



PROTEZIONE CIVILE
 Presidenza del Consiglio dei Ministri
 Dipartimento della Protezione Civile



REGIONE LAZIO



**CONFERENZA DELLE REGIONI E
 DELLE PROVINCE AUTONOME**

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

MICROZONAZIONE SISMICA

Appendice 2

rapporto specialistico sulle indagini di nuova esecuzione
 (MASW e HVSR)

Regione Lazio

Comune di Capranica Prenestina



<p>Regione</p> <p>Lazio</p>	<p>Soggetto realizzatore</p> <p>GEO ambiente <small>Geoambiente soc. coop. a r. l. Via delle Idrovore della Magliana, 147 - 00148 Roma C. Fisc. e P. Iva 05166791003 Tel/Fax 06/5819295 www.geoambiente.it E-mail: info@geoambiente.it</small></p> <p>REDATTORE DELLO STUDIO</p> <p>Dott.Geol. Bruno Coppola</p> <p>GRUPPO DI LAVORO</p> <p>Dott.Geol. Giacinto Angelucci</p> <p>Dott.Geol. Massimilano Ferrari</p> <p>Dott.Geol. Fabrizio Rinaldi</p>	<p>Data</p> <p>Febbraio 2013</p>
------------------------------------	---	---

1. INDAGINI EX-NOVO

Le indagini ex-novo specifiche per la Microzonazione Sismica sono state realizzate specificamente in corrispondenza di punti maggiormente significativi, individuati in modo da chiarire il più possibile il modello geologico-sismico del territorio, secondo i criteri definiti al degli ICMS.

In particolare sono state effettuate le seguenti indagini:

- Esecuzione di n. 1 prospezione sismica tipo MASW per la determinazione dei parametri sismici
- esecuzione di n. 14 prove di misura dei microtremori ambientali, analizzati attraverso il metodo HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) o tecnica dei rapporti spettrali tra la componente orizzontale e verticale del campo di rumore ambientale, che rappresenta una delle metodologie di maggior impiego per la stima delle frequenze proprie di vibrazione del sottosuolo.

1.1 Indagine sismica multicanale MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Il metodo MASW è una tecnica di indagine geofisica che consente la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali (V_s), basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che si trasmettono 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 o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione, cioè sono onde la cui velocità dipende dalla frequenza.

E' sperimentalmente provata la relazione che lega le leggi del moto delle onde superficiali di Rayleigh e quelle delle onde di taglio S. La velocità di fase delle prime è influenzata direttamente da alcuni parametri quali la velocità delle onde P, la densità del mezzo ed in particolare modo dalla velocità delle onde S.

Il metodo di indagine MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), basato su un energizzazione sismica artificiale del suolo e sull'analisi spettrale delle onde di Rayleigh presenti nel segnale, consente di ricostruire il modello sismo-stratigrafico del sottosuolo e soddisfare quindi le aspettative della nuova normativa.

In particolare, osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare le principali proprietà fisico-elastiche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

La propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati e trasversalmente isotropi, avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda che interessano il terreno a diverse profondità e che risultano condizionate dalle caratteristiche elastiche. Questo comportamento viene definito dispersione ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

In generale, lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte, rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

Lo studio dello spettro delle velocità derivante dall'analisi del sismogramma registrato consente di definire la cosiddetta curva di dispersione che associa ad ogni frequenza la velocità di propagazione dell'onda. Tale curva è estraibile dallo spettro del segnale poiché essa approssimativamente posa sui massimi del valore assoluto dello spettro.

La tecnica MASW sottintende quindi un metodo interpretativo indiretto attraverso il quale, a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri sismici (V_{s30}).

La procedura è articolata in tre passi successivi:

- Acquisizione, registrazione e analisi dei dati sismici contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;
- Definizione della curva di dispersione del modello reale del terreno funzione delle caratteristiche dello stesso.
- Inversione, ovvero reiterazioni successive per la definizione di un modello finale le cui caratteristiche (densità e velocità di propagazione delle onde s) meglio approssimano quelle reali.

