

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



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

**PROGETTO DEFINITIVO**

**POTENZIAMENTO DELLA LINEA FOLIGNO-TERONTOLA**

**INTERVENTI DI SEMPLIFICAZIONE E VELOCIZZAZIONE SUI PRG  
DELLE STAZIONI DI ASSISI ED ELLERA**

**INDAGINI GEOFISICHE - ASSISI**

SCALA:

-

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

I R 0 B 0 1 D 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	ESECUTIVA	S. Costabile	Giu 20	F.M. CARLI	Giu 20	T.Paoletti	Giu20	M. Comedini Giu 20

File: IR0B01D69IGGE0005001A.doc

n. Elab.: X

## Sommario

PREMESSA .....	4
1. METODOLOGIE GEOFISICHE UTILIZZATE .....	5
1.1. INDAGINE SISMICA MASW .....	5
1.1.1. Cenni teorici .....	5
1.1.2. Strumentazione utilizzata e tecniche operative .....	6
1.1.3. Elaborazione dei dati .....	7
1.2. RILIEVO SISMICO HVSR .....	8
1.2.1. Cenni teorici .....	8
1.2.2. Strumentazione utilizzata ed elaborazione dei dati .....	8
2. STAZIONE DI ASSISI .....	10
2.1. MASW 1 .....	12
2.1.1. Acquisizione dei dati .....	12
2.1.2. Elaborazione dei dati e risultati .....	13
2.2. HVSR 1 .....	17
2.2.1. Acquisizione dei dati .....	18
2.2.2. Elaborazione dei dati e risultati .....	19
2.3. MASW 2 .....	22
2.3.1. Acquisizione dei dati .....	22
2.3.2. Elaborazione dei dati e risultati .....	24
2.4. HVSR 2 .....	28
2.4.1. Acquisizione dei dati .....	29
2.4.2. Elaborazione dei dati e risultati .....	30
2.5. MASW 3 .....	34
2.5.1. Acquisizione dei dati .....	34
2.5.2. Elaborazione dei dati e risultati .....	36
2.6. HVSR 3 .....	41
2.6.1. Acquisizione dei dati .....	41
2.6.2. Elaborazione dei dati e risultati .....	42

3. CONCLUSIONE.....	46
---------------------	----

## PREMESSA

A seguito della Gara a procedura negoziata, ai sensi dell'art. 8, co. 4, lett. B) del Regolamento per le attività Negoziali delle Società del Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane, emanato con "Disciplinare di Gruppo n° 220/AD del 22/02/2017", espletata con il prezzo più basso, determinato mediante massimo ribasso sull'elenco prezzi posto a base di gara, per l'affidamento di un accordo quadro riguardante l'"esecuzione di prospezioni geofisiche (sismica a rifrazione e a riflessione, sondaggi elettrici verticali, prospezioni georadar, magnetometriche e gravimetriche, carotaggi geofisici e prospezioni in fori di sondaggi geognostici), relative caratterizzazioni dei terreni interessati dalla progettazione di fattibilità tecnico-economica, definitiva ed esecutiva di linee e nodi ferroviari nonché di infrastrutture stradali e impianti civili ed industriali, sistemazione di siti di riambientalizzazione ricadenti nell'ambito del territorio nazionale" si è attivato da parte di Italferr S.p.A. la commessa IR12.1D02.A01 con atto contrattuale 100038665 del 16 aprile 2020 su all'accordo quadro N. 200001348. A seguito dell'incarico la G.I.A. Consulting s.r.l. ha eseguito una campagna d'indagini geofisiche, per la progettazione definitiva del PRG della Stazione di Assisi.

Il piano d'indagine in oggetto ha previsto:

- ✓ esecuzione di n° 3 indagini sismiche di tipo arrivo MASW
- ✓ esecuzione di n° 3 indagini sismiche di tipo passivo HVSR.

Le indagini si sono svolte presso la Stazione di Assisi il giorno 23/04/2020. Queste hanno consentito di ottenere una ricostruzione sismostratigrafica dei siti investigati e la classificazione del sottosuolo di fondazione secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018.

Sono state inoltre ricavate le frequenze fondamentali di vibrazione del sottosuolo mediante la tecnica di indagine sismica passiva HVSR.

## 1. Metodologie geofisiche utilizzate

### 1.1. Indagine sismica MASW

#### 1.1.1. Cenni teorici

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 30.0m-50.0m, in funzione della rigidità del suolo.

### *1.1.2. Strumentazione utilizzata e tecniche operative*

La strumentazione utilizzata è costituita da tre componenti principali: la sorgente, i ricevitori e l'acquisitore digitale (sismografo). Per l'acquisizione e la registrazione dei dati è stata impiegata la seguente attrezzatura:

- sismografo digitale MAE X820S (Figura 1)



**Figura 1 - Sismografo utilizzato per effettuare le indagini sismiche di tipo MASW**

- Cavo con 24 collegamenti per geofoni;
- 24 geofoni a componente verticale con frequenza di 4.5 Hz

Una volta ultimato lo stendimento vengono effettuate delle energizzazioni attraverso una mazza battente di 8 Kg.

I profili sismici eseguiti hanno una lunghezza di 58 metri costituiti da 24 geofoni distanziati di 2.5 m.

Per ogni stendimento sono state effettuate molteplici registrazioni. In particolare, sono stati effettuati shots a 3, 4, 5 volte la spaziatura geofonica per ogni estremo dello stendimento ottenendo 6 registrazioni di onde superficiali. Gli shots sono stati quindi eseguiti alle seguenti distanze a partire dai geofoni posti alle estremità degli stendimenti:

- 7.5 m
- 10 m
- 12.5 m

### *1.1.3. 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.

Questi passaggi consentono in di risalire alla stratigrafia sismica in termini di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) e di conseguenza alla categoria di suolo.

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

## 1.2. RILIEVO SISMICO HVSR

### 1.2.1. Cenni teorici

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).

### 1.2.2. Strumentazione utilizzata ed elaborazione dei dati

Per eseguire le indagini HVSR è stato utilizzato un tromografo digitale TROMINO (Figura 2). 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.



**Figura 2 - Tromino utilizzato per effettuare le indagini di sismica passiva di tipo HVSr.**

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 20 min. con una frequenza di campionamento di 128 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 vengono poi elaborati mediante il software Grilla.

## 2. STAZIONE DI ASSISI

Nel piano d'indagini in oggetto, come richiesto, sono state eseguite sia analisi sismiche di tipo MASW che indagini sismiche di tipo passivo HVSR per la caratterizzazione sismica del sottosuolo. 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

Nella seguente tabella vengono riportati il numero e le quantità principali delle prove eseguite

Indagine	Quantità	Geofoni	Interdistanza geofonica	Frequenza geofoni	Numero energizzazioni
MASW	3	24 m	2.5 m	4.5 Hz	6

Indagine	Quantità	Durata (min)	Frequenza Campionamento
HVSR	3	20	128 Hz

In particolare, l'attività si è articolata mediante l'acquisizione di differenti metodologie strutturate in:

- n. 3 rilievi sismici per onde superficiali di tipo attivo MASW, ubicati in corrispondenza dei tratti indicati Figura 3. Tutti gli stendimenti, costituiti da n. 24 geofoni, sono finalizzati 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. 3 registrazioni di prove sismiche passive di tipo HVSR, ubicate al centro degli stendimenti di sismica attiva, per la definizione delle frequenze di risonanza di sito in funzione dei significativi contrasti di impedenza sismica.

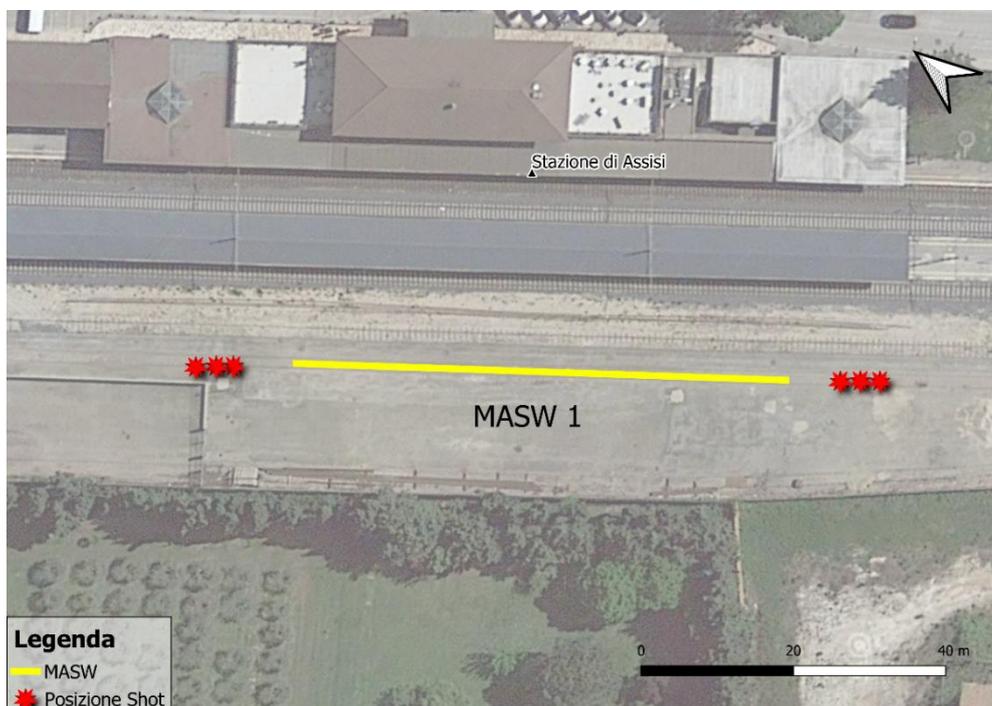


**Figura 3 - Ubicazione delle indagini effettuate presso la stazione di Assisi.**

## 2.1. MASW 1

### 2.1.1. Acquisizione dei dati

La MASW numero 1 è ubicata all'interno della stazione di Assisi come indicato in Figura 4 dove è rappresentata anche la posizione dei 6 shots effettuati. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 58 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. In totale sono state eseguite 6 registrazioni, energizzando a 3, 4, e 5 volte la spaziatura geofonica (Figura 4).



**Figura 4 - Ubicazione della MASW n. 1**

In Figura 5 è rappresentata l'esecuzione delle indagini presso il sito 1. Data l'impossibilità di infilare il puntale nel terreno, per posizionare i geofoni, sono state utilizzate delle apposite basette per l'utilizzo su asfalto o su substrati rigidi al fine di renderli il più solidali possibile con il terreno.



**Figura 5 - Esecuzione delle indagini MASW**

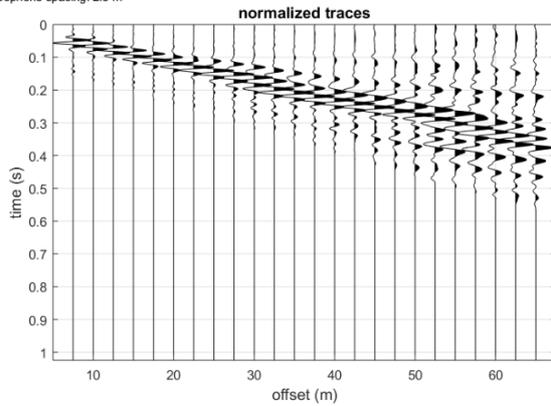
### *2.1.2. Elaborazione dei dati e risultati*

Al termine dell'indagine si sono ottenute così 6 set di tracce, con i relativi spettri di velocità calcolati. I segnali delle tracce sono stati debitamente filtrati e puliti attraverso il software WinMASW Lite.

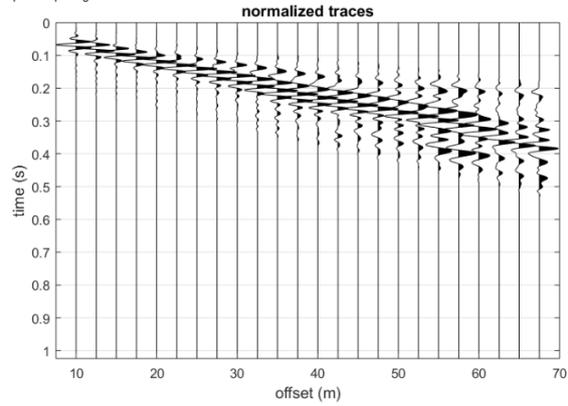
Dopodichè sullo spettro di velocità medio, è stato effettuato il processo di picking dei massimi di ampiezza del modo fondamentale e degli eventuali modi superiori. Successivamente mediante il processo di inversione, si ottiene il profilo di velocità con la profondità che permette di definire il parametro  $V_{Seq}$ .

**Tracce acquisite:**

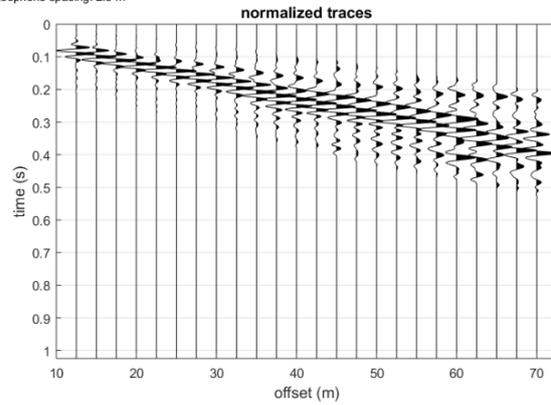
dataset: 75\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



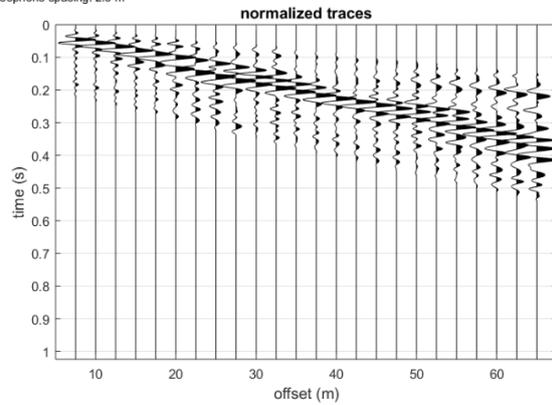
dataset: 100\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



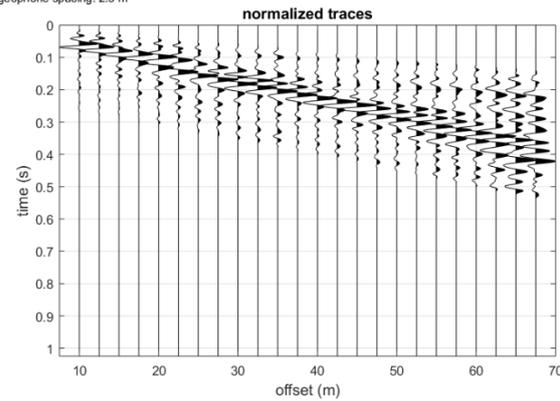
dataset: 125\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



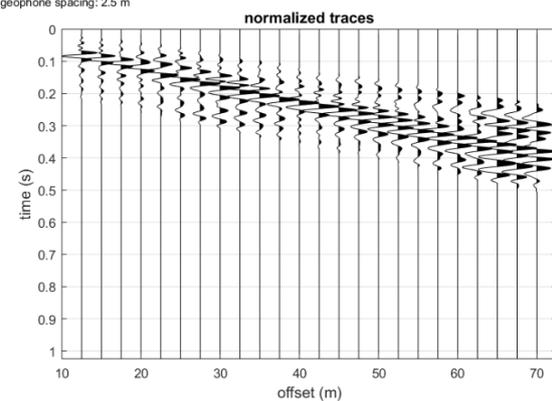
dataset: -75\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: -100\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m

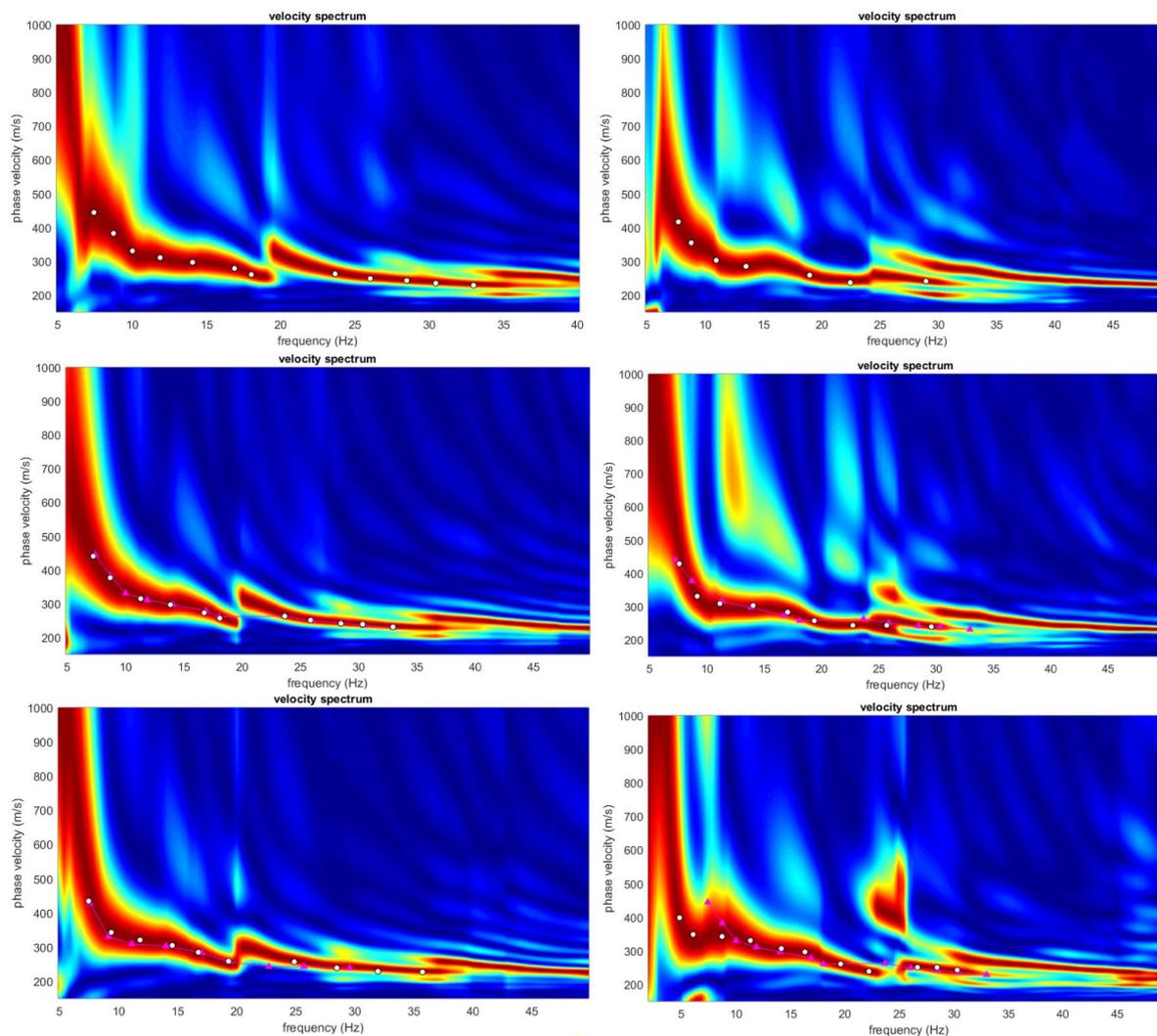


dataset: -125\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



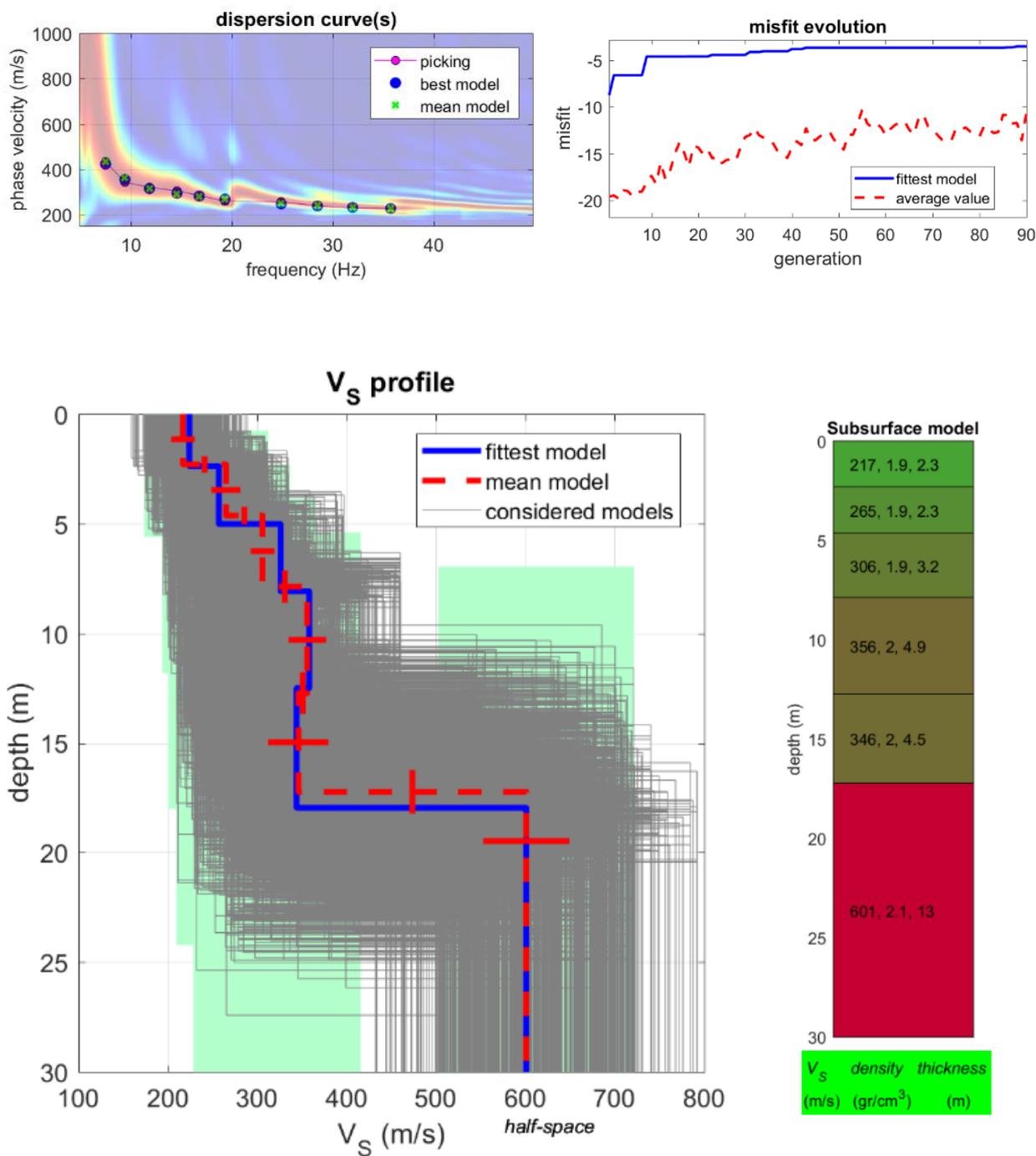
**Figura 6 – Dati degli shots effettuati rispettivamente a 7.5, 10 e 12.5 metri, da ogni lato dello stendimento**

*Spettri di velocità:*



**Figura 7 – Spettri di velocità delle tracce di tutti e sei gli shots effettuati.**

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



dataset: 125\_1.sg2  
 dispersion curve: 125.cdp  
 Vs30 & VsE (best model): 382 382 m/s  
 Vs30 & VsE (mean model): 385 385 m/s

**Figura 8 - Risultati dell'inversione e del modello stratigrafico del sottosuolo**

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di determinare la velocità delle Vs e di determinare quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{s30}$  e  $V_{seq} = 385 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

### *2.2.1. Acquisizione dei dati*

Le indagini HVSR sono state svolte successivamente all'indagine sismica di tipo attivo, posizionando la strumentazione al centro dello stendimento utilizzato per eseguire l'indagine MASW, al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche di sito. Si è quindi ubicato il TROMINO al suolo utilizzando gli appositi piedini per substrato rigido al fine di posizionarlo correttamente in bolla.



**Figura 9 - Esecuzione dell'indagine HVSR.**

Il TROMINO è stato posizionato ed è stato lasciato acquisire in modo automatico per un tempo di 20 minuti.

### *2.2.2. Elaborazione dei dati e risultati*

I dati sono stati trasferiti al PC attraverso apposito collegamento USB ed elaborati con il software Grilla. I dati che sono stati puliti, per la presenza di tracce disturbate e filtrati in funzione della loro dispersione espressa in termini di deviazione standard. È stato inoltre imposto un lisciamento (smoothing) del 10% alle curve per smorzarne la spigolosità ed un intervallo di analisi di frequenza di 10 secondi. Grazie a queste operazioni viene successivamente rappresentata la curva sperimentale H/V dalla quale è possibile risalire al picco di frequenza massima di risonanza di sito.

### **Risultati**

Strumento: TEB-0504/01-19

Formato dati: 32 byte

Fondo scala [mV]: 89

Inizio registrazione: 23/04/20 09:19:42      Fine registrazione: 23/04/20 09:39:42

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".      Analizzato 78% tracciato (selezione automatica)

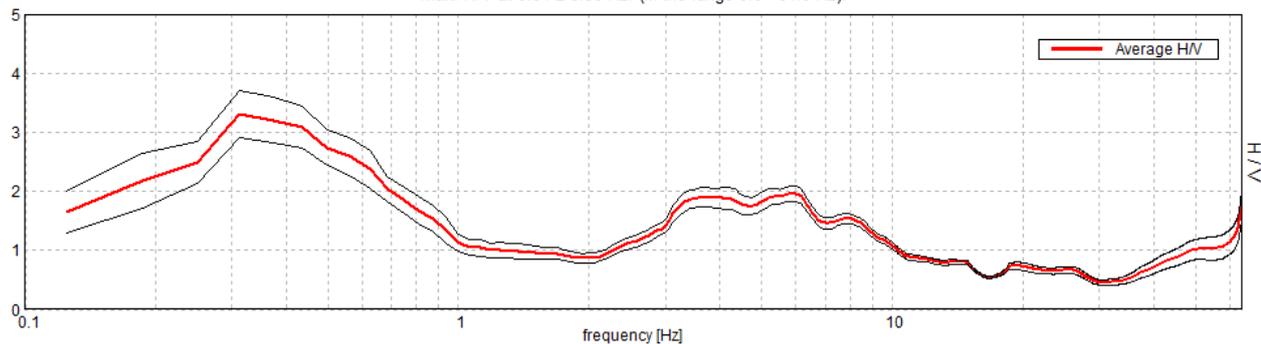
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 10 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

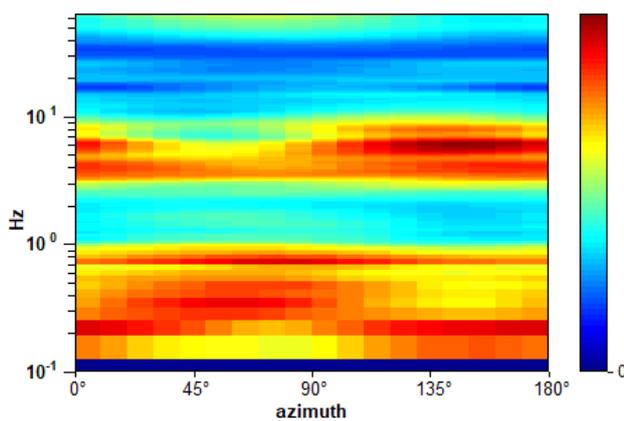
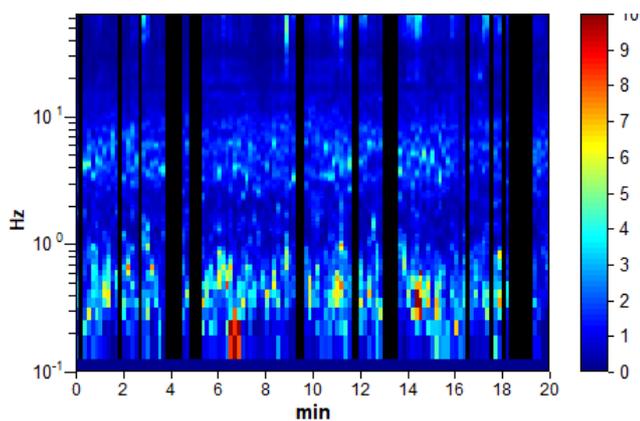
Lisciamento: 10%

Max. H/V at 0.31 ± 0.56 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

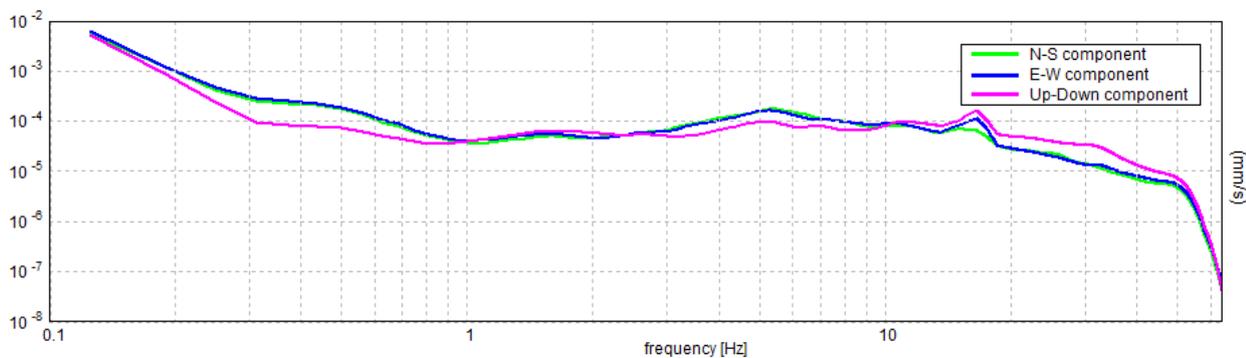


SERIE TEMPORALE H/V

DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



**Picco H/V a  $0.31 \pm 0.56$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.31 > 1.00$		<b>NO</b>
$n_c(f_0) > 200$	$290.6 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 8	<b>OK</b>	

### Criteria per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.125 Hz	<b>OK</b>	
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.875 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$3.31 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 1.78356  < 0.05$		<b>NO</b>
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.55736 < 0.0625$		<b>NO</b>
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.4066 < 2.5$	<b>OK</b>	

$L_w$	lunghezza della finestra
$n_w$	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
$f$	frequenza attuale
$f_0$	frequenza del picco H/V

$\sigma_f$	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	ampiezza della curva H/V alla frequenza $f_0$
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza $f$
$f^-$	frequenza tra $f_0/4$ e $f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequenza tra $f_0$ e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

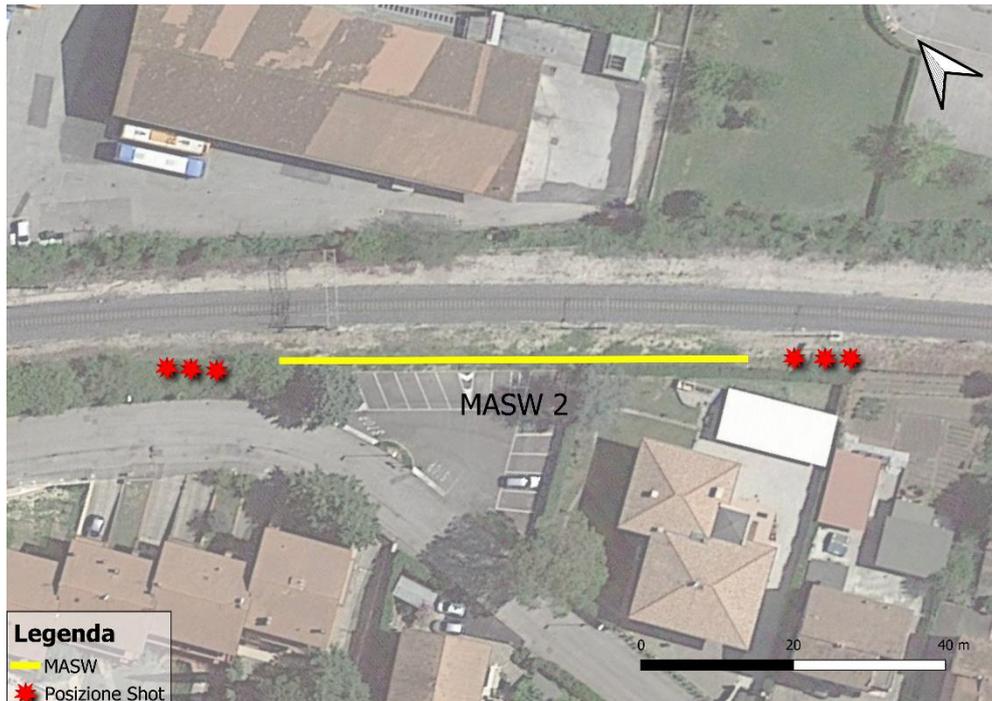
Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.2 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine è stato possibile identificare la frequenza del picco del rapporto H/V pari a  $0.31 \pm 0.56$  Hz.

## 2.3. MASW 2

### 2.3.1. Acquisizione dei dati

La MASW numero 2 è ubicata lungo il tratto ferroviario posto a nord rispetto alla stazione di Assisi. In particolare, è posizionata nei pressi vi Via Cavour. Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 58 metri composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. In totale sono state eseguite 6 registrazioni, energizzando a 3, 4, e 5 volte la spaziatura geofonica (Figura 10).



**Figura 10 - Ubicazione della MASW n. 2**

In Figura 11 è rappresentata l'esecuzione delle indagini presso il sito 2.



**Figura 11 - Esecuzione delle indagini MASW**

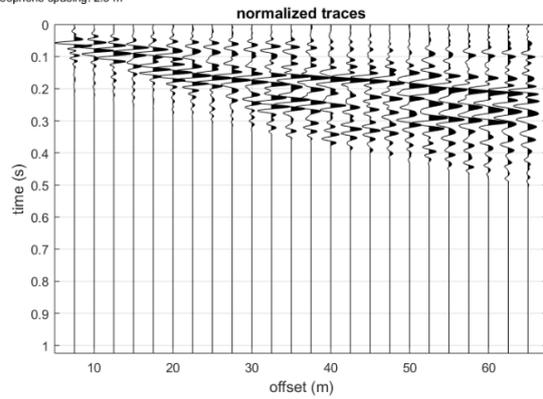
### *2.3.2. Elaborazione dei dati e risultati*

Al termine dell'indagine si sono ottenute così 6 set di dati, con i relativi spettri di velocità calcolati. I segnali delle tracce sono stati debitamente filtrati e puliti attraverso il software WinMASW Lite.

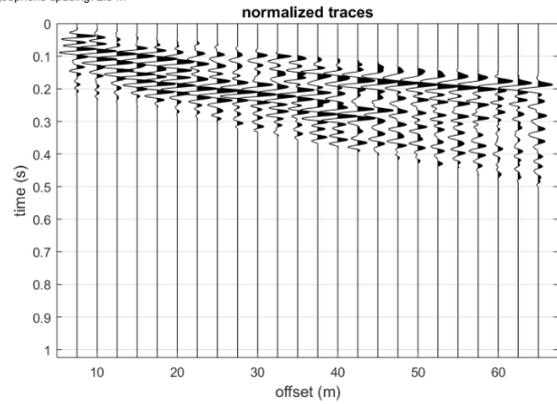
Dopodichè sullo spettro di velocità medio, è stato effettuato il processo di picking dei massimi di ampiezza del modo fondamentale e degli eventuali modi superiori. Mediante il processo di inversione, si ottiene il profilo di velocità con la profondità che permette di definire il parametro  $V_{seq}$ .

**Tracce acquisite:**

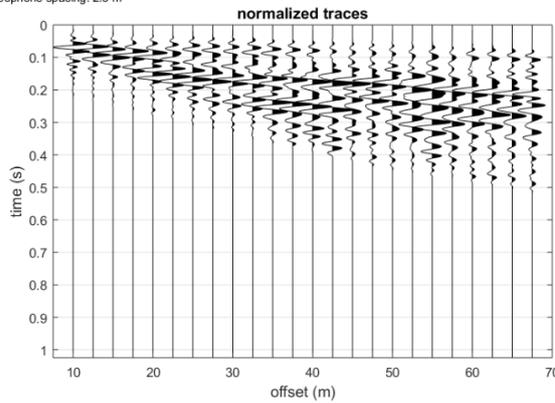
dataset: 75\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



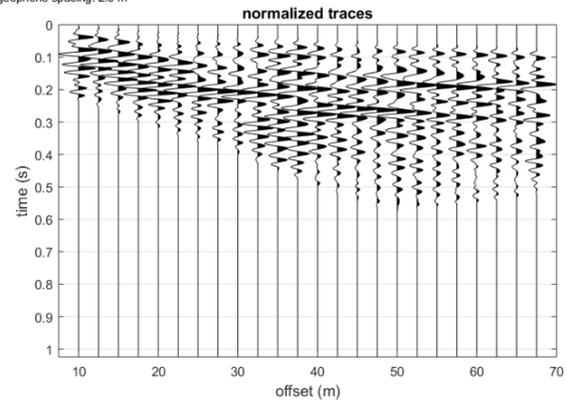
dataset: -75\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 7.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



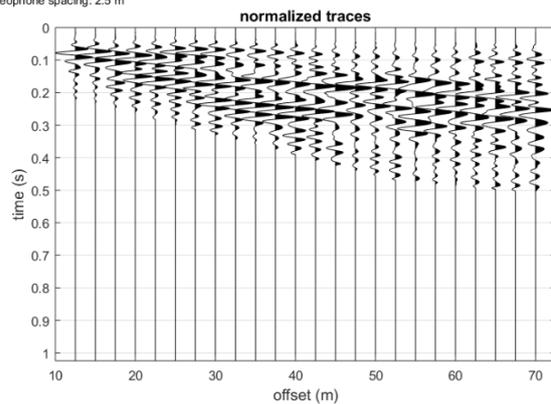
dataset: 100\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



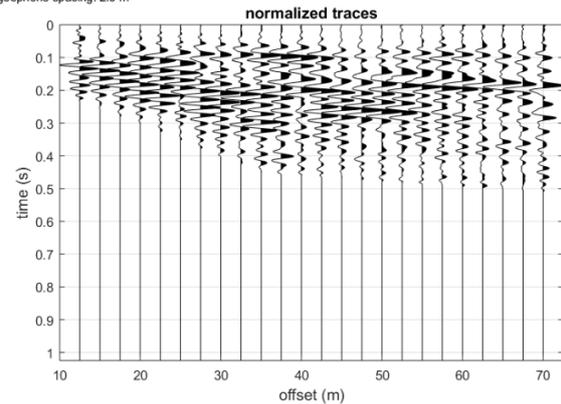
dataset: -100\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 10 m  
geophone spacing: 2.5 m



dataset: 125\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m

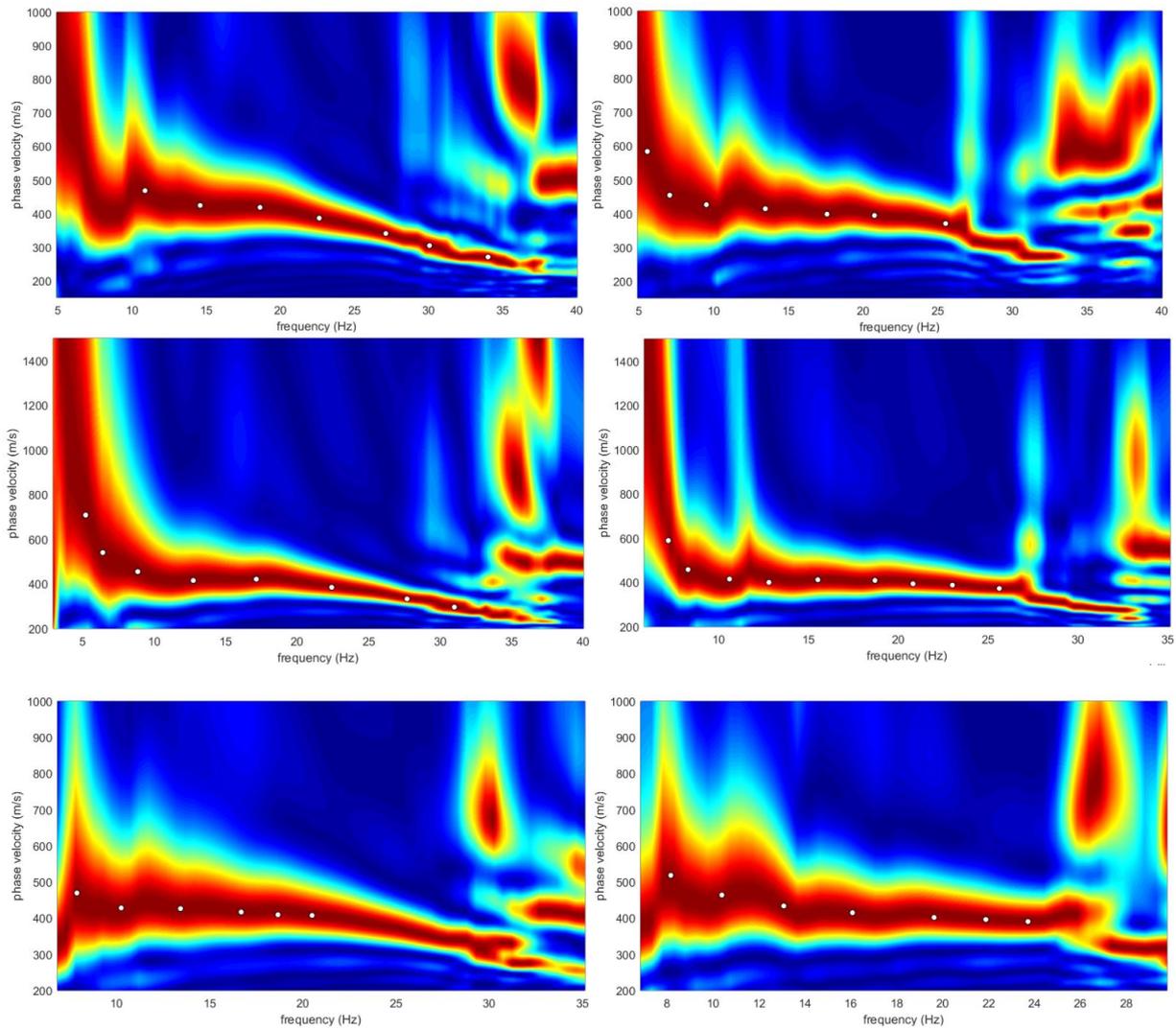


dataset: -125\_1\_sg2  
sampling: 0.25 ms  
minimum offset: 12.5 m  
geophone spacing: 2.5 m



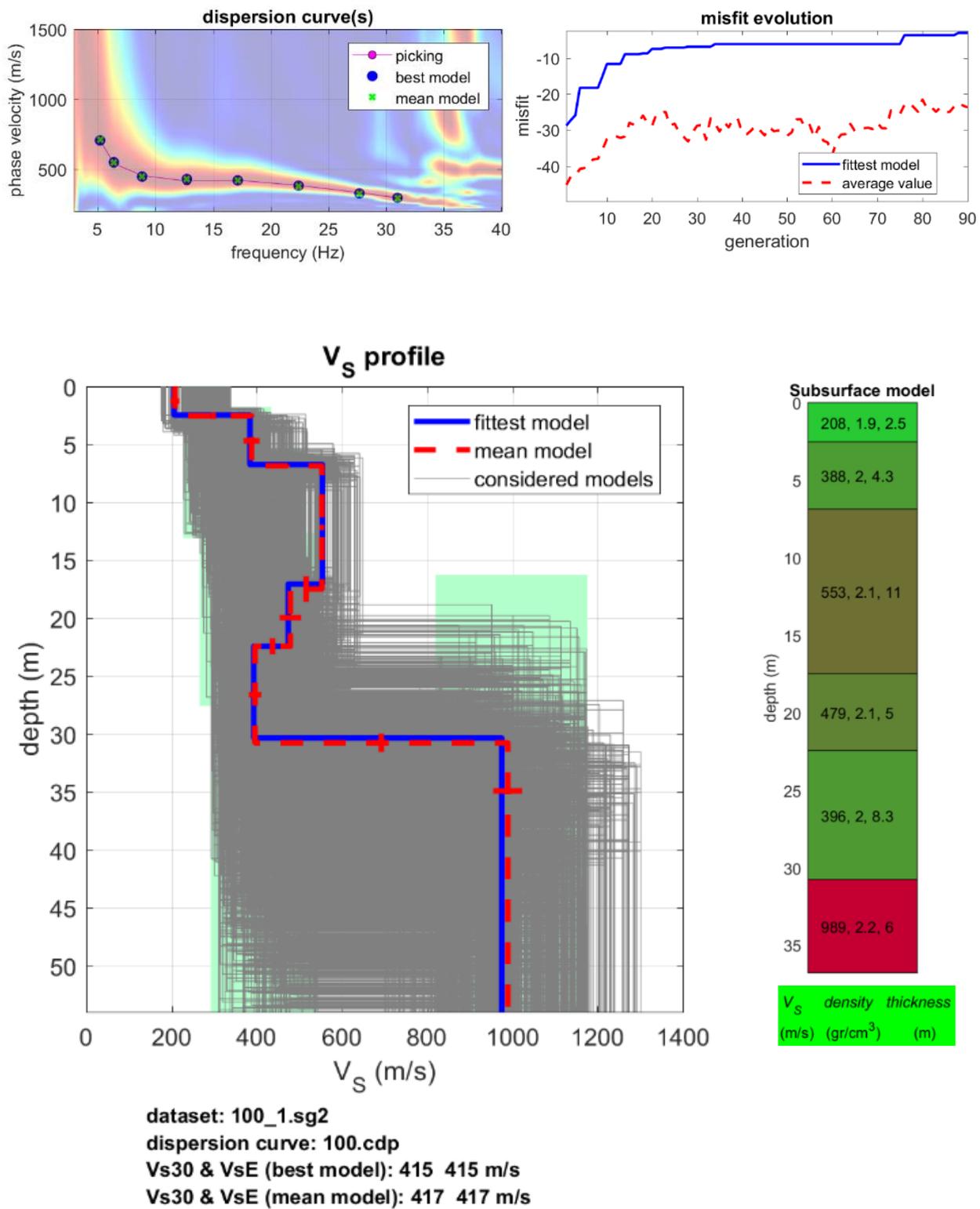
**Figura 12 - Tracce di tutti gli shots effettuati rispettivamente a 7.5, 10 e 12.5 metri, da ogni lato dello stendimento**

**Spettri di velocità:**



**Figura 13 - Spettri delle tracce di tutti e sei gli shots effettuati.**

*Risultati dell'inversione e modello stratigrafico del sottosuolo*



**Figura 14 - Risultati dell'inversione e del modello stratigrafico del sottosuolo**

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di calcolare la velocità delle Vs e di determinare quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

$V_{s30}$  e  $V_{seq} = 417$  m/s

Categoria di suolo: **B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

#### **2.4. HVSr 2**

#### *2.4.1. Acquisizione dei dati*

Le indagini HVSR sono state svolte successivamente all'indagine sismica di tipo attivo, posizionando la strumentazione al centro dello stendimento utilizzato per eseguire l'indagine MASW, al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche di sito (Figura 15).



**Figura 15 - Esecuzione dell'indagine HVSR.**

Il TROMINO è stato posizionato ed è stato lasciato acquisire in modo automatico per un tempo di 20 minuti.

#### *2.4.2. Elaborazione dei dati e risultati*

I dati sono stati trasferiti al PC attraverso apposito collegamento USB ed elaborati con il software Grilla. I dati che sono stati puliti, per la presenza di tracce disturbate e filtrati in funzione della loro dispersione espressa in termini di deviazione standard. È stato inoltre imposto un lisciamento (smoothing) del 10% alle curve per smorzarne la spigolosità ed un intervallo di analisi di frequenza di 10 secondi. Grazie a queste operazioni viene successivamente rappresentata la curva sperimentale H/V dalla quale è possibile risalire al picco di frequenza massima di risonanza di sito.

### **Risultati**

Strumento: TEB-0504/01-19

Formato dati: 32 byte

Fondo scala [mV]: 89

Inizio registrazione: 23/04/20 10:30:05      Fine registrazione: 23/04/20 10:50:05

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

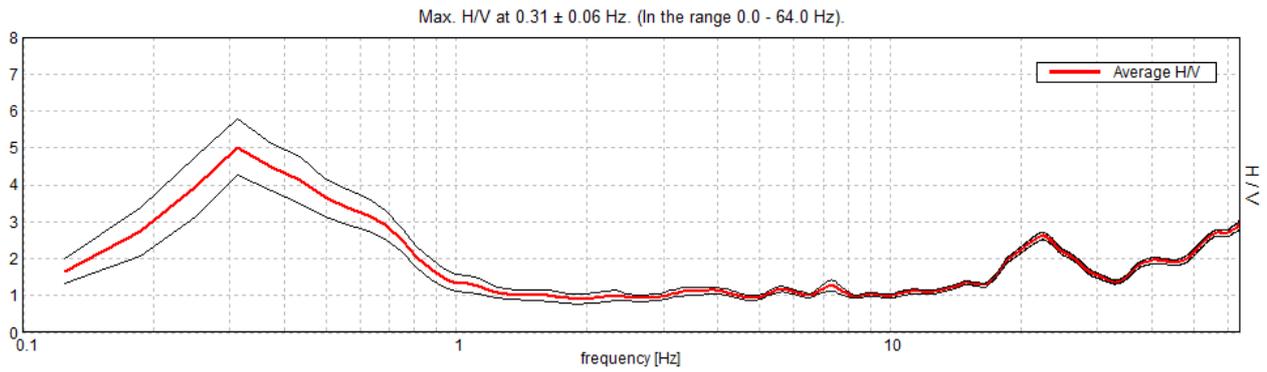
Durata registrazione: 0h20'00".      Analizzato 77% tracciato (selezione automatica)

Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 10 s

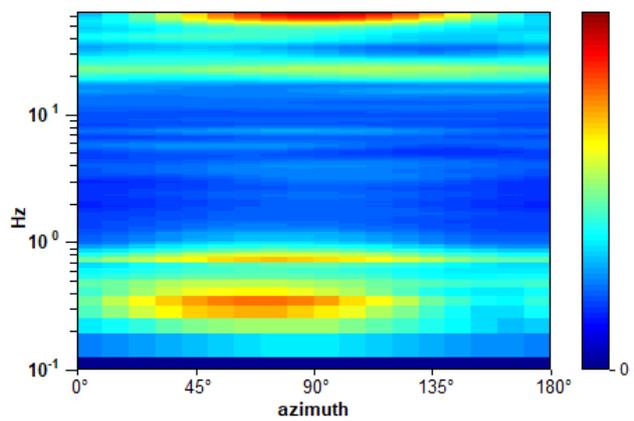
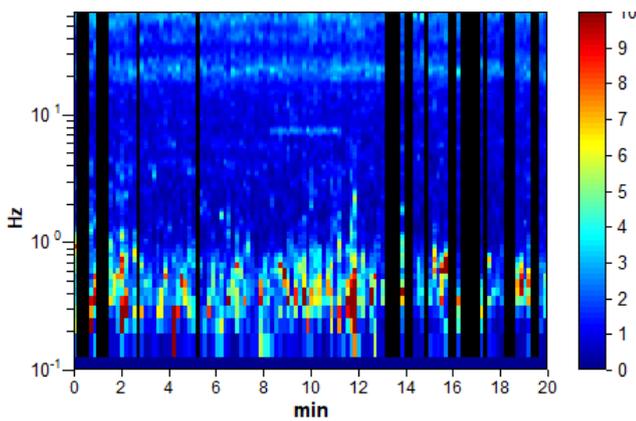
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

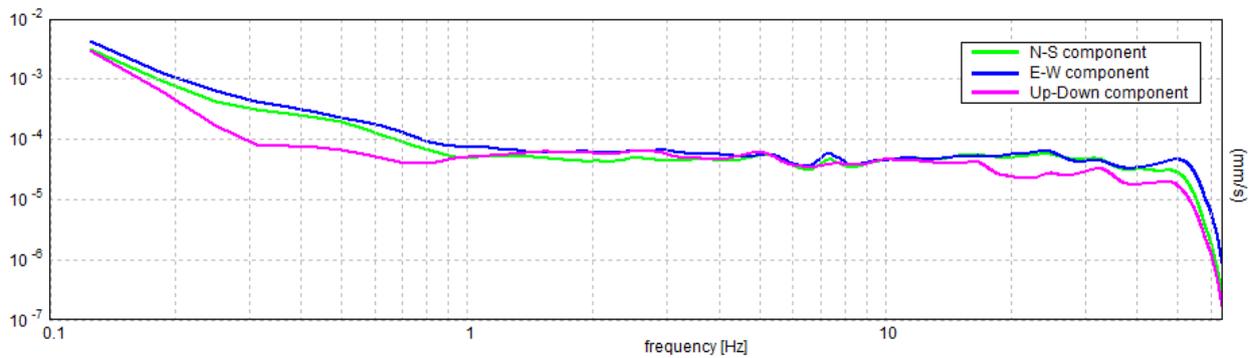


SERIE TEMPORALE H/V

DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



**Picco H/V a  $0.31 \pm 0.06$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.31 > 1.00$		<b>NO</b>
$n_c(f_0) > 200$	$287.5 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 8	<b>OK</b>	

### Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.125 Hz	<b>OK</b>	
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.75 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$5.01 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.20747  < 0.05$		<b>NO</b>
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.06483 < 0.0625$		<b>NO</b>
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7617 < 2.5$	<b>OK</b>	

$L_w$	lunghezza della finestra
$n_w$	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
$f$	frequenza attuale

$f_0$	frequenza del picco H/V
$\sigma_f$	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	ampiezza della curva H/V alla frequenza $f_0$
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza $f$
$f^-$	frequenza tra $f_0/4$ e $f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequenza tra $f_0$ e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine è stato possibile identificare la frequenza del picco del rapporto H/V pari a  $0.31 \pm 0.06$  Hz.

## 2.5. MASW 3

### 2.5.1. *Acquisizione dei dati*

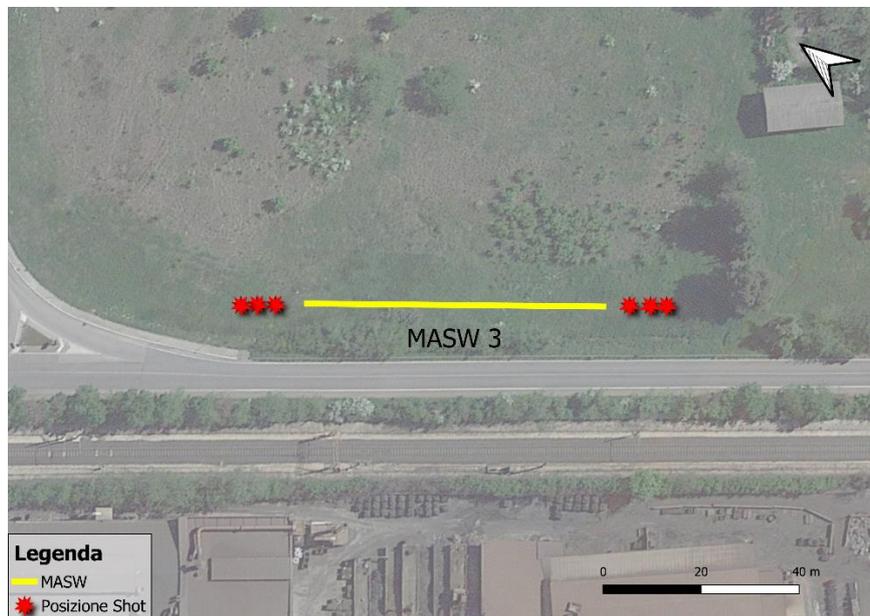
La MASW numero 3 è ubicata lungo il tratto ferroviario a Sud della Stazione di Assisi. In particolare, è posizionata nei pressi via Santa Maria Maddalena. La posizione dell'indagine è stata spostata parallelamente di 13 metri, rispetto alle ubicazioni inviate da parte di ITALFERR per via dell'impossibilità di accedere all'area designata come indicato in Figura 16.



**Figura 16 - Ubicazione indicata da ITALFERR per l'esecuzione delle indagini. Si nota l'impossibilità di accesso all'area designata.**

Si è quindi preferito eseguire l'indagine sul campo posto di fronte all'area proposta.

Per eseguire l'indagine è stato utilizzato uno stendimento con lunghezza di 58 metri, composto da 24 geofoni distanziati di 2.5 metri. In totale sono state eseguite 6 registrazioni, energizzando a 3, 4, e 5 volte la spaziatura geofonica (Figura 17).



**Figura 17 - Ubicazione della MASW n. 3**

In Figura 18 è rappresentata l'esecuzione delle indagini presso il sito 3 di Assisi.



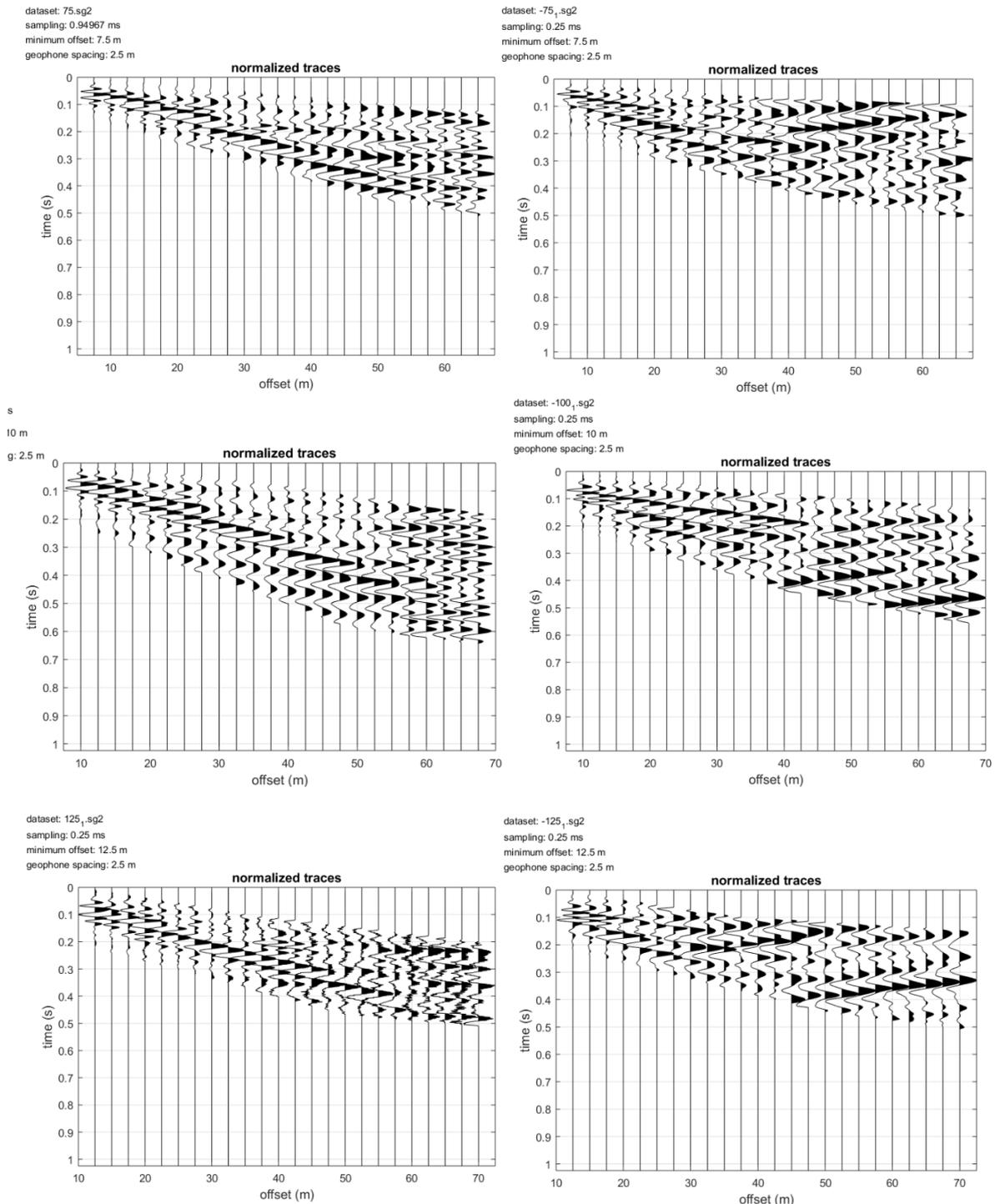
**Figura 18 - Esecuzione delle indagini MASW**

### *2.5.2. Elaborazione dei dati e risultati*

Al termine dell'indagine si sono ottenute così 6 tracce, con i relativi spettri di velocità calcolati. I segnali delle tracce sono stati debitamente filtrati e puliti attraverso il software WinMASW Lite.

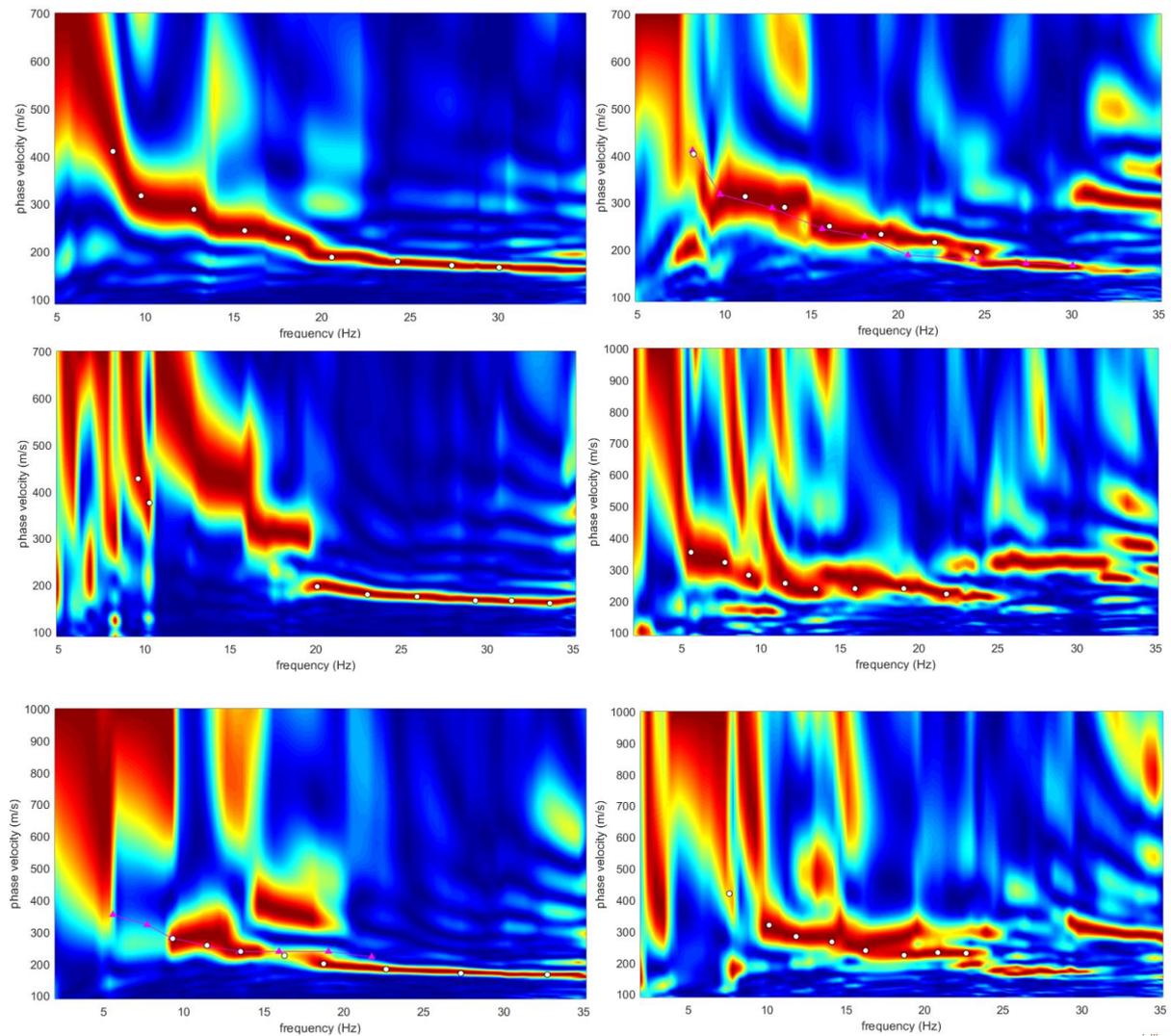
Dopodichè sullo spettro di velocità medio, è stato effettuato il processo di picking dei massimi di ampiezza del modo fondamentale e degli eventuali modi superiori. Mediante il processo di inversione, si ottiene il profilo di velocità con la profondità che permette di definire il parametro  $V_{seq}$ .

**Tracce acquisite:**



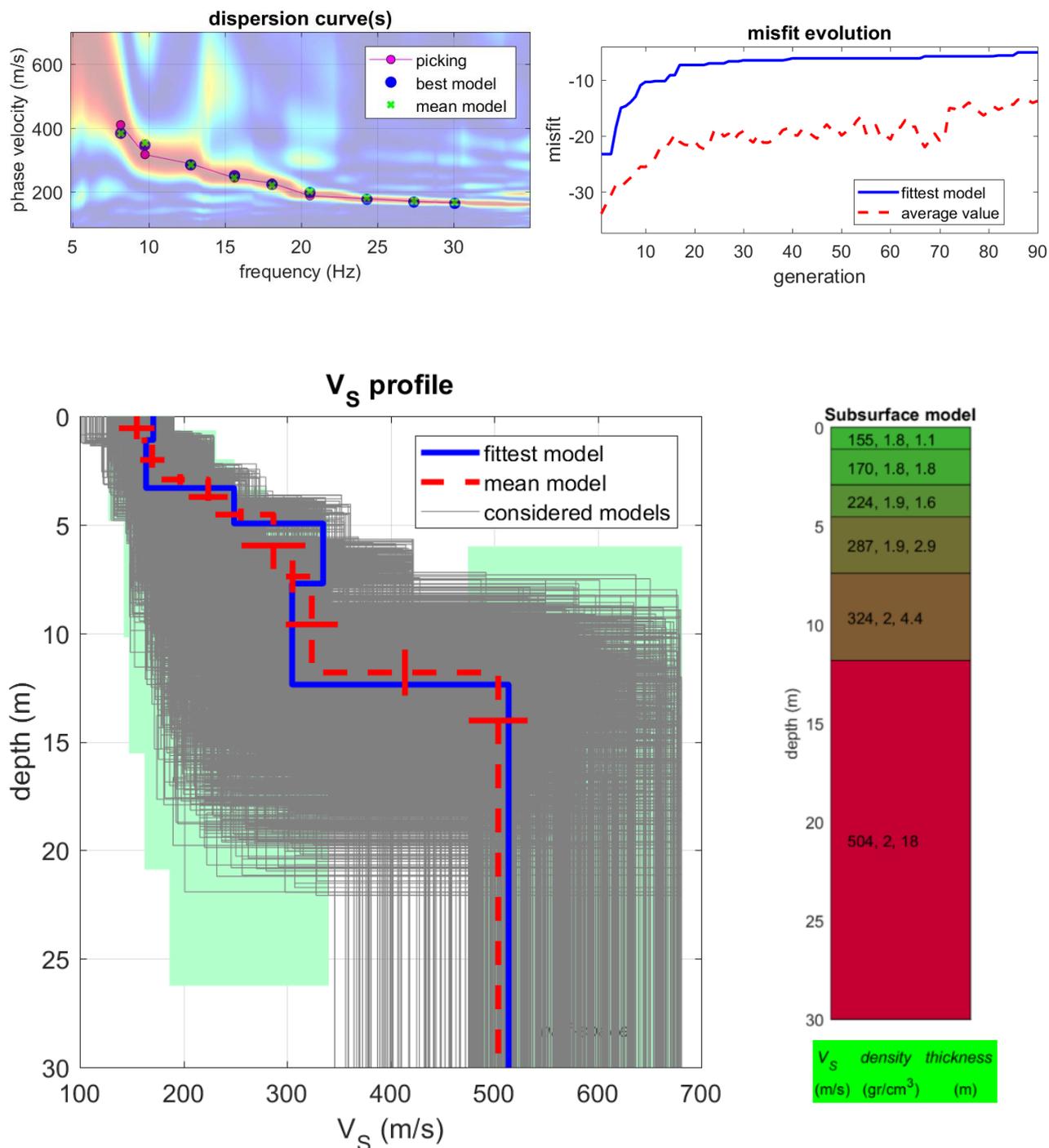
**Figura 19 - Tracce di tutti gli shots effettuati rispettivamente a 7.5, 10 e 12.5 metri, da ogni lato dello stendimento**

*Spettri di velocità:*



**Figura 20 - Spettri delle tracce di tutti e sei gli shots effettuati.**

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



dataset: 75.sg2  
 dispersion curve: 75.cdp  
 Vs30 & VsE (best model): 356 356 m/s  
 Vs30 & VsE (mean model): 354 354 m/s

**Figura 21 - Risultati dell'inversione e del modello stratigrafico del sottosuolo**

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di calcolare la velocità delle Vs e di determinare quindi la categoria di suolo nell'area investigata:

Vs30 e Vseq = **354 m/s**

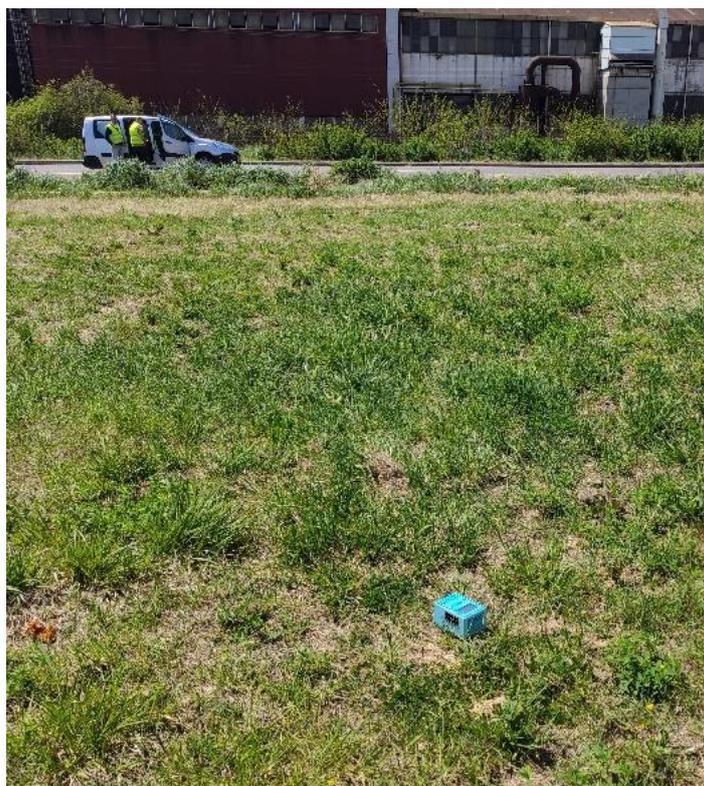
Categoria di suolo: **C**

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.

## 2.6. HVSr 3

### 2.6.1. *Acquisizione dei dati*

Le indagini HVSr sono state svolte successivamente all'indagine sismica di tipo attivo, posizionando la strumentazione al centro dello stendimento utilizzato per eseguire l'indagine MASW, al fine di determinare le frequenze di risonanza caratteristiche di sito.



**Figura 22 - Esecuzione dell'indagine HVSr.**

Il TROMINO è stato posizionato ed è stato lasciato acquisire in modo automatico per un tempo di 20 minuti.

### *2.6.2. Elaborazione dei dati e risultati*

I dati sono stati trasferiti al PC attraverso apposito collegamento USB ed elaborati con il software Grilla. I dati che sono stati puliti, per la presenza di tracce disturbate e filtrati in funzione della loro dispersione espressa in termini di deviazione standard. È stato inoltre imposto un lisciamento (smoothing) del 10% alle curve per smorzarne la spigolosità ed un intervallo di analisi di frequenza di 10 secondi. Grazie a queste operazioni viene successivamente rappresentata la curva sperimentale H/V dalla quale è possibile risalire al picco di frequenza massima di risonanza di sito.

### **Risultati**

Strumento: TEB-0504/01-19

Formato dati: 32 byte

Fondo scala [mV]: 89

Inizio registrazione: 23/04/20 11:35:23      Fine registrazione: 23/04/20 11:55:23

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST ; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".      Analizzato 100% tracciato (selezione automatica)

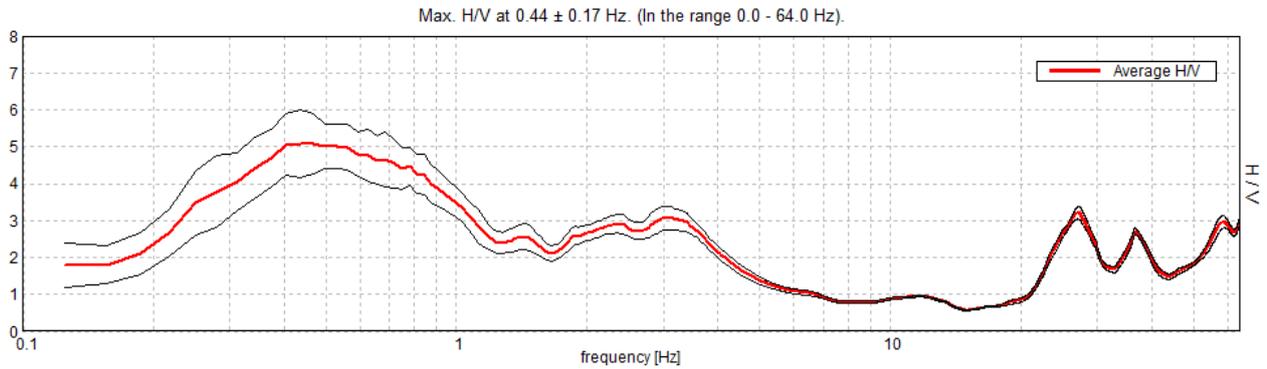
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

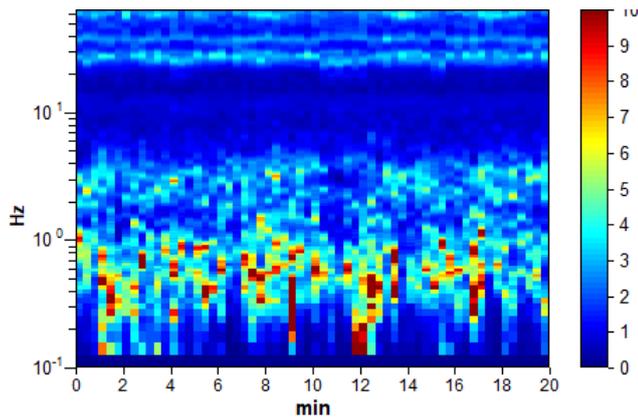
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

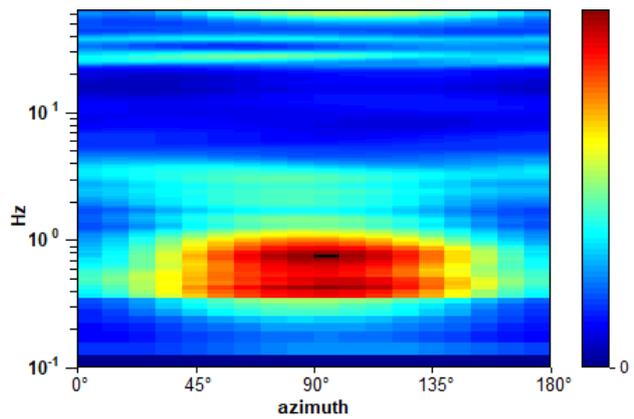
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



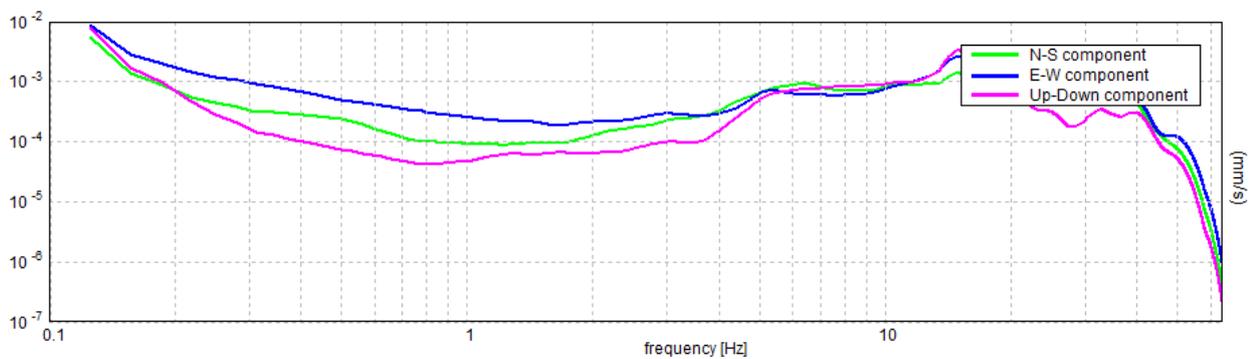
SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



**Picco H/V a  $0.44 \pm 0.17$  Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.44 > 0.50$		<b>NO</b>
$n_c(f_0) > 200$	$525.0 > 200$	<b>OK</b>	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 22	<b>OK</b>	

### Criteria per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.188 Hz	<b>OK</b>	
Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.219 Hz	<b>OK</b>	
$A_0 > 2$	$5.08 > 2$	<b>OK</b>	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.39523  < 0.05$		<b>NO</b>
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.17291 < 0.0875$		<b>NO</b>
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.9298 < 2.5$	<b>OK</b>	

$L_w$	lunghezza della finestra
$n_w$	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
$f$	frequenza attuale
$f_0$	frequenza del picco H/V

$\sigma_f$	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
$A_0$	ampiezza della curva H/V alla frequenza $f_0$
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza $f$
$f^-$	frequenza tra $f_0/4$ e $f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
$f^+$	frequenza tra $f_0$ e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	deviazione standard di $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$

Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [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 $f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Dall'indagine è stato possibile identificare la frequenza del picco del rapporto H/V pari a  $0.44 \pm 0.17$  Hz.

### 3. CONCLUSIONE

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.

Le indagini hanno prodotto i seguenti risultati:

#### Stazione di Assisi:

##### Sito 1:

$V_{s30}$  e  $V_{seq} = 385 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

$f_0: 0.31 \pm 0.56 \text{ Hz}$

##### Sito 2:

$V_{s30}$  e  $V_{seq} = 417 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

$f_0: 0.31 \pm 0.06 \text{ Hz}$

##### Sito 3:

$V_{s30}$  e  $V_{seq} = 354 \text{ m/s}$

Categoria di suolo: **C**

Depositivi 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.

$f_0: 0.44 \pm 0.17 \text{ Hz}$

