



Projekt / Progetto:

Studio delle sponde del lago di Fortezza, finalizzato alla definizione degli elementi geologico-geotecnici per la progettazione di un percorso pedo-ciclabile

Studie des Seeufers von Franzensfeste für die Ermittlung der Geologie und Geotechnik zur Projektierung eines Fußgänger- und Radweges

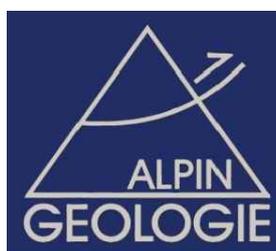
Angelegt / Inizializzato	25.07.2017	ST				
	25.07.2017	MG				
					13.04.2018	ST
	Datum / Data	Abk. / Sigla	Datum / Data	Abk. / Sigla	Datum / Data	Abk. / Sigla
	Erstellung / Redazione		Bearbeitung / Revisione		Prüfung / Controllo	

Inhalt / contenuto :

INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITU
INDAGINI GEOFISICHE - REPORT PROVE HVSR (ALPIN GEOLOGIE)
FELDUNTERSUCHUNGEN
GEOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN - REPORT HVSR PROBEN (ALPIN GEOLOGIE)



MOUNTAIN-EERING s.r.l.
Società di Ingegneria
Ingenieurgesellschaft
via Volta 13/A Volta str.
I-39100 Bolzano/Bozen
Tel. +39 0471 094781
Fax +39 0471 094782
info@mountain-eering.com
mountain-eering@pec.it
www.mountain-eering.com
MwSt-Nr.02602520211 P.IVA



ALPIN GEOLOGIE
Büro für angewandte Geologie
Studio di geologia applicata
via Luis-Zuegg-Straße 70/A
I-39012 Meran/Merano
Tel. +39 0473 490440
Fax +39 0473 490441
info@alpin-geologie.it
mail@pec.alpin-geologie.it
www.alpin-geologie.it
MwSt.-Nr. 01732130214 P. IVA



Projekt nr. / n. progetto:

1153bbg

Anlage Nr. / Allegato n.:

4

Maßstab / Scala:

-

INDAGINI GEOFISICHE – REPORT DI CALCOLO PROVE HVSR (27.11.2017)

1. RISPOSTA SISMICA LOCALE

L'attuale normativa antisismica intende fornire una base quantitativa per la classificazione dei suoli in termini di effetti di sito. Il parametro chiave di questa base quantitativa è la velocità media delle onde di taglio S nei primi 30 metri ($V_{S,30}$).

La metodologia adottata della misura a stazione singola del tremore sismico, attraverso i rapporti spettrali, porta alla misura immediata della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo: le misure di microtremore a stazione singola, opportunamente invertite, permettono di stimare in maniera rapida sia la stratigrafia superficiale che il $V_{S,30}$.

Essendo il suolo assimilabile ad un corpo viscoelastico, è possibile pertanto misurarne le frequenze proprie di oscillazione in ogni punto. Queste frequenze vengono determinate dalle proprietà meccaniche e dalla morfologia attorno al punto di misura. La risposta del suolo può essere studiata in questa maniera utilizzando come funzione di eccitazione il rumore sismico di fondo.

Gli effetti di sito sono amplificazioni locali delle onde sismiche dovute a particolari condizioni geologiche e topografiche. Se la frequenza di risonanza del suolo coincide con quella delle strutture, si produce un'amplificazione molto elevata delle onde sismiche e vengono indotte sollecitazioni con forte potere distruttivo (fenomeno della *doppia risonanza*).

2. METODOLOGIA ADOTTATA E STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

La metodologia HVSR, adottata nel presente lavoro, è una tecnica di tipo passivo dal momento che sfrutta il rumore sismico ambientale, presente ovunque sulla superficie terrestre, generato da fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento...), dall'attività dinamica terrestre e dall'attività antropica (microtremori).

Ad ogni frequenza di risonanza rilevata corrisponde una variazione apprezzabile dei parametri elastici del sottosuolo e quindi ciò permette di discriminare, in un sistema stratificato, la presenza dei diversi orizzonti. Lo spessore (h) di tali orizzonti è poi ricavabile grazie alla relazione semplificata che lega la frequenza di risonanza (f_r) alla velocità delle onde di taglio (V_s):

$$f_r = V_s/4h \quad (1)$$

In mancanza della velocità delle Vs e in virtù dell'equazione (1), la tecnica HVSR può essere abbinata a metodi di prospezione di tipo geotecnico (penetrometrie, sondaggi meccanici) in grado di fornire un'adeguata descrizione stratigrafica del sottosuolo.

Nel presente lavoro, come stratigrafie di ancoraggio, per le prove HVSR1 e HVSR2, si sono utilizzate quelle ottenute dai sondaggi S2 e S3 eseguiti nel sito.

Per ubicazione delle stazioni sismiche si veda l'Allegato 3 "PLANIMETRIA CON PUNTI DI INDAGINE GEOGNOSTICA, GEOFISICA, GEOMECCANICA".

Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato un tromografo digitale modello "Tromino" che rappresenta la nuova generazione di strumenti ad alta risoluzione adatti a misurazioni di rumore ambientale. Lo strumento racchiude al suo interno tre velocimetri elettrodinamici, ortogonali tra loro, con intervallo di frequenza compreso tra 0.1 e 256 Hz. I dati vengono memorizzati in una scheda di memoria interna, evitando così la presenza di qualsiasi cavo che possa introdurre rumore meccanico ed elettronico.

Durante la fase di processing in studio, i dati vengono convertiti in file ASCII mediante il software "Grilla", fornito a supporto dello strumento utilizzato, quindi elaborati per ottenere spettri di velocità in funzione della frequenza.

In fase operativa si sono eseguite le seguenti operazioni:

- il rumore sismico è stato registrato nelle sue tre componenti per un intervallo di tempo di 30 minuti.
- la registrazione è stata suddivisa in finestre temporali di 20 secondi ciascuna.
- per ogni segmento viene eseguita un'analisi spettrale del segmento nelle sue tre componenti.
- per ciascun segmento si calcolano i rapporti spettrali fra le componenti del moto sui piani orizzontale e verticale.
- vengono calcolati i rapporti spettrali medi su tutti i segmenti.
- si costruisce poi un modello teorico HVSR avente tante discontinuità sismiche quante sono le discontinuità evidenziate dalla registrazione eseguita.
- si adatta la curva teorica a quella sperimentale; in questo modo si otterranno gli spessori dei sismostrati con la relativa velocità delle onde di taglio S.

3. RISULTATI DEI RILIEVI TROMOGRAFICI

3.1 HVSR 1

Frequenza fondamentale di risonanza di sito: **3 Hz**.

La curva HVSR evidenzia una frequenza caratteristica di risonanza del sito pari a circa 3 Hz (fig. 1) verificando le condizioni di “chiarezza” della curva (si veda più avanti “Verifica di attendibilità del dato acquisito secondo le LINEE GUIDA SESAME”).

Si nota una sostanziale omogeneità del sottosuolo in termini sismici con una costante crescita delle velocità di propagazione delle onde di taglio. Lo spettro sismico si stabilizza costantemente su di un rapporto spettrale $H/V > 1$ (fig. 1).

La frequenza fondamentale di sito può comportare criticità per strutture con periodo proprio pari a circa 0.3 secondi.

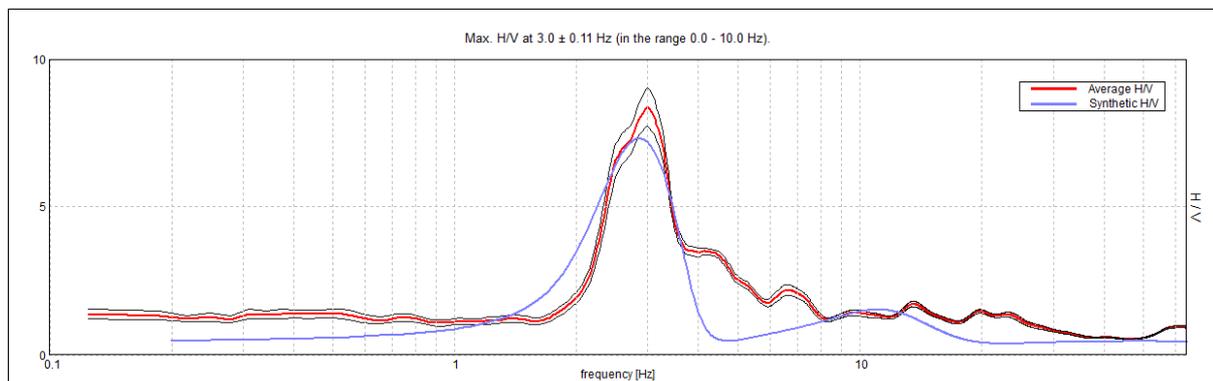


Fig. 1 Rapporto spettrale H/V misurato. Con la linea rossa l'H/V medio, l'intervallo di confidenza al 95%, con linea blu la curva sintetica

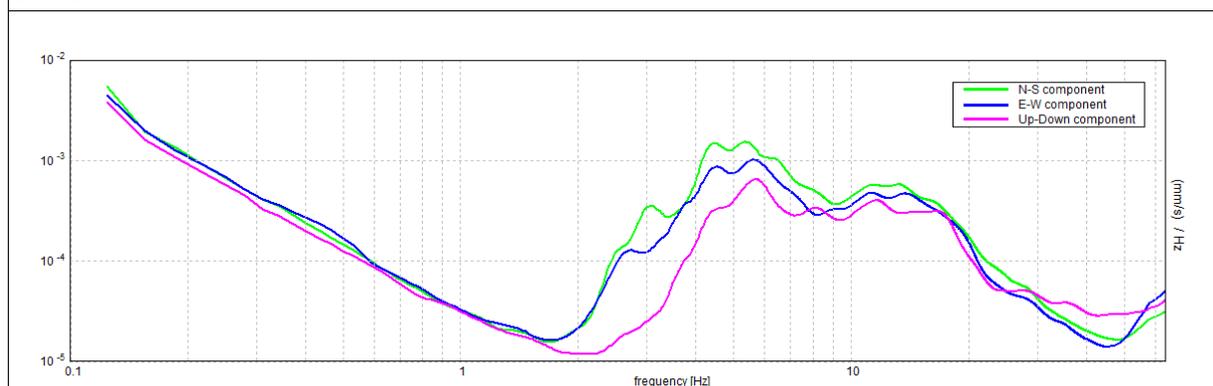
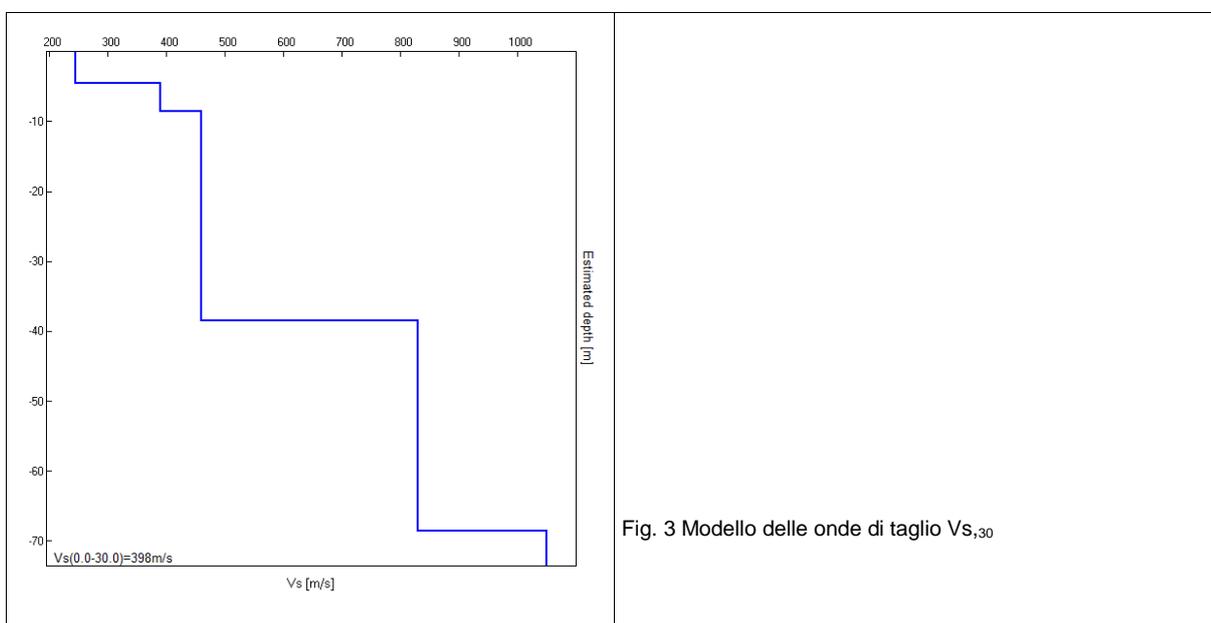


Fig. 2 Analisi spettrale delle tre componenti del moto

Il modello di inversione consente di definire la seguente sismostratigrafia in termini di onde di taglio (fig. 3):

sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)
1	245	4.5
2	390	4
3	460	30
4	830	30
5	>1050	Inf.
Vs,30=398 m/s (relativo a quota esecuzione misura)		



La velocità equivalente delle onde di taglio **Vs**, nei primi trenta metri calcolati a partire dalla relativa quota di esecuzione della misura, è pari a circa **400 m/s**, che riconduce il tipo di suolo nella categoria **B** (*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s*).

3.1.1 VERIFICA DI ATTENDIBILITÀ DEL DATO ACQUISITO SECONDO LE LINEE GUIDA SESAME (2005)

Criteria basilari per la definizione dell'affidabilità della curva HVSR e il loro esito positivo è condizione necessaria per estrarre qualsiasi informazione o interpretazione del dato¹			
$f_0 > 10 / L_w$	3.00 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	4020.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 145 times	OK	

Chiarezza del picco²			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	2.281 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.563 Hz	OK	
$A_0 > 2$	8.38 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03824 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	0.11472 < 0.15	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.6618 < 1.58	OK	

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

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

1 Tutte e tre le verifiche devono essere soddisfatte.

2 Il soddisfacimento di almeno cinque delle sei verifiche conferma la presenza di un "chiaro singolo picco" della curva HVSR; il concetto di "chiarezza" del picco è legato all'ampiezza del picco H/V e al suo valore relativo rispetto al valore H/V in altri intervalli di frequenza. Il concetto di "singolo" si riferisce al fatto che in nessun altro intervallo di frequenze l'ampiezza H/V mostri un altro picco chiaro che soddisfi gli stessi criteri.

3.2 HVSr 2

Frequenza fondamentale di risonanza di sito: **3 Hz**.

La curva HVSr evidenzia una frequenza caratteristica di risonanza del sito pari a circa 3 Hz (fig. 4) verificando le condizioni di “chiarezza” della curva (si veda più avanti “Verifica di attendibilità del dato acquisito secondo le LINEE GUIDA SESAME”).

Si nota una sostanziale omogeneità del sottosuolo in termini sismici con una costante crescita delle velocità di propagazione delle onde di taglio. Lo spettro sismico si stabilizza costantemente su di un rapporto spettrale H/V > 1 (fig. 4).

La frequenza fondamentale di sito può comportare criticità per strutture con periodo proprio pari a circa 0.3 secondi.

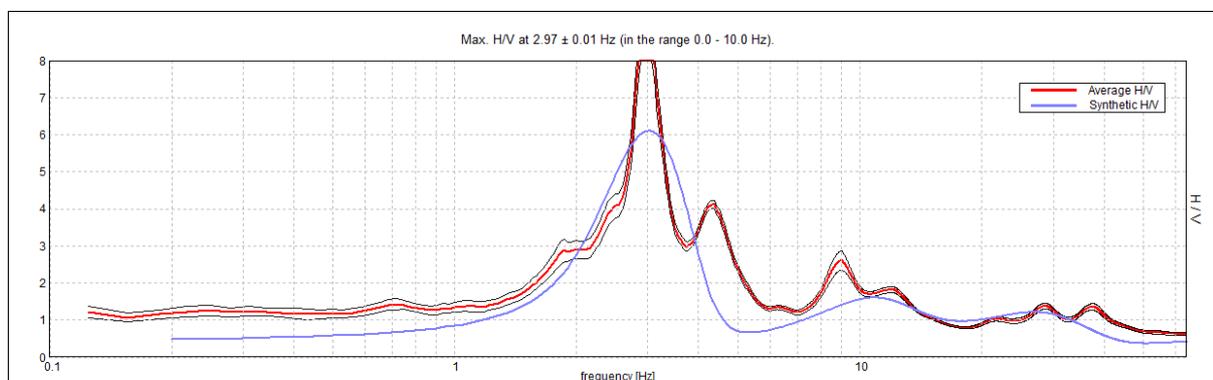


Fig. 4 Rapporto spettrale H/V misurato. Con la linea rossa l'H/V medio, l'intervallo di confidenza al 95%, con linea blu la curva sintetica

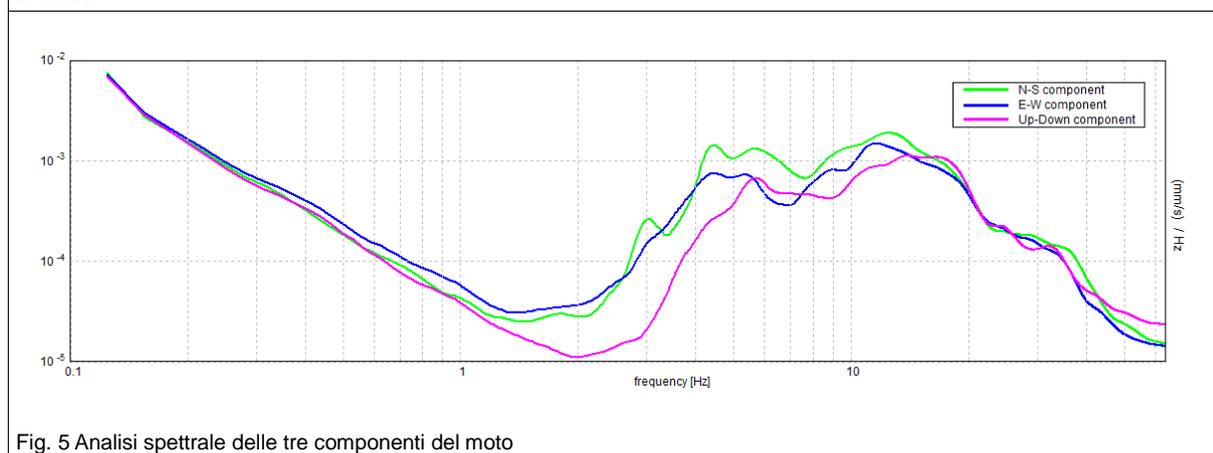
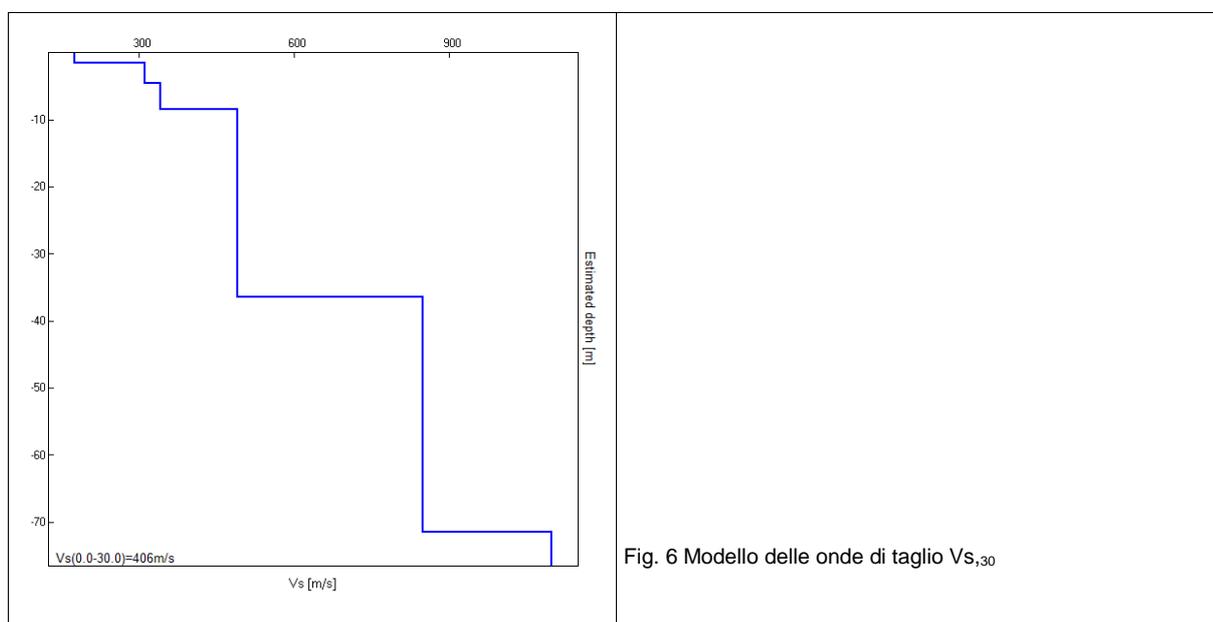


Fig. 5 Analisi spettrale delle tre componenti del moto

Il modello di inversione consente di definire la seguente sismostratigrafia in termini di onde di taglio (fig. 6):

sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)
1	174	1.5
2	310	3
3	340	4
4	490	28
5	850	35
6	>1100	Inf.

Vs,30=406 m/s (relativo a quota esecuzione misura)



La velocità equivalente delle onde di taglio **Vs**, nei primi trenta metri calcolati a partire dalla relativa quota di esecuzione della misura, è pari a circa **405 m/s**, che riconduce il tipo di suolo nella categoria **B** (*Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs,30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s*).

3.2.1 VERIFICA DI ATTENDIBILITÀ DEL DATO ACQUISITO SECONDO LE LINEE GUIDA SESAME (2005)

Criteria basilari per la definizione dell'affidabilità della curva HVSR e il loro esito positivo è condizione necessaria per estrarre qualsiasi informazione o interpretazione del dato¹

$f_0 > 10 / L_w$	$2.97 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$4096.9 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 144 times	OK	

Chiarezza del picco²

Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	2.656 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	3.344 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$9.57 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00401 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.0119 < 0.14844$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7557 < 1.58$	OK	

1. Tutte e tre le verifiche devono essere soddisfatte.
2. Il soddisfacimento di almeno cinque delle sei verifiche conferma la presenza di un "chiaro singolo picco" della curva HVSR; il concetto di "chiarezza" del picco è legato all'ampiezza del picco H/V e al suo valore relativo rispetto al valore H/V in altri intervalli di frequenza. Il concetto di "singolo" si riferisce al fatto che in nessun altro intervallo di frequenze l'ampiezza H/V mostri un altro picco chiaro che soddisfi gli stessi criteri.

3.3 HVSr 3

Frequenza fondamentale di risonanza di sito: **assente**.

La curva HVSr non evidenzia alcuna frequenza caratteristica di risonanza chiara del sito (fig. 7). Non sono presenti, nell'intervallo di frequenze ingegneristiche, picchi che verifichino le condizioni di "chiarezza" della curva (si veda più avanti "Verifica di attendibilità del dato acquisito secondo le LINEE GUIDA SESAME").

Si nota una sostanziale omogeneità del sottosuolo in termini sismici con una costante crescita delle velocità di propagazione delle onde di taglio. Lo spettro sismico si stabilizza costantemente su di un rapporto spettrale H/V > 1 (fig. 7).

Si escludono criticità in termini di amplificazioni locali delle onde sismiche (effetti di risonanza) per il sito in esame.

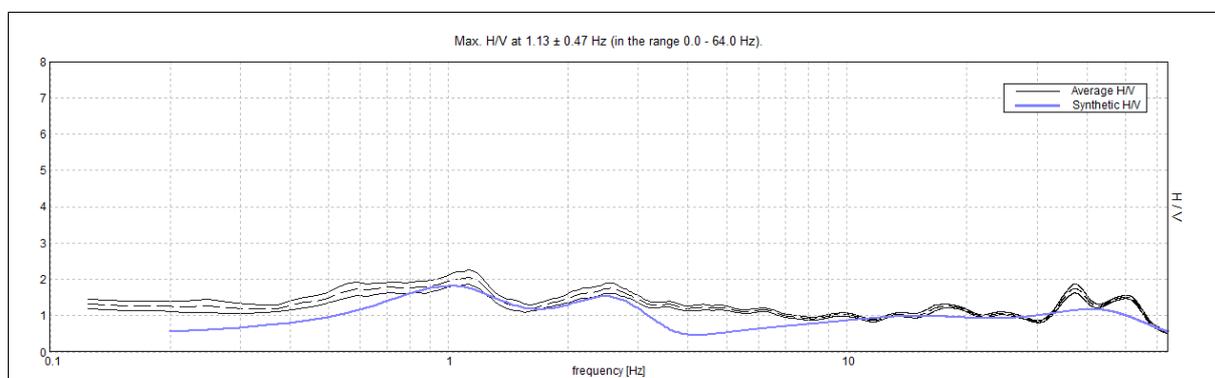


Fig. 7 Rapporto spettrale H/V misurato. Con la linea rossa l'H/V medio, l'intervallo di confidenza al 95%, con linea blu la curva sintetica

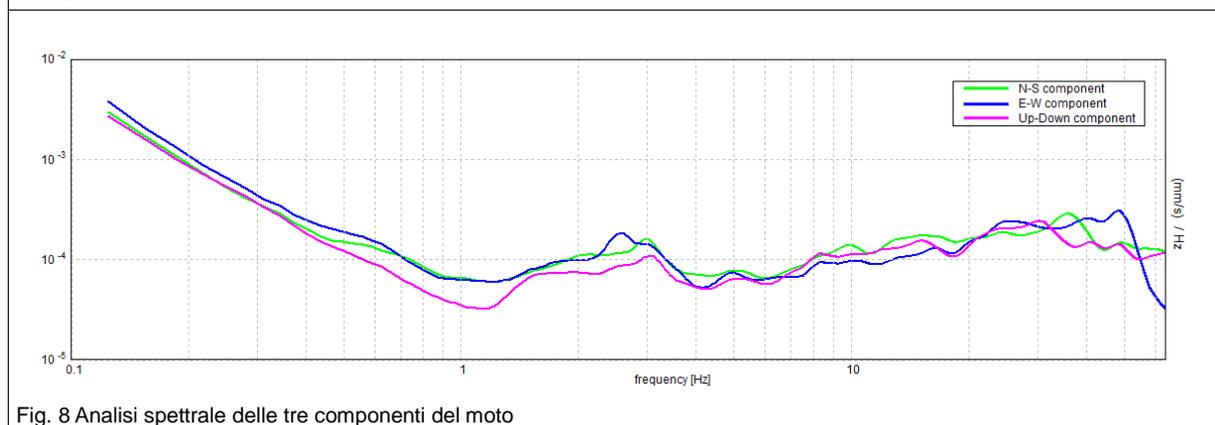
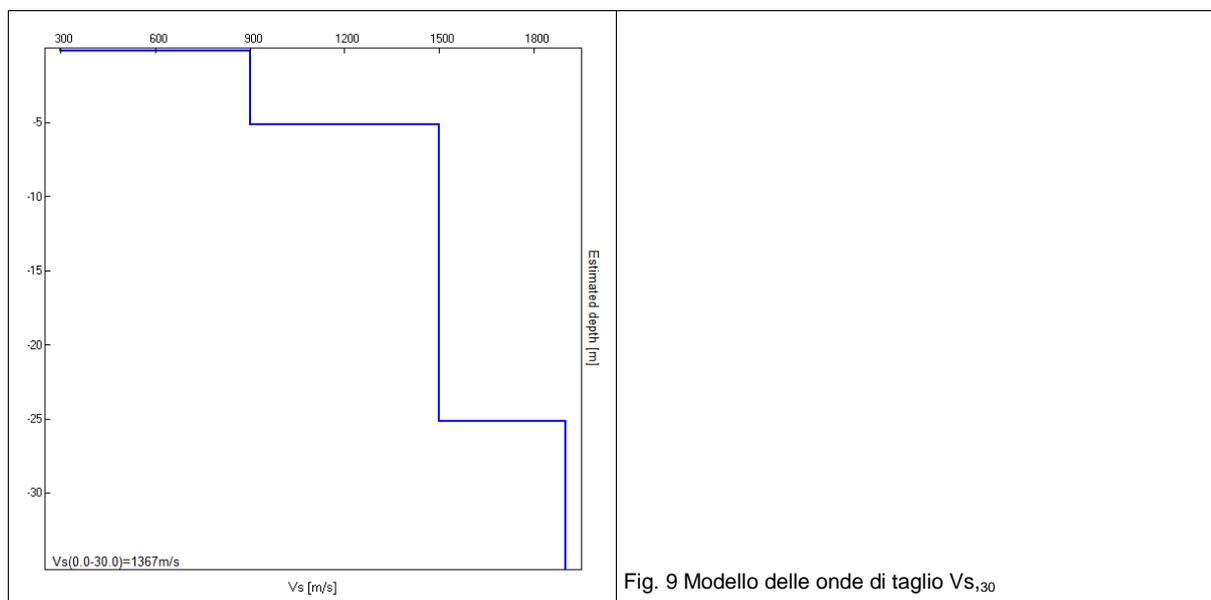


Fig. 8 Analisi spettrale delle tre componenti del moto

Il modello di inversione consente di definire la seguente sismostratigrafia in termini di onde di taglio (Figura 9):

sismostrato	Vs (m/s)	Spessore (m)
1	300	0.15
2	900	5
3	1500	20
4	>1900	Inf.
Vs,30=1367 m/s (relativo a piano campagna)		



La velocità equivalente delle onde di taglio V_s , nei primi trenta metri, è pari a circa **1367** m/s, che riconduce il tipo di suolo nella categoria **A** (*Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m*).

3.3.1 VERIFICA DI ATTENDIBILITÀ DEL DATO ACQUISITO SECONDO LE LINEE GUIDA SESAME (2005)

Criteri basilari per la definizione dell'affidabilità della curva HVSR e il loro esito positivo è condizione necessaria per estrarre qualsiasi informazione o interpretazione del dato¹

$f_0 > 10 / L_w$: 1.13 > 0.50 [OK]

$nc(f_0) > 200$: 1597.5 > 200 [OK]

$sA(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$

$sA(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ Superato 0 volte su 55 [OK]

Chiarezza del picco²

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]

$A_0 > 2$: 2.06 > 2 [OK]

$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm sA(f)] = f_0 \pm 5\%$: | 0.41581 | < 0.05 [NO]

$sf < e(f_0)$: 0.46778 < 0.1125 [NO]

¹ Tutte e tre le verifiche devono essere soddisfatte.

² Il soddisfacimento di almeno cinque delle sei verifiche conferma la presenza di un "chiaro singolo picco" della curva HVSR; il concetto di "chiarezza" del picco è legato all'ampiezza del picco H/V e al suo valore relativo rispetto al valore H/V in altri intervalli di frequenza. Il concetto di "singolo" si riferisce al fatto che in nessun altro intervallo di frequenze l'ampiezza H/V mostri un altro picco chiaro che soddisfi gli stessi criteri.