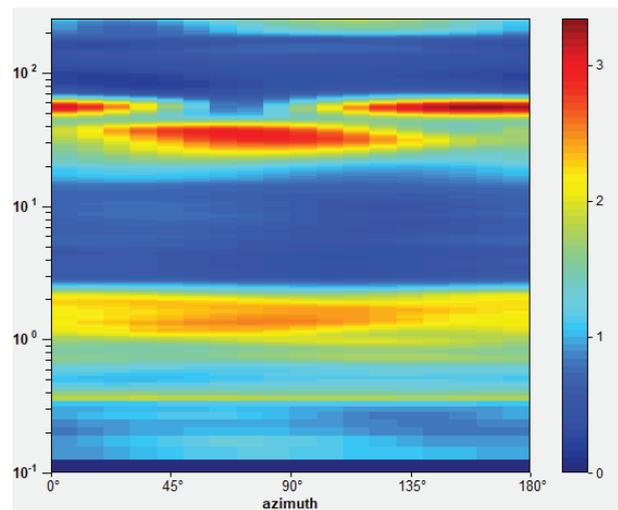
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



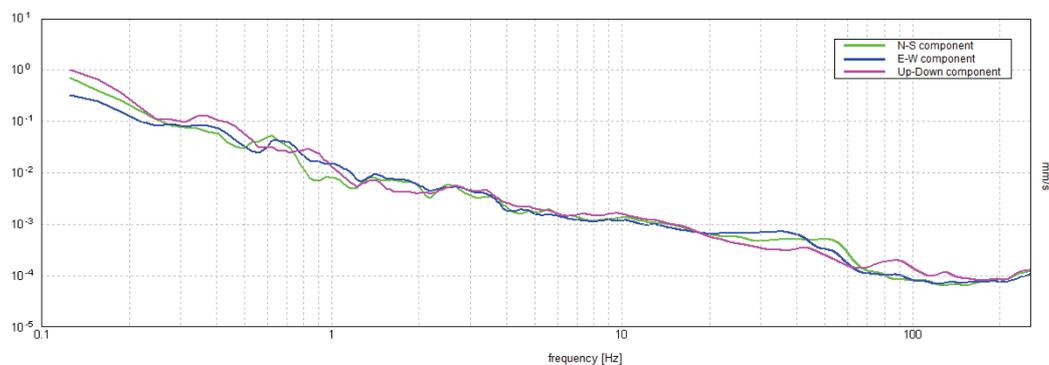
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



Max. H/V at  $1.31 \pm 0.19$  Hz (in the range 0.2 - 20.0 Hz).

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.31 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$2178.8 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 64 times	OK	

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.5 Hz	OK	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.406 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.38 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.14532  < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.19074 < 0.13125$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.199 < 1.78$	OK	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

#### Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

All'indagine di sismica passiva è stato possibile identificare la frequenza di risonanza del sito, corrispondente al picco di frequenza del rapporto spettrale **H/V pari a  $1.31 \pm 0.19$  Hz.**

### 2.1.3 DOWNHOLE S1

Questa indagine Down-Hole è stata svolta nel foro di sondaggio (S1), ubicato nell'area adiacente Via Flaminia Vecchia, come riportato in **Figura 11**, condizionato con tubo PVC ed opportunamente cementato, in modo da rendere solidale il tubo con il terreno circostante.



**Figura 11** - Ubicazione del foro di sondaggio (a) ed esecuzione della prova Down-hole in sito (b)

L'energizzazione per la generazione delle onde di compressione (P) è stata realizzata con mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per facilitare la generazione ed il rilievo delle onde trasversali con adeguata componente sul piano orizzontale (SH) si è utilizzato una traversina in legno, opportunamente ancorata (Dacia Duster 4X4), producendo un impatto laterale. Sono state effettuate, quindi, per ogni stazionamento, due energizzazioni per le onde S (con inversione di fase), con piano di oscillazione prevalentemente orizzontale, e una verticale per la generazione prevalente delle onde P. Le energizzazioni sono state realizzate ad una distanza di 2.5 metri dal boccaforo.

Nella **Tabella 3** sono riportati i valori dei tempi d'arrivo relativi alle onde P e S, i tempi corretti sulla verticale (T corr. P e T corr. S), per tenere conto della distanza del punto di energizzazione dal foro di sondaggio, i valori delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  relativi all'intervallo corrispondente ed infine i principali moduli elastici dinamici: il modulo di taglio (G) e il modulo di compressibilità volumetrica (Ev).

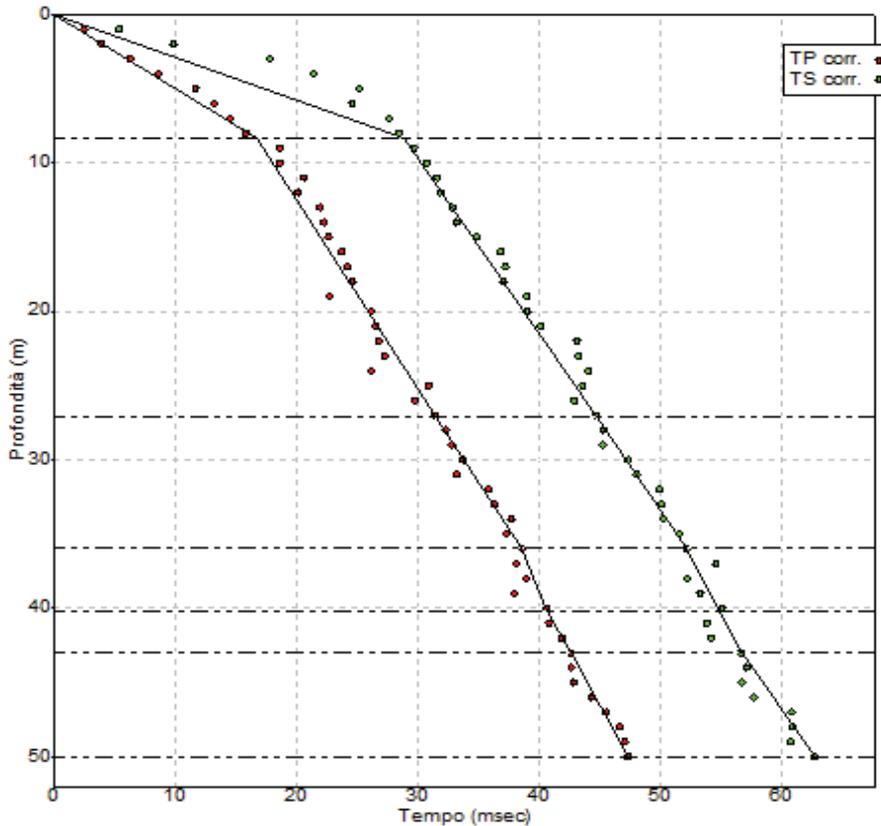
Profondità (m)	T... P (s)	T... SH (s)	Dist. Scoppio-Foro (m)	T.... P (s)	T.... SH (s)	$V_p$ (m/s)	$V_{SH}$ (m/s)	$\gamma$ (kN/mc)	$\rho$ (kg/mc)	G (Mpa)	Ev (Mpa)
1	0,0065	0,0144	2,5	0,0024	0,0053	414,24	186,98	14,71	1500	524,45	187,47
2	0,0062	0,0157	2,5	0,0039	0,0038	516,38	203,92	14,71	1500	623,76	316,81
3	0,0081	0,0231	2,5	0,0062	0,0177	482,11	169,05	14,71	1500	428,68	291,49
4	0,0101	0,0252	2,5	0,0086	0,0214	467,03	187,18	14,71	1500	525,56	257,10
5	0,013	0,0281	2,5	0,0116	0,0251	430,01	198,94	14,71	1500	593,65	198,21
6	0,0143	0,0266	2,5	0,0132	0,0246	454,55	244,36	14,71	1500	895,68	190,49
7	0,0154	0,0293	2,5	0,0145	0,0276	482,66	253,69	14,71	1500	965,36	220,73
8	0,0165	0,0298	2,5	0,0157	0,0284	507,97	281,26	14,71	1500	1186,60	228,84
9	0,0193	0,0308	2,5	0,0186	0,0297	483,98	303,27	17,65	1800	1655,53	200,89
10	0,0191	0,0312	2,5	0,0185	0,0303	539,67	330,38	17,65	1800	1964,68	262,29
11	0,0211	0,0324	2,5	0,0206	0,0316	534,62	348,16	17,65	1800	2181,93	223,55
12	0,0205	0,0325	2,5	0,0201	0,0318	597,93	377,16	17,65	1800	2560,47	302,15
13	0,0223	0,0334	2,5	0,0219	0,0328	593,64	396,35	17,65	1800	2827,73	257,31
14	0,0226	0,0337	2,5	0,0222	0,0332	629,27	422,00	17,65	1800	3205,54	285,36
15	0,0229	0,0353	2,5	0,0226	0,0348	664,06	430,79	17,65	1800	3340,45	348,36
16	0,024	0,0373	2,5	0,0237	0,0369	674,76	434,16	17,65	1800	3392,89	367,15
17	0,0244	0,0376	2,5	0,0241	0,0372	704,21	456,99	17,65	1800	3759,12	391,44
18	0,0248	0,0374	2,5	0,0246	0,0370	732,77	485,90	17,65	1800	4249,84	399,88
19	0,0229	0,0393	2,5	0,0227	0,0390	836,85	487,63	17,65	1800	4280,05	689,89
20	0,0263	0,0393	2,5	0,0261	0,0390	766,37	512,87	17,65	1800	4734,57	425,32
21	0,0267	0,0404	2,5	0,0265	0,0401	792,07	523,47	17,65	1800	4932,42	471,62
22	0,0269	0,0434	2,5	0,0267	0,0431	823,11	510,17	17,65	1800	4685,01	594,84
23	0,0274	0,0435	2,5	0,0272	0,0432	844,36	531,85	17,65	1800	5091,56	604,43
24	0,0263	0,0443	2,5	0,0262	0,0441	917,49	544,69	17,65	1800	5340,41	803,15
25	0,031	0,0438	2,5	0,0308	0,0436	810,47	573,62	17,65	1800	5922,78	392,66
26	0,0299	0,0431	2,5	0,0298	0,0429	873,58	606,03	17,65	1800	6610,91	492,19
27	0,0315	0,0448	2,5	0,0314	0,0446	860,81	605,26	17,65	1800	6594,04	454,58
28	0,0324	0,0455	2,5	0,0323	0,0453	867,64	617,83	16,18	1650	6298,33	402,33
29	0,0329	0,0454	2,5	0,0328	0,0452	884,73	641,14	16,18	1650	6782,41	387,21
30	0,0338	0,0475	2,5	0,0337	0,0473	890,65	633,77	16,18	1650	6627,42	425,22
31	0,0333	0,0482	2,5	0,0332	0,0480	933,95	645,24	16,18	1650	6869,56	523,30
32	0,0359	0,0501	2,5	0,0358	0,0499	894,08	640,67	16,18	1650	6772,53	415,97
33	0,0364	0,0502	2,5	0,0363	0,0501	909,19	659,25	16,18	1650	7171,17	407,78
34	0,0378	0,0504	2,5	0,0377	0,0503	901,90	676,42	16,18	1650	7549,57	335,54
35	0,0374	0,0517	2,5	0,0373	0,0516	938,21	678,71	16,18	1650	7600,62	438,99
36	0,0387	0,0523	2,5	0,0386	0,0522	932,47	689,99	16,18	1650	7855,52	387,28
37	0,0382	0,0547	2,5	0,0381	0,0546	970,79	677,96	16,67	1700	7813,69	560,33
38	0,039	0,0523	2,5	0,0389	0,0522	976,47	728,15	16,67	1700	9013,40	419,14
39	0,038	0,0534	2,5	0,0379	0,0533	1028,42	731,84	16,67	1700	9104,93	584,02
40	0,0407	0,0552	2,5	0,0406	0,0551	984,72	726,05	16,67	1700	8961,57	453,56
41	0,0409	0,0539	2,5	0,0408	0,0538	1004,31	762,08	17,65	1800	10453,81	421,70
42	0,0419	0,0543	2,5	0,0418	0,0542	1004,16	774,85	17,65	1800	10807,06	374,07
43	0,0427	0,0568	2,5	0,0426	0,0567	1008,73	758,32	17,65	1800	10350,90	451,43
44	0,0427	0,0572	2,5	0,0426	0,0571	1032,11	770,47	18,63	1900	11278,90	520,11
45	0,0429	0,0568	2,5	0,0428	0,0567	1050,57	793,48	18,63	1900	11962,45	502,03
46	0,0444	0,0578	2,5	0,0443	0,0577	1037,56	797,02	18,63	1900	12069,64	436,14
47	0,0456	0,0609	2,5	0,0455	0,0608	1032,16	772,85	18,63	1900	11348,53	511,02
48	0,0467	0,061	2,5	0,0466	0,0609	1029,23	787,95	18,63	1900	11796,49	439,83
49	0,0471	0,0608	2,5	0,0470	0,0607	1041,69	806,97	18,63	1900	12372,79	412,03
50	0,0474	0,0628	2,5	0,0473	0,0627	1056,17	797,17	18,63	1900	12074,21	509,55

T oss P: tempo di primo arrivo osservato onde P
T oss SH: tempo di primo arrivo osservato onde S (S1+S2)
T corr P: tempo di primo arrivo corretto onde P
T corr SH: tempo di primo arrivo corretto onde S (S1+S2)
$V_p$ : velocità onde P
$V_{SH}$ : velocità media onde S
$\gamma$ : Peso di volume
G: Modulo di deformazione a taglio
Ev: Modulo di compressibilità volumetrica

**Tabella 3 – Parametri prova Down-Hole.**

In accordo con la stratigrafia del sondaggio S1 eseguito dalla Ditta *SONDEDILE S.r.l.*, l'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito di ricostruire il seguente modello sismo-stratigrafico (**Figura 12**):

1. il primo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **8.32 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **469.37 m/s** e **215.67 m/s**. Questo è ascrivibile al terreno di riporto;
2. il secondo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **27.17 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **720.00 m/s** e **467.41 m/s**. Questo è associabile a sabbia limosa riscontrata;
3. il terzo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **35.90 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **905.87 m/s** e **653.67 m/s**. Questo è associabile al limo sabbioso riscontrato;
4. il quarto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **40.00 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **990.10 m/s** e **716.00 m/s**. Questo è associabile all'argilla limosa riscontrata;
5. il quinto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **43.00 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1005.73 m/s** e **765.08 m/s**. Questo è associabile alle sabbie riscontrate;
6. infine, si individua il sesto sismo-strato fino alla profondità di **50 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1037.22 m/s** e **788.12 m/s**. Quest'ultimo sismo-strato è associabile alla ghiaia poligenica prelevata.



		Terreno di riporto (TR)
	8,32	
		Sabbia limosa (MSL)
	27,17	
		Limo sabbioso (MS)
	35,89	
		Argilla limosa (M)
	40,19	
		Sabbia (S)
	43,00	
		Ghiaia poligenica (G)
	50,06	

Figura 12 - Modello sismico-stratigrafico

	Profondità (m)	V <sub>P</sub> media (m/s)	V <sub>SH</sub> media (m/s)	γ (kN/mc)	G <sub>medio</sub> (Mpa)	E <sub>v</sub> medio (Mpa)
Strato 1 - TR	9,00	469,37	215,67	14,71	717,97	236,39
Strato 2 - MSL	32,00	720,00	467,41	17,65	4070,00	419,35
Strato 3 - MS	36,00	905,87	653,67	16,18	7058,57	413,74
Strato 4 - M	40,00	990,10	716,00	16,67	8723,39	504,26
Strato 5 - S	43,00	1005,73	765,08	17,65	10537,26	415,73
Strato 6 - G	50,00	1037,22	788,12	18,63	11843,30	475,82

Tabella 4 – Valori medi dei parametri relativi ai 6 sismo-strati individuati.

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:

$$V_{s,eq} = H / \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{V_{s,i}} \right) \quad (1)$$

Dove:

$H$ : profondità del **substrato sismico** (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s;

$N$ : numero strati;

$V_{s,i}$ : velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato (m/s);

$h_i$ : spessore dell' $i$ -esimo strato (in m).

Per depositi con **profondità H del substrato superiore a 30 m**, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro  $V_{s30}$  ottenuto ponendo  $H = 30$  m nell'espressione (1) e considerando la proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

È stato, quindi, determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito per i primi 30 m di profondità dal piano campagna, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{seq} = 352.42$  m/s

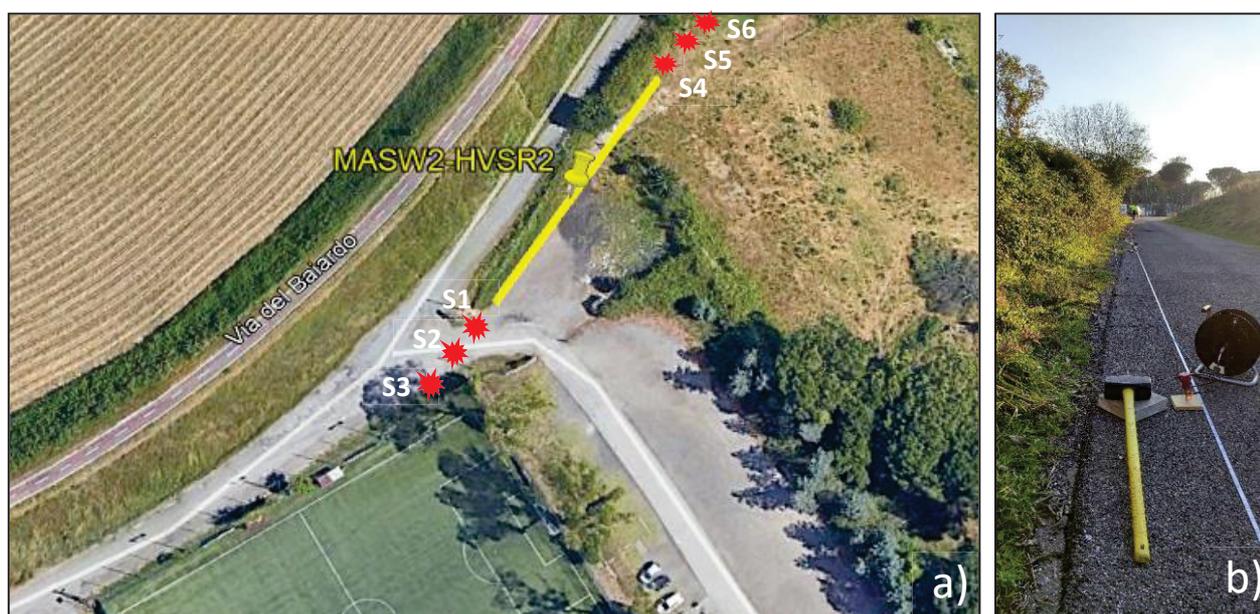
Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

## 2.2 SITO 2

### 2.2.1 MASW 2

La MASW numero 2 è ubicata a lato di via del Baiardo, come riportato in **Figura 13**, in cui è rappresentata anche la posizione dei 6 shots effettuati. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 60 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. Al fine di rendere i geofoni solidali con il terreno, sono state impiegate delle apposite basette per l'utilizzo su asfalto.



**Figura 13**– Ubicazione della MASW n.2 (a) e relativo stendimento (b).

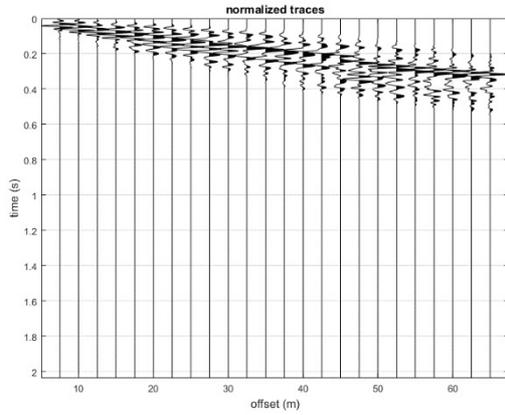
Ai fini dell'elaborazione delle tracce acquisite, sono stati considerati i parametri riportati nella seguente tabella.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	50
Velocità minima di elaborazione [m/s]	120
Velocità massima di elaborazione [m/s]	1500

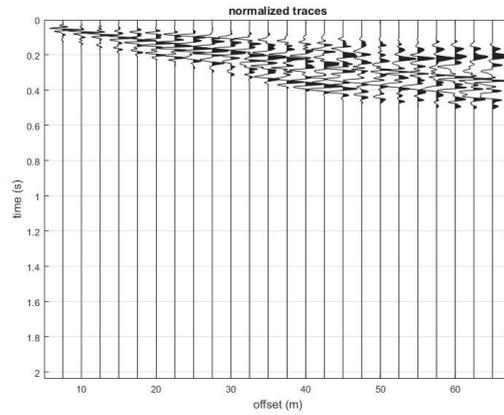
**Tabella 5** – Parametri utilizzati per l'elaborazione dei dati

*Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati:*

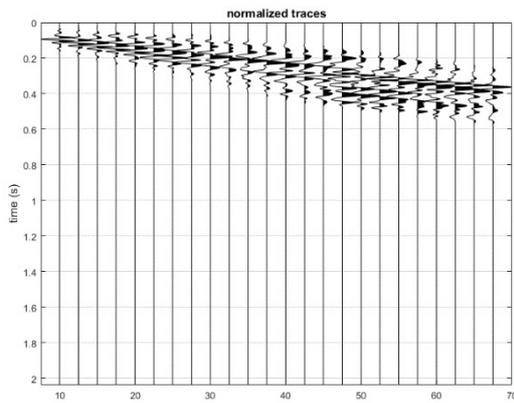
dataset: S1.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



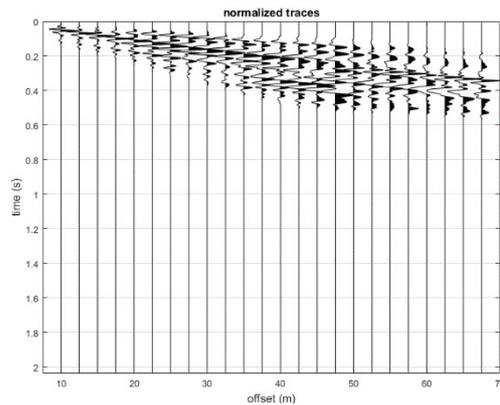
dataset: S4.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



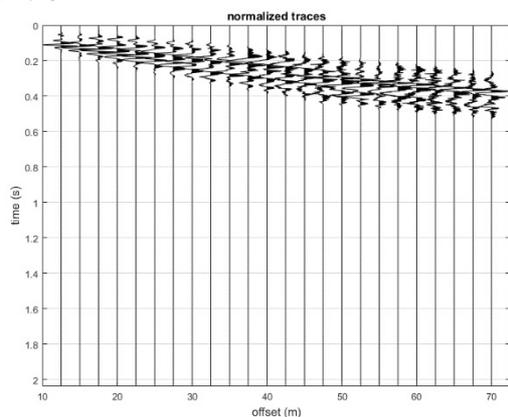
dataset: S2.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



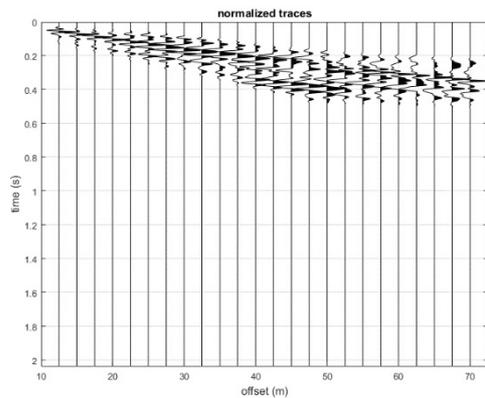
dataset: S5.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: S3.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m

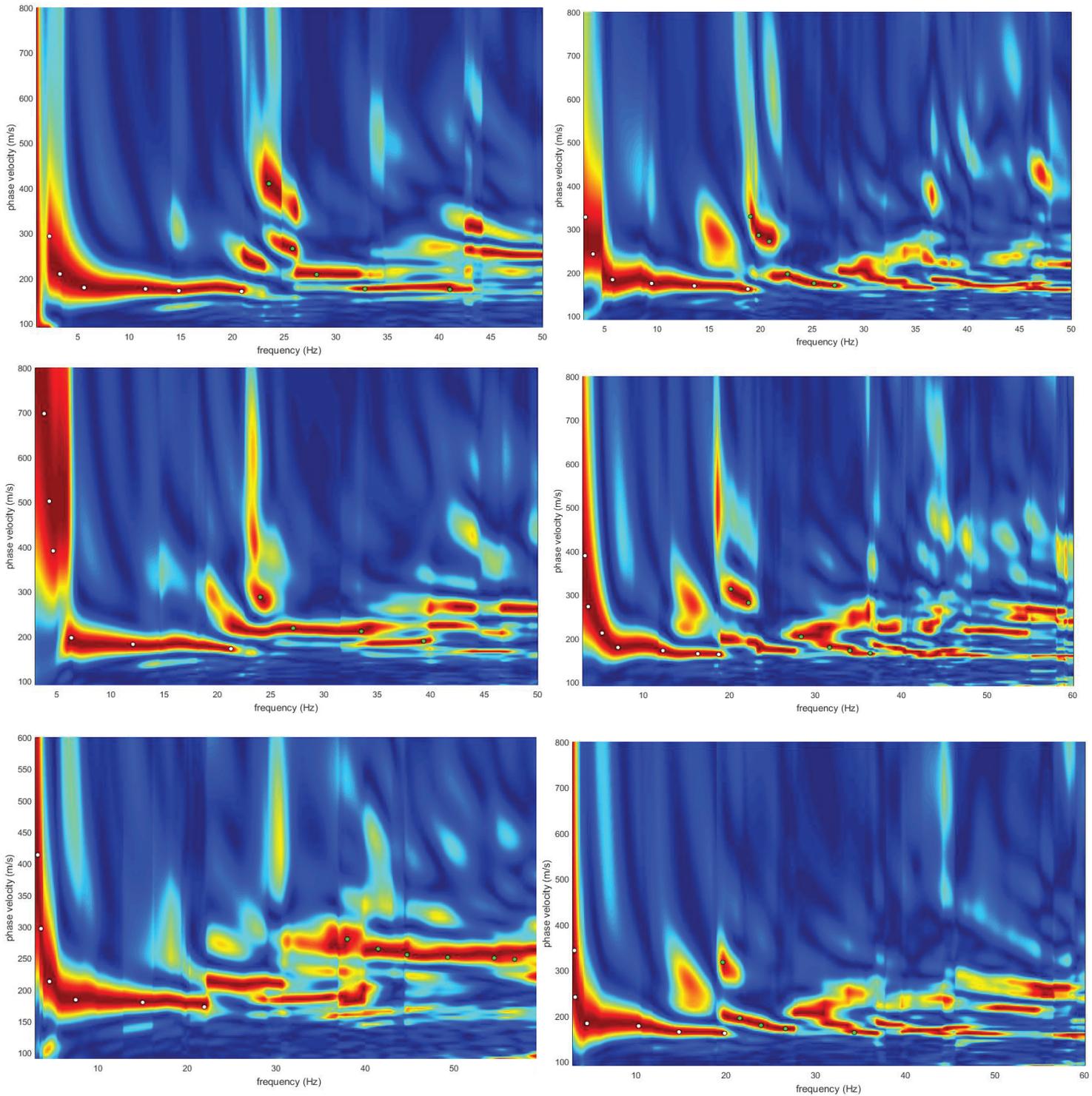


dataset: S6.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



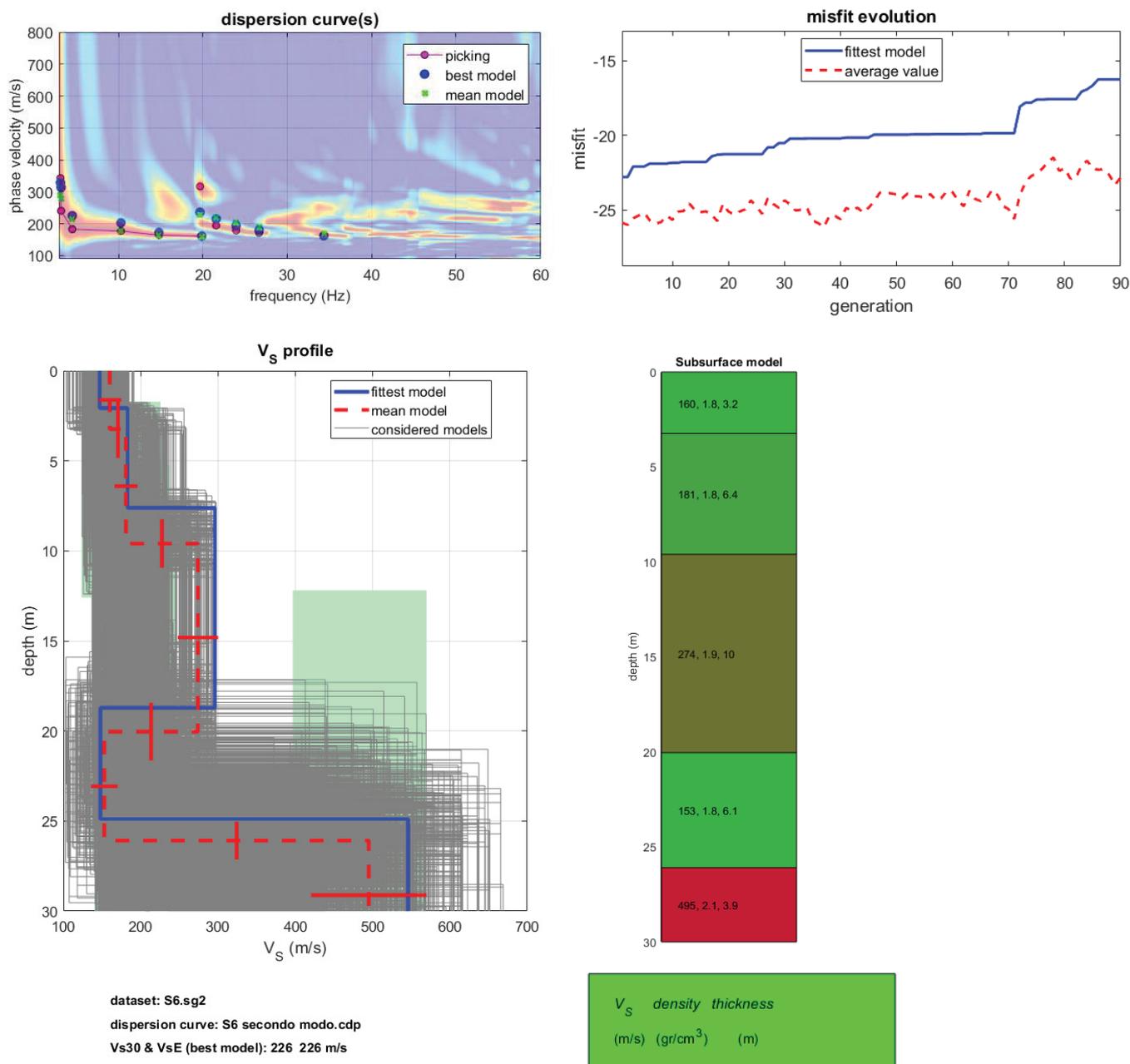
**Figura 14** – Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati.

*Spettri di frequenza – velocità di fase.*



**Figura 15** – Spettri di velocità di fase – frequenza delle tracce acquisite.

*Risultati dell'inversione e modello sismo stratigrafico del sottosuolo:*



**Figura 16** – Risultati dell’approccio di inversione (in alto) e relativo modello sismo-stratigrafico del sottosuolo (in basso).

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo ritenuto rappresentativo dell'area investigata. E' stato determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{s30}$  e  $V_{s,eq} = 226$  m/s

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

## 2.2.2 HVSR 2

Le indagini HVSR sono state svolte in un terreno ai lati di via del Baiardo, come indicato in **Figura 17**. Il TROMINO è stato posizionato al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche del sito, e lasciato acquisire in modo manuale per un tempo di 30 minuti.



**Figura 17** – Ubicazione indagine HVSR 2.

### Risultati

Instrument: TEB-0504/01-19

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 89

Start recording: 12/01/2021 14:39:15      End recording: 12/01/2021 15:09:15

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 51% trace (manual window selection)

Sampling rate: 512 Hz

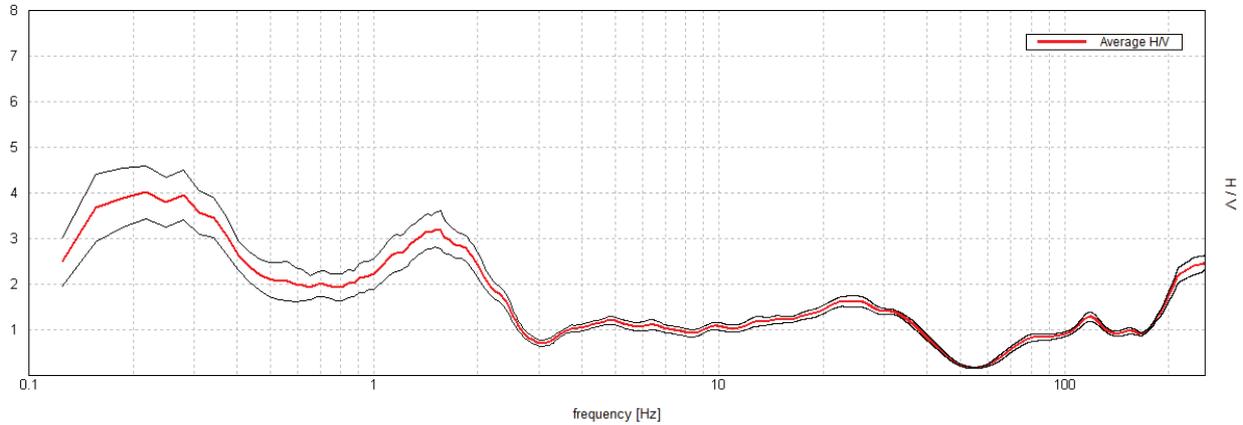
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

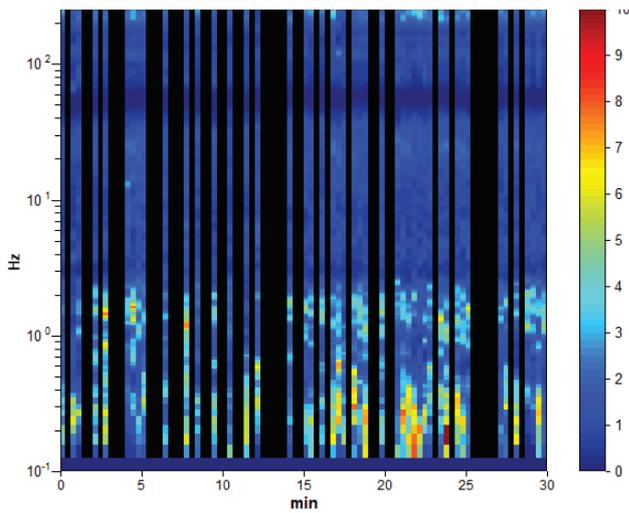
Smoothing: 10%

### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

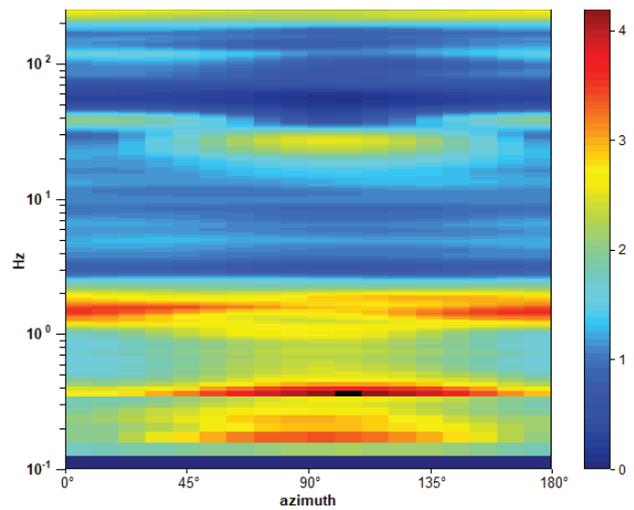
Max. H/V at  $0.22 \pm 0.39$  Hz. (In the range 0.2 - 20.0 Hz).



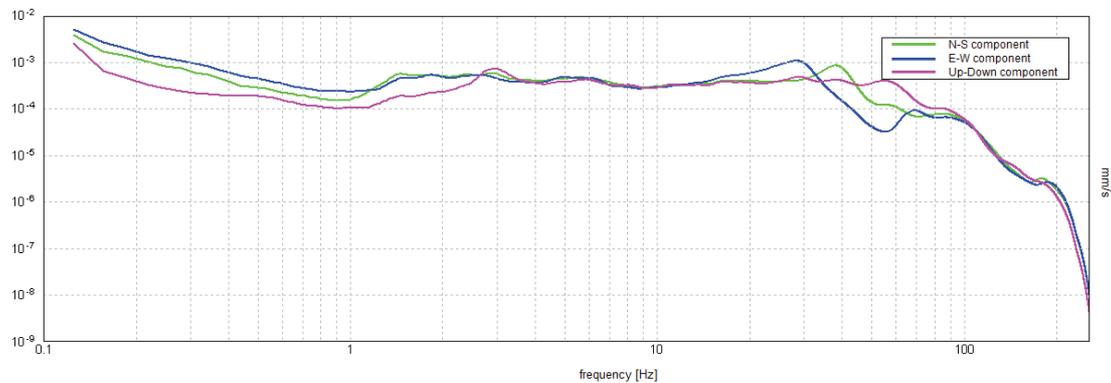
### H/V TIME HISTORY



### DIRECTIONAL H/V



### SINGLE COMPONENT SPECTRA



Max. H/V at  $0.22 \pm 0.39$  Hz (in the range 0.2 - 20.0 Hz).

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.22 > 0.50$		<b>NO</b>
$n_c(f_0) > 200$	$201.3 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 12 times	<b>OK</b>	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	<b>OK</b>	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.594 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$4.01 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 1.77781  < 0.05$		<b>NO</b>
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.3889 < 0.04375$		<b>NO</b>
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.5719 < 2.5$	<b>OK</b>	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine di sismica passiva è stato possibile identificare la frequenza di risonanza del sito, corrispondente al picco di frequenza del rapporto spettrale H/V pari a  $0.22 \pm 0.39$  Hz.

### 2.2.3 DOWNHOLE S6

L'indagine Down-Hole è stata svolta nel foro di sondaggio (S6), ubicato in un'area adiacente via del Baiardo, come riportato in **Figura 18**, condizionato con tubo PVC ed opportunamente cementato, in modo da rendere solidale il tubo con il terreno circostante.



**Figura 18.** Ubicazione del foro di sondaggio (a) ed esecuzione della prova Down-hole in sito (b)

L'energizzazione per la generazione delle onde di compressione (P) è stata realizzata con mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per facilitare la generazione ed il rilievo delle onde trasversali con adeguata componente sul piano orizzontale (SH) si è utilizzato una traversina in legno, opportunamente ancorata (Dacia Duster 4X4). Sono state effettuate, quindi, per ogni stazionamento, due energizzazioni per le onde S (con inversione di fase), con piano di oscillazione prevalentemente orizzontale, e una verticale per la generazione prevalente delle onde P. Le energizzazioni sono state realizzate ad una distanza di 2,5 metri dal boccaforo.

Nella **Tabella 6** sono riportati i valori dei tempi d'arrivo relativi alle onde P e S, i tempi corretti sulla verticale (T corr. P e T corr. S), per tenere conto della distanza del punto di energizzazione dal foro di sondaggio, i valori delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  relativi all'intervallo corrispondente ed infine i principali moduli elastici dinamici: il modulo di taglio (G) e il modulo di compressibilità volumetrica ( $E_v$ ).

Profondità (m)	T... P (s)	T... SH (s)	Dist. Scoppio-Foro (m)	T... P (s)	T... SH (s)	$V_p$ (m/s)	$V_{SH}$ (m/s)	$\gamma$ (kN/mc)	$\rho$ (kg/mc)	G (Mpa)	$E_v$ (Mpa)
1	0,0088	0,0194	2,5	0,0033	0,0072	305,98	138,79	16,18	1650	317,85	112,09
2	0,0089	0,0247	2,5	0,0056	0,0154	359,73	129,62	16,18	1650	277,21	176,55
3	0,0079	0,027	2,5	0,0061	0,0207	494,32	144,63	16,18	1650	345,16	357,16
4	0,0082	0,0282	2,5	0,0070	0,0239	575,24	167,27	16,18	1650	461,65	484,44
5	0,0111	0,0322	2,5	0,0099	0,0288	503,62	173,61	16,18	1650	497,30	352,19
6	0,0107	0,0437	2,5	0,0099	0,0403	607,48	148,74	16,18	1650	365,05	560,22
7	0,0107	0,0458	2,5	0,0101	0,0431	694,68	162,29	17,65	1800	474,10	805,42
8	0,0133	0,0459	2,5	0,0127	0,0438	630,19	182,60	17,65	1800	600,20	634,82
9	0,0134	0,0459	2,5	0,0129	0,0442	697,07	203,50	17,65	1800	745,44	775,25
10	0,0148	0,0453	2,5	0,0144	0,0439	696,47	227,54	17,65	1800	931,98	748,86
11	0,017	0,0465	2,5	0,0166	0,0453	663,56	242,59	17,65	1800	1059,31	651,32
12	0,0182	0,0477	2,5	0,0178	0,0467	673,50	256,97	17,65	1800	1188,64	657,99
13	0,0174	0,0474	2,5	0,0171	0,0465	760,82	279,29	20,59	2100	1638,03	997,16
14	0,0179	0,0505	2,5	0,0176	0,0497	794,50	281,61	20,59	2100	1665,42	1103,51
15	0,0181	0,0537	2,5	0,0179	0,0530	840,16	283,18	20,59	2100	1684,04	1257,79
16	0,0187	0,0537	2,5	0,0185	0,0531	866,00	301,57	20,59	2100	1909,79	1320,26
17	0,019	0,0552	2,5	0,0188	0,0546	904,36	311,28	20,59	2100	2034,84	1446,21
18	0,02	0,0561	2,5	0,0198	0,0556	908,64	323,94	20,59	2100	2203,62	1440,00
19	0,0193	0,0552	2,5	0,0191	0,0547	992,34	347,17	20,59	2100	2531,06	1732,98
20	0,0211	0,0572	2,5	0,0209	0,0568	955,24	352,37	20,59	2100	2607,48	1568,57
21	0,0217	0,0589	2,5	0,0215	0,0585	974,58	359,05	20,59	2100	2707,32	1633,60
22	0,0225	0,0579	2,5	0,0224	0,0575	984,07	382,41	20,59	2100	3071,00	1624,16
23	0,023	0,0601	2,5	0,0229	0,0597	1005,89	384,95	20,59	2100	3111,91	1709,89
24	0,024	0,0587	2,5	0,0239	0,0584	1005,41	411,07	19,61	2000	3379,58	1571,09
25	0,0239	0,061	2,5	0,0238	0,0607	1051,24	411,88	19,61	2000	3392,91	1757,83
26	0,0226	0,0622	2,5	0,0225	0,0619	1155,75	419,93	19,61	2000	3526,90	2201,26
27	0,0238	0,0625	2,5	0,0237	0,0622	1139,31	433,85	19,61	2000	3764,48	2094,11
28	0,0239	0,0631	2,5	0,0238	0,0628	1176,21	445,51	16,18	2000	3969,50	2237,67
29	0,0243	0,0638	2,5	0,0242	0,0636	1197,84	456,23	16,18	2000	4162,94	2314,59
30	0,025	0,0646	2,5	0,0249	0,0644	1204,16	466,01	16,18	2000	4343,23	2320,90
31	0,0251	0,0635	2,5	0,0250	0,0633	1239,07	489,77	16,18	2000	4797,57	2430,91
32	0,0249	0,0642	2,5	0,0248	0,0640	1289,06	499,96	16,18	2000	4999,22	2656,77
33	0,0263	0,065	2,5	0,0262	0,0648	1258,35	509,15	16,18	2000	5184,62	2475,60
34	0,0267	0,0652	2,5	0,0266	0,0650	1276,85	522,88	16,18	2000	5468,07	2531,59
35	0,026	0,0659	2,5	0,0259	0,0657	1349,58	532,46	16,18	2000	5670,29	2886,71
36	0,026	0,0659	2,5	0,0259	0,0657	1387,95	547,60	16,18	2000	5997,27	3053,17
37	0,026	0,0659	2,5	0,0259	0,0658	1426,32	562,74	19,61	2000	6333,46	3224,33
38	0,0262	0,0656	2,5	0,0261	0,0655	1453,52	580,52	19,61	2000	6740,08	3326,75
39	0,0271	0,0671	2,5	0,0270	0,0670	1442,07	582,41	19,61	2000	6784,14	3254,57
40	0,0259	0,0658	2,5	0,0258	0,0657	1547,42	609,09	19,61	2000	7419,79	3799,68
41	0,0278	0,0668	2,5	0,0277	0,0667	1477,56	614,91	19,61	2000	7562,35	3358,05
42	0,0278	0,0673	2,5	0,0278	0,0672	1513,47	625,18	19,61	2000	7816,90	3538,90
43	0,029	0,0691	2,5	0,0290	0,0690	1485,26	623,34	19,61	2000	7770,99	3375,88
44	0,0269	0,0686	2,5	0,0269	0,0685	1638,33	642,43	19,61	2000	8254,43	4267,63
45	0,0271	0,0688	2,5	0,0271	0,0687	1663,08	655,08	19,61	2000	8582,55	4387,31
46	0,0281	0,0711	2,5	0,0281	0,0710	1639,43	647,93	19,61	2000	8396,29	4255,93
47	0,0281	0,0719	2,5	0,0281	0,0718	1674,96	654,61	20,59	2100	8998,79	4691,71
48	0,0276	0,073	2,5	0,0276	0,0729	1741,49	658,43	20,59	2100	9104,01	5154,97
49	0,029	0,0727	2,5	0,0290	0,0726	1691,85	674,88	20,59	2100	9564,71	4735,67
50	0,0308	0,0757	2,5	0,0308	0,0756	1625,40	661,33	20,59	2100	9184,42	4323,48

T <sub>oss P</sub> : tempo di primo arrivo osservato onde P		
T <sub>oss SH</sub> : tempo di primo arrivo osservato onde S (S1+S2)		
T <sub>corr P</sub> : tempo di primo arrivo corretto onde P		
T <sub>corr SH</sub> : tempo di primo arrivo corretto onde S (S1+S2)		
$V_p$ : velocità onde P		
$V_{SH}$ : velocità media onde S		
$\gamma$ : Peso di volume		
G: Modulo di deformazione a taglio		
$E_v$ : Modulo di compressibilità volumetrica		

**Tabella 6** – Parametri prova Down-Hole.

In accordo con la stratigrafia del sondaggio S6 eseguito dalla Ditta *SONDEDILE S.r.l.*, l'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito di ricostruire il seguente modello sismo-stratigrafico (**Figura 15**):

1. il primo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **6 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **474,39 m/s** e **150,44 m/s**. Questo è ascrivibile ad un limo sabbioso argilloso;
2. il secondo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **14 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **677,97 m/s** e di **212,94 m/s**. Il sismo-strato è associabile ad una sabbia limosa;
3. il terzo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **23 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **907,93 m/s** e di **327,89 m/s**. Il sismo-strato è associabile ad una sabbia debolmente ghiaiosa a luoghi limoso argillosa;
4. il quarto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **30 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1116,98 m/s** e di **428,68 m/s**. Il sismo-strato è associabile a sabbia limoso argillosa;
5. il quinto sismo-strato fino alla profondità di **46 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1428,91 m/s** e **571,26 m/s**. Quest'ultimo sismo-strato è associabile ad una sabbia limosa;
6. il sesto sismo-strato fino alla profondità di **50 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1686,93 m/s** e **658,96 m/s**. Quest'ultimo sismo-strato è associabile ad una sabbia debolmente ghiaiosa a luoghi limoso argillosa.

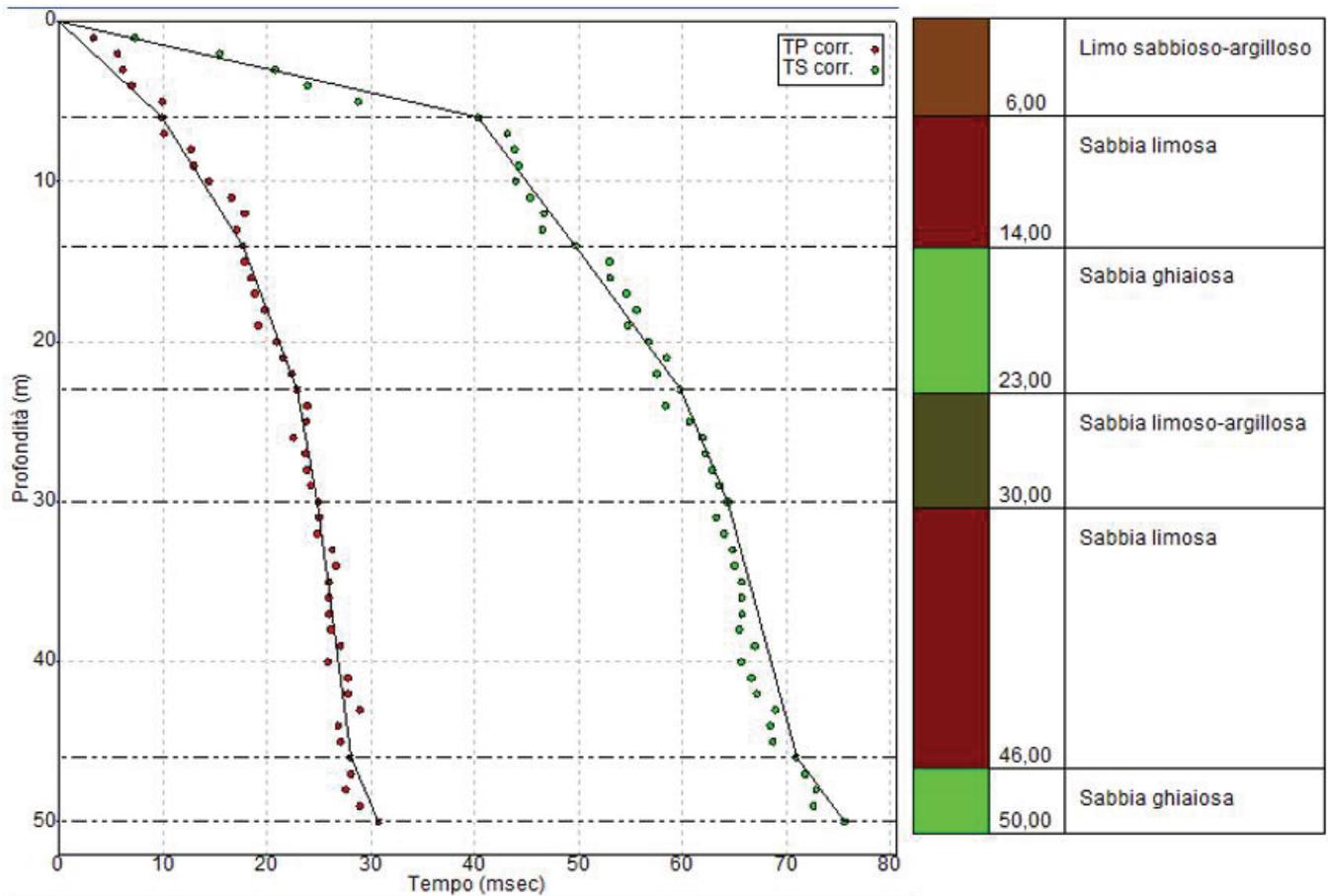


Figura 19. Modello sismico-stratigrafico

	Profondità Letto(m)	Spessore (m)	V <sub>P</sub> media(m/s)	V <sub>SH</sub> media (m/s)	γ (kN/mc)	G <sub>medio</sub> (Mpa)	E <sub>v</sub> medio (Mpa)
Strato 1 - LSA	6	6,00	474,39	150,44	14,71	377,37	340,44
Strato 2 - SL	14	8,00	677,97	212,94	17,65	875,34	728,88
Strato 3 - SG	23	9,00	907,93	327,89	16,18	2287,68	1439,47
Strato 4 - SLA	30	7,00	1116,98	428,68	16,67	3706,43	2025,92
Strato 5 - SL	46	16,00	1428,91	571,26	17,65	6595,37	3243,81
Strato 6 - SG	50	4,00	1686,93	658,96	18,63	9015,95	4709,57

Tabella 7 – Valori medi dei parametri relativi ai 6 sismo-strati individuati.

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:

$$V_{s,eq} = H / \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{V_{s,i}} \right) \quad (1)$$

Dove:

$H$ : profondità del **substrato sismico** (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s;

$N$ : numero strati;

$V_{s,i}$ : velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato (m/s);

$h_i$ : spessore dell' $i$ -esimo strato (in m).

Per depositi con **profondità H del substrato superiore a 30 m**, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro  $V_{s30}$  ottenuto ponendo  $H = 30$  m nell'espressione (1) e considerando la proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

È stato, quindi, determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito per i primi 30 m di profondità dal piano campagna, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{seq} = 251,30$  m/s

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

## 2.3 SITO 3

### 2.3.1 MASW 3

La MASW numero 3 è ubicata alla fine di via Marciana Marina, lungo una sponda del fiume, come riportato in **Figura 20**, in cui è rappresentata anche la posizione dei 6 shots effettuati. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 60 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. Al fine di rendere i geofoni solidali con il terreno, sono state impiegate delle apposite basette per l'utilizzo su asfalto.



**Figura 20** – Ubicazione della MASW n.3 (a) e relativo stendimento (b).

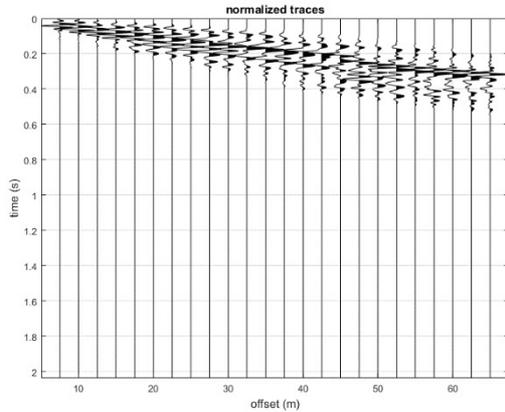
Ai fini dell'elaborazione delle tracce acquisite, sono stati considerati i parametri riportati nella seguente tabella.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	50
Velocità minima di elaborazione [m/s]	120
Velocità massima di elaborazione [m/s]	1500

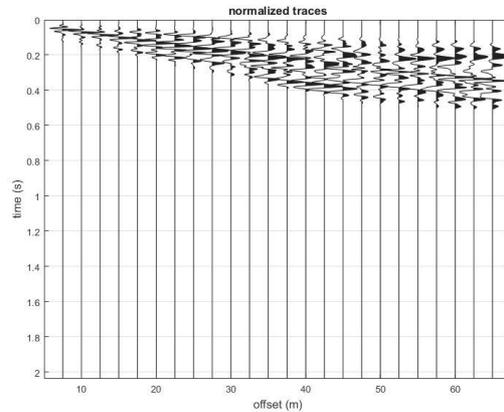
**Tabella 8** – Parametri utilizzati per l'elaborazione dei dati

*Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati:*

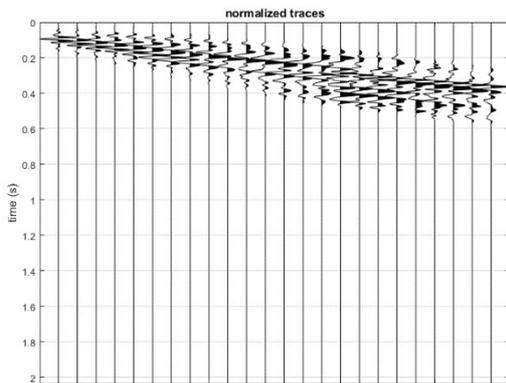
dataset: S1.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



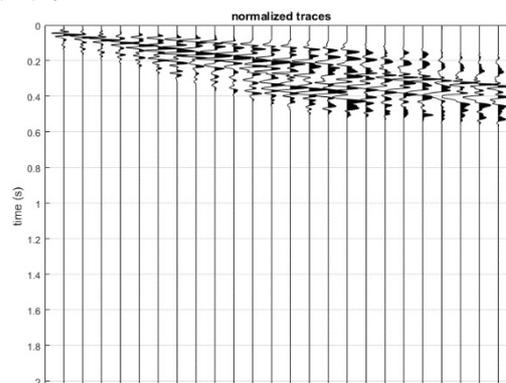
dataset: S4.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



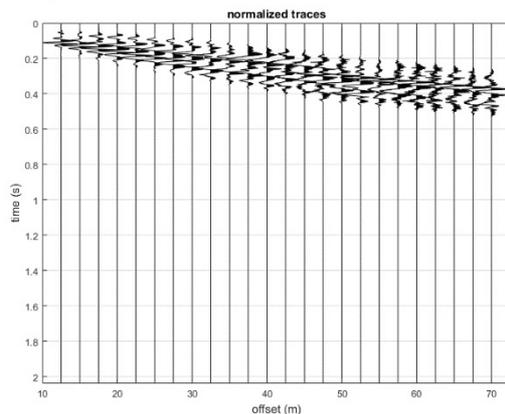
dataset: S2.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



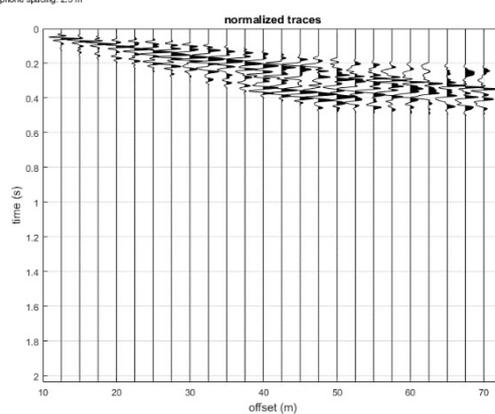
dataset: S5.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: S3.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m

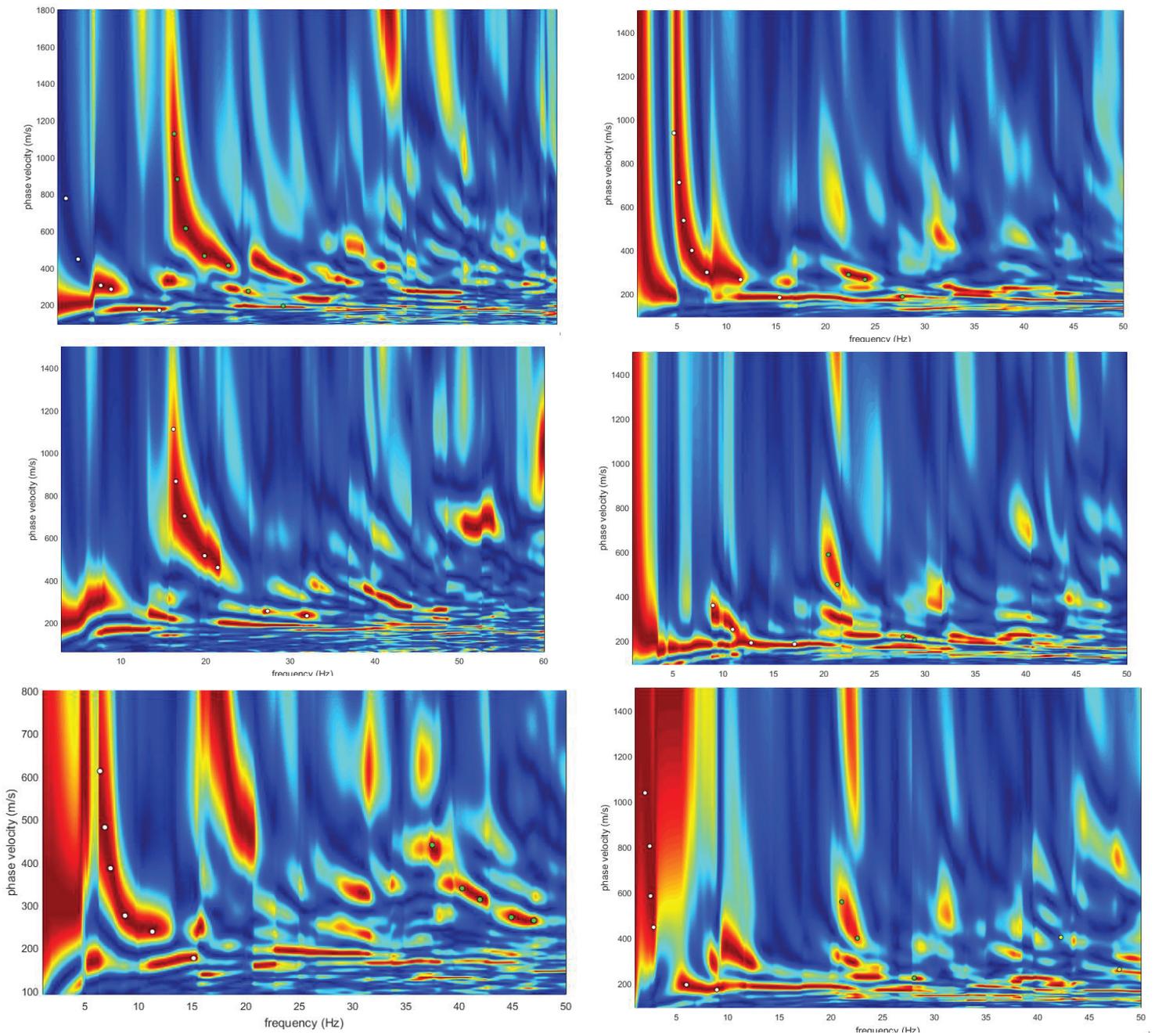


dataset: S6.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



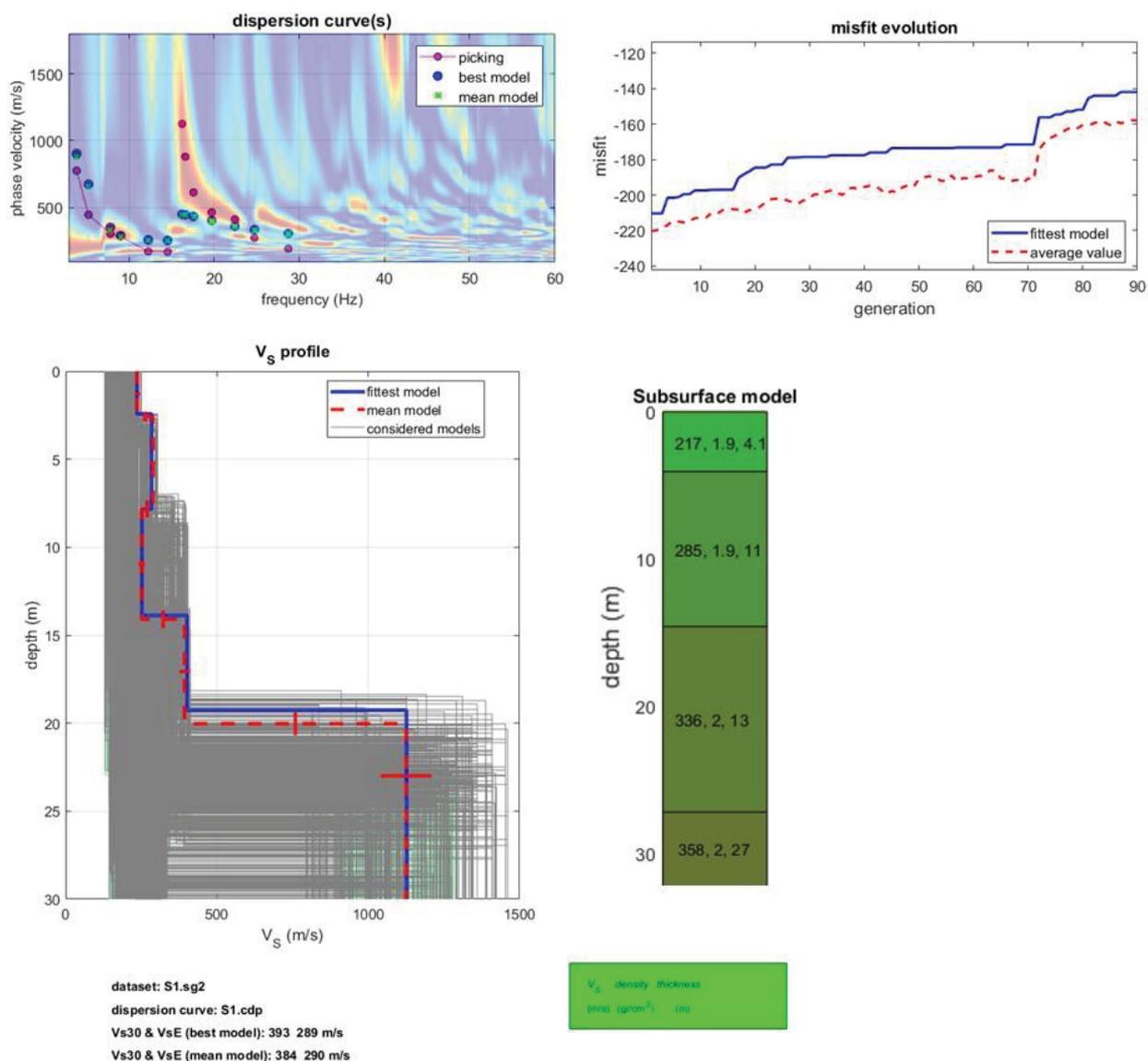
**Figura 21** – Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati.

*Spettri di frequenza – velocità di fase.*



**Figura 22** – Spettri di velocità di fase – frequenza delle tracce acquisite.

*Risultati dell'inversione e modello sismo stratigrafico del sottosuolo:*



**Figura 23** – Risultati dell’approccio di inversione (in alto) e relativo modello sismo-stratigrafico del sottosuolo (in basso).

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo ritenuto rappresentativo dell'area investigata. E' stato determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

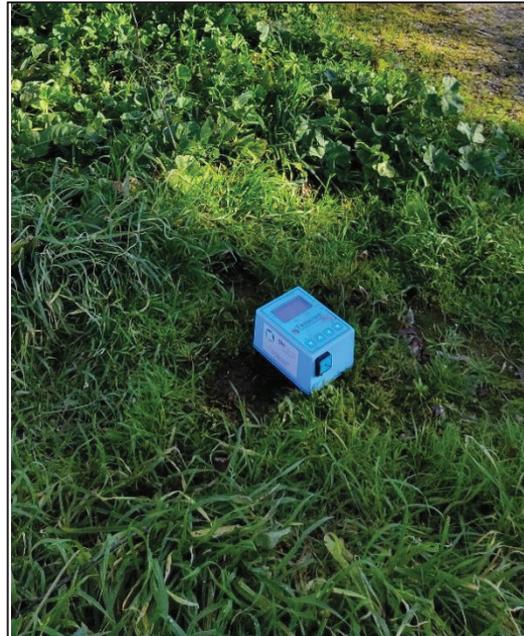
$V_{s30}$  e  $V_{s,eq}$  = **393 m/s e 289 m/s**

Categoria di suolo: **E**

Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C (Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s) o D (Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, caratterizzati da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s), con profondità del substrato non superiore a 30 m.

### 2.3.2 HVSR 3

Le indagini HVSR sono state svolte alla fine di via Marciana Marina, lungo una sponda del fiume, come indicato in **Figura 22**. Il TROMINO è stato posizionato al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche del sito, e lasciato acquisire in modo manuale per un tempo di 30 minuti.



**Figura 24** – Ubicazione indagine HVSR 3.

### Risultati

Instrument: TEB-0504/01-19

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 89

Start recording: 16/01/2021 07:45:09      End recording: 16/01/2021 08:15:09

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 80% trace (manual window selection)

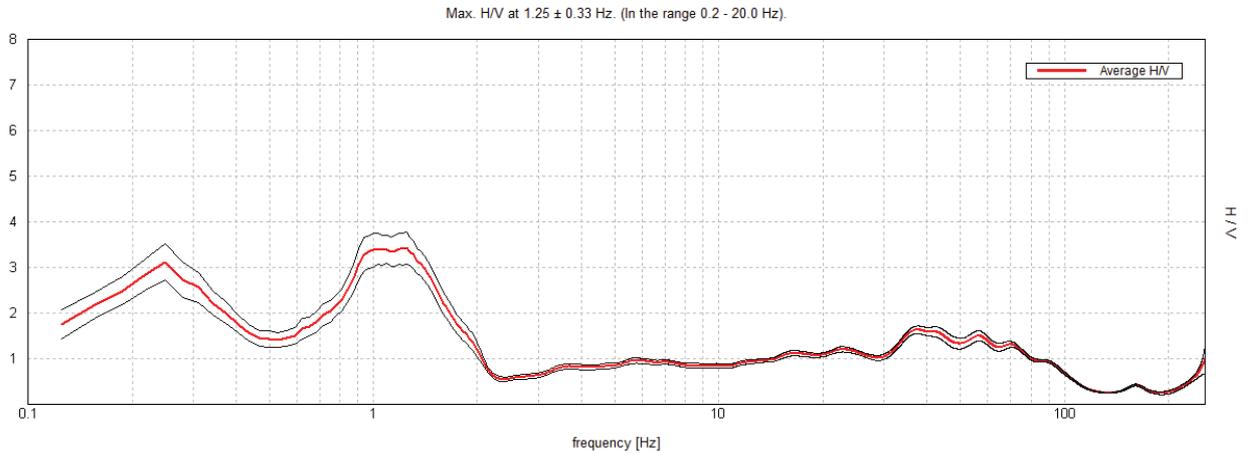
Sampling rate: 512 Hz

Window size: 20 s

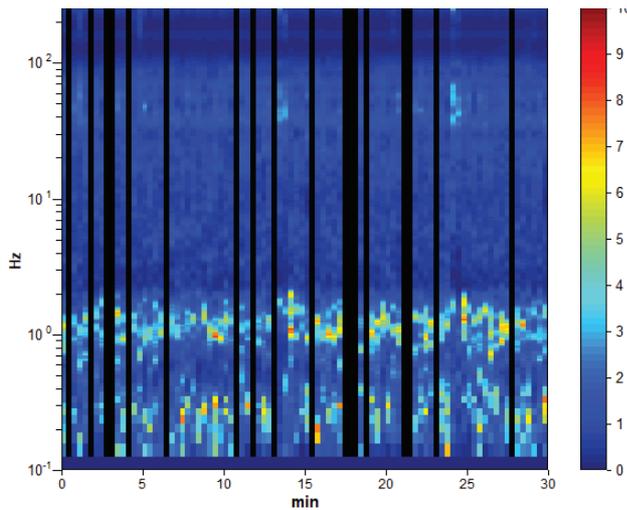
Smoothing type: Triangular window

Smoothing: 10%

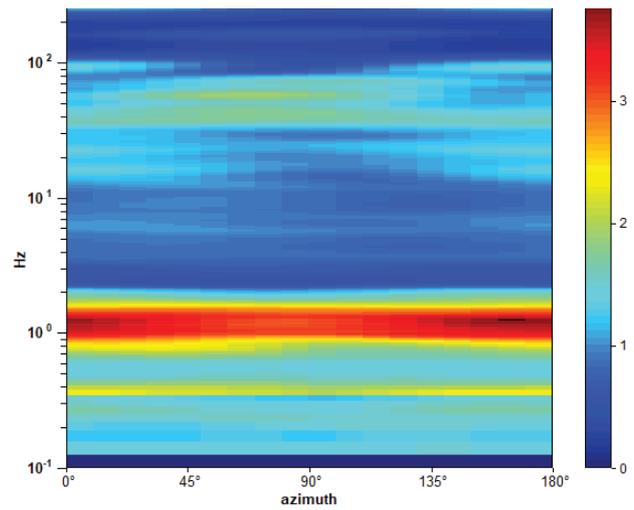
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO



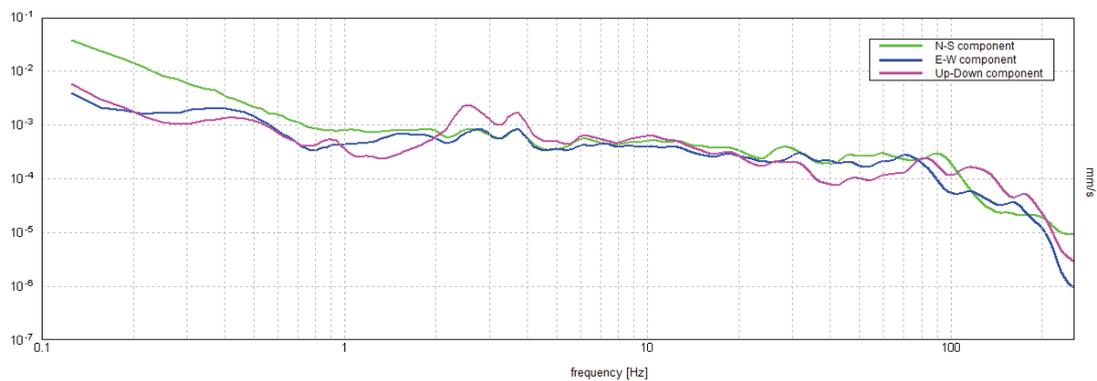
H/V TIME HISTORY



DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA



Max. H/V at  $1.25 \pm 0.33$  Hz (in the range 0.2 - 20.0 Hz).

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.25 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1800.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 61 times	OK	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.656 Hz	OK	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.781 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.43 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.26775  < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.33469 < 0.125$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3527 < 1.78$	OK	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$

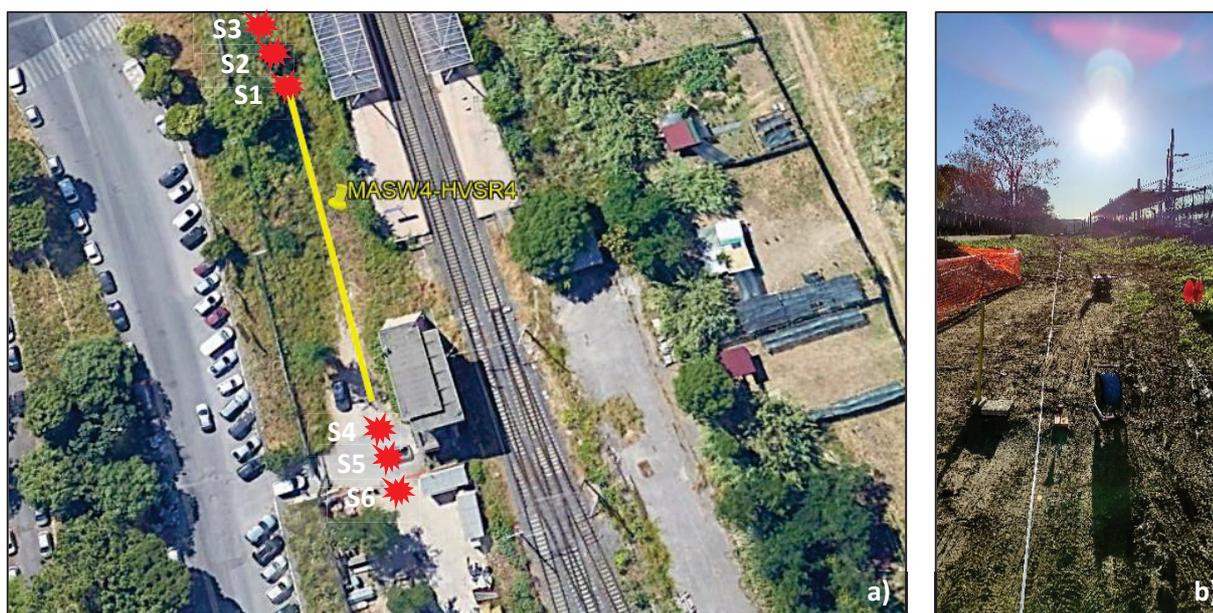
Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine di sismica passiva è stato possibile identificare la frequenza di risonanza del sito, corrispondente al picco di frequenza del rapporto spettrale **H/V pari a  $1.25 \pm 0.33$  Hz.**

## 2.4 SITO 4

### 2.4.1 MASW 4

La MASW numero 4 è adiacente alla stazione di Val D'Ala, come riportato in **Figura 23**, in cui è rappresentata anche la posizione dei 6 shots effettuati. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 60 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. Al fine di rendere i geofoni solidali con il terreno, sono state impiegate delle apposite basette per l'utilizzo su asfalto.



**Figura 25** – Ubicazione della MASW n.4 (a) e relativo stendimento (b).

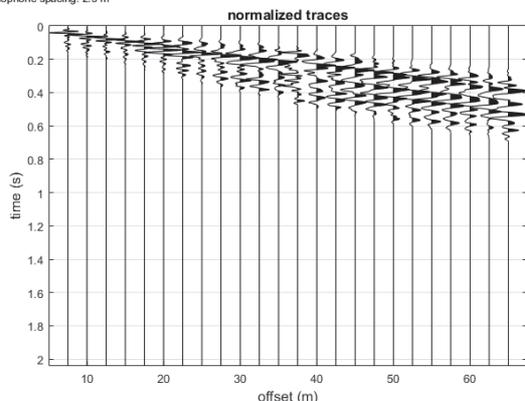
Ai fini dell'elaborazione delle tracce acquisite, sono stati considerati i parametri riportati nella seguente tabella.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	50
Velocità minima di elaborazione [m/s]	120
Velocità massima di elaborazione [m/s]	1500

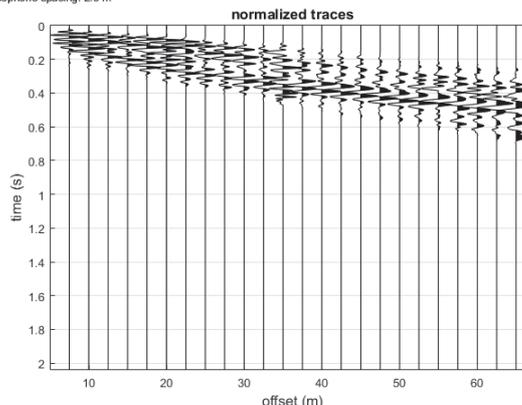
**Tabella 9**– Parametri utilizzati per l'elaborazione dei dati

*Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati:*

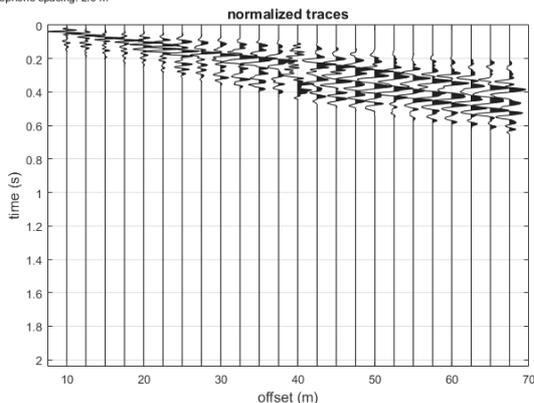
dataset: S1d.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



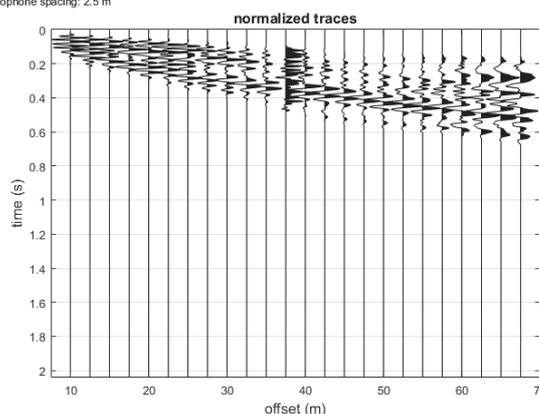
dataset: S4.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



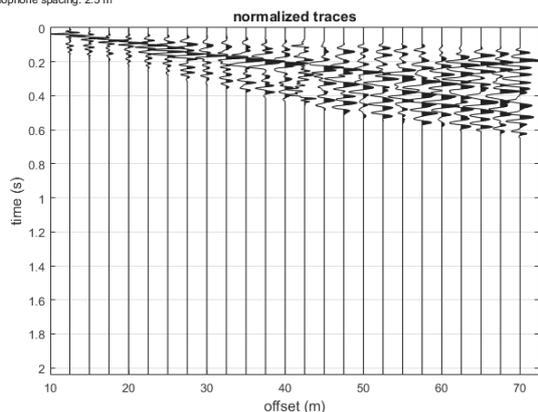
dataset: S2.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



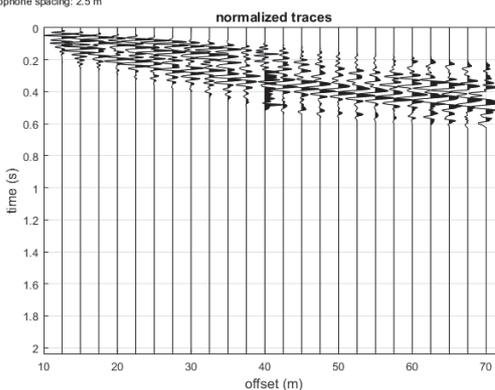
dataset: S5.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: S3.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m

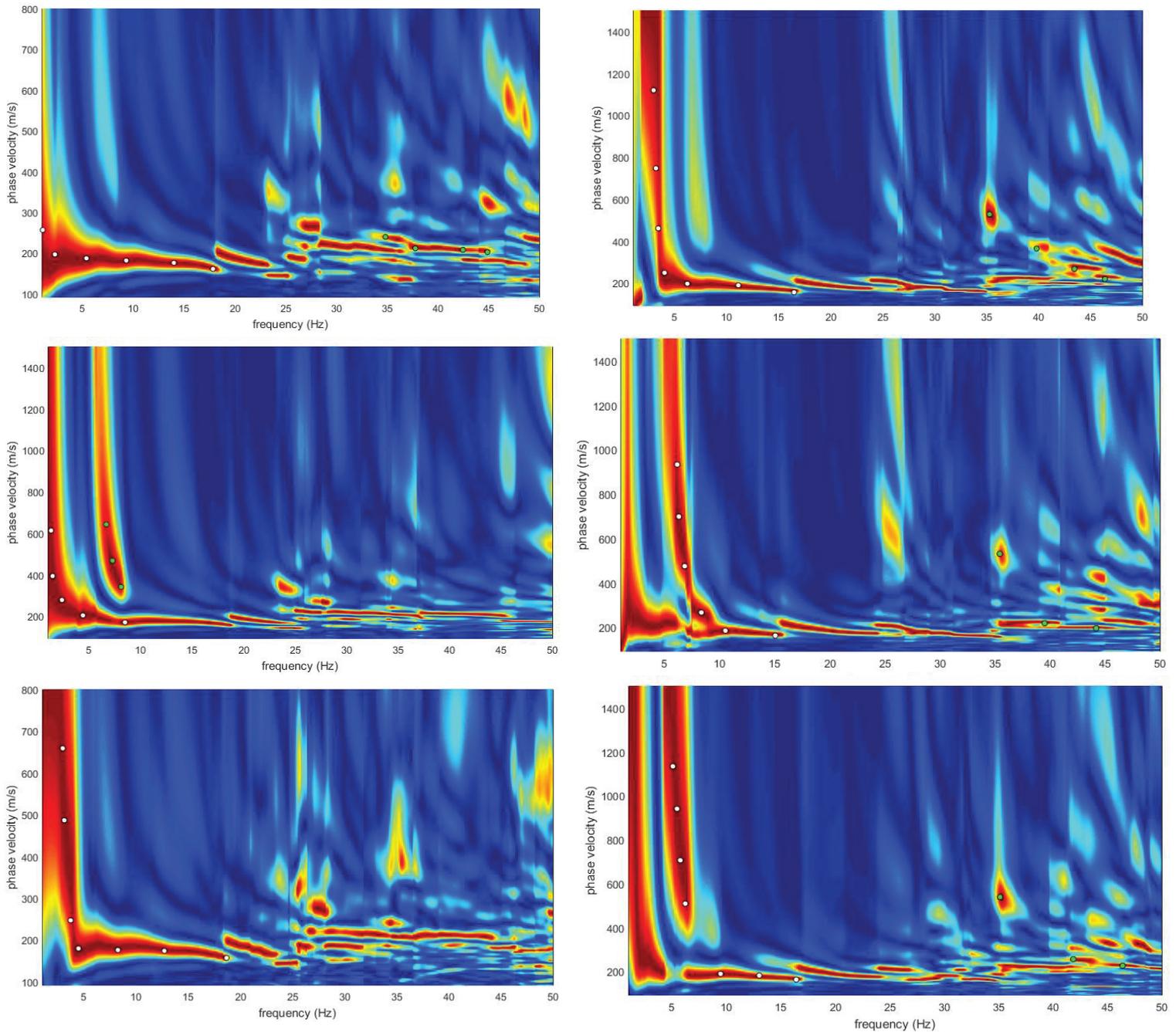


dataset: S6b.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



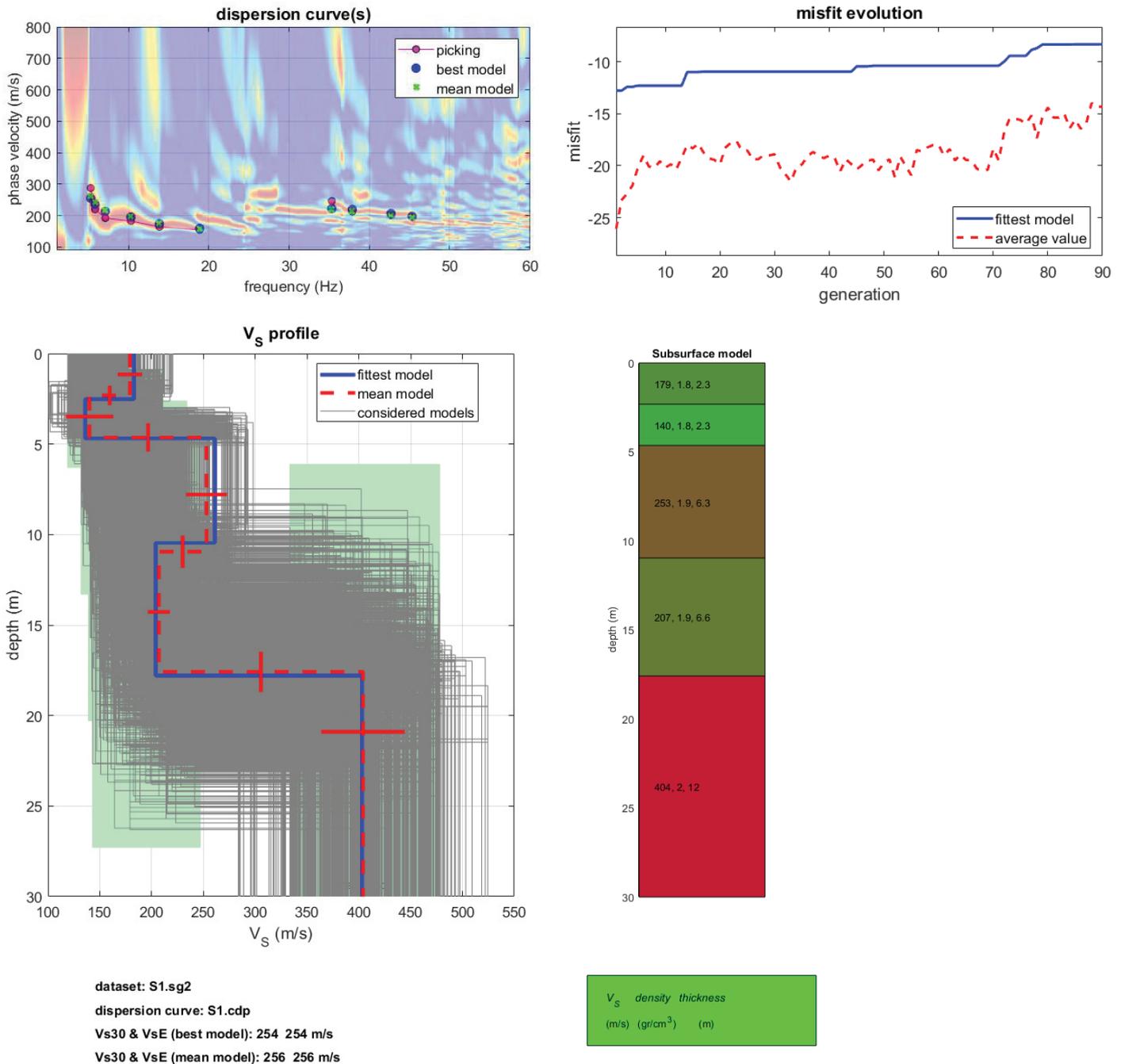
**Figura 26** – Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati.

*Spettri di frequenza – velocità di fase.*



**Figura 27** – Spettri di velocità di fase – frequenza delle tracce acquisite.

*Risultati dell'inversione e modello sismo stratigrafico del sottosuolo:*



**Figura 28** – Risultati dell’approccio di inversione (in alto) e relativo modello sismo-stratigrafico del sottosuolo (in basso).

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo ritenuto rappresentativo dell'area investigata. E' stato determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{s30}$  e  $V_{s,eq} = 254$  m/s

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

## 2.4.2 HVSR 4

Le indagini HVSR sono state svolte in un'area adiacente alla stazione di Val D'Ala, come indicato in **Figura 27**. Il TROMINO è stato posizionato al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche del sito, e lasciato acquisire in modo manuale per un tempo di 30 minuti.



**Figura 29** – Ubicazione indagine HVSR 4.

### Risultati

Instrument: TEB-0504/01-19

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 89

Start recording: 16/01/2021 09:17:43      End recording: 16/01/2021 09:47:43

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 48% trace (manual window selection)

Sampling rate: 512 Hz

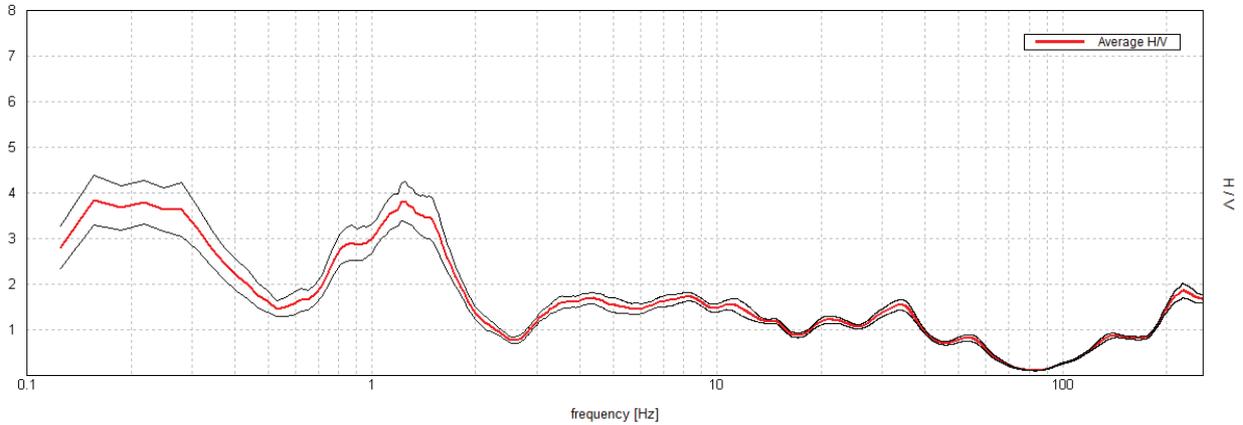
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

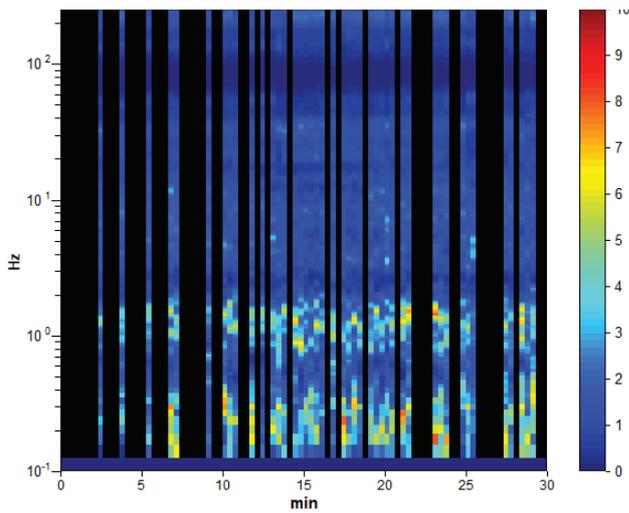
Smoothing: 10%

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

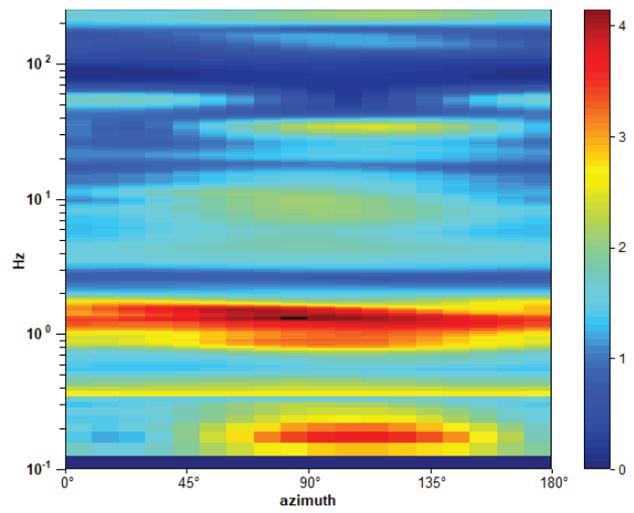
Max. H/V at 1.25 ± 0.79 Hz. (In the range 0.2 - 20.0 Hz).



H/V TIME HISTORY



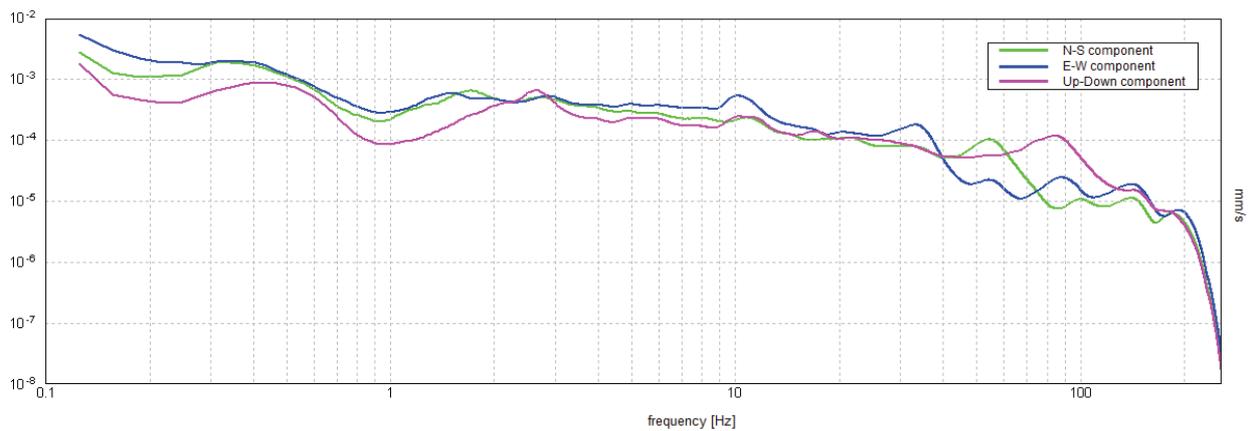
DIRECTIONAL H/V



SINGLE

COMPONENT

SPECTRA



Max. H/V at  $1.25 \pm 0.79$  Hz (in the range 0.2 - 20.0 Hz).

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.25 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1075.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 61 times	OK	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.688 Hz	OK	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.844 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.81 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.63187  < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.78984 < 0.125$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.4379 < 1.78$	OK	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine di sismica passiva è stato possibile identificare la frequenza di risonanza del sito, corrispondente al picco di frequenza del rapporto spettrale H/V pari a  $1.25 \pm 0.79$  Hz.

## 2.5 SITO 5

### 2.5.1 MASW 5

La MASW numero 5 è ubicata in Via Fiesole, adiacente all'area ferroviaria, come riportato in **Figura 30**, in cui è rappresentata anche la posizione dei 6 shots effettuati. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 60 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. Al fine di rendere i geofoni solidali con il terreno, sono state impiegate delle apposite basette per l'utilizzo su asfalto.



**Figura 30** – Ubicazione della MASW n.5 (a) e relativo stendimento (b).

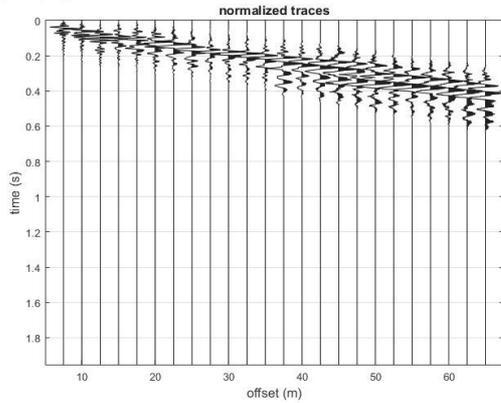
Ai fini dell'elaborazione delle tracce acquisite, sono stati considerati i parametri riportati nella seguente tabella.

Frequenza minima di elaborazione [Hz]	1
Frequenza massima di elaborazione [Hz]	50
Velocità minima di elaborazione [m/s]	120
Velocità massima di elaborazione [m/s]	1500

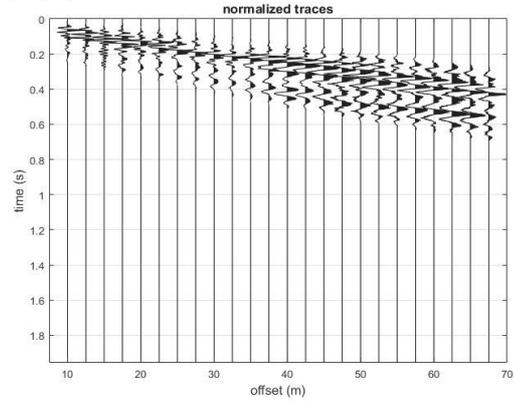
**Tabella 10** – Parametri utilizzati per l'elaborazione dei dati

*Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati:*

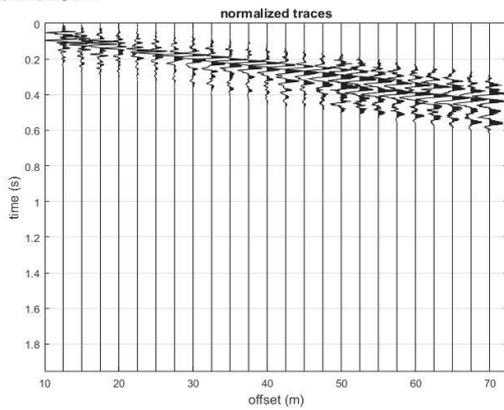
dataset: S1.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



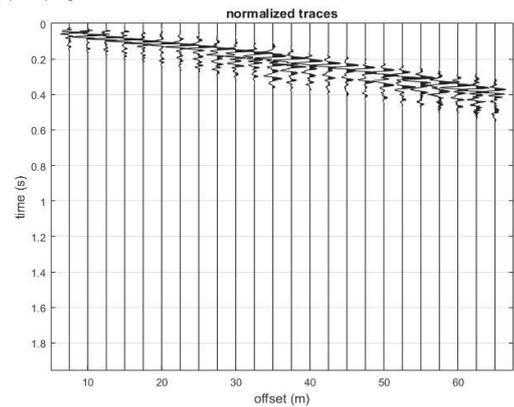
dataset: S2.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



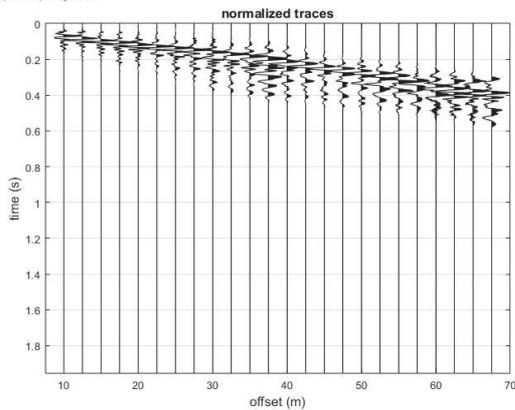
dataset: S3.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



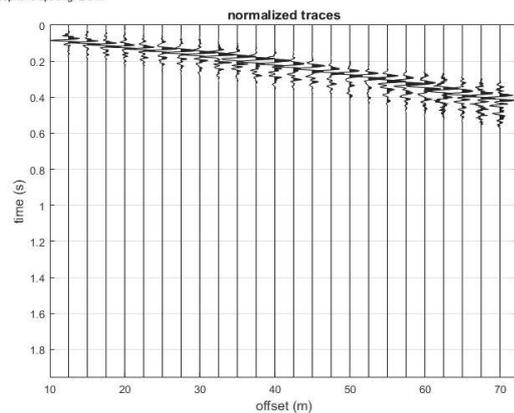
dataset: S4.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: S5.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m

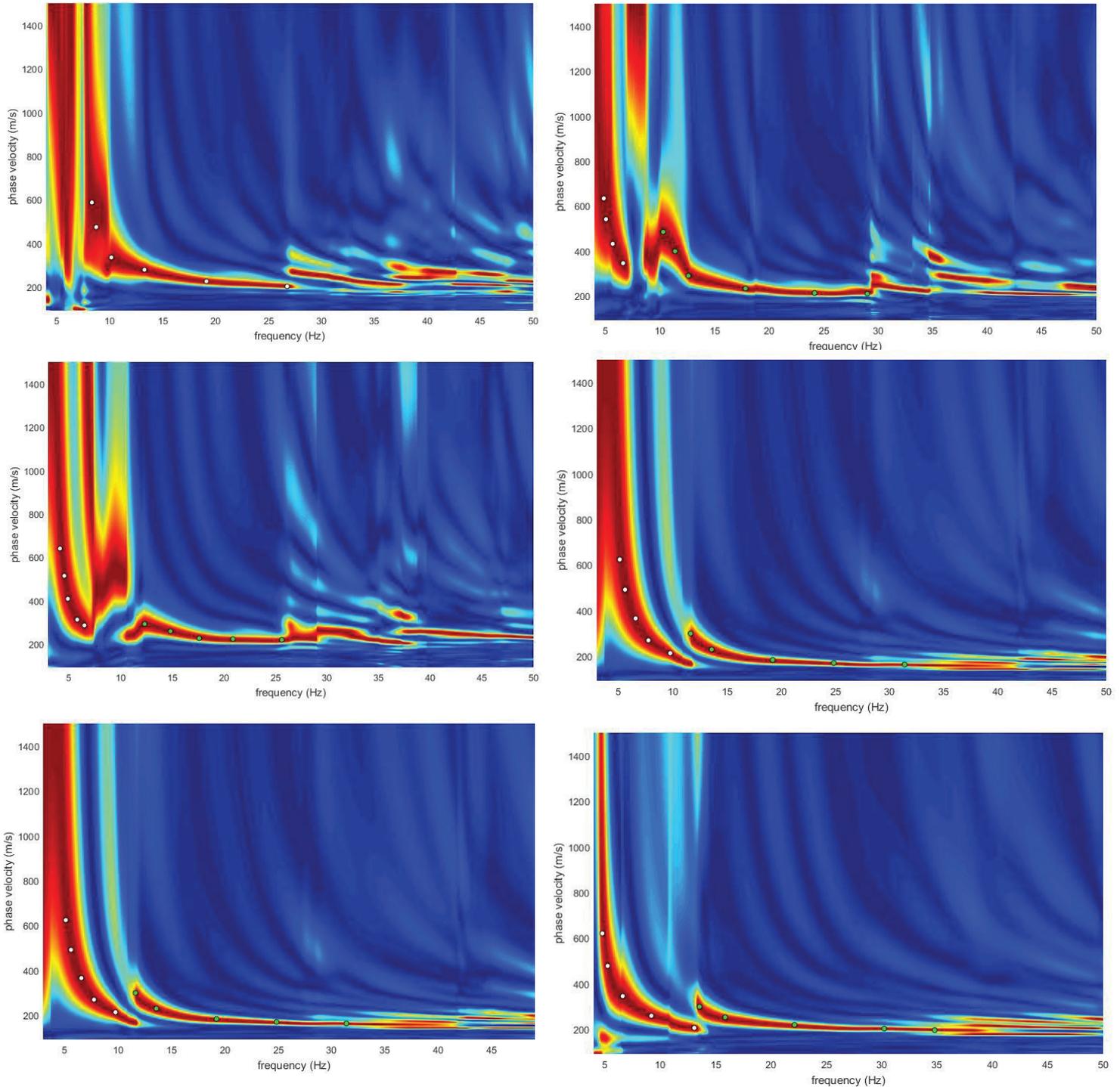


dataset: S6.sg2  
sampling: 0.94967 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



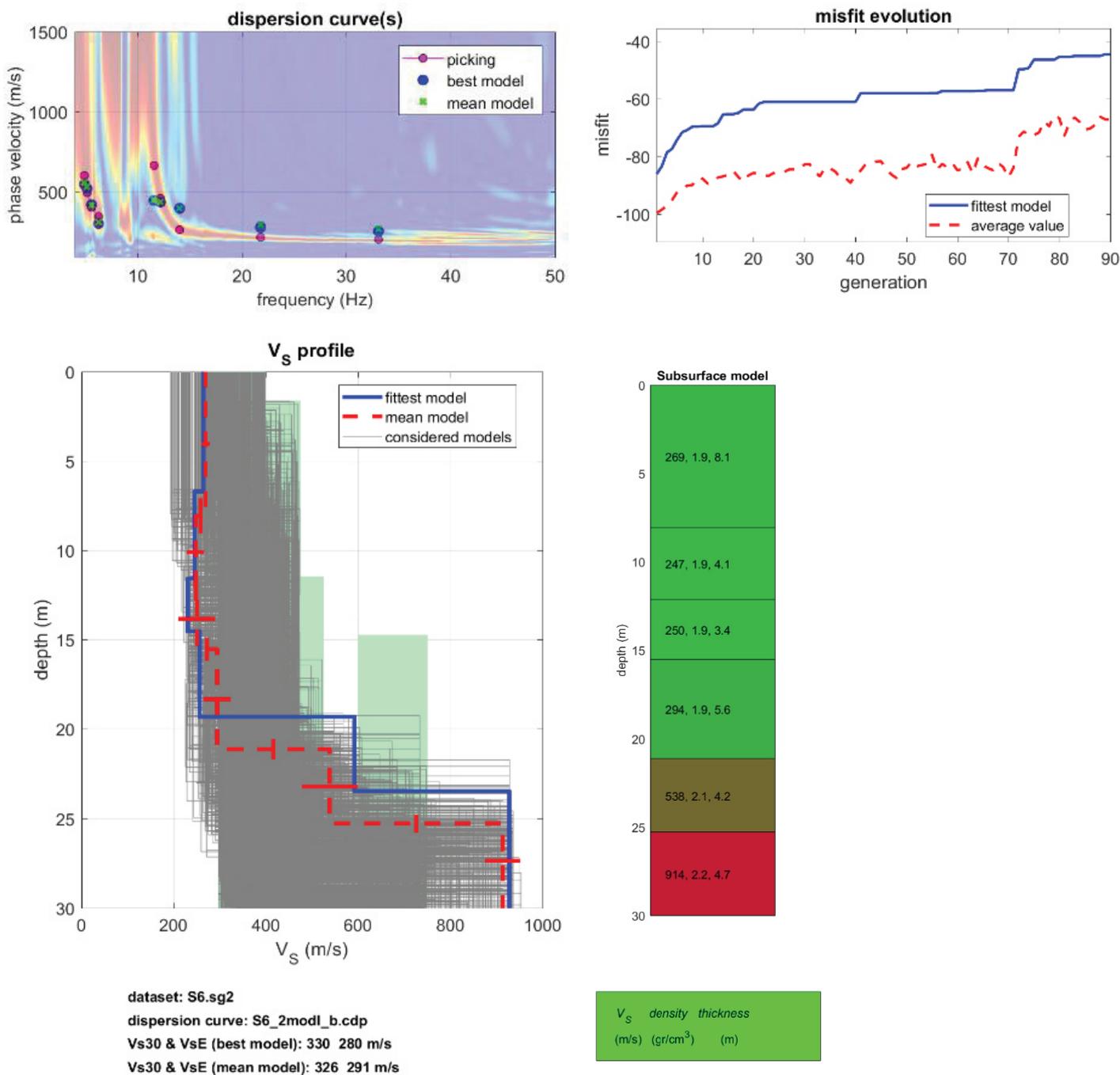
**Figura 31** – Tracce acquisite relative ai 6 shots effettuati.

*Spettri di frequenza – velocità di fase.*



**Figura 32** – Spettri di velocità di fase – frequenza delle tracce acquisite.

*Risultati dell'inversione e modello sismo stratigrafico del sottosuolo:*



**Figura 33** – Risultati dell’approccio di inversione (in alto) e relativo modello sismo-stratigrafico del sottosuolo (in basso).

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di ricostruire il profilo di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo ritenuto rappresentativo dell'area investigata. È stato determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

**$V_{s30}$  e  $V_{s,eq} = 330 \text{ m/s} - 280 \text{ m/s}$**

Categoria di suolo: **E**

Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C (Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s) o D (Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, caratterizzati da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s), con profondità del substrato non superiore a 30 m.

### 2.5.2 HVSR 5

Le indagini HVSR sono state svolte in un'area adiacente alla stazione di Val D'Ala, come indicato in **Figura 32**. Il TROMINO è stato posizionato al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche del sito, e lasciato acquisire in modo manuale per un tempo di 30 minuti.



**Figura 34** – Ubicazione indagine HVSR 4.

### Risultati:

Instrument: TEB-0504/01-19

Data format: 32 bit

Full scale [mV]: 89

Start recording: 12/03/2021 16:29:05 End recording: 12/03/2021 16:59:05

Channel labels: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

GPS data not available

Trace length: 0h30'00". Analyzed 82% trace (manual window selection)

Sampling rate: 512 Hz

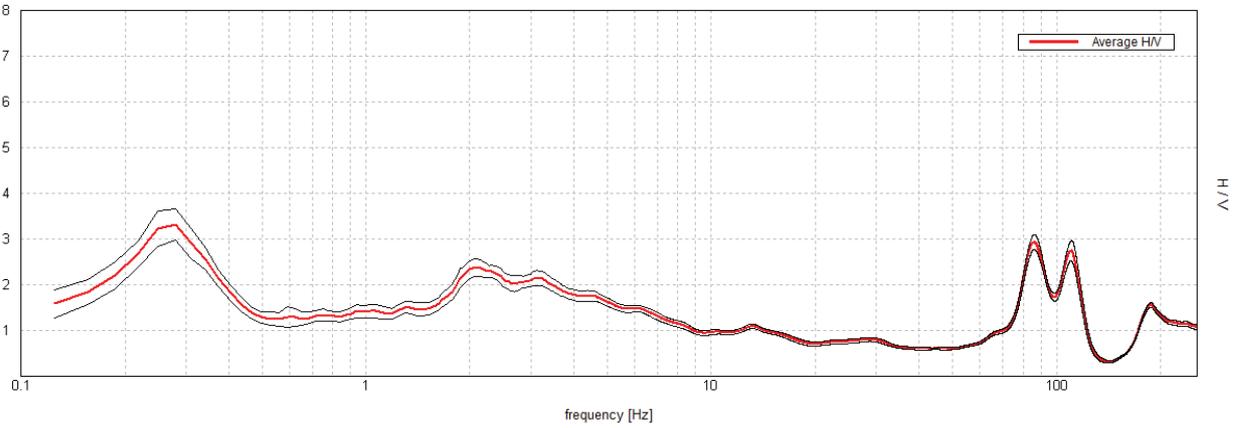
Window size: 20 s

Smoothing type: Triangular window

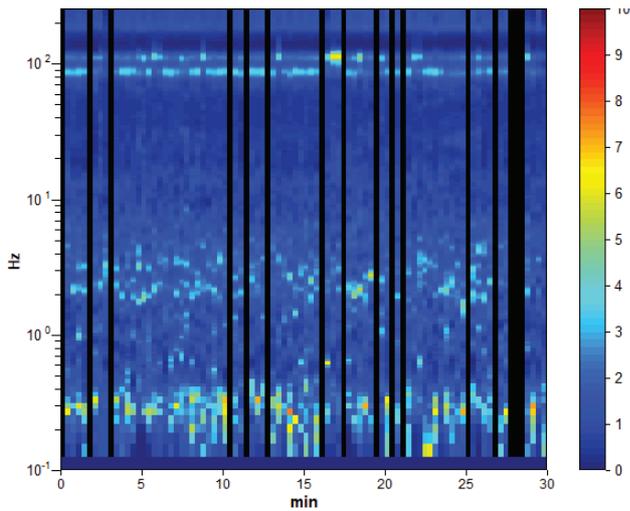
Smoothing: 10%

### HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

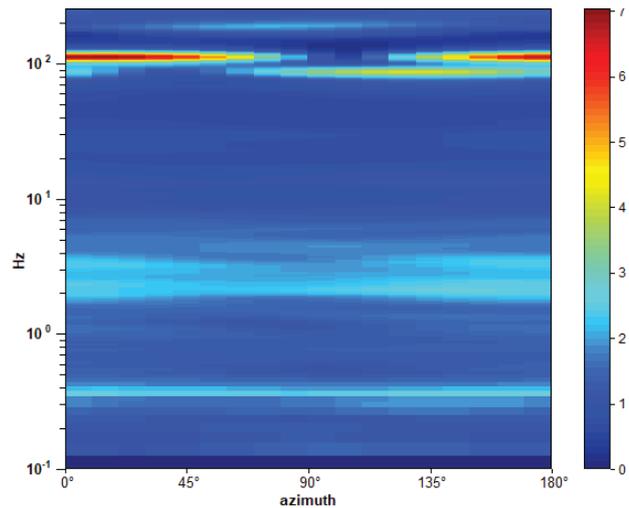
Max. H/V at  $0.28 \pm 0.01$  Hz. (In the range 0.2 - 20.0 Hz).



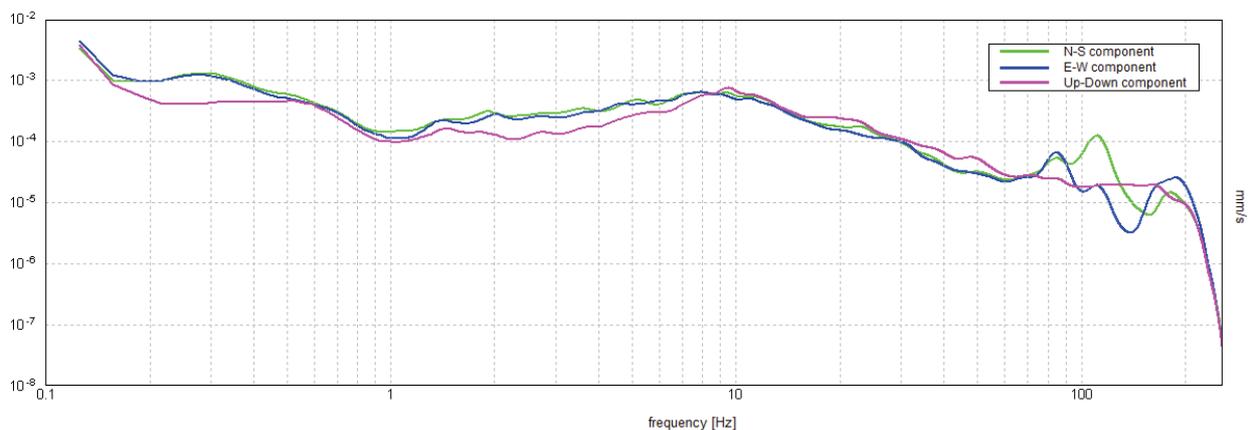
### H/V TIME HISTORY



### DIRECTIONAL H/V



### SINGLE COMPONENT SPECTRA



Max. H/V at  $0.28 \pm 0.01$  Hz (in the range 0.2 - 20.0 Hz).

**Criteria for a reliable H/V curve**

[All 3 should be fulfilled]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.28 > 0.50$		<b>NO</b>
$n_c(f_0) > 200$	$416.3 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 14 times	<b>OK</b>	

**Criteria for a clear H/V peak**

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.125 Hz	<b>OK</b>	
Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.438 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$3.31 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03417  < 0.05$	<b>OK</b>	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.00961 < 0.05625$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3403 < 2.5$	<b>OK</b>	

$L_w$	window length
$n_w$	number of windows used in the analysis
$n_c = L_w n_w f_0$	number of significant cycles
$f$	current frequency
$f_0$	H/V peak frequency
$\sigma_f$	standard deviation of H/V peak frequency
$\varepsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	H/V peak amplitude at frequency $f_0$
$A_{H/V}(f)$	H/V curve amplitude at frequency $f$
$f^-$	frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	standard deviation of $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{H/V}(f)$ curve should be multiplied or divided
$\sigma_{\log H/V}(f)$	standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve
$\theta(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Threshold values for  $\sigma_f$  and  $\sigma_A(f_0)$

Freq. range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine di sismica passiva è stato possibile identificare la frequenza di risonanza del sito, corrispondente al picco di frequenza del rapporto spettrale **H/V pari a  $0.28 \text{ Hz} \pm 0.01 \text{ Hz}$** .

### 2.5.3 DOWNHOLE S7

L'indagine Down-Hole è stata svolta nel foro di sondaggio (S7), ubicato in Via Fiesole, adiacente all'area ferroviaria, come riportato in **Figura 35**, condizionato con tubo PVC ed opportunamente cementato, in modo da rendere solidale il tubo con il terreno circostante.



**Figura 35** - Ubicazione del foro di sondaggio (a) ed esecuzione della prova Down-hole in sito (b)

L'energizzazione per la generazione delle onde di compressione (P) è stata realizzata con mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per facilitare la generazione ed il rilievo delle onde trasversali con adeguata componente sul piano orizzontale (SH) si è utilizzato una traversina in legno, opportunamente ancorata (Dacia Duster 4X4). Sono state effettuate, quindi, per ogni stazionamento, due energizzazioni per le onde S (con inversione di fase), con piano di oscillazione prevalentemente orizzontale, e una verticale per la generazione prevalente delle onde P. Le energizzazioni sono state realizzate ad una distanza di 2.5 metri dal boccaforo.

Nella **Tabella 11** sono riportati i valori dei tempi d'arrivo relativi alle onde P e S, i tempi corretti sulla verticale (T corr. P e T corr. S), per tenere conto della distanza del punto di energizzazione dal foro di sondaggio, i valori delle velocità Vp e Vs relativi all'intervallo corrispondente ed infine i principali moduli elastici dinamici: il modulo di taglio (G) e il modulo di compressibilità volumetrica (Ev).

Profondità (m)	T <sub>oss</sub> P (s)	T <sub>oss</sub> SH (s)	Dist. Scoppio-Foro (m)	T <sub>corr</sub> P (s)	T <sub>corr</sub> SH (s)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>SH</sub> (m/s)	γ (kN/mc)	ρ (kg/mc)	G (Mpa)	Ev (Mpa)
1	0,0097	0,0156	2,5	0,0036	0,0058	277,59	172,60	14,71	1500	446,87	56,00
2	0,01	0,0133	2,5	0,0062	0,0083	320,16	240,72	14,71	1500	869,18	37,86
3	0,0104	0,0141	2,5	0,0080	0,0108	375,49	276,96	14,71	1500	1150,60	58,08
4	0,0117	0,0155	2,5	0,0099	0,0131	403,16	304,32	14,71	1500	1389,18	58,59
5	0,0132	0,0205	2,5	0,0118	0,0183	423,50	272,69	14,71	1500	1115,41	120,30
6	0,0133	0,0206	2,5	0,0123	0,0190	488,72	315,53	16,67	1700	1692,55	180,37
7	0,0135	0,0208	2,5	0,0127	0,0196	550,60	357,36	16,67	1700	2170,97	225,90
8	0,0139	0,0219	2,5	0,0133	0,0209	602,99	382,72	16,67	1700	2490,04	286,10
9	0,0137	0,0225	2,5	0,0132	0,0217	681,81	415,15	16,67	1700	2929,88	399,62
10	0,0136	0,0246	2,5	0,0132	0,0239	757,92	419,01	16,67	1700	2984,75	578,60
11	0,0136	0,0256	2,5	0,0133	0,0250	829,45	440,65	16,18	1650	3203,77	708,01
12	0,0138	0,0246	2,5	0,0135	0,0241	888,24	498,28	16,18	1650	4096,64	755,57
13	0,0137	0,0256	2,5	0,0135	0,0251	966,29	517,12	16,18	1650	4412,27	952,34
14	0,0149	0,0258	2,5	0,0147	0,0254	954,46	551,22	16,18	1650	5013,41	834,69
15	0,0156	0,0262	2,5	0,0154	0,0258	974,80	580,42	17,65	1800	6063,89	901,91
16	0,0159	0,0262	2,5	0,0157	0,0259	1018,50	618,10	17,65	1800	6876,78	950,31
17	0,016	0,0269	2,5	0,0158	0,0266	1073,93	638,77	17,65	1800	7344,43	1096,72
18	0,0175	0,0286	2,5	0,0173	0,0283	1038,44	635,41	17,65	1800	7267,47	972,07
19	0,0182	0,0299	2,5	0,0180	0,0296	1052,95	640,93	17,65	1800	7394,21	1009,79
20	0,0188	0,0301	2,5	0,0187	0,0299	1072,11	669,62	17,65	1800	8071,10	992,80
21	0,0205	0,0305	2,5	0,0204	0,0303	1031,62	693,39	19,61	2000	9615,69	846,40
22	0,021	0,0325	2,5	0,0209	0,0323	1054,36	681,28	19,61	2000	9282,84	985,64
23	0,0228	0,0327	2,5	0,0227	0,0325	1014,71	707,51	19,61	2000	10011,32	724,45
24	0,023	0,0331	2,5	0,0229	0,0329	1049,12	729,00	17,65	1800	9565,90	705,74
25	0,024	0,0335	2,5	0,0239	0,0333	1046,86	749,99	17,65	1800	10124,75	622,69
26	0,0241	0,0355	2,5	0,0240	0,0353	1083,81	735,77	17,65	1800	9744,50	815,11
27	0,0259	0,0352	2,5	0,0258	0,0351	1046,93	770,33	17,65	1800	10681,25	548,75
28	0,0265	0,0365	2,5	0,0264	0,0364	1060,81	770,17	17,65	1800	10677,05	601,95
29	0,027	0,0366	2,5	0,0269	0,0365	1078,06	795,29	16,18	1650	10435,98	526,18
30	0,0277	0,0373	2,5	0,0276	0,0372	1086,79	807,08	16,18	1650	10747,67	515,80
31	0,0282	0,0386	2,5	0,0281	0,0385	1102,86	805,72	16,18	1650	10711,45	578,70
32	0,0287	0,0382	2,5	0,0286	0,0381	1118,38	840,25	16,18	1650	11649,30	510,54
33	0,03	0,0383	2,5	0,0299	0,0382	1103,15	864,09	16,18	1650	12319,69	365,33
34	0,0315	0,0399	2,5	0,0314	0,0398	1082,28	854,43	16,18	1650	12045,86	326,58
35	0,0313	0,0419	2,5	0,0312	0,0418	1121,06	837,45	17,65	1800	12623,82	579,02
36	0,0315	0,0419	2,5	0,0314	0,0418	1145,61	861,26	17,65	1800	13351,77	582,12
37	0,0329	0,0424	2,5	0,0328	0,0423	1127,18	874,63	17,65	1800	13769,64	451,03
38	0,0331	0,042	2,5	0,0330	0,0419	1150,52	906,72	17,65	1800	14798,47	409,52
39	0,0337	0,0444	2,5	0,0336	0,0443	1159,65	880,18	17,65	1800	13944,94	561,27
40	0,0337	0,044	2,5	0,0336	0,0439	1189,26	910,86	17,65	1800	14934,14	554,59
41	0,0353	0,0446	2,5	0,0352	0,0445	1163,63	920,99	18,14	1850	15692,11	412,68
42	0,035	0,0476	2,5	0,0349	0,0475	1202,12	883,91	18,14	1850	14454,15	746,22
43	0,0359	0,0479	2,5	0,0358	0,0478	1199,79	899,22	18,14	1850	14959,02	668,55
44	0,0358	0,0484	2,5	0,0357	0,0483	1231,03	910,56	18,14	1850	15338,61	758,42
45	0,0363	0,0489	2,5	0,0362	0,0488	1241,58	921,66	18,14	1850	15715,11	756,47
46	0,0373	0,0513	2,5	0,0372	0,0512	1235,06	898,01	18,14	1850	14918,79	832,79
47	0,0381	0,0498	2,5	0,0380	0,0497	1235,34	945,11	17,65	1800	16078,17	603,16
48	0,037	0,052	2,5	0,0369	0,0519	1299,06	924,33	17,65	1800	15378,88	987,06
49	0,038	0,0519	2,5	0,0380	0,0518	1291,15	945,35	17,65	1800	16086,40	855,87
50	0,0391	0,0531	2,5	0,0391	0,0530	1280,37	942,80	17,65	1800	15999,55	817,55

T <sub>oss</sub> P: tempo di primo arrivo osservato onde P
T <sub>oss</sub> SH: tempo di primo arrivo osservato onde S (S1+S2)
T <sub>corr</sub> P: tempo di primo arrivo corretto onde P
T <sub>corr</sub> SH: tempo di primo arrivo corretto onde S (S1+S2)
V <sub>p</sub> : velocità onde P
V <sub>SH</sub> : velocità media onde S
γ: Peso di volume
G: Modulo di deformazione a taglio
Ev: Modulo di compressibilità volumetrica

**Tabella 11 – Parametri prova Down-Hole.**

In accordo con la stratigrafia del sondaggio S7 eseguito dalla Ditta *SONDEDILE S.r.l.*, l'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito di ricostruire il seguente modello sismo-stratigrafico (**Figura 15**):

1. il primo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **5.23 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **359.98 m/s** e **253.46 m/s**. Questo è ascrivibile al terreno di riporto;
2. il secondo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **10 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **616.41 m/s** e di **377.95 m/s**. Il sismo-strato è associabile ad argilla limosa riscontrata;
3. il terzo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **14 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **909.61 m/s** e di **501.82 m/s**. Il sismo-strato è associabile a limo sabbioso riscontrato;
4. il quarto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **20.25 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1038.46 m/s** e di **630.54 m/s**. Il sismo-strato è associabile a ghiaia limosa sabbiosa riscontrata;
5. il quinto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **23 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1033.57 m/s** e di **694.06 m/s**. Il sismo-strato è associabile a sabbia limosa riscontrata;
6. il sesto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **28 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1057.51 m/s** e di **751.05 m/s**. Il sismo-strato è associabile a ghiaia limosa sabbiosa riscontrata;
7. il settimo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **34 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1095.25 m/s** e di **827.81 m/s**. Il sismo-strato è associabile a limo sabbioso argilloso riscontrato;
8. l'ottavo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **40 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1148.88 m/s** e di **878.52 m/s**. Il sismo-strato è associabile a ghiaia sabbiosa limosa riscontrata;
9. il nono sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **46 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1212.20 m/s** e di **905.73 m/s**. Il sismo-strato è associabile ad argilla limosa;

10. infine, si individua il decimo sismo-strato fino alla profondità di **50 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1276.48 m/s** e **937.49 m/s**. Quest'ultimo sismo-strato è associabile a ghiaia limoso sabbiosa.

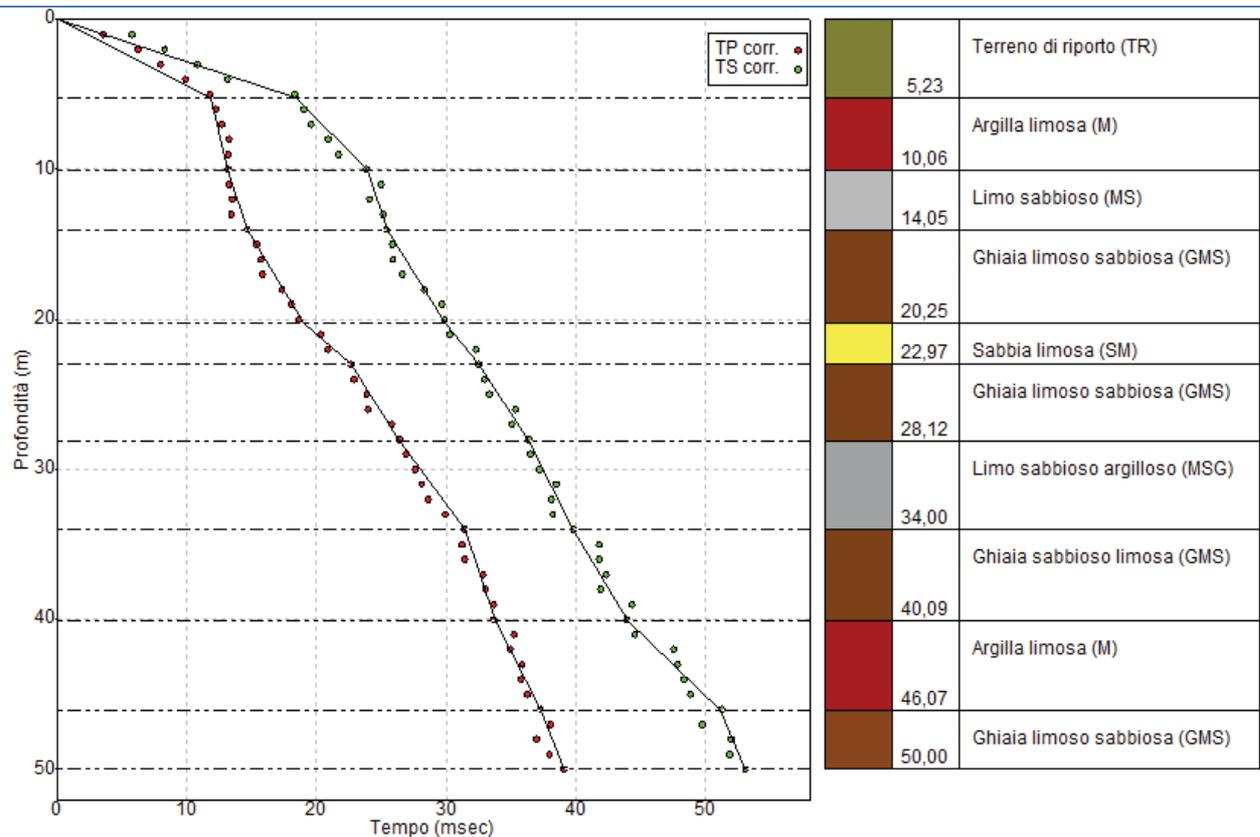


Figura 36 - Modello sismo-stratigrafico

	Profondità (m)	VP media (m/s)	VSHmedia (m/s)	$\gamma$ (kN/mc)	Gmedio (Mpa)	Evmedio (Mpa)
Strato 1 - TR	5,00	359,98	253,46	14,71	994,25	66,17
Strato 2 - M	10,00	616,41	377,95	16,67	2453,64	334,12
Strato 3 - MS	14,00	909,61	501,82	16,18	4181,52	812,65
Strato 4 - GMS	20,00	1038,46	630,54	17,65	7169,65	987,27
Strato 5 - SM	23,00	1033,57	694,06	19,61	9636,62	852,16
Strato 6 - GMS	28,00	1057,51	751,05	17,65	10158,69	658,85
Strato 7 - MSG	34,00	1095,25	827,81	16,18	11318,32	470,52
Strato 8 - GMS	40,00	1148,88	878,52	17,65	13903,80	522,93
Strato 9 - M	46,00	1212,20	905,73	18,14	15179,63	695,85
Strato 10 - GMS	50,00	1276,48	937,49	17,65	15885,75	815,91

Tabella 12 – Valori medi dei parametri relativi ai 10 sismo-strati individuati.

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:

$$V_{s,eq} = H / \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{V_{s,i}} \right) \quad (1)$$

Dove:

$H$ : profondità del **substrato sismico** (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s;

$N$ : numero strati;

$V_{s,i}$ : velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato (m/s);

$h_i$ : spessore dell' $i$ -esimo strato (in m).

Per depositi con **profondità H del substrato superiore a 30 m**, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro  $V_{s30}$  ottenuto ponendo  $H = 30$  m nell'espressione (1) e considerando la proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

È stato, quindi, determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito per i primi 30 m di profondità dal piano campagna, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{seq} = 290.21$  m/s

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

## 2.6 SITO 6

### 2.6.1 DOWNHOLE S11

L'indagine Down-Hole è stata svolta nel foro di sondaggio (S11), ubicato nell'area sottostante il Viadotto Littorio, come riportato in **Figura 37**, condizionato con tubo PVC ed opportunamente cementato, in modo da rendere solidale il tubo con il terreno circostante.



**Figura 37.** Ubicazione del foro di sondaggio (a) ed esecuzione della prova Down-hole in sito (b)

L'energizzazione per la generazione delle onde di compressione (P) è stata realizzata con mazza di 8 Kg battente su piattello metallico. Per facilitare la generazione ed il rilievo delle onde trasversali con adeguata componente sul piano orizzontale (SH) si è utilizzato una traversina in legno, opportunamente ancorata (Dacia Duster 4X4). Sono state effettuate, quindi, per ogni stazionamento, due energizzazioni per le onde S (con inversione di fase), con piano di oscillazione prevalentemente orizzontale, e una verticale per la generazione prevalente delle onde P. Le energizzazioni sono state realizzate ad una distanza di 2.5 metri dal boccaforo. Nella **Tabella 13** sono riportati i valori dei tempi d'arrivo relativi alle onde P e S, i tempi corretti sulla verticale (T corr. P e T corr. S), per tenere conto della distanza del punto di energizzazione dal foro di sondaggio, i valori delle velocità  $V_p$  e  $V_s$  relativi all'intervallo corrispondente ed infine i principali moduli elastici dinamici: il modulo di taglio (G) e il modulo di compressibilità volumetrica ( $E_v$ ).



Profondità (m)	T <sub>oss</sub> P (s)	T <sub>oss</sub> SH (s)	Dist. Scoppio-Foro (m)	T <sub>corr</sub> P (s)	T <sub>corr</sub> SH (s)	V <sub>p</sub> (m/s)	V <sub>SH</sub> (m/s)	γ (kN/mc)	ρ (kg/mc)	G (Mpa)	Ev (Mpa)
1	0,0104	0,0228	2,5	0,0039	0,0085	258,90	118,10	14,71	1500	209,20	72,65
2	0,0112	0,0167	2,5	0,0070	0,0104	285,85	191,71	14,71	1500	551,29	49,06
3	0,0121	0,0187	2,5	0,0093	0,0144	322,74	208,83	14,71	1500	654,15	69,02
4	0,013	0,0225	2,5	0,0110	0,0191	362,85	209,64	16,67	1700	747,16	124,20
5	0,0136	0,0251	2,5	0,0122	0,0225	411,04	222,72	16,67	1700	843,24	174,79
6	0,0137	0,0277	2,5	0,0126	0,0256	474,45	234,66	16,67	1700	936,09	257,87
7	0,0149	0,0296	2,5	0,0140	0,0279	498,86	251,12	16,67	1700	1072,01	280,13
8	0,0156	0,0317	2,5	0,0149	0,0303	537,28	264,40	16,67	1700	1188,44	332,28
9	0,0141	0,0343	2,5	0,0136	0,0330	662,47	272,33	16,67	1700	1260,74	577,97
10	0,0156	0,0357	2,5	0,0151	0,0346	660,75	288,73	16,67	1700	1417,23	553,25
11	0,0168	0,0379	2,5	0,0164	0,0370	671,46	297,64	16,67	1700	1506,01	565,66
12	0,0169	0,0385	2,5	0,0165	0,0377	725,30	318,38	16,67	1700	1723,22	664,55
13	0,018	0,0412	2,5	0,0177	0,0405	735,46	321,32	16,67	1700	1755,14	685,50
14	0,0178	0,041	2,5	0,0175	0,0404	798,96	346,86	16,67	1700	2045,36	812,45
15	0,0189	0,0433	2,5	0,0186	0,0427	804,60	351,20	16,67	1700	2096,79	820,97
16	0,02	0,0424	2,5	0,0198	0,0419	809,71	381,94	16,67	1700	2479,89	783,91
17	0,0202	0,0463	2,5	0,0200	0,0458	850,64	371,12	16,67	1700	2341,41	917,90
18	0,0199	0,0469	2,5	0,0197	0,0465	913,21	387,48	16,18	1650	2477,31	1045,70
19	0,0219	0,0465	2,5	0,0217	0,0461	875,06	412,12	16,18	1650	2802,46	889,79
20	0,0236	0,0489	2,5	0,0234	0,0485	854,05	412,18	16,18	1650	2803,24	829,76
21	0,0227	0,0488	2,5	0,0225	0,0485	931,64	433,37	16,18	1650	3098,81	1018,96
22	0,0232	0,0482	2,5	0,0231	0,0479	954,38	459,37	16,18	1650	3481,83	1038,64
23	0,0241	0,0488	2,5	0,0240	0,0485	959,98	474,09	16,18	1650	3708,52	1026,10
24	0,0258	0,0521	2,5	0,0257	0,0518	935,27	463,15	16,18	1650	3539,31	971,38
25	0,0262	0,05	2,5	0,0261	0,0498	958,96	502,49	16,18	1650	4166,25	961,84
26	0,0268	0,0513	2,5	0,0267	0,0511	974,62	509,16	18,63	1900	4925,64	1148,04
27	0,0283	0,0509	2,5	0,0282	0,0507	958,14	532,72	18,63	1900	5392,04	1025,34
28	0,0287	0,0535	2,5	0,0286	0,0533	979,49	525,45	18,63	1900	5245,79	1123,43
29	0,0292	0,0544	2,5	0,0291	0,0542	996,83	535,07	18,63	1900	5439,61	1162,71
30	0,0309	0,0576	2,5	0,0308	0,0574	974,24	522,64	18,63	1900	5189,87	1111,39
31	0,0294	0,0568	2,5	0,0293	0,0566	1057,85	547,55	18,63	1900	5696,34	1366,66
32	0,0304	0,0587	2,5	0,0303	0,0585	1055,84	546,81	18,63	1900	5680,94	1360,65
33	0,0316	0,0584	2,5	0,0315	0,0582	1047,30	566,69	18,63	1900	6101,56	1270,43
34	0,0316	0,0582	2,5	0,0315	0,0580	1078,85	585,77	18,63	1900	6519,39	1342,21
35	0,0319	0,0603	2,5	0,0318	0,0601	1099,97	581,91	18,63	1900	6433,77	1441,06
36	0,0329	0,0594	2,5	0,0328	0,0593	1096,86	607,52	18,63	1900	7012,54	1350,89
37	0,0341	0,061	2,5	0,0340	0,0609	1087,52	607,94	18,63	1900	7022,24	1310,82
38	0,0352	0,0646	2,5	0,0351	0,0645	1081,88	589,51	17,65	1800	6255,33	1272,79
39	0,0352	0,0644	2,5	0,0351	0,0643	1110,23	606,83	17,65	1800	6628,43	1334,90
40	0,0357	0,0639	2,5	0,0356	0,0638	1122,63	627,20	17,65	1800	7080,83	1324,44
41	0,0358	0,0662	2,5	0,0357	0,0661	1147,38	620,49	17,65	1800	6930,04	1445,65
42	0,0357	0,0648	2,5	0,0356	0,0647	1178,55	649,30	17,65	1800	7588,52	1488,37
43	0,0384	0,066	2,5	0,0383	0,0659	1121,68	652,62	17,65	1800	7666,32	1242,53
44	0,0386	0,0673	2,5	0,0385	0,0672	1141,73	654,84	17,65	1800	7718,76	1317,24
45	0,0375	0,0703	2,5	0,0374	0,0702	1201,85	641,10	17,65	1800	7398,19	1613,58
46	0,038	0,0727	2,5	0,0379	0,0726	1212,31	633,67	17,65	1800	7227,70	1681,77
47	0,038	0,07	2,5	0,0379	0,0699	1238,59	672,38	17,65	1800	8137,65	1676,37
48	0,0396	0,0706	2,5	0,0395	0,0705	1213,76	680,81	17,65	1800	8343,00	1539,40
49	0,0408	0,0731	2,5	0,0407	0,0730	1202,54	671,19	17,65	1800	8108,84	1521,82

T <sub>oss</sub> P: tempo di primo arrivo osservato onde P
T <sub>oss</sub> SH: tempo di primo arrivo osservato onde S (S1+S2)
T <sub>corr</sub> P: tempo di primo arrivo corretto onde P
T <sub>corr</sub> SH: tempo di primo arrivo corretto onde S (S1+S2)
V <sub>p</sub> : velocità onde P
V <sub>SH</sub> : velocità media onde S
γ: Peso di volume
G: Modulo di deformazione a taglio
Ev: Modulo di compressibilità volumetrica

Tabella 13 – Parametri prova Down-Hole.

In accordo con la stratigrafia del sondaggio S7 eseguito dalla Ditta *SONDEDILE S.r.l.*, l'elaborazione dei dati acquisiti ha consentito di ricostruire il seguente modello sismo-stratigrafico (**Figura 15**):

1. il primo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **3 m** dal piano campagna (p.c.), con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **289.16 m/s** e **172.88 m/s**. Questo è ascrivibile al terreno di riporto;
2. il secondo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **17 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **643.13 m/s** e di **295.15 m/s**. Il sismo-strato è associabile ad argilla limosa riscontrata;
3. il terzo sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **25 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **922.82 m/s** e di **443.03 m/s**. Il sismo-strato è associabile a limo sabbioso argilloso riscontrato;
4. il quarto sismo-strato si individua fino alla profondità di circa **37 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1033.96 m/s** e di **555.77 m/s**. Il sismo-strato è associabile a ghiaia poligenica riscontrata;
5. infine, si individua il quinto sismo-strato fino alla profondità di **49 m** dal p.c., con valori di velocità medie delle onde P e delle onde S rispettivamente di **1164.43 m/s** e **641.66 m/s**. Quest'ultimo sismo-strato è associabile ad argilla limosa riscontrata.

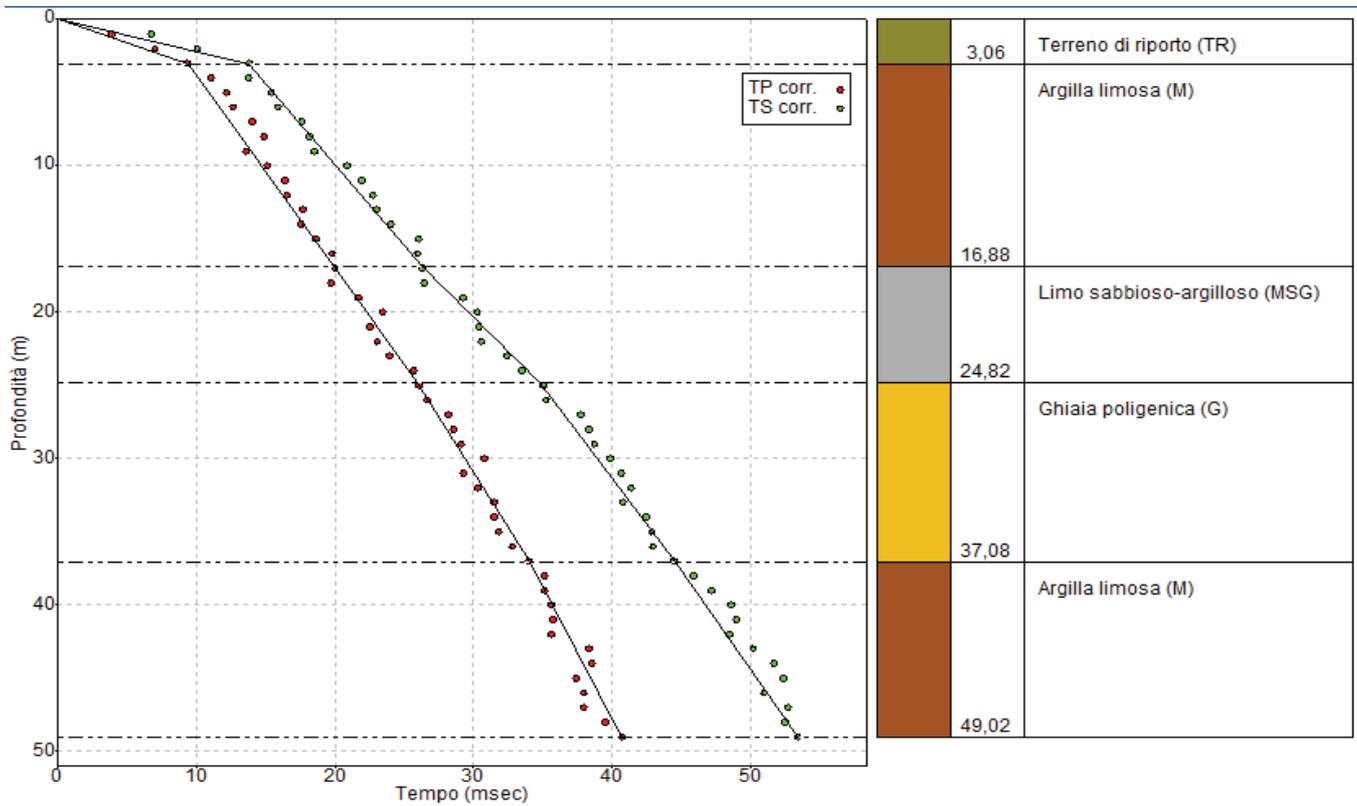


Figura 38. Modello sismico-stratigrafico

	Profondità (m)	VP media (m/s)	VSHmedia (m/s)	$\Gamma$ (kN/mc)	$\rho$ media (kg/mc)	Gmedio (Mpa)	EVmedio (Mpa)
Strato 1 -TR	3,00	289,16	172,88	14,71	1500,00	471,55	63,58
Strato 2 - M	17,00	643,13	295,15	16,67	1700,00	1529,48	539,39
Strato 3 - MSG	25,00	922,82	443,03	16,18	1650,00	3259,72	972,77
Strato 4 - G	37,00	1033,96	555,77	18,63	1900,00	5888,31	1251,14
Strato 5 - M	49,00	1164,43	641,66	17,65	1800,00	7423,63	1454,91

Tabella 14 – Valori medi dei parametri relativi ai 5 sismo-strati individuati.

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:

$$V_{s,eq} = H / \sum_{i=1}^N \left( \frac{h_i}{V_{s,i}} \right) \quad (1)$$

Dove:

$H$ : profondità del **substrato sismico** (in m), definito come quella formazione, costituita da roccia o terreno molto rigido caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s;

$N$ : numero strati;

$V_{s,i}$ : velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato (m/s);

$h_i$ : spessore dell' $i$ -esimo strato (in m).

Per depositi con **profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m**, la velocità equivalente delle onde di taglio è definita dal parametro  $V_{s30}$  ottenuto ponendo  $H = 30$  m nell'espressione (1) e considerando la proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

È stato, quindi, determinato il parametro  $V_{s,eq}$  del sito per i primi 30 m di profondità dal piano campagna, definendo quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{seq} = 314.95$  m/s

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s

## CONCLUSIONI

Riassumendo quanto esposto, le indagini eseguite hanno consentito di determinare la stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e di conseguenza alla categoria di suolo e alla frequenza  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche di sito.

Il piano di indagini eseguito, in merito all'oggetto del presente report, è di seguito elencato:

### SITO 1

- MASW:  
 $V_{s30}$  e  $V_{s,eq}$  = **343,00 m/s**
- DOWNHOLE S1:  
 $V_{s30}$  e  $V_{s,eq}$  = **352,42 m/s**

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

- HVSR:  
 $f_0$  = **1.31 ± 0.19 Hz**

### SITO 2

- MASW:  
 $V_{s30}$  e  $V_{s,eq}$  = **226,00 m/s**
- DOWNHOLE S6:  
 $V_{s30}$  e  $V_{s,eq}$  = **251,30 m/s**

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

- HVSR:  
 $f_0 = 0.22 \pm 0.39 \text{ Hz}$

### SITO 3

- MASW:  
 $V_{s30}$  e  $V_{s,eq} = 393 \text{ m/s}$  e  $289 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **E**

Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C (Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s) o D (Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, caratterizzati da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s), con profondità del substrato non superiore a 30 m.

- HVSR:  
 $f_0 = 1.25 \pm 0.33 \text{ Hz}$

### SITO 4

- MASW:  
 $V_{s30}$  e  $V_{s,eq} = 254,00 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento

delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.

- HVSr:  
 $f_0 = 1.25 \pm 0.79 \text{ Hz}$

#### SITO 5:

- MASW:  
 $V_{s30} \text{ e } V_{s,eq} = 330 \text{ m/s} - 280 \text{ m/s}$
- DOWNHOLE S7:  
 $V_{s30} \text{ e } V_{s,eq} = 290.21 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **E**

Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C (Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s) o D (Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, caratterizzati da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s), con profondità del substrato non superiore a 30 m.

- HVSr:  
 $f_0 = 0.28 \pm 0.01 \text{ Hz}$

#### SITO 6:

- DOWNHOLE S11:  
 $V_{s30} \text{ e } V_{s,eq} = 314.95 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.