Questo ultimo processo impone la conoscenza della stratigrafia locale in funzione della quale vengono definiti il Modulo di Poisson, lo spessore degli strati e la velocità delle onde S (V_s); analizzando e confrontando i parametri è possibile trovare la soluzione che meglio rappresenta la realtà geologica del sito.

Le acquisizioni vengono eseguite con stendimenti lineari in cui i geofoni sono collocati su una linea retta (Fig. 1) ad una distanza reciproca costante determinata dalle condizioni geologiche locali e

logistiche. Risulta fondamentale infatti che non vi siano variazioni stratigrafiche laterali nell'ambito della lunghezza dello stendimento e che lo stesso non subisca brusche variazioni di quota.

La sorgente sismica, realizzata con una massa battente (switch hammer) è stata posizionata esternamente allo stendimento ad una distanza variabile, (D) di 2, 3 e 4 volte la distanza intergeofonica, (Dx), dal primo geofono, e sempre in asse con esso.

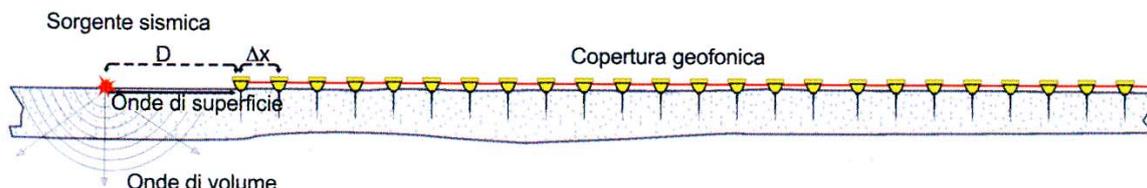


Fig. 1 – Dispositivo geometrico utilizzato per le prove MASW.

La strumentazione utilizzata è costituita da un sismografo multicanale M.A.E. A6000S, con le seguenti caratteristiche tecniche:

- capacità di campionamento dei segnali tra 0.002 e 0.00005 sec;
- sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" (time break)
- filtri High Pass e Band Reject
- "Automatic Gain Control"
- convertitore A/D a 24 bit
- 24 geofoni verticali (P) con periodo proprio di 4.5 Hz;
- massa battente pesante di 10 Kg.

Prova MASW 1.

La configurazione spaziale in sito è equivalente ad un dispositivo geometrico punto di scoppio-geofoni "base distante in linea". In particolare è stato utilizzato il seguente set-up:

- 24 geofoni con interspazio (Dx) di 2,0 m;
- n. 3 energizzazioni con offset 2, 4 e 5 volte (Dx);
- passo di campionatura pari a 1000 Hz;
- lunghezza delle tracce sismiche pari a 2.048 (ms)

Di seguito si riportano i risultati, sia in forma grafica che numerica, ottenuti dalla prove effettuate.

Numero di ricevitori..... 24

Numero di campioni temporali..... 2048

Passo temporale di acquisizione 1ms
 Numero di ricevitori usati per l'analisi 24
 L'intervallo considerato per l'analisi comincia a 0ms

I ricevitori non sono invertiti (l'ultimo ricevitore è l'ultimo per l'analisi)

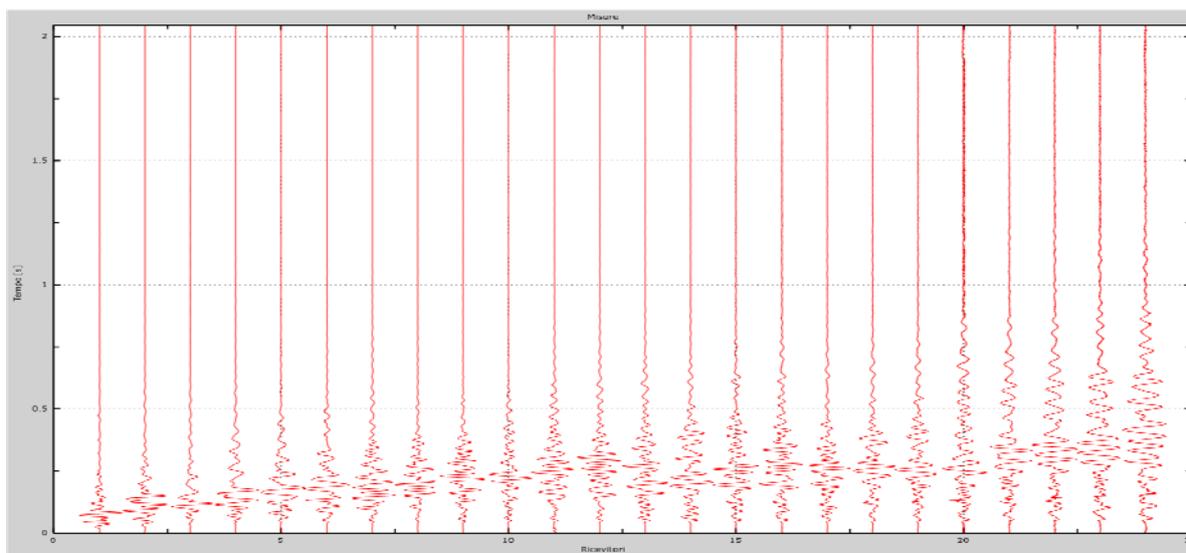


Fig. 2: Sismogramma di acquisizione riferito alla prova 1

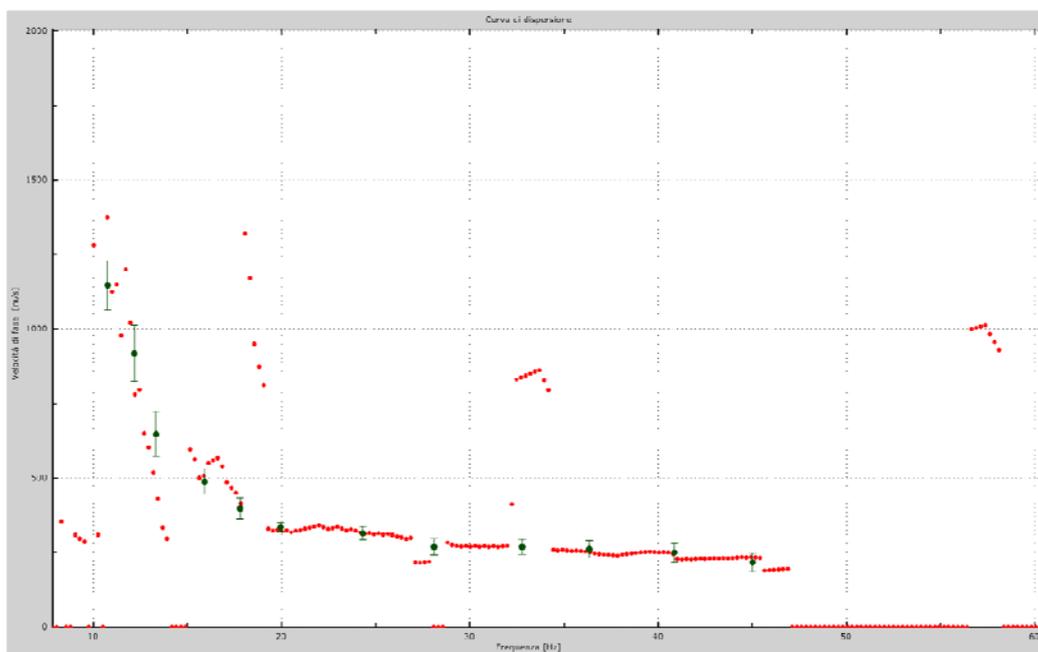


Fig. 3 - Curva di dispersione

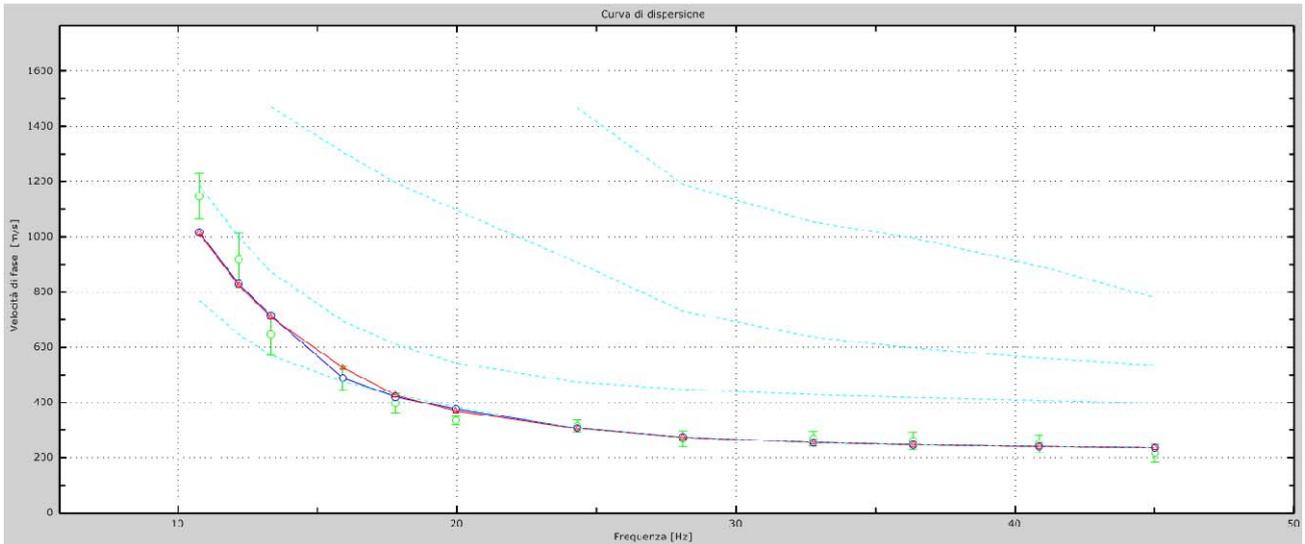


Fig. 4: Velocità numeriche – punti sperimentali (verde), modi di Rayleigh (ciano), curva apparente (blu), curva numerica (rosso). Errore tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica 10%.

Numero di strati (escluso semispazio) 6
 Spaziatura ricevitori [m] 2 m
 Numero ricevitori 24
 Numero modi 4

strato	h [m]	z [m]	Densità [kg/m ³]	Falda	Poisson	Vp [m/s]	Vs finale [m/s]
1	2	-2	1800	NO	0.25	415.69	240.000
2	3	-5	1800	NO	0.25	484.97	280.000
3	5	-10	2000	NO	0.3	1028.96	550.000
4	10	-20	2200	NO	0.3	1216.04	650.000
5	20	-40	2300	NO	0.3	2338.54	1250.000
6	∞	-∞	2400	NO	0.3	2806.24	1500.000

Tabella riassuntiva dei principali parametri sismo-elastici dei livelli riconosciuti.

A partire dal profilo verticale delle onde S e dalle relative velocità dei sismostrati del modello sismico monodimensionale riportato nel capitolo precedente, è possibile calcolare il valore delle Vs30, che rappresenta la “velocità equivalente” di propagazione entro 30 m di profondità delle onde di taglio (Vs). Per il calcolo delle Vs30 si fa riferimento alla seguente espressione, riportata nel D.M. 14.09.2005 e nel D.M. 14.01.2008 (“Norme tecniche per le costruzioni”):

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}}$$

Dove: H_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Utilizzando la formula sopra riportata si ottiene il seguente valore (la quota iniziale corrisponde al piano campagna attuale), di velocità media di propagazione delle Onde di taglio entro i 30 metri di profondità (V_{S30}): $V_{S30} = 582$ m/s.

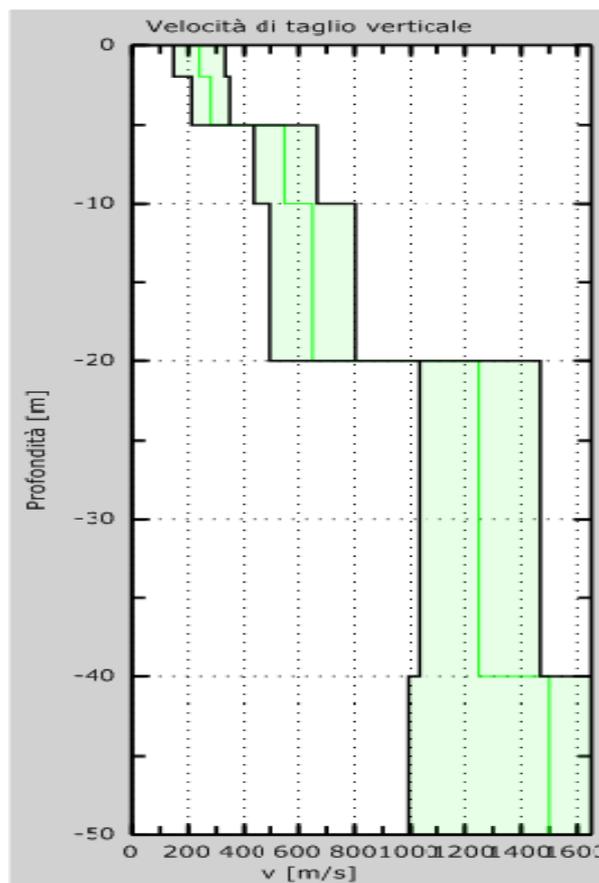


Fig. 4 – Profilo di velocità V_s . La linea verde è riferita alla V_s finale.

1.2 Indagine sismica con tecnica dei rapporti spettrali (HVSr)

La tecnica HVSr (o di Nakamura) è una tecnica sperimentale finalizzata alla caratterizzazione delle proprietà meccaniche del sottosuolo (impedenza sismica, velocità di propagazione delle onde S) a partire da misure del campo di vibrazioni ambientali generate da sorgenti non controllate. Questa

tecnica è molto economica, sia per quel che riguarda le registrazioni in sito, che per quel che riguarda le analisi cui i dati vengono sottoposti.

Si sottolinea che l'analisi del rapporto spettrale H/V non è, da sola, sufficiente a caratterizzare la complessità degli effetti di sito e soprattutto non è in grado di determinare, da sola, il valore assoluto dell'amplificazione sismica. Il metodo ha comunque dimostrato di essere idoneo per valutare il periodo fondamentale di depositi sedimentari (in modo particolare quando l'impedenza di questi è in grande contrasto con l'impedenza del bed-rock).

In pratica si tratta di misurare con un sismometro a tre componenti le vibrazioni ambientali presenti in un punto e quindi costruire una curva rappresentativa dei rapporti spettrali (H/V) in funzione della frequenza di vibrazione. Il metodo consente di determinare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno (o frequenza di risonanza f_0), a partire dal fatto che il microtremore sia principalmente costituito da onde sismiche superficiali, in particolare da onde di Rayleigh.

Il contrasto d'impedenza sismica tra gli strati di terreno superficiali ed il substrato roccioso è la causa dell'amplificazione al sito. Specificamente, verificata l'ipotesi per cui la componente verticale del moto sia esente da effetti di amplificazione, la funzione di amplificazione è determinabile come il rapporto tra le componenti spettrali orizzontali (H) e quella verticale (V) di una stessa registrazione in superficie. Tale funzione è propriamente indicata come curva H/V (per questo spesso si parla di tecnica HVSR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio technique) ed esprime la variazione dell'amplificazione del terreno in funzione della frequenza.

La principale applicazione della tecnica del rapporto spettrale H/V è quindi quella di consentire in modo semplice e veloce l'identificazione della frequenza fondamentale f_0 di un determinato sito.

La tecnica HVSR si basa attraverso una registrazione del rumore ambientale lungo tre direzioni ortogonali tra loro (x,y,z) con una singola stazione. Una volta acquisiti i dati di campagna sulle tracce di registrazione viene eseguita un'operazione detta di windowing, in cui le tre tracce registrate vengono suddivise in finestre temporali di durata prefissata. Secondo le indicazioni del progetto SESAME tale dimensione, detta Long Period, deve essere almeno pari ai 20 secondi. Si ottiene così un insieme di finestre "long", che sono sincronizzate fra le tracce.

Queste finestre vengono filtrate in base a dei criteri che permettono di individuare l'eventuale presenza di transienti (disturbi temporanei con grandi contributi nelle frequenze alte) o di fenomeni di saturazione. Per ciascuna delle finestre rimanenti, quindi ritenute valide, viene valutato lo spettro di Fourier. Quest'ultimo viene sottoposto a tapering e/o lisciamento secondo una delle varie tecniche note in letteratura.

Successivamente si prendono in considerazione gli spettri delle finestre relative alle tracce orizzontali in coppia. Ovvero, ogni spettro di una finestra per esempio della direzione X, ha il suo corrispettivo per le finestre nella direzione Y, vale a dire che sono relative a finestre temporali sincrone. Per ognuna di queste coppie viene eseguita una somma tra le componenti in frequenza secondo un determinato criterio che può essere, ad esempio, una semplice media aritmetica o una somma euclidea. Per ciascuna coppia di cui sopra, esiste lo spettro nella direzione verticale Z, ovvero relativo alla finestra temporale sincrona a quelle della coppia. Ogni componente in frequenza di questo spettro viene usato come denominatore nel rapporto con quello della suddetta coppia. Questo permette quindi di ottenere il ricercato rapporto spettrale H/V per tutti gli intervalli temporali in cui viene suddivisa la registrazione durante l'operazione di windowing.

Eseguendo per ciascuna frequenza di tali rapporti spettrali una media sulle varie finestre, si ottiene il rapporto spettrale H/V medio, la cui frequenza di picco (frequenza in cui è localizzato il massimo valore assunto dal rapporto medio stesso) rappresenta la deducibile stima della frequenza naturale di vibrazione del sito.

Le misure di microtremore sono state effettuate utilizzando il sismografo digitale multicanale M.A.E. A 6000 S S3S2, alimentato da 1 batteria e collegato ad un sensore geofonico 3D di superficie con frequenza propria di 2 Hz. Il dispositivo geofonico, progettato specificamente per l'acquisizione del rumore sismico, è dotato di tre sensori elettrodinamici (velocimetri) di cui n. 2 componenti orizzontali orientati N-S, E-W e n.1 verticale. I dati di rumore, amplificati e digitalizzati a 24 bit equivalenti, sono stati acquisiti alla frequenza di campionamento di 250 Hz, per una durata di registrazione pari 20 minuti.

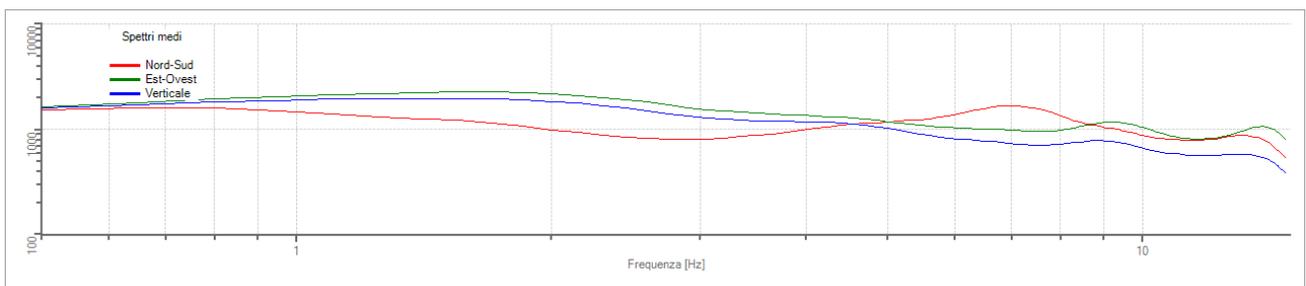
I dati raccolti sono stati successivamente processati con software specifico "geopsy" per la determinazione della curva HVSR ed avendo come obiettivo principale la ricerca del picco di frequenza naturale

I risultati ottenuti dalle prove vengono presentati sotto forma di grafici, di cui quello più importante è quello relativo al rapporto spettrale H/V, dove la frequenza espressa in Hz è riportata sull'asse delle (x) mentre l'ampiezza del rapporto HