

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



S.O. GEOLOGIA TECNICA

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA DI 2° FASE

RADDOPPIO DECIMOMANNU-VILLAMASSARGIA

Lotto 2

RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOFISICHE

SCALA:

-

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

RR0P 02 R 69 IG GE0005 001 B

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	T. Vicenzetto	03/2023	P. Balbi	03/2023	T. Paoletti	03/2023	G. Benedetti Luglio 2023
B	Emissione Esecutiva	P. Balbi	07/2023	F. Romano	07/2023	T. Paoletti	07/2023	ITALFERR S.p.A. Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane Dott. Geol. Giampaolo Benedetti Ordine dei Geologi Emilia Romagna n. 1019

File: RR0P02R69IGGE0005001B

n. Elab.: 1



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	2 di 55

INDICE

1	PREMESSA	3
2	METODOLOGIE DI INDAGINE	4
3	INDAGINE SISMICA CON METODO MASW ATTIVO	5
4	RISULTATI PROSPEZIONI MASW	6
4.1	MASW1_LOTTO2	6
4.2	MASW2_LOTTO2	13
4.3	MASW3_LOTTO2	20
5	INDAGINE SISMICA CON METODO HVSR	27
6	RISULTATI INDAGINE SISMICA PASSIVA (HVSR)	30
6.1	HVSR1_LOTTO2	30
6.2	HVSR2_LOTTO2	35
6.3	HVSR3_LOTTO2	40
9	INDAGINE SISMICA CON METODO A RIFRAZIONE IN ONDE P E ONDE S	45
10	RISULTATI TOMOGRAFIA SISMICA	47
10.1	RIFRAZIONE R1_LOTTO 2	47
10.2	RIFRAZIONE R2_LOTTO 2	51
11	CONCLUSIONI	55

1 PREMESSA

La presente relazione illustra e riassume i risultati delle indagini geofisiche a supporto del PFTE della tratta Decimomannu – Villamassargia parte 2 (Figura 1-1 e Figura 1.3).

A tal fine sono state richieste indagini sismiche di superficie di Sismica a Rifrazione, indagini di superficie con metodo passivo (HVSr) e indagini di superficie con metodo attivo (MASW), in modo tale da poter stimare la V_{seq} e la risposta sismica locale in base alla normativa vigente (DM 17 gennaio 2018 - NTC2018 Norme Tecniche sulle Costruzioni).



Figura 1-1: Inquadramento generale dell'area di studio Lotto 2 (da Google Earth).

2 METODOLOGIE DI INDAGINE

La campagna di misure geofisiche condotta, è consistita in indagini sismiche di superficie con metodologia MASW, Sismica a Rifrazione e HVSR; ed indagini sismiche in foro con metodologia Down-Hole (DH). Di seguito, nei relativi capitoli tecnici, si riporta una breve descrizione dei principi base delle tecniche d'indagine e i relativi risultati.



Figura 2-1: Strumentazione impiegata per le prove di superficie mediante metodologia MASW (a sinistra in alto), HVSR (a destra in alto), di sismica a rifrazione in onde P e S (in basso).

Indagini geofisiche	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	5 di 55

3 INDAGINE SISMICA CON METODO MASW ATTIVO

Lo scopo della prova MASW è quello di ricostruire il profilo di rigidità del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh con un successivo processo d'inversione, attraverso il quale è fornita una stima indiretta della distribuzione delle Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio). La prova consiste nel produrre sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale in un determinato campo di frequenze e nel registrare tramite uno stendimento lineare di sensori (geofoni) le vibrazioni prodotte, in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

Il profilo che si ricava da questo tipo di indagine è un profilo monodimensionale Vs-Profondità che generalmente, in presenza di stratigrafie costituite da orizzonti piano paralleli, può essere attribuito convenzionalmente alla stratigrafia relativa al centro della stesa, in quanto si assume che lungo tutto lo sviluppo dello stendimento la stratigrafia rimanga invariata. Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati delle indagini MASW è winMASW 2018 Professionale della Eliosoft.

In riferimento all'acquisizione di onde S con tecnica di sismica attiva (prova MASW), sono state adottate le seguenti caratteristiche:

- 24 geofoni verticali (frequenza di 4,5 Hz);
- spaziatura dei geofoni: 2 metri;
- sorgente: massa da 10 kg;
- distanza energizzazioni: 3-4-5 volte la spaziatura;
- lunghezza registrazione del singolo evento: 2000 millisecondi;
- campionamento del segnale: 1 millisecondo.

N°	Strumentazione per prove sismiche attive di superficie (MASW e Rifrazione)
1	Sismografo Echo 24-48 2010 prodotto dalla Ambrogeo s.r.l. di Piacenza (PC)
24	geofoni verticali con frequenza 4,5 Hz (Geospace)
1	cavo di collegamento per geofoni 24 take-out/2.0 metri
1	massa battente del peso di 10 kg
1	piastra in alluminio pressato
1	linea trigger con dispositivo hammer-switch

Tabella 3.1: Strumentazione utilizzata per l'indagine sismica MASW.

	DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA					
Indagini geofisiche	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. B	FOGLIO 6 di 55

4 RISULTATI PROSPEZIONI MASW

4.1 MASW1_LOTTO2

L'indagine sismica MASW1_LOTTO2 è stata eseguita all'interno del comune di Villaspeciosa (SU) in un campo in prossimità della ferrovia (Figura 4-1-Figura 4-2).



Figura 4-1: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova MASW1_LOTTO2 (da Google Earth).



Figura 4-2: Foto relativa all'esecuzione della prova MASW1_LOTTO2.

L'indagine di sismica superficiale eseguita ha permesso la determinazione dell'andamento della velocità delle V_s fino a 30 m di profondità.

Di seguito si riportano le immagini relative all'analisi ω - p (trasformata τ - p & trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione è stata effettuata con il metodo *phase shift* utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici (Figura 4-3).

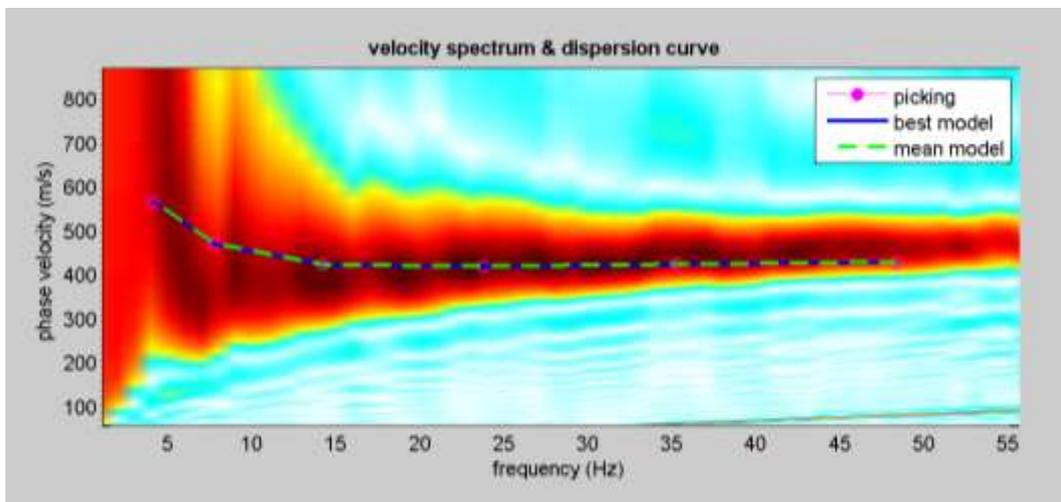


Figura 4-3: Curva di dispersione e modo fondamentale relativo al segnale sismico registrato in situ.

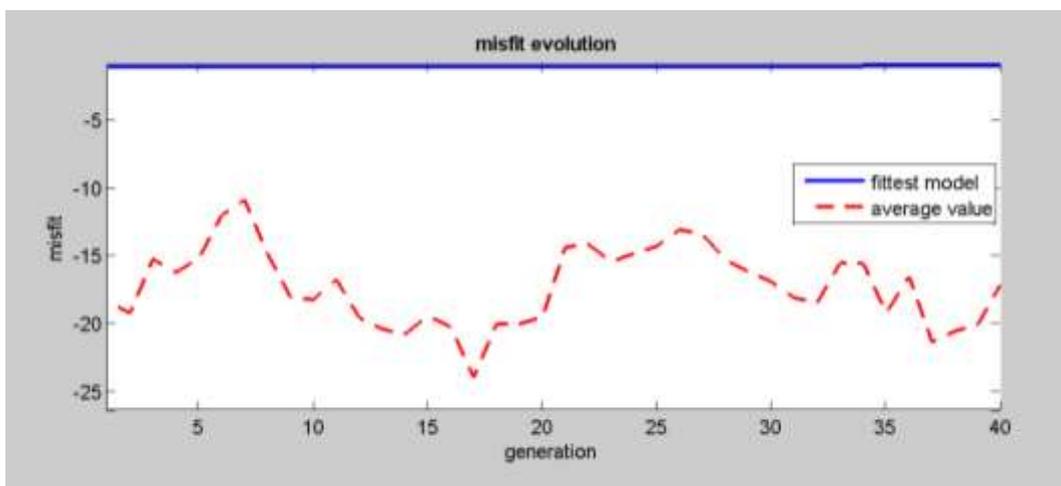


Figura 4-4: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

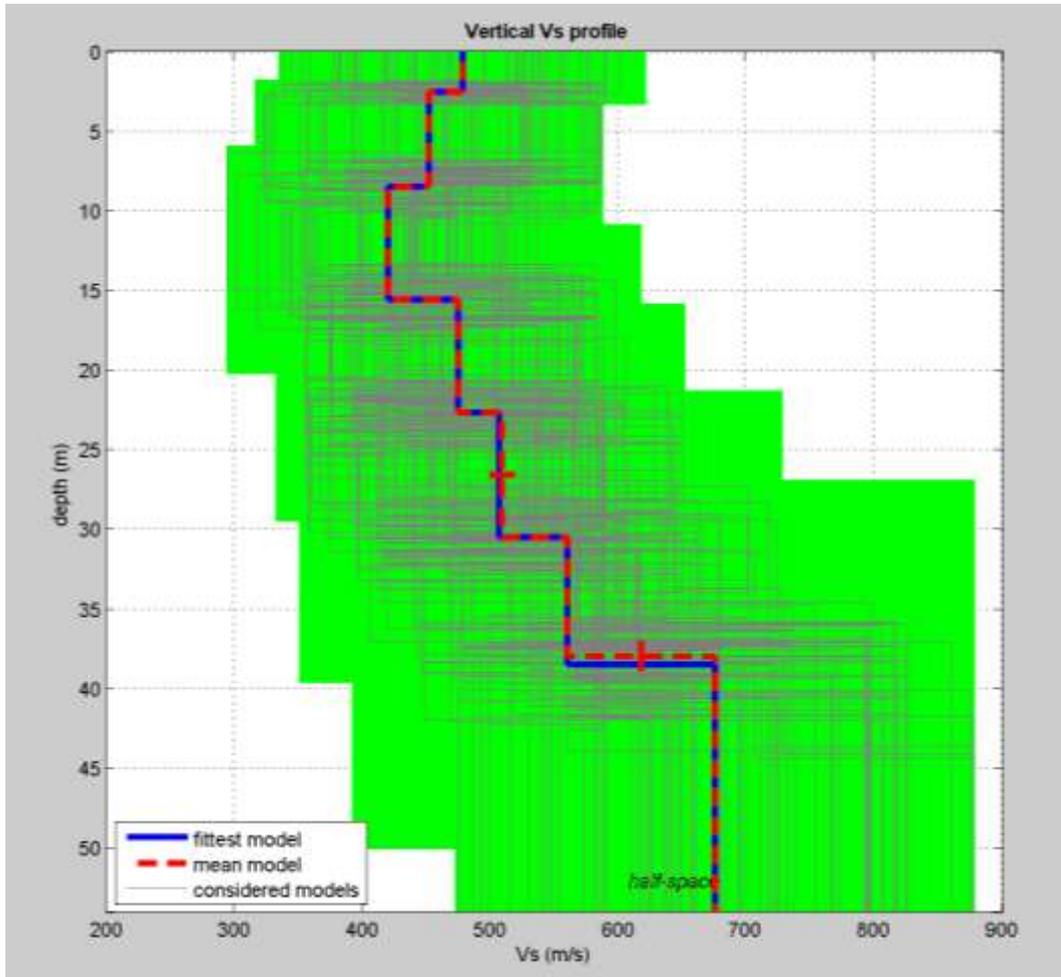


Figura 4-5: Modello del profilo delle Vs con la profondità risultante dall'inversione dei dati.

Per quanto concerne i dettagli relativi alle caratteristiche geometriche dello stendimento, sono stati utilizzati 24 geofoni in linea con interdistanza di 2.0 m.

Al fine della valutazione della risposta sismica locale (RSL) con approccio semplificato si effettua una "classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, Vs" (NTC 2018).

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

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

Dove:



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	9 di 55

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, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s.

Si tiene a precisare che “per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio V_{seq} è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità” (NTC 2018).

Nel caso specifico è risultato:

$$V_{seq} = 464 \text{ m/s}$$

Si tratta quindi di un suolo di **tipo B** ($S_s = 1.2$ secondo le NTC 2018) (Tabella 4.1).

È stata inoltre individuata la categoria topografica **T1**, in quanto il sito ricade all'interno delle “configurazioni superficiali semplici” (NTC 2018) (Tabella 4.2).

Inoltre, poiché il sito ricade all'interno delle “categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato” (NTC 2018) per definire le azioni sismiche viene fornito lo spettro di risposta elastico (**Figura 4-6**) con relativa tabella (Tabella 4.3), ricavato considerando una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni). Tale condizione corrisponde allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (NTC 2018).



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	10 di 55

CLASSIFICAZIONE DEL SITO NTC 2018 MASW1_LOTTO2

Data: Ottobre 2022

Località Villaspeciosa (SU)

Coordinate LAT 39.300881° LONG 8.921431° (WGS84 gradi decimali)

Metodo di indagine MASW

Strumentazione utilizzata Sismografo Echo 24-2010 a 24 Canali, 24 bits

Metodo di energizzazione Mazza da 10 kg

Geometria stendimento: 24 geofoni - interasse 2.0m

RISPOSTA SISMICA LOCALE – approccio semplificato

(si vedano le tabelle sottostanti per ricavare i valori del Coeff. Cc e del coeff di amplificazione S)

		Ss	Cc	S=S _s *S _T
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.			
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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	1.2	1.37	1.2
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.			
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente 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 100 e 180 m/s.			
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.			

Tabella 4.1: Categorie di sottosuolo di fondazione (NTC 2018).

I parametri a/g, F0 e T* vengono forniti dalla normativa

T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1	
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1.2	valore alla sommità del pendio
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.2	valore della cresta del rilievo
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1.4	valore della cresta del rilievo

Tabella 4.2: Categorie topografiche (NTC 2018).

“Le sovraesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell’azione sismica se di altezza maggiore di 30 m” (NTC 2018).

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO RIERITO AL 5% DISMORZAMENTO – COMPONENTE ORIZZONTALE (NTC 2018)

Possibilità di superamento del 10% in 50 anni

$$T_0 = a_g * S$$

$$T_b = T_c / 3$$

$$T_c = C_c * T_c^*$$

$$T_d = 4.0 * a_g / g + 1.6$$

Ascisse T(s)	Ordinate Se (a/g)
0.000	0.054
0.152	0.154
0.455	0.154
1.780	0.039

Tabella 4.3: Valori del periodo proprio di vibrazione (T) e di accelerazione della componente orizzontale del moto sismico (Se).

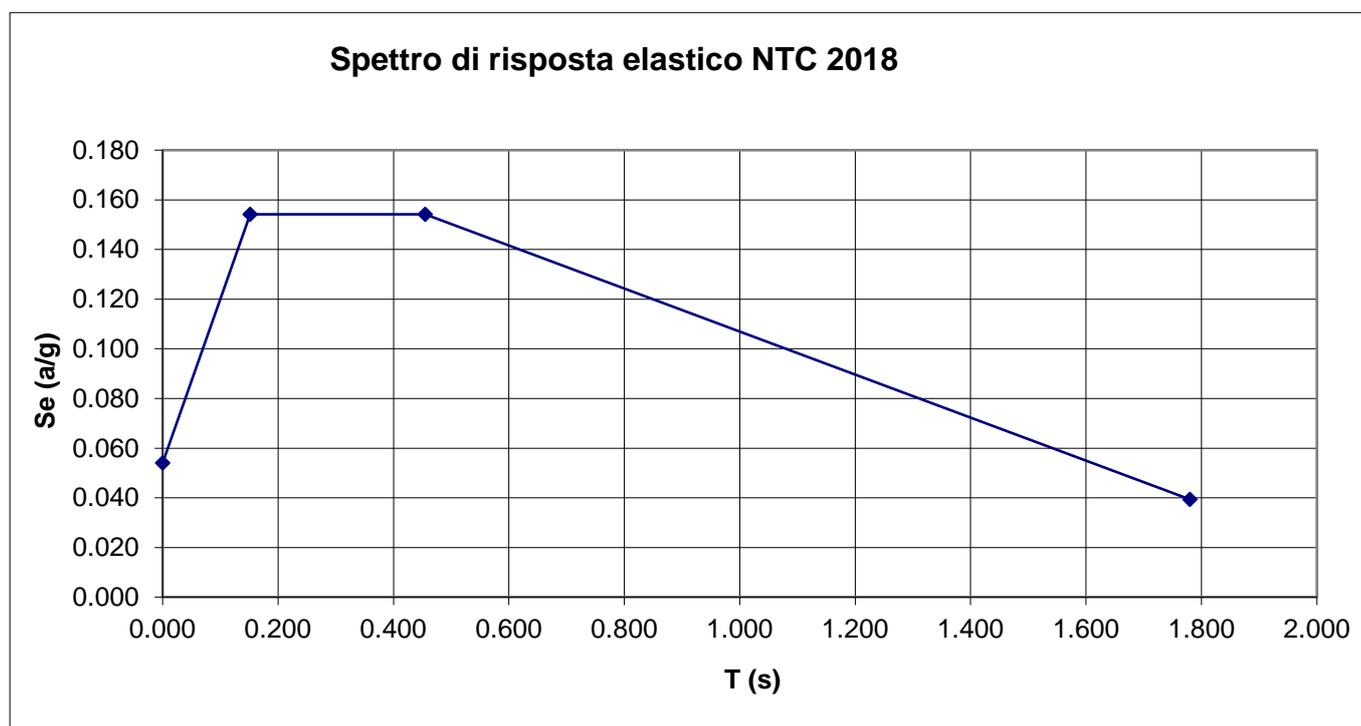


Figura 4-6: Spettro di risposta elastico in accelerazione della componente orizzontale del modo sismico (Se).

Vengono di seguito forniti i risultati della prova sismica MASW (Tabella 4.4) con particolare rilievo all'andamento delle onde sismiche di taglio (Vs) e del modulo di taglio dinamico (G) con la profondità (**Figura 4-7**).

Depth (m)	Density (t/mc)	S-velocity (m/s)	Gmax (Mpa)
2.60	1.92	478	438
8.50	1.92	452	392
15.60	1.88	420	332
22.70	1.93	475	435
30.00	1.96	506	501

Tabella 4.4: Valori di profondità, densità, Vs e modulo di taglio dinamico (G) ottenuti dai risultati della prova sismica MASWI_LOTTO2.

$V_{s,eq} = 463.17 \text{ m/s}$

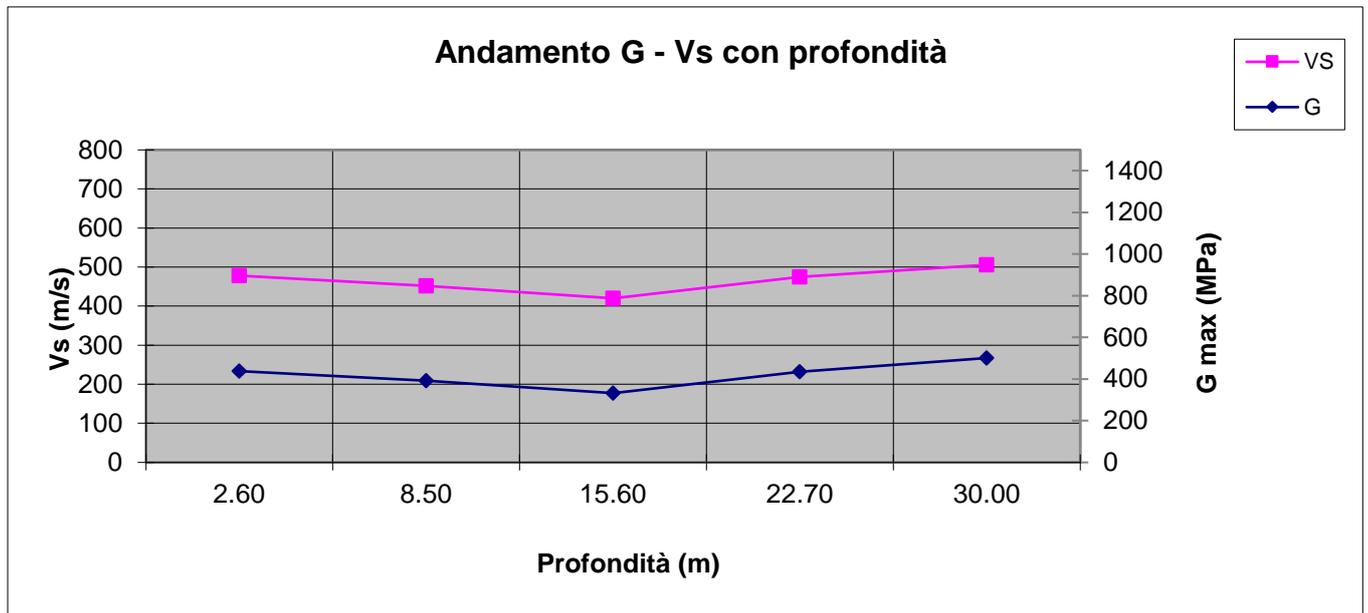


Figura 4-7: Grafico dell'andamento del modulo di taglio dinamico (G) e della Vs con la profondità.

	DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA					
Indagini geofisiche	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. B	FOGLIO 13 di 55

4.2 MASW2_LOTTO2

L'indagine sismica MASW2_LOTTO2 è stata eseguita all'interno del comune di Villaspeciosa (SU), in prossimità della linea ferroviaria, vicino a SP90 (Figura 4-8-Figura 4-9).



Figura 4-8: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova MASW2_LOTTO2 (da Google Earth).



Figura 4-9: Foto relativa all'esecuzione della prova MASW2_LOTTO2.

L'indagine di sismica superficiale eseguita ha permesso la determinazione dell'andamento della velocità delle V_s fino a 30 m di profondità.

Di seguito si riportano le immagini relative all'analisi ω - p (trasformata τ - p & trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione è stata effettuata con il metodo *phase shift* utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici (**Figura 4-10**).

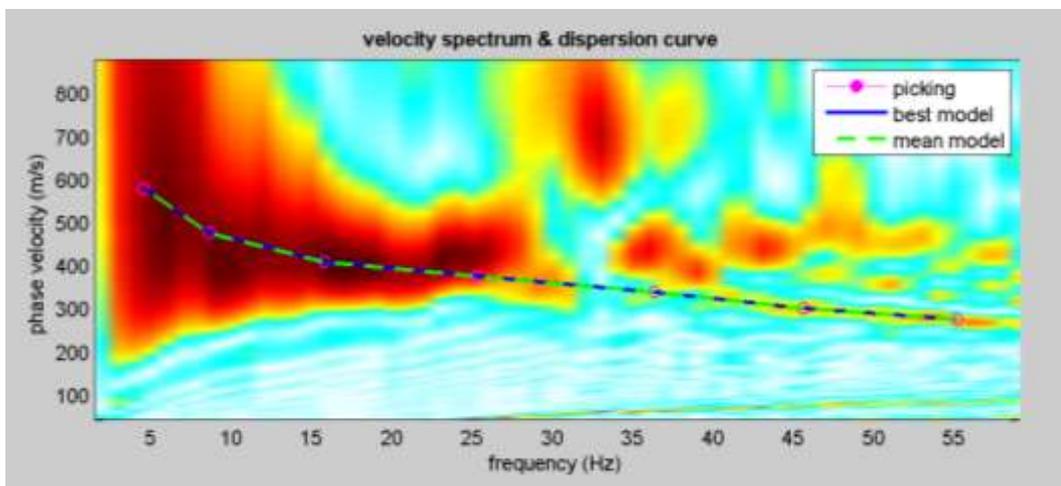


Figura 4-10: Curva di dispersione e modo fondamentale relativo al segnale sismico registrato in situ.

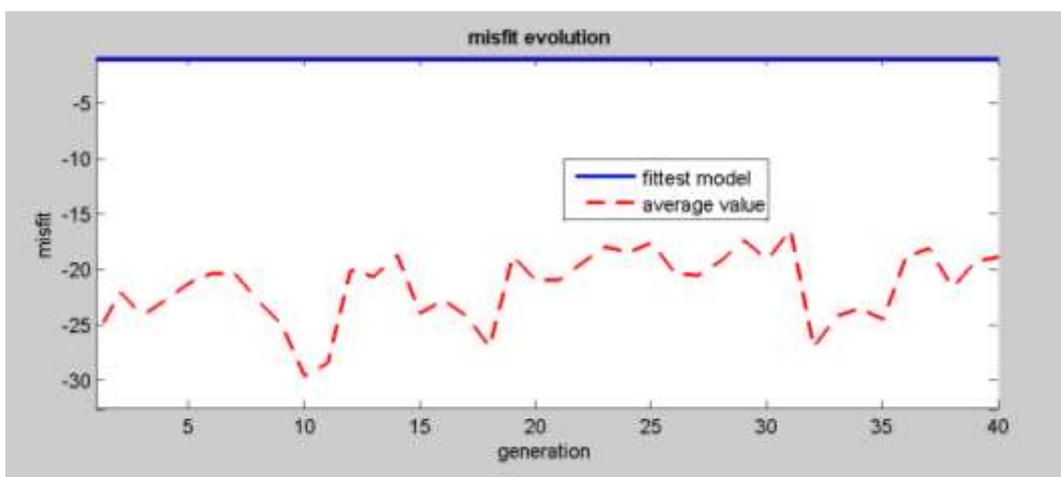


Figura 4-11: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

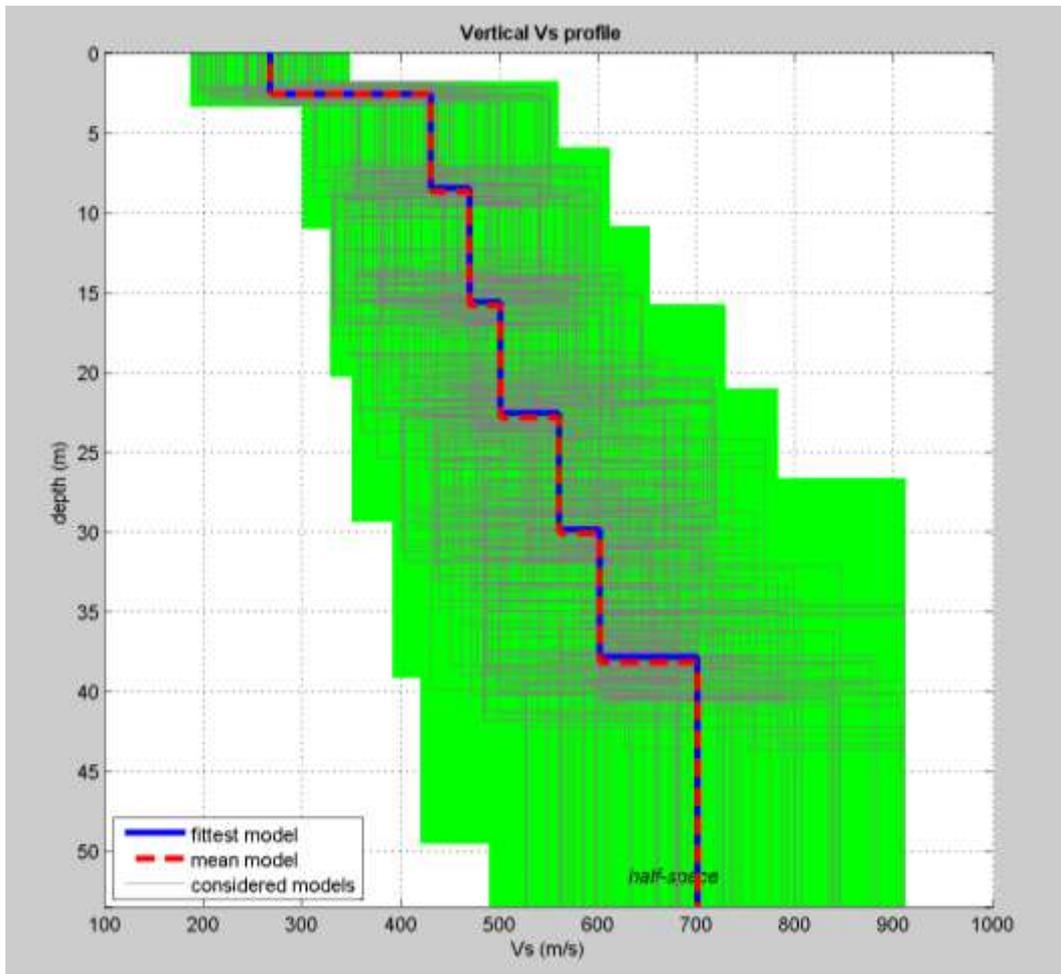


Figura 4-12: Modello del profilo delle Vs con la profondità risultante dall'inversione dei dati.

Per quanto concerne i dettagli relativi alle caratteristiche geometriche dello stendimento, sono stati utilizzati 24 geofoni in linea con interdistanza di 2.0 m.

Al fine della valutazione della risposta sismica locale (RSL) con approccio semplificato si effettua una "classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, Vs" (NTC 2018).

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

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

Dove:



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	16 di 55

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, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s.

Si tiene a precisare che “per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio V_{seq} è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità” (NTC 2018).

Nel caso specifico è risultato:

$$V_{seq} = 456 \text{ m/s}$$

Si tratta quindi di un suolo di **tipo B** ($S_s = 1.2$ secondo le NTC 2018) (Tabella 4.5).

È stata inoltre individuata la categoria topografica **T1**, in quanto il sito ricade all'interno delle “configurazioni superficiali semplici” (NTC 2018) (Tabella 4.6).

Inoltre, poiché il sito ricade all'interno delle “categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato” (NTC 2018) per definire le azioni sismiche viene fornito lo spettro di risposta elastico (Figura 4-13) con relativa tabella (Tabella 4.7: Valori del periodo proprio di vibrazione (T) e di accelerazione della componente orizzontale del moto sismico (S_e)), ricavato considerando una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni). Tale condizione corrisponde allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (NTC 2018).



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	17 di 55

CLASSIFICAZIONE DEL SITO NTC 2018 MASW2_LOTTO2

Data: Ottobre 2022

Località Villaspeciosa (SU)

Coordinate LAT 39.300241° LONG 8.900803° (WGS84 gradi decimali)

Metodo di indagine MASW

Strumentazione utilizzata Sismografo Echo 24-2010 a 24 Canali, 24 bits

Metodo di energizzazione Mazza da 10 kg

Geometria stendimento: 24 geofoni - interasse 2.0 m

RISPOSTA SISMICA LOCALE – approccio semplificato

(si vedano le tabelle sottostanti per ricavare i valori del Coeff. Cc e del coeff di amplificazione S)

		Ss	Cc	S=S _s *S _T
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.			
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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	1.2	1.37	1.2
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.	1.5	1.53	1.5
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente 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 100 e 180 m/s.			
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.			

Tabella 4.5: Categorie di sottosuolo di fondazione (NTC 2018).

I parametri a/g, F0 e T* vengono forniti dalla normativa

T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1	
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1.2	valore alla sommità del pendio
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.2	valore della cresta del rilievo
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1.4	valore della cresta del rilievo

Tabella 4.6: Categorie topografiche (NTC 2018).

“Le sovraesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell’azione sismica se di altezza maggiore di 30 m” (NTC 2018).

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	18 di 55

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO RIERITO AL 5% DISMORZAMENTO – COMPONENTE ORIZZONTALE (NTC 2018)

Possibilità di superamento del 10% in 50 anni

$$T_0 = a_g \cdot S$$

$$T_b = T_c / 3$$

$$T_c = C_c \cdot T_c^*$$

$$T_d = 4.0 \cdot a_g / g + 1.6$$

Ascisse T(s)	Ordinate Se (a/g)
0.000	0.054
0.152	0.154
0.455	0.154
1.780	0.039

Tabella 4.7: Valori del periodo proprio di vibrazione (T) e di accelerazione della componente orizzontale del moto sismico (Se).

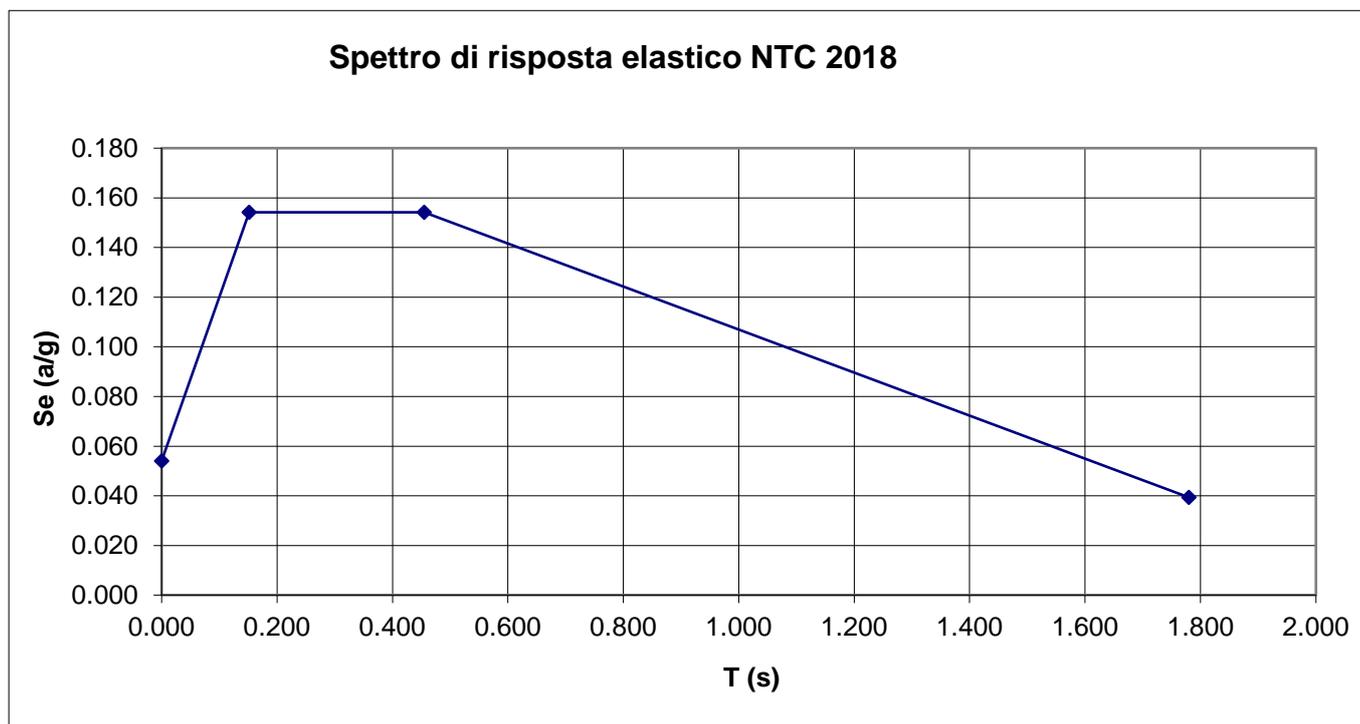


Figura 4-13: Spettro di risposta elastico in accelerazione della componente orizzontale del modo sismico (Se).

Vengono di seguito forniti i risultati della prova sismica MASW (Tabella 4.8) con particolare rilievo all'andamento delle onde sismiche di taglio (Vs) e del modulo di taglio dinamico (G) con la profondità (Figura 4-14).

Depth (m)	Density (t/mc)	S-velocity (m/s)	Gmax (Mpa)
2.60	1.72	268	123
8.70	1.91	430	354
15.80	1.92	470	425
22.80	1.95	501	490
30.00	1.98	560	622

Tabella 4.8: Valori di profondità, densità, Vs e modulo di taglio dinamico (G) ottenuti dai risultati della prova sismica MASW2_LOTTO2.

$V_{s_{eq}} = 455.77 \text{ m/s}$

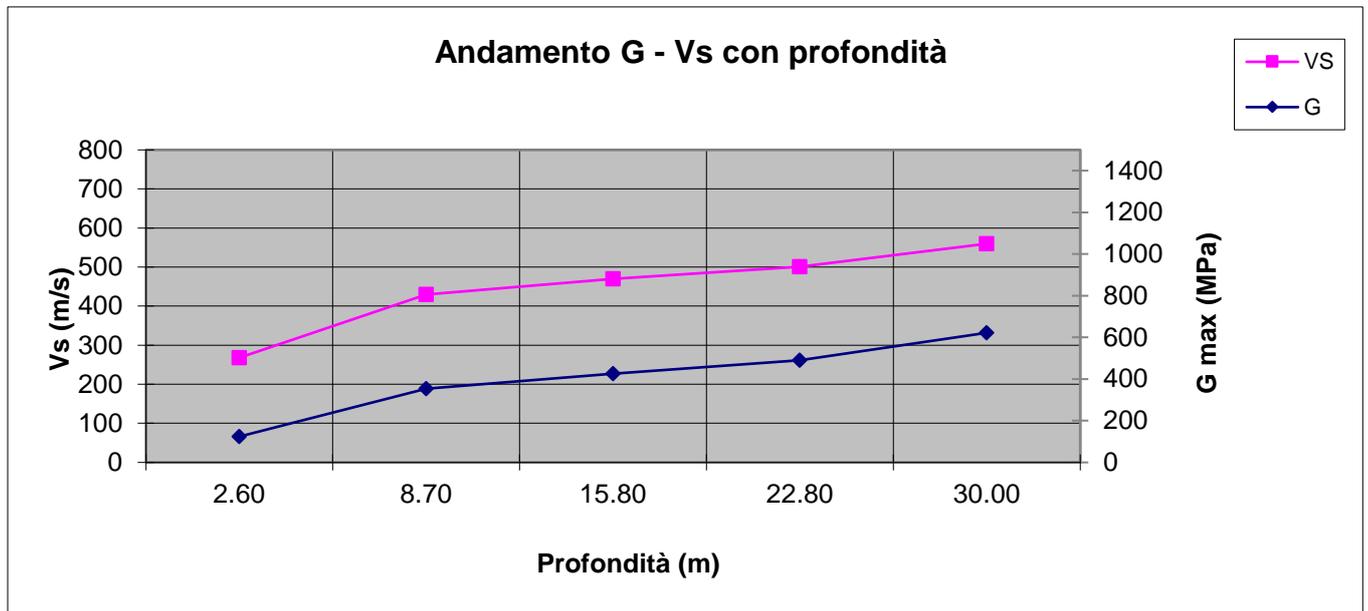


Figura 4-14: Grafico dell'andamento del modulo di taglio dinamico (G) e della Vs con la profondità.

4.3 MASW3_LOTTO2

L'indagine sismica MASW3_LOTTO2 è stata eseguita all'interno del comune di Siliqua (SU) in prossimità della Linea ferroviaria (**Figura 4-15-Figura 4-16**).



Figura 4-15: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova MASW3_LOTTO2 (da Google Earth).



Figura 4-16: Foto relativa all'esecuzione della prova MASW3_LOTTO2.

L'indagine di sismica superficiale eseguita ha permesso la determinazione dell'andamento della velocità delle V_s fino a 30 m di profondità.

Di seguito si riportano le immagini relative all'analisi ω - p (trasformata τ - p & trasformata di Fourier) al fine di discriminare l'energia associata alle onde di Rayleigh.

L'inversione della curva di dispersione è stata effettuata con il metodo *phase shift* utilizzando la tecnica di calcolo degli algoritmi genetici (**Figura 4-17**).

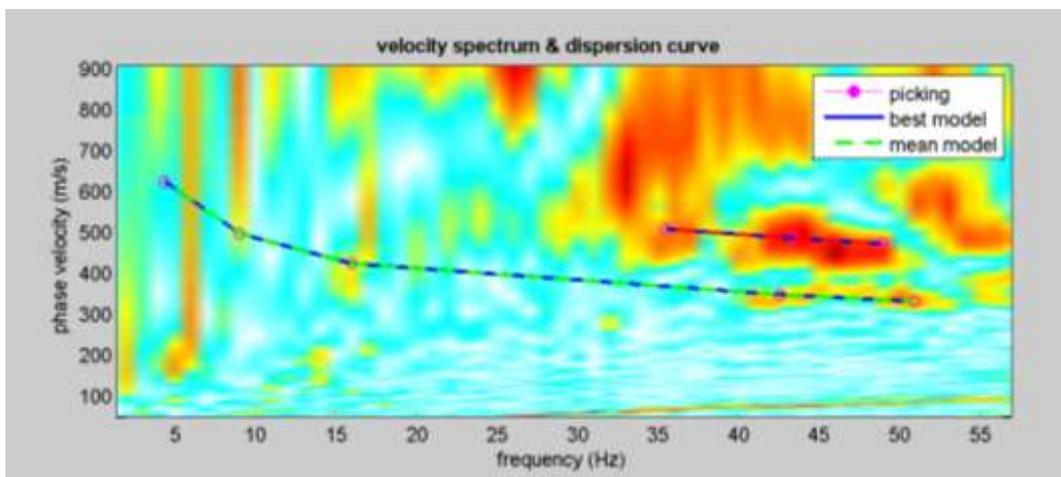


Figura 4-17: Curva di dispersione e modo fondamentale relativo al segnale sismico registrato in situ.

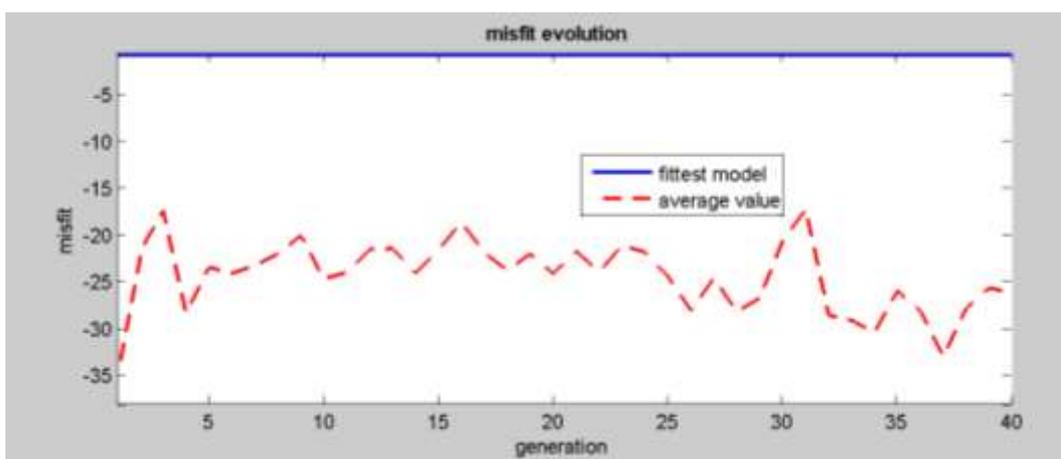


Figura 4-18: Confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella teorica.

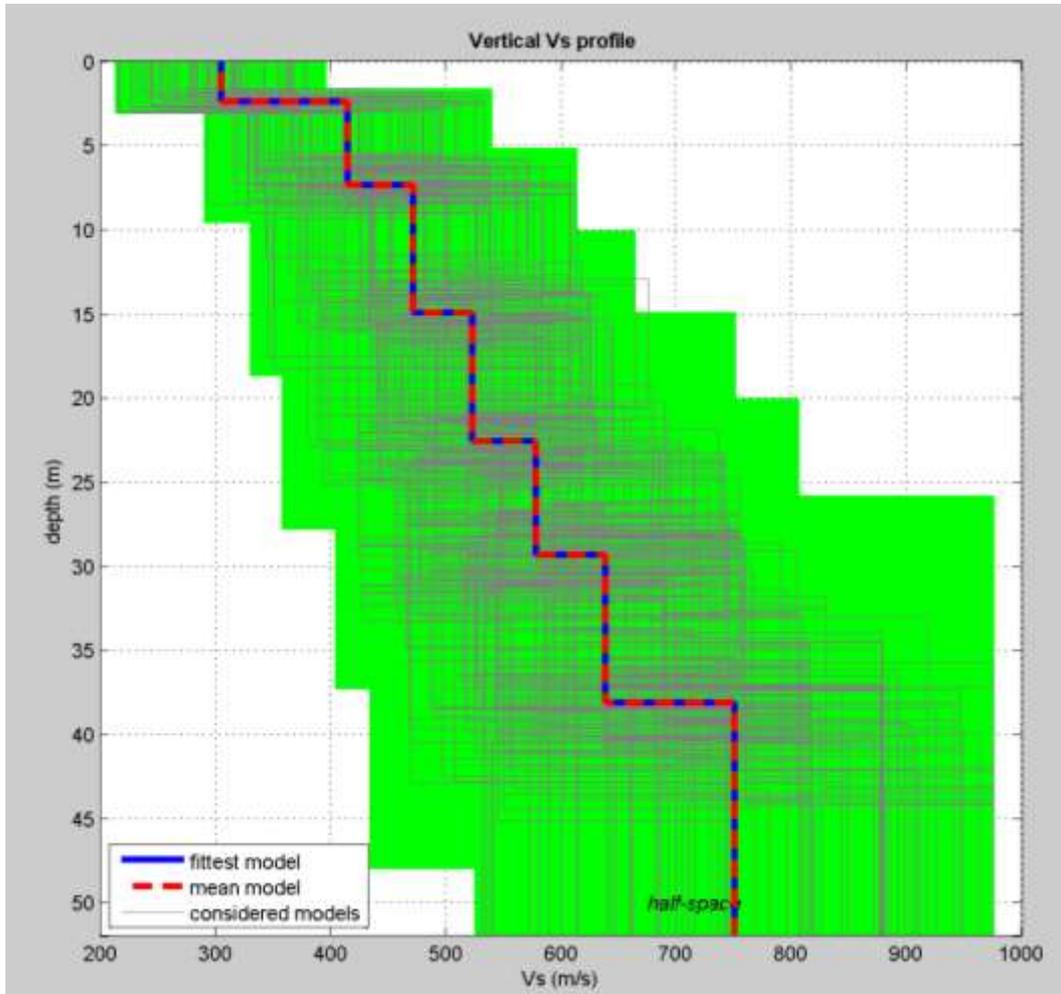


Figura 4-19: Modello del profilo delle Vs con la profondità risultante dall'inversione dei dati.

Per quanto concerne i dettagli relativi alle caratteristiche geometriche dello stendimento, sono stati utilizzati 24 geofoni in linea con interdistanza di 2.0 m.

Al fine della valutazione della risposta sismica locale (RSL) con approccio semplificato si effettua una "classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, Vs" (NTC 2018).

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



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	23 di 55

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

Dove:

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, caratterizzato da V_s non inferiore a 800 m/s.

Si tiene a precisare che “per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità” (NTC 2018).

Nel caso specifico è risultato:

$$V_{s,eq} = 474.39 \text{ m/s}$$

Si tratta quindi di un suolo di **tipo B** ($S_s = 1.2$ secondo le NTC 2018) (**Tabella 4.9**).

È stata inoltre individuata la categoria topografica **T1**, in quanto il sito ricade all'interno delle “configurazioni superficiali semplici” (NTC 2018) (**Tabella 4.10**).

Inoltre, poiché il sito ricade all'interno delle “categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato” (NTC 2018) per definire le azioni sismiche viene fornito lo spettro di risposta elastico (**Figura 4-20**) con relativa tabella (**Tabella 4.11**), ricavato considerando una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (tempo di ritorno 475 anni). Tale condizione corrisponde allo stato limite ultimo di salvaguardia della vita (NTC 2018).



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
	RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	24 di 55

CLASSIFICAZIONE DEL SITO NTC 2018 MASW3_LOTTO2

Data: Ottobre 2022

Località Siliqua (SU)

Coordinate LAT 39.299012 LONG 8.864176 (WGS84 gradi decimali)

Metodo di indagine MASW

Strumentazione utilizzata Sismografo Echo 24-2010 a 24 Canali, 24 bits

Metodo di energizzazione Mazza da 10 kg

Geometria stendimento: 24 geofoni - interasse 2.0 m

RISPOSTA SISMICA LOCALE – approccio semplificato

(si vedano le tabelle sottostanti per ricavare i valori del Coeff. Cc e del coeff di amplificazione S)

		Ss	Cc	S=S _s *S _T
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.			
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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	1.2	1.37	1.2
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.			
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente 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 100 e 180 m/s.			
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.			

Tabella 4.9: Categorie di sottosuolo di fondazione (NTC 2018).

I parametri a/g, F0 e T* vengono forniti dalla normativa

T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	1	
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	1.2	valore alla sommità del pendio
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	1.2	valore della cresta del rilievo
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	1.4	valore della cresta del rilievo

Tabella 4.10: Categorie topografiche (NTC 2018).

“Le sovraesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell’azione sismica se di altezza maggiore di 30 m” (NTC 2018).

SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO RIERITO AL 5% DISMORZAMENTO – COMPONENTE ORIZZONTALE (NTC 2018)

Possibilità di superamento del 10% in 50 anni

Ascisse T(s)	Ordinate Se (a/g)
0.000	0.054
0.152	0.154
0.455	0.154
1.780	0.039

$$T_0 = a_g \cdot S$$

$$T_b = T_c / 3$$

$$T_c = C_c \cdot T_c^*$$

$$T_d = 4.0 \cdot a_g / g + 1.6$$

Tabella 4.11: Valori del periodo proprio di vibrazione (T) e di accelerazione della componente orizzontale del moto sismico (Se).

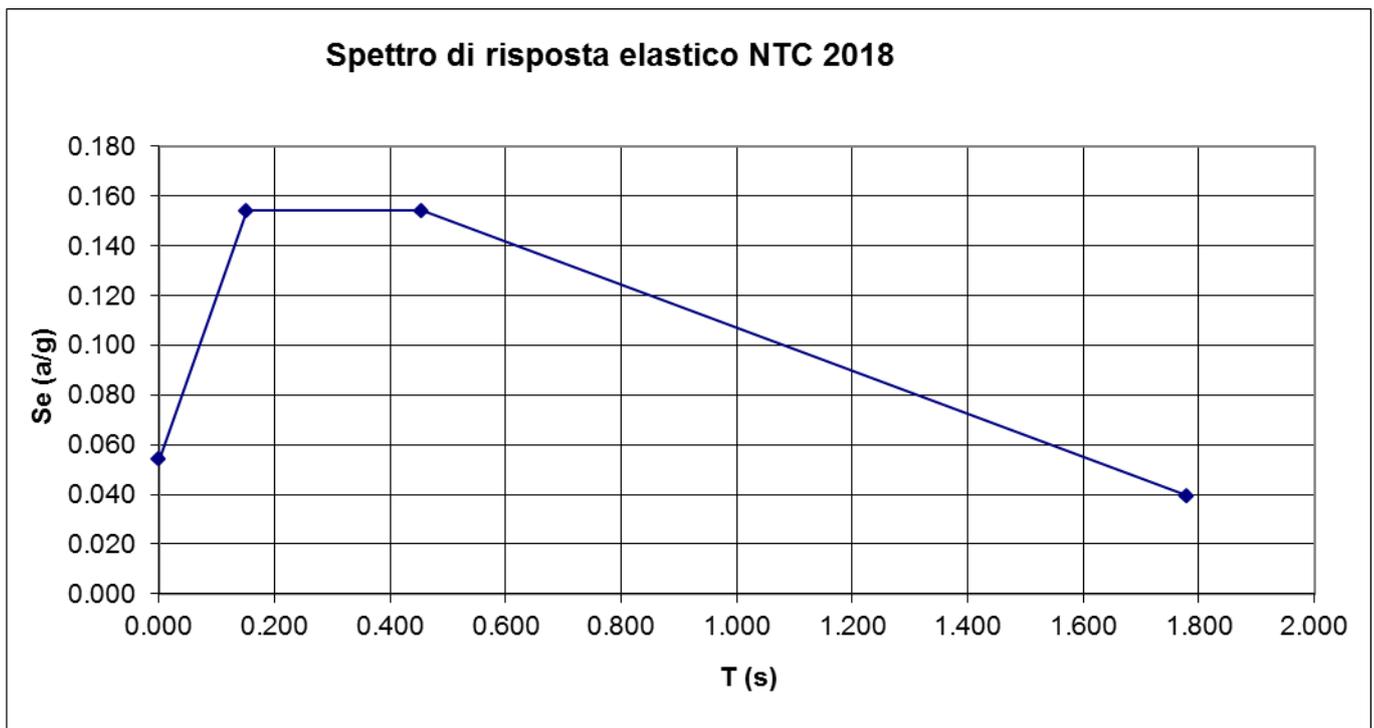


Figura 4-20: Spettro di risposta elastico in accelerazione della componente orizzontale del modo sismico (Se).

Vengono di seguito forniti i risultati della prova sismica MASW (Tabella 4.8) con particolare rilievo all'andamento delle onde sismiche di taglio (Vs) e del modulo di taglio dinamico (G) con la profondità (Figura 4-14).

Depth (m)	Density (t/mc)	S-velocity (m/s)	Gmax (Mpa)
2.40	1.77	305	164
7.40	1.89	415	325
15.00	1.93	472	430
22.60	1.96	523	537
29.30	2.00	578	668
30.00	2.04	638	829

Tabella 4.12: Valori di profondità, densità, Vs e modulo di taglio dinamico (G) ottenuti dai risultati della prova sismica MASW3_LOTTO2.

$V_{seq} = 474.39 \text{ m/s}$

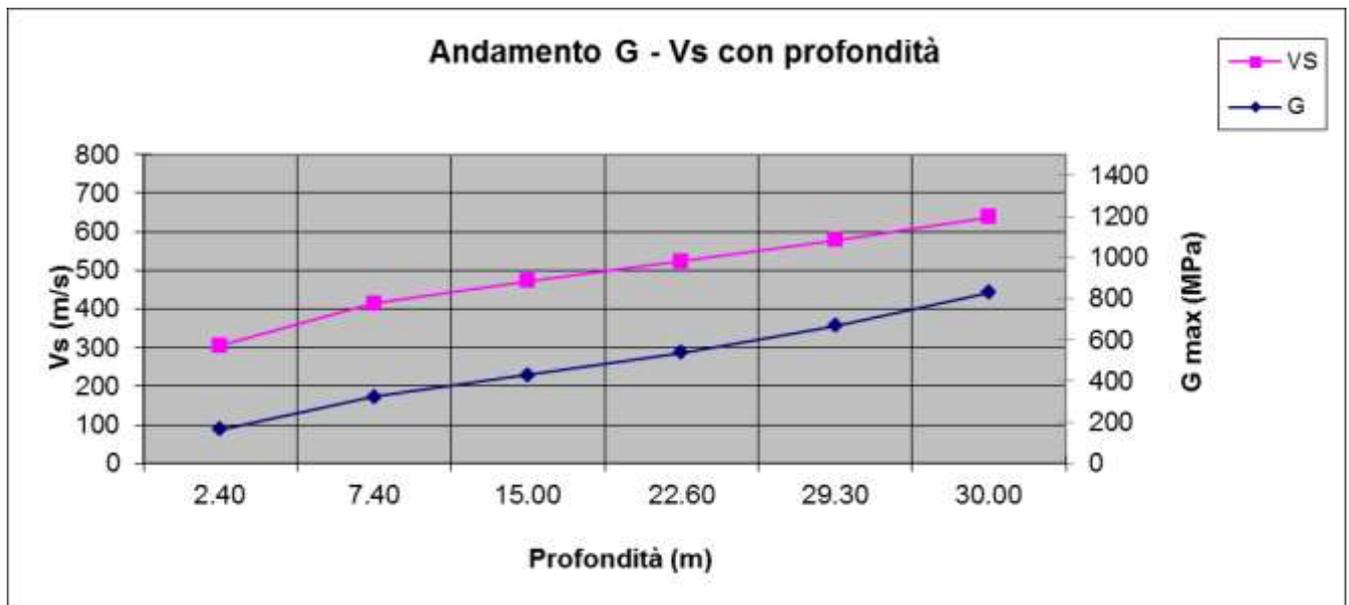


Figura 4-21: Grafico dell'andamento del modulo di taglio dinamico (G) e della Vs con la profondità.



5 INDAGINE SISMICA CON METODO HVSR

Come detto in precedenza, sono state condotte anche delle indagini geofisiche di superficie a tecnica passiva (HVSR); sono state infatti eseguite delle registrazioni al fine di evidenziare le caratteristiche di risposta sismica in termini di frequenza caratteristica del sito in base ai valori d'impedenza sismica rilevata.

I risultati che si possono ottenere da una registrazione di questo tipo rivelano principalmente la frequenza caratteristica di risonanza del sito. Essa rappresenta un parametro fondamentale per il corretto dimensionamento delle opere da realizzare in termini di risposta sismica locale in quanto si dovranno adottare adeguate precauzioni nel realizzare strutture aventi la stessa frequenza di vibrazione del terreno, al fine di evitare effetti di "doppia risonanza", estremamente pericolosi per la stabilità degli stessi.

Le basi teoriche della tecnica HVSR si rifanno in parte alla sismica tradizionale (riflessione, rifrazione, diffrazione) e in parte alla teoria dei microtremiti. La forma di un'onda registrata in un sito x da uno strumento dipende:

1. dalla forma dell'onda prodotta dalla sorgente s;
2. dal percorso dell'onda dalla sorgente s al sito x (attenuazioni, riflessioni, rifrazioni, incanalamenti per guide d'onda);
3. dalla risposta dello strumento.

Possiamo esprimere questo concetto come:

segnale registrazione al sito x = sorgente * effetti di percorso * funzione trasferimento strumento

Il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, è generato dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento) e dall'attività antropica oltre che, ovviamente, dall'attività dinamica terrestre. Si chiama anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto piccole, molto più piccole di quelle indotte dai terremoti. I metodi che si basano sulla sua acquisizione si dicono passivi in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le esplosioni della sismica attiva.

Nel tragitto dalla sorgente s al sito le onde elastiche (sia di terremoto che microtremore) subiscono riflessioni, rifrazioni, intrappolamenti per fenomeni di guida d'onda, attenuazioni che dipendono dalla natura del sottosuolo attraversato. Questo significa che se da un lato l'informazione relativa alla sorgente viene persa e non sono più applicabili le tecniche della sismica classica, è presente comunque una parte debolmente correlata nel segnale che può essere estratta e che contiene le informazioni relative al percorso del segnale ed in particolare relative alla struttura locale vicino al sensore. Dunque, anche il debole rumore sismico, che tradizionalmente costituisce la parte di segnale scartata dalla sismologia classica, contiene informazioni. Questa informazione è però "sepolta" all'interno del rumore casuale e può essere estratta attraverso tecniche opportune.

Una di queste tecniche è la teoria dei rapporti spettrali o, semplicemente, HVSR che è in grado di fornire stime affidabili delle frequenze principali dei sottosuoli; informazione di notevole importanza nell'ingegneria sismica.

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un Tromografo digitale "TROMINO", prodotto da Micromed S.p.a., dotato di n. 3 sensori elettrodinamici (velocimetri) orientati N-S, E-W e verticalmente.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	28 di 55

L'accorgimento adottato è stato quello di verificare che i geofoni fossero posizionati in bolla e che la loro componente longitudinale fosse rivolta verso Nord. Il tempo di acquisizione è stato di 30 minuti e le finestre temporali prese in considerazione per l'acquisizione sono di 20 s ciascuna.

La relazione che si applica per il calcolo della profondità delle superfici con i maggiori contrasti di impedenza è la seguente:

$$T_s = 2\pi / \omega = 4H / V_s$$

dove:

T_s = periodo della vibrazione (s)

ω = frequenza misurata (rad)

H = profondità del sismostrato (m)

V_s = velocità delle onde di taglio (m/s)

Interpretando i minimi della componente verticale come risonanza del modo fondamentale dell'onda di Rayleigh e i picchi delle componenti orizzontali come contributo delle onde SH, si è potuto ricavare il valore di frequenza caratteristica di ogni sito.

N°	Strumentazione per prove HVSR
1	Sismografo-Tromografo digitale "TROMINO", prodotto da Micromed S.p.a.
2	Batterie 1.5 V
1	Bussola per corretto orientamento della stazione sismica

Tabella 5.1: Strumentazioni utilizzate per le indagini HVSR.

CONDIZIONI DI CONGRUITÀ

La prima condizione, prima di procedere all'estrazione di qualsiasi informazione e interpretazione, riguarda la verifica di "congruità" della curva H/V; in pratica bisogna verificare l'attendibilità della curva ottenuta secondo il seguente criterio:

$$f_0 \text{ (freq. di picco)} > 10 / l_w \text{ (lunghezza finestra temporale)}$$

Questa condizione è proposta in maniera tale che, alla frequenza di interesse, in ogni finestra ci siano almeno 10 cicli significativi (Tabella 5.2). Se i dati lo permettono è possibile verificare se la condizione:

$$f_0 \text{ (freq. di picco)} > 20 / l_w$$

Tale condizione renderebbe il picco eventuale ancora più significativo, ma questo non è d'obbligo.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	29 di 55

Per una prova ottimale c'è bisogno di un grande numero di cicli significativi e di finestre: quando si usa la selezione automatica delle finestre temporali con i parametri di *default*, il numero totale di cicli significativi ($nc = lw \cdot nw \cdot f_0$) deve essere > 200 ; ciò significa che, ad esempio, per un picco di 1 Hz, ci siano almeno 20 finestre da 10 secondi ciascuna, o per un picco da 0.5 Hz ci siano 10 finestre da 40 s).

È necessario che ci sia un valore di *scattering* basso tra tutte le finestre; infatti, deviazioni standard elevate spesso sono dovute a rumore ambientale non stazionario che può perturbare il segnale e tradursi in un risultato non significativo relativamente alla determinazione del picco di frequenza H/V. Comunque si raccomanda che $\sigma_A(f)$ sia minore di un fattore 2 (per $f_0 > 0.5$ Hz), o un fattore 3 (per $f_0 < 0.5$ Hz), in un range di frequenze di almeno $[0.5f_0, 2f_0]$.

f_0 [Hz]	Minimum value for lw [s]	Minimum number of significant cycles (nc)	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Tabella 5.2: Durata della registrazione raccomandata.

Nel nostro caso specifico è sempre stata utilizzata una durata di 30' (1800 s) e un valore delle finestre temporali di 20 s. Di seguito si riportano i risultati ottenuti dalle analisi HVSR.

	DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA					
Indagini geofisiche	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. B	FOGLIO 30 di 55

6 RISULTATI INDAGINE SISMICA PASSIVA (HVSRI)

6.1 HVSRI_LOTTO2

L'indagine sismica HVSRI_LOTTO2 è stata eseguita all'interno del di Villaspeciosa (SU) in un campo in prossimità della ferrovia (Figura 6-1-Figura 6-2)



Figura 6-1: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova HVSRI_LOTTO2 (da Google Earth).



Figura 6-2: Foto relativa all'esecuzione della prova HVSRI_LOTTO2.

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	31 di 55

Strumento: TRZ-0153/01-11

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: 51

Inizio registrazione: 26/10/22 15:01:38

Fine registrazione: 26/10/22 15:31:38

Durata registrazione: 0h30'00".

Analizzato 86% tracciato (selezione manuale)

Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

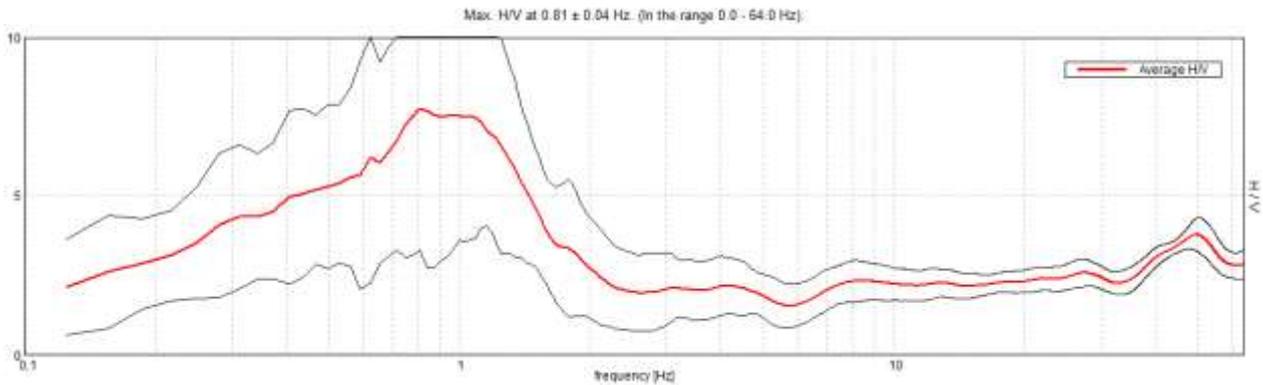


Figura 6-3: Rapporto spettrale orizzontale su verticale.

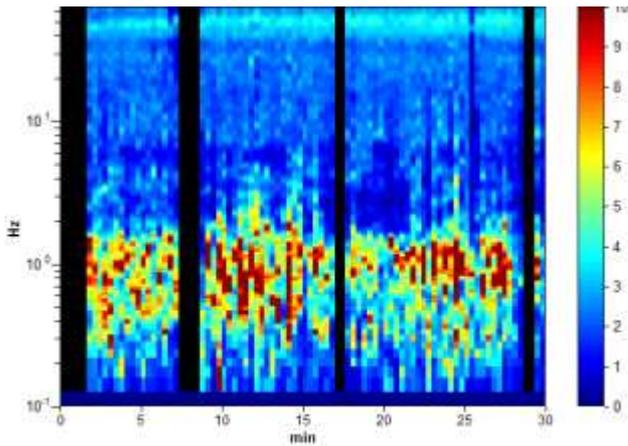


Figura 6-4: Serie temporale H/V.

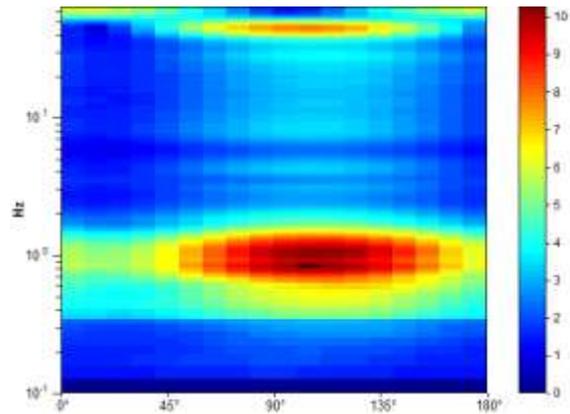


Figura 6-5: Direzionalità H/V.

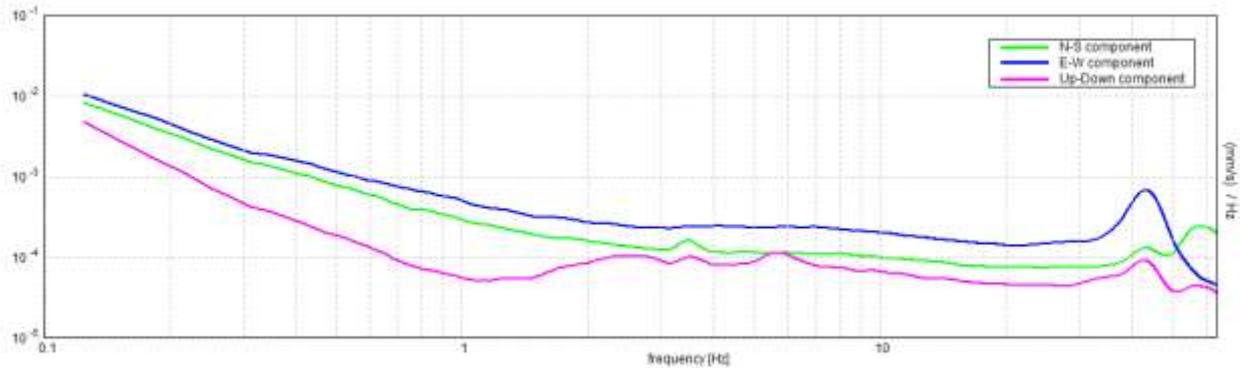


Figura 6-6: Spettri delle singole componenti.

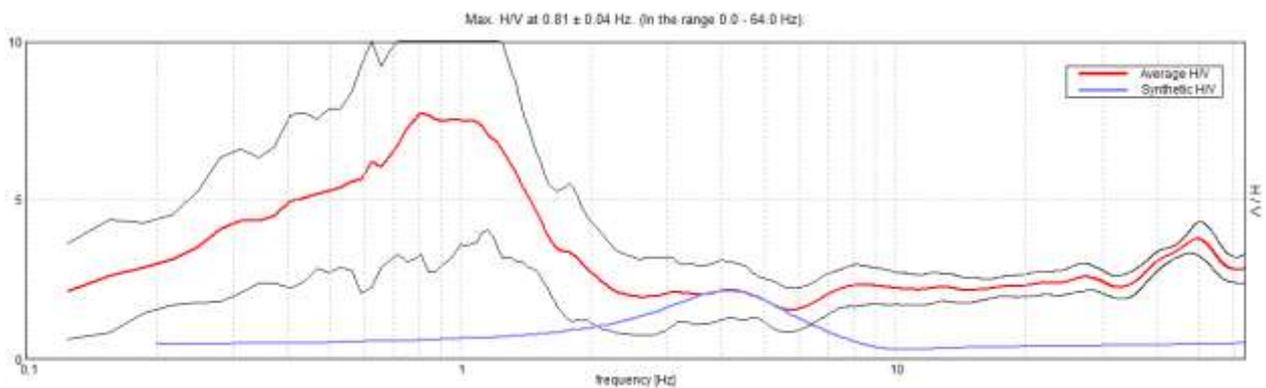


Figura 6-7: Confronto tra H/V sperimentale e sintetico.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.60	2.60	500	0.35
15.60	13.00	380	0.35
49.60	34.00	765	0.35
inf.	inf.	1100	0.35

Tabella 6.1: Valori di profondità, spessore, velocità delle onde di taglio (Vs) e rapporto di Poisson ottenuti dall'indagine HVSR1_LOTTO2.

Lo spessore della coltre detritica al di sopra del *bedrock* (Vs = 800 m/s) risulta essere superiore ai 49.60 metri (Tabella 6.1-Figura 6-8).

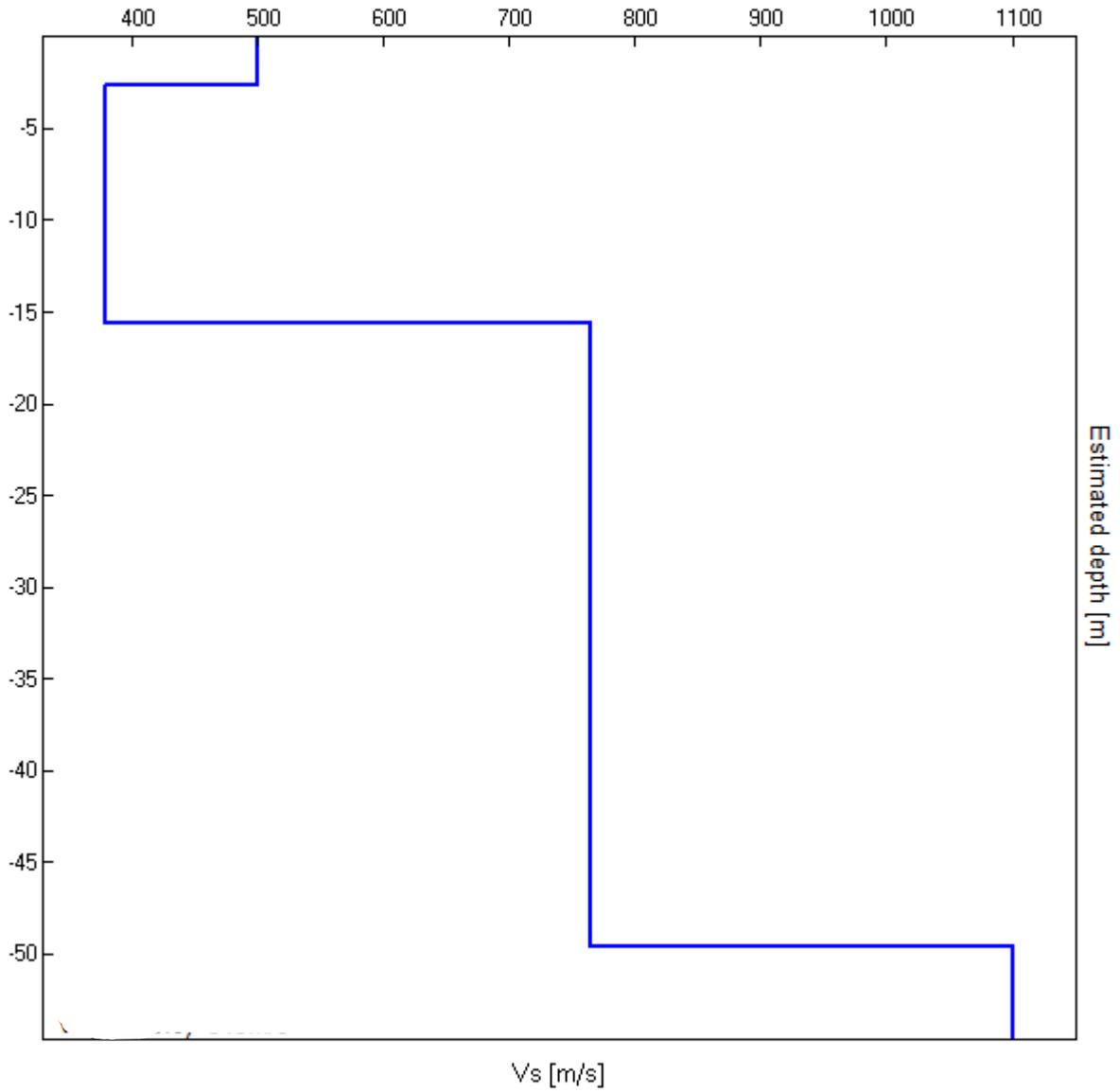


Figura 6-8: Modello dell'andamento delle V_s con la profondità.

[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 0.81 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.44 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$2587.5 > 200$	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 $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 56 volte su 70		NO

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	1.125 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	2.906 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$7.98 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.05036 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.07239 < 0.14375$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$2.2583 < 1.78$		NO

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
σ_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 σ_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

Tabella 6.2: Risultati dell'indagine sismica HVSRI_LOTTO2.

	DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA					
Indagini geofisiche	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. B	FOGLIO 35 di 55

6.2 HVSR2_LOTTO2

L'indagine sismica HVSR2_LOTTO2 è stata eseguita all'interno del comune di Villaspeciosa (SU), in prossimità della linea ferroviaria, vicino a SP90 (Figura 6-9-Figura 6-10)



Figura 6-9: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova HVSR2_LOTTO2 (da Google Earth).



Figura 6-10: Foto relativa all'esecuzione della prova HVSR2_LOTTO2.

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	36 di 55

Strumento: TRZ-0153/01-11
 Inizio registrazione: 26/10/22 15:45:52
 Durata registrazione: 0h30'00".
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Tipo di lisciamento: Triangular window

Formato dati: 16 byte Fondo scala [mV]: 51
 Fine registrazione: 26/10/22 16:15:52
 Analizzato 92% tracciato (selezione manuale)
 Lunghezza finestre: 20 s
 Lisciamento: 10%

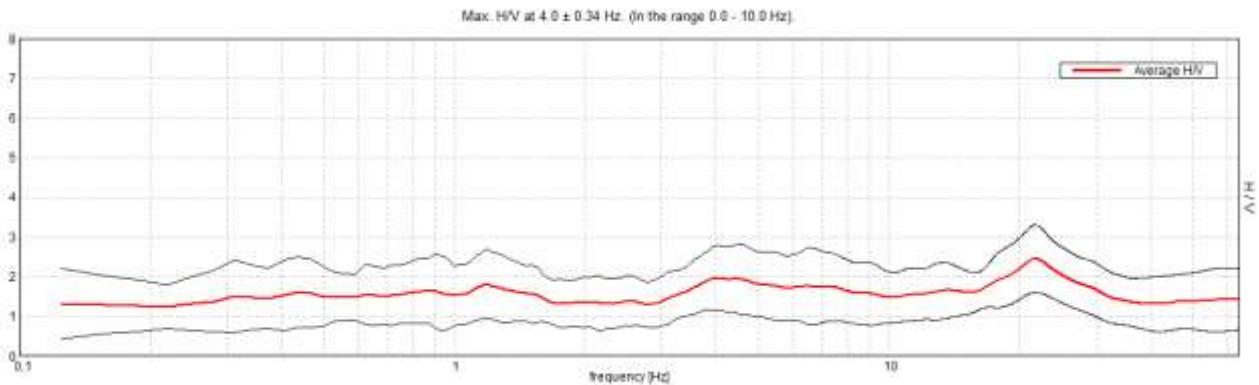


Figura 6-11: Rapporto spettrale orizzontale su verticale.

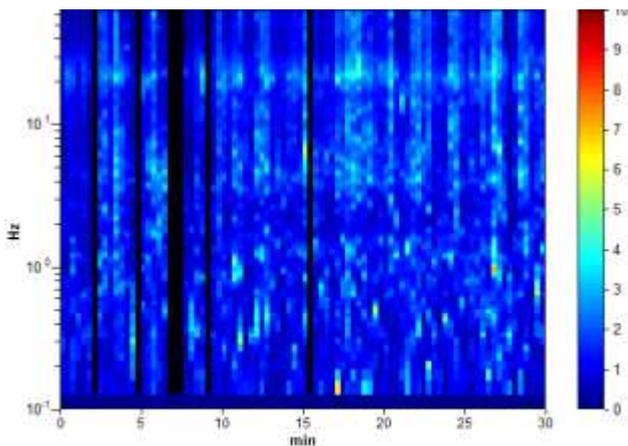


Figura 6-12: Serie temporale H/V.

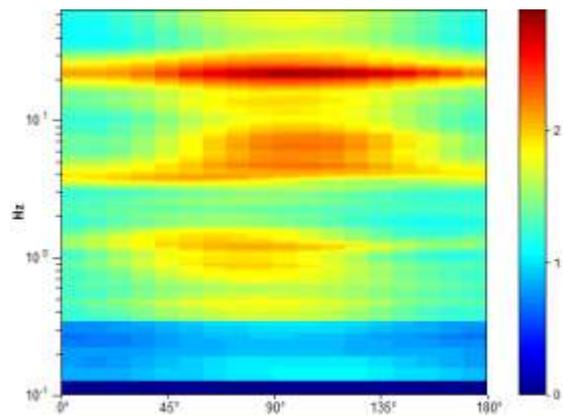


Figura 6-13: Direzionalità H/V.

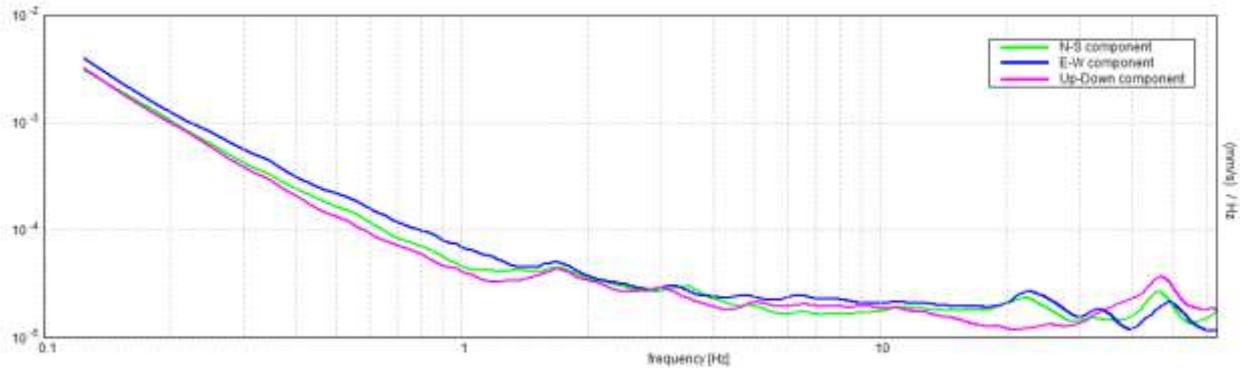


Figura 6-14: Spettri delle singole componenti.

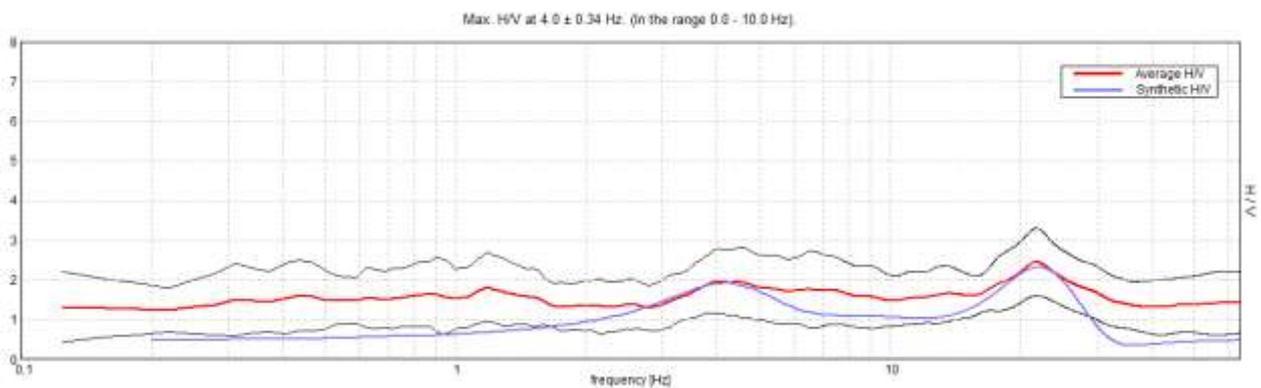


Figura 6-15: Confronto tra H/V sperimentale e sintetico.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.60	2.60	220	0.35
15.80	13.20	490	0.35
45.80	30.00	745	0.35
inf.	inf.	1100	0.35

Tabella 6.3: Valori di profondità, spessore, velocità delle onde di taglio (Vs) e rapporto di Poisson ottenuti dall'indagine HVSR2_LOTTO2.

Lo spessore della coltre detritica al di sopra del *bedrock* (Vs = 800 m/s) risulta essere superiore ai 45.80 metri (Tabella 6.3-Figura 6-16).

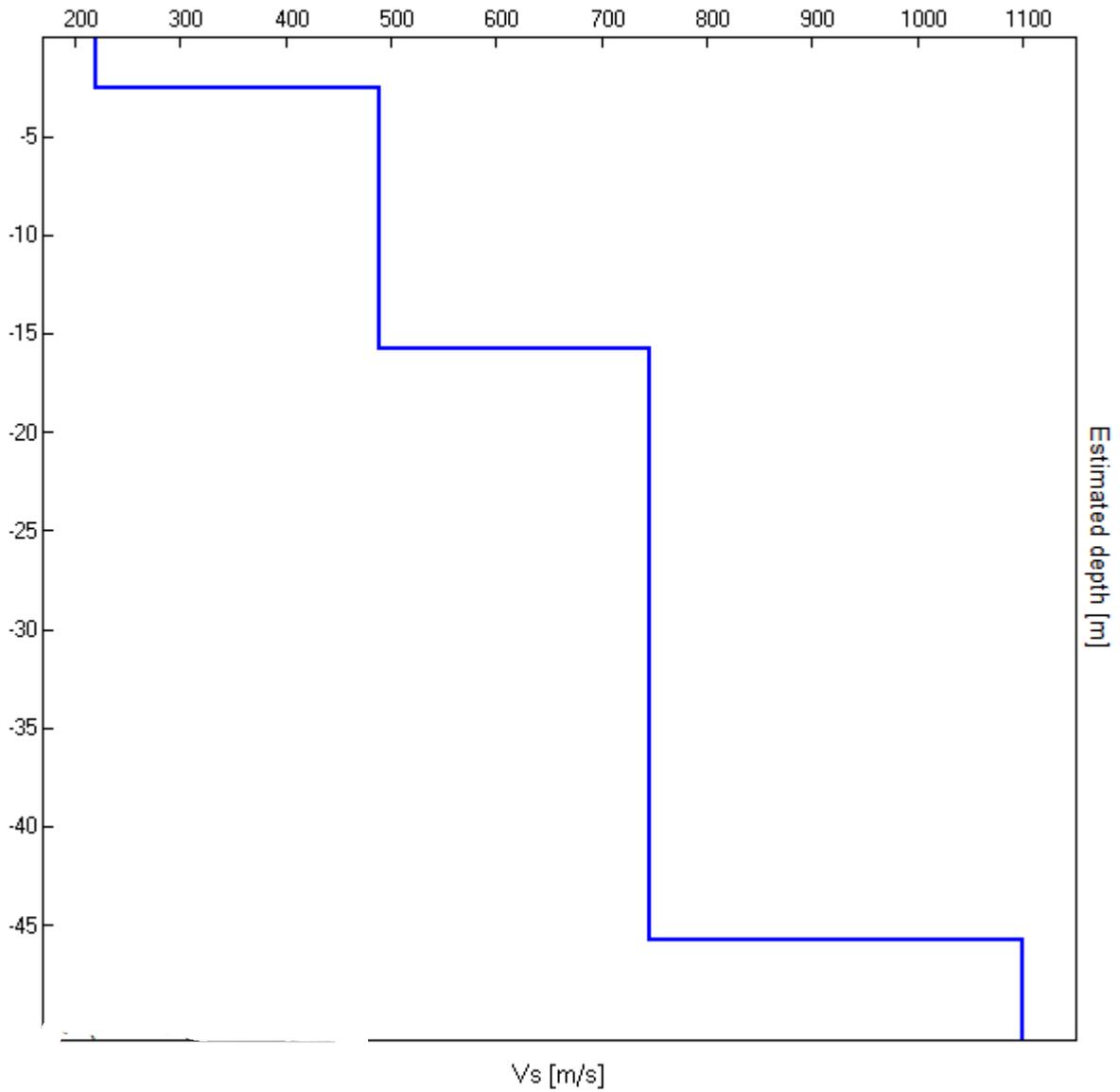


Figura 6-16: Modello dell'andamento delle Vs con la profondità.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	39 di 55

[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 4.0 ± 0.34 Hz (nell'intervallo 0.0 - 10.0 Hz).

Altro Picco H/V a 21.84 ± 0.16 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.94 > 0.50$	OK
$n_c(f_0) > 200$	$1687.5 > 200$	OK
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 46	OK

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	1.844 Hz		NO
$A_0 > 2$	$0.99 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00693 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0065 < 0.14063$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2771 < 2.0$	OK	

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
σ_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 σ_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

Tabella 6.4: Risultati dell'indagine sismica HVSR2_LOTTO2.

	DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA					
	Indagini geofisiche	COMMESSA RROP	LOTTO 02	CODIFICA R 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. B

6.3 HVSR3_LOTTO2

L'indagine sismica HVSR3_LOTTO2 è stata eseguita all'interno del comune di Siliqua (SU) in prossimità della Linea ferroviaria (**Figura 6-17-Figura 6-18**)



Figura 6-17: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova HVSR3_LOTTO2 (da Google Earth).



Figura 6-18: Foto relativa all'esecuzione della prova HVSR3_LOTTO2.

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	41 di 55

Strumento: TRZ-0153/01-11
 Inizio registrazione: 26/10/22 16:33:16
 Durata registrazione: 0h30'00".
 Freq. campionamento: 128 Hz
 Tipo di lisciamento: Triangular window

Formato dati: 16 byte Fondo scala [mV]: 51
 Fine registrazione: 26/10/22 17:03:16
 Analizzato 80% tracciato (selezione manuale)
 Lunghezza finestre: 20 s
 Lisciamento: 10%

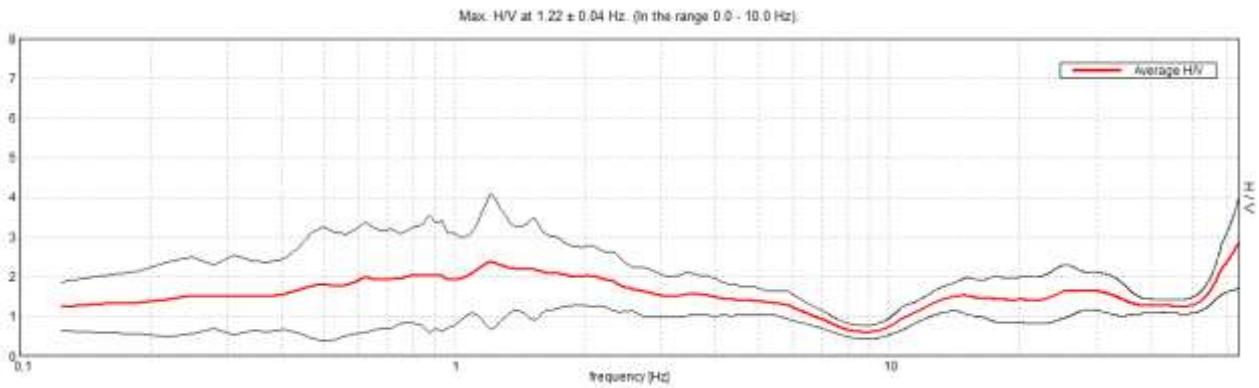


Figura 6-19: Rapporto spettrale orizzontale su verticale.

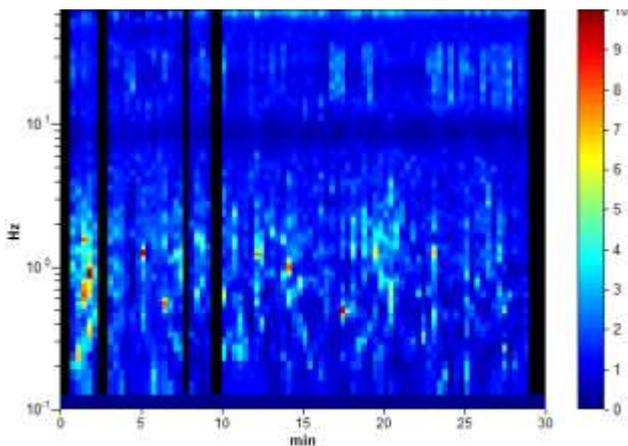


Figura 6-20: Serie temporale H/V.

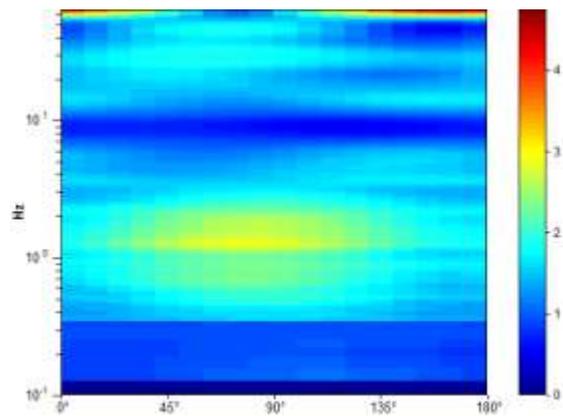


Figura 6-21: Direzionalità H/V.

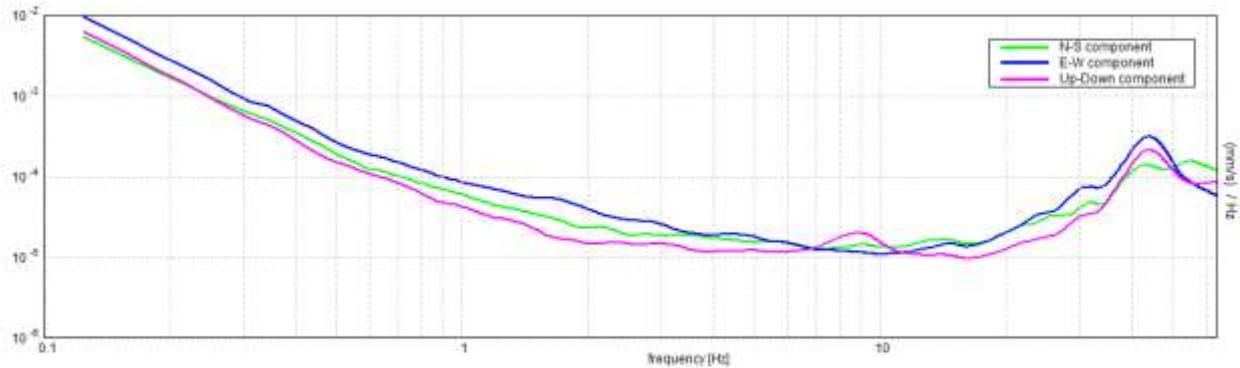


Figura 6-22: Spettri delle singole componenti.

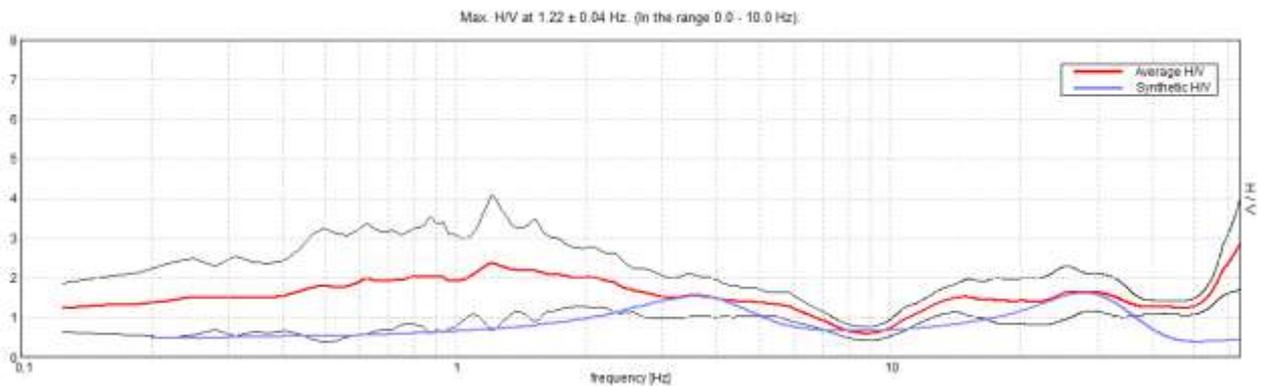


Figura 6-23: Confronto tra H/V sperimentale e sintetico.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.40	2.40	280	0.35
22.60	20.20	540	0.35
50.60	28.00	750	0.35
inf.	inf.	1065	0.35

Tabella 6.5: Valori di profondità, spessore, velocità delle onde di taglio (V_s) e rapporto di Poisson ottenuti dall'indagine HVSR3_LOTTO2.

Lo spessore della coltre detritica al di sopra del *bedrock* ($V_s = 800$ m/s) o *bedrock like* ($V_s = 700$ m/s) risulta essere superiore ai 22.60 metri (Tabella 6.5-Figura 6-24).

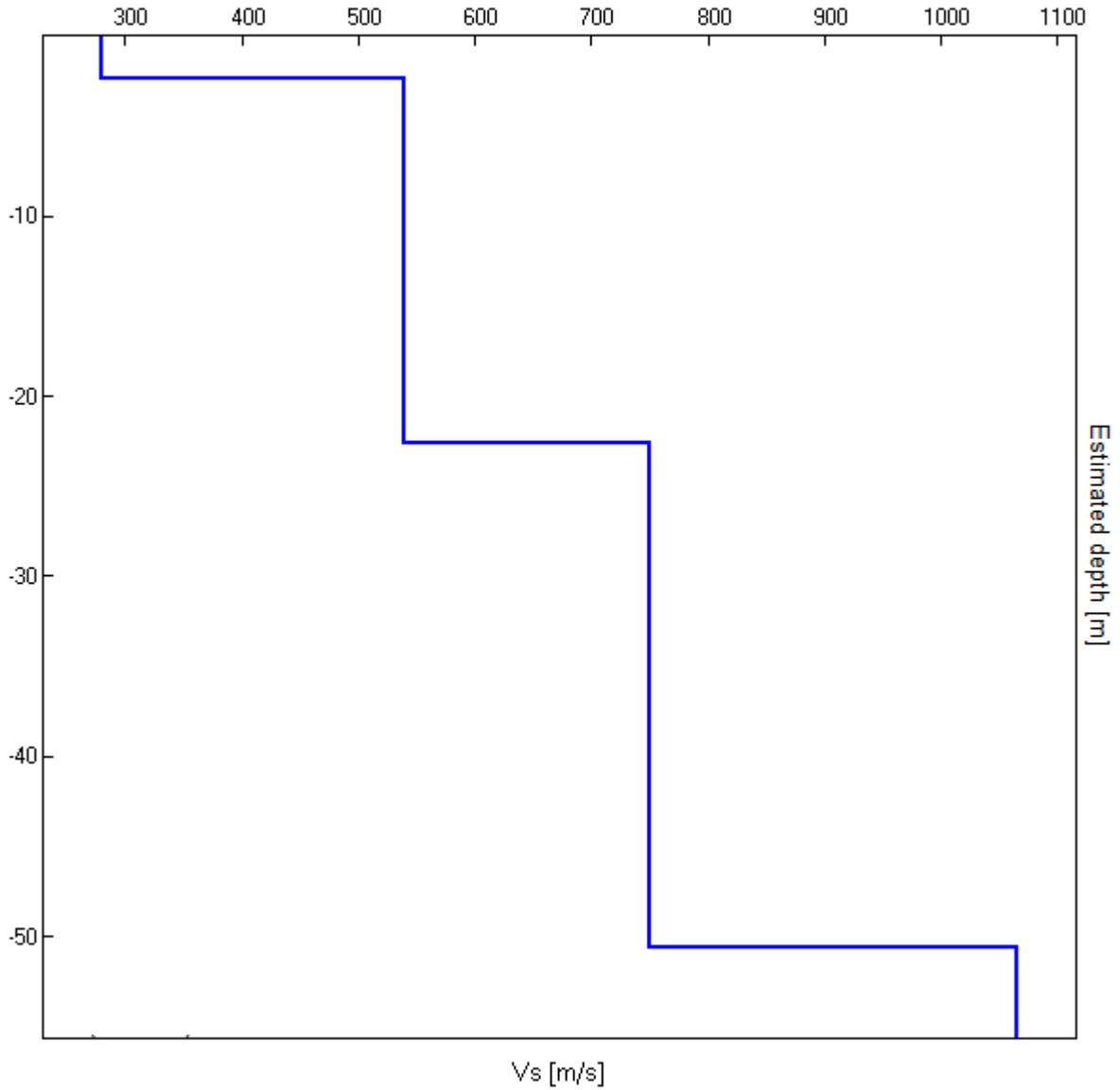


Figura 6-24: Modello dell'andamento delle Vs con la profondità.

[Secondo le linee guida SESAME, 2005. Si raccomanda di leggere attentamente il manuale di *Grilla* prima di interpretare la tabella seguente].

Picco H/V a 1.22 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 10.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$1.22 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1950.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5$ Hz $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5$ Hz	Superato 0 volte su 60	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$2.39 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01746 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.02128 < 0.12188$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.8528 < 1.78$	OK	

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				
σ_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 σ_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

Tabella 6.6: Risultati dell'indagine sismica HVSR3_LOTTO2.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RR0P	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	45 di 55

7 INDAGINE SISMICA CON METODO A RIFRAZIONE IN ONDE P E ONDE S

Le onde elastiche provocate da una vibrazione si trasmettono nel suolo con velocità differenti per ogni litotipo. Nella prospezione sismica a rifrazione si sfrutta la diversa velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P o “di compressione”) e longitudinali (onde SH o “di taglio”) per determinare lo spessore e l’andamento dei sismostrati.

La prospezione consiste nel generare un’onda sismica nel terreno attraverso un a determinata sorgente di energia (colpo di mazza, maglio battente, cannoncino sismico, ecc.) e nel misurare il tempo impiegato da questa per compiere il percorso nel sottosuolo dal punto di energizzazione fino ai sensori di ricezione (geofoni) seguendo le leggi della rifrazione dell’ottica (Legge di Snell), cioè rifrangendosi sulla superficie di separazione tra due strati con proprietà sismiche differenti.

L’apparecchiatura necessaria per le prospezioni consiste in una serie di ricevitori (geofoni), che vengono spazati lungo un determinato allineamento (linea sismica), e da un sismografo che registra l’istante di inizio della perturbazione elastica e i tempi di primo arrivo delle onde a ciascun geofono. In questo modo, osservando i primi arrivi in corrispondenza di punti posti a differente distanza dalla sorgente energizzante, è possibile costruire una curva tempo/distanza (dromocrona) che rappresenta la variazione del minimo percorso in funzione del tempo.

L’analisi tomografica, in sintesi, determina un modello a gradiente uniforme mediante l’analisi dei tempi di percorrenza e ottimizza i risultati attraverso le *Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT)*. In particolare, il software dedicato fornisce una stima delle velocità delle onde P e S, nonché la forma e la profondità delle interfacce, tramite il metodo del reciproco generalizzato GRM e, poi, nell’ottimizzazione del risultato finale, ricerca i percorsi dei raggi sismici basandosi su algoritmo SIRT, che tiene conto della distribuzione delle velocità stesse nel modello.

Per gli stendimenti effettuati nella presente campagna di indagini sono state eseguite energizzazioni in onde P con un cannoncino (fucile) sismico con cartucce “a salve” e/o con massa battente (martello kg 8) e in onde SH, colpendo lateralmente su entrambi i lati una trave di legno posizionata nello stesso punto in cui è stata effettuata la precedente energizzazione in P.

I punti di energizzazione per il profilo sono stati 14, di cui 6 interni allo stendimento stesso e 8 all’esterno, a una distanza dal primo e ultimo geofono pari alla distanza intergeofonica e pari al doppio della distanza intergeofonica adottata.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA

LOTTO

CODIFICA

DOCUMENTO

REV.

FOGLIO

RROP

02

R 69 IG

GE 0005 001

B

46 di 55

STRUMENTAZIONI UTILIZZATE

N°	Strumentazione per prove sismiche a Rifrazione in onde P e onde S
1	Sismografo Echo 24-48 2010 prodotto dalla Ambrogeo s.r.l. di Piacenza (PC)
1	Toughbook Panasonic CF-19
24	geofoni verticali con frequenza 12 Hz (Hueihai Sunfull)
24	geofoni orizzontali con frequenza 12 Hz (Hueihai Sunfull)
1	cavo di collegamento per geofoni 24 take-out con passo intergeofonico 5.0-10.0 metri
1	massa battente del peso di 8 kg
1	linea trigger con dispositivo hammer-switch
2	masse battenti con pendolo del peso di 15 kg per energizzazione in onde SH
1	cannoncino (fucile) sismico della Ambrogeo s.r.l. con cartucce "a salve"

Tabella 7.1: Strumentazione utilizzata per l'indagine sismica.

8 RISULTATI TOMOGRAFIA SISMICA

L'indagine, relativamente al comportamento del terreno in merito alle onde di volume (onde P) e onde di taglio (onde SH), ha permesso di evidenziare una distribuzione delle velocità delle onde sismiche piuttosto regolare su tutte le aree investigate.

8.1 Rifrazione R1_LOTTO 2

Il profilo sismico "R1_LOTTO2", è stato eseguito per una lunghezza complessiva pari a 480 metri (incluse le battute esterne allo stendimento); i 48 geofoni verticali e orizzontali utilizzati per eseguire le misurazioni sono stati posizionati seguendo una distanza intergeofonica, pari a 10 metri.

Il profilo è stato condotto da W (geofono n. 1) verso E (geofono n. 48).

L'indagine è stata eseguita all'interno del comune di Villaspeciosa (SU) in un campo accessibile da via Is Coras De Ponti.



Figura 8-1: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova Sismica a Rifrazione R1_LOTTO2 (da Google Earth).

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	48 di 55



Figura 8-2: Foto relativa all'esecuzione della prova Sismica a Rifrazione R1_LOTTO2.

PROFILO SISMICO TOMOGRAFICO IN VP - R1_LOTTO2

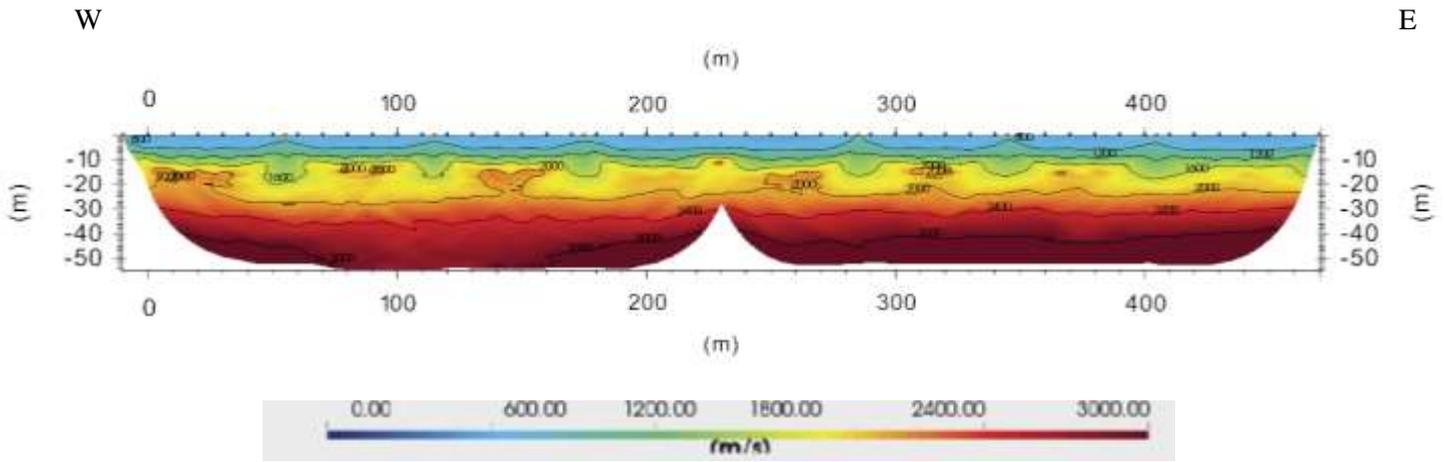


Figura 8-3: Profilo sismico tomografico R1_LOTTO2 in Vp.

PROFILO SISMICO TOMOGRAFICO IN VS - R1_LOTTO2

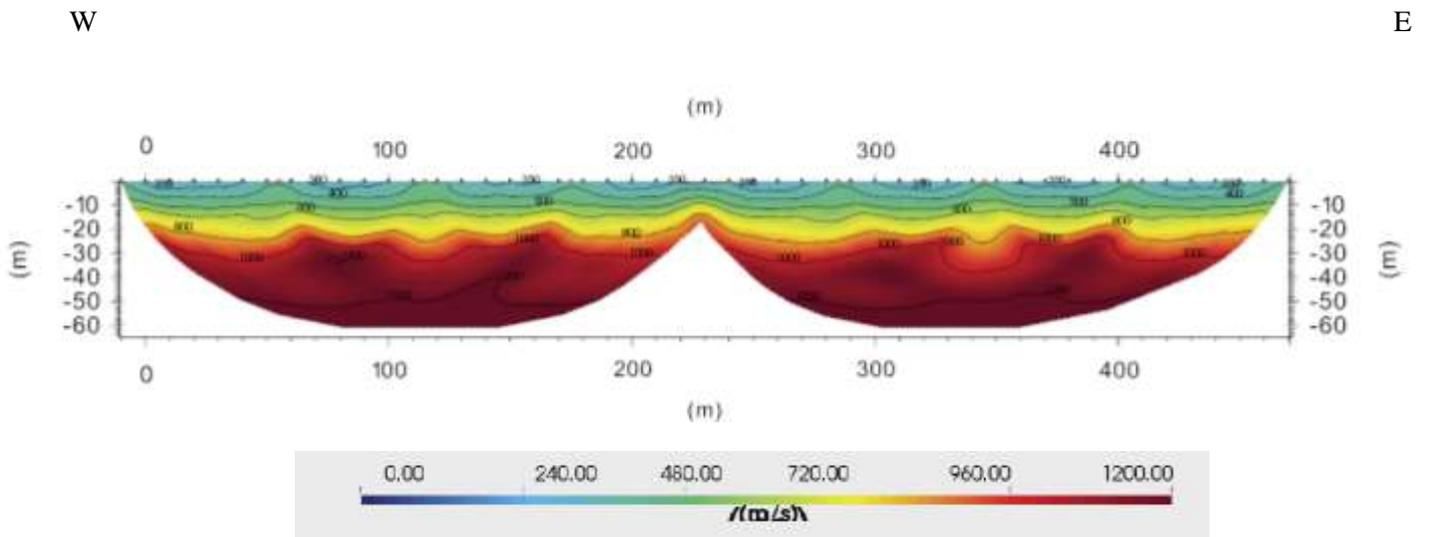


Figura 8-4: Profilo sismico tomografico R1_LOTTO2 in Vs.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	50 di 55

Superficialmente il profilo sismico a rifrazione è caratterizzato da valori di velocità sismiche inferiori ai 1600 m/s di V_p e ai 500 m/s di V_s per uno spessore medio di circa 12-15 metri; tale sismostrato ha un andamento circa sub-orizzontale, e rappresenta uno strato di riporto e strato limoso-argilloso con sabbia e ghiaia.

Al di sotto di esso si evidenzia la presenza di un secondo sismostrato con valori crescenti di velocità fino a circa 2000 m/s di V_p e 750-800 m/s di V_s fino a una profondità di circa 18-22 metri dal p.c.; questo strato è caratterizzato dalla presenza di alternanze con sabbie argillose e ghiaie compatte.

Stratigraficamente sottoposto a questo sismostrato, si individua la presenza di sismostrato con valori crescenti di velocità fino a circa 3000 m/s di V_p e 1000-1200 m/s di V_s fino alla profondità di circa 40-45 metri.

Oltre questa profondità, i valori delle velocità sismiche quindi evidenziano un progressivo incremento fino a superare la velocità di 3000 m/s di V_p e di 1000-1200 m/s di V_s . Tale sismostrato subisce quindi un ulteriore aumento di densità e velocità con la profondità.

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	51 di 55

8.2 Rifrazione R2_LOTTO 2

Il profilo sismico "R2_LOTTO2", è stato eseguito per una lunghezza complessiva pari a 480 metri (incluse le battute esterne allo stendimento); i 48 geofoni verticali e orizzontali utilizzati per eseguire le misurazioni sono stati posizionati seguendo una distanza intergeofonica, pari a 10 metri.

Il profilo è stato condotto da E (geofono n. 1) verso W (geofono n. 48).

L'indagine è stata eseguita all'interno del comune di Villaspeciosa (SU) in un campo accessibile da via Su Pixinali.



Figura 8-5: Ortofoto relativa all'ubicazione della prova Sismica a Rifrazione R2_LOTTO2 (da Google Earth).

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	52 di 55



Figura 8-6: Foto relativa all'esecuzione della prova Sismicas a Rifrazione R2_LOTTO2.

PROFILO SISMICO TOMOGRAFICO IN VP - R2_LOTTO2

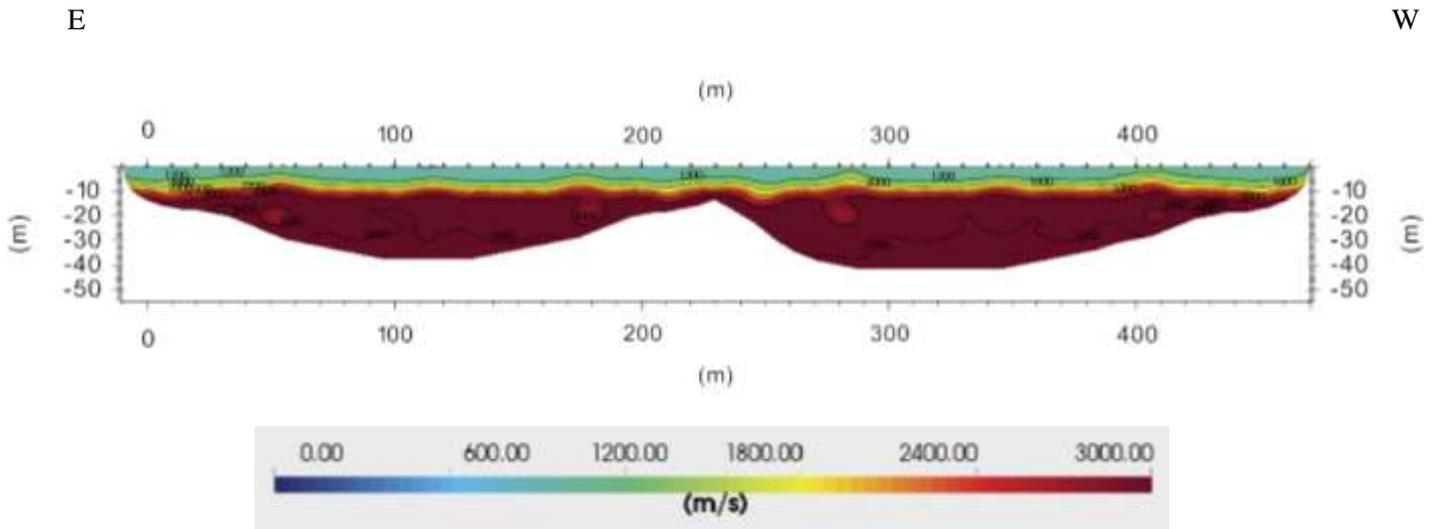


Figura 8-7: Profilo sismico tomografico R2_LOTTO2 in Vp.

PROFILO SISMICO TOMOGRAFICO IN VS - R2_LOTTO2

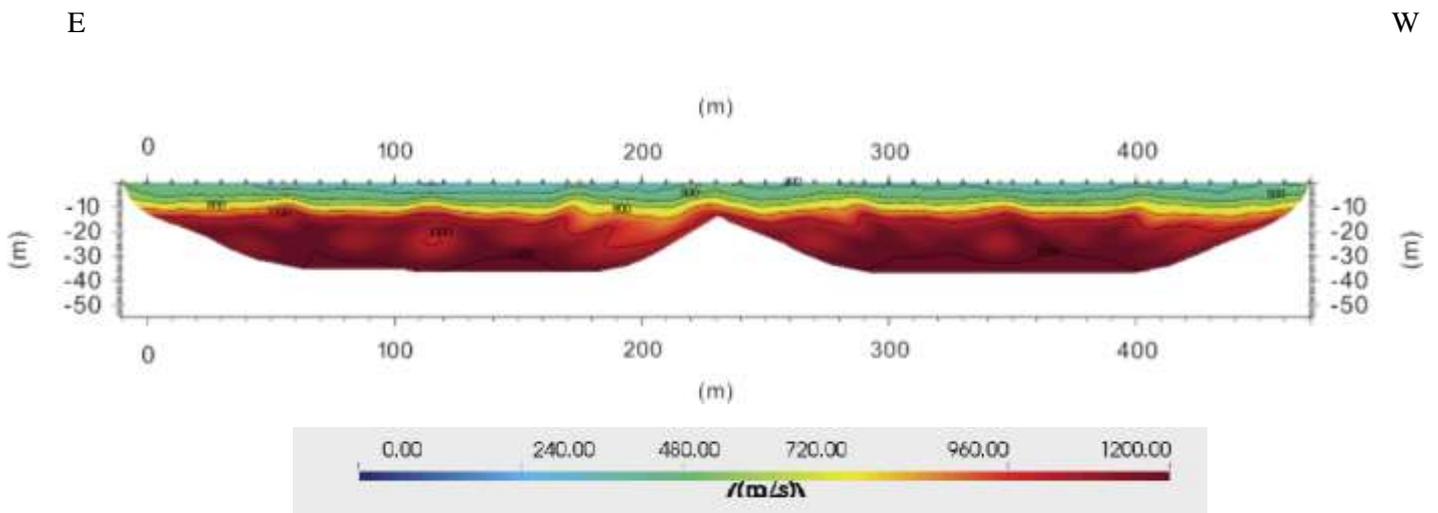


Figura 8-8: Profilo sismico tomografico R2_LOTTO2 in Vs.



DECIMOMANNU - VILLAMASSARGIA

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	54 di 55

Superficialmente il profilo sismico a rifrazione è caratterizzato da valori di velocità sismiche inferiori ai 1600 m/s di V_p e ai 500 m/s di V_s per uno spessore medio di circa 5-8 metri; tale sismostrato ha un andamento circa sub-orizzontale, e rappresenta uno strato di riporto e strato limoso-argilloso consistente con ghiaia.

Al di sotto di esso si evidenzia la presenza di un secondo sismostrato con valori crescenti di velocità fino a circa 2400-3000 m/s di V_p e 750-900 m/s di V_s fino a una profondità di circa 15 metri dal p.c.; questo strato è caratterizzato dalla presenza di siltiti arenacee compatte, alternate ad areniti compatte e/o poco fratturate.

Stratigraficamente sottoposto a questo sismostrato, si individua la presenza di sismostrato con valori crescenti di velocità fino a circa 3500 m/s di V_p e 1200-1250 m/s di V_s fino alla profondità di circa 30-35 metri.

Oltre questa profondità, i valori delle velocità sismiche quindi evidenziano un progressivo incremento fino a superare la velocità di 3500 m/s di V_p e di 1250 m/s di V_s . Tale sismostrato subisce quindi un ulteriore aumento di densità e velocità con la profondità.

Indagini geofisiche

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RROP	02	R 69 IG	GE 0005 001	B	55 di 55

9 CONCLUSIONI

La campagna di indagini geofisiche condotta ha fornito i seguenti risultati:

Indagini eseguite	Risultati
MASW1_LOTTO2	$V_{Seq} = 463.17$ m/s (categoria di sottosuolo B)
MASW2_LOTTO2	$V_{Seq} = 455.77$ m/s (categoria di sottosuolo B)
MASW3_LOTTO2	$V_{Seq} = 474.39$ m/s (categoria di sottosuolo B)
HVSR1_LOTTO2	H/V a 0.81 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz)
HVSR2_LOTTO2	H/V a 4.0 ± 0.34 Hz (nell'intervallo 0.0 - 10.0 Hz). Altro Picco H/V a 21.84 ± 0.16 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).
HVSR3_LOTTO2	H/V a 1.22 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 10.0 Hz).
Sismica a Rifrazione R1_LOTTO2	Da 0 a 12.00-15.00 m p.c.: Vp inferiori a 1600 m/s -Vs inferiori a 500 m/s Da 12.00-15.00 a 18.00-22.00 m p.c.: Vp inferiori a 2000 m/s -Vs inferiori a 750-800 m/s Da 18.00-22.00 a 40.00-45.00 m p.c.: Vp inferiori a 3000 m/s - Vs inferiori a 1000-1200 m/s Oltre 40.00-45.00 m p.c.: Vp superiori a 3000 m/s - Vs superiori a 1200 m/s.
Sismica a Rifrazione R2_LOTTO2	Da 0 a 5.00-8.00 m p.c.: Vp inferiori a 1600 m/s -Vs inferiori a 500 m/s Da 5.00-8.00 a 15.00 m p.c.: Vp inferiori a 2400-3000 m/s -Vs inferiori a 750-900 m/s Da 15.00 a 30.00-35.00 m p.c.: Vp inferiori a 3500 m/s - Vs inferiori a 1200-1250 m/s Oltre 30.00-35.00 m p.c.: Vp superiori a 3500 m/s - Vs superiori a 1250 m/s.

Tabella 9.1: Risultati ottenuti dalla campagna di indagini geofisiche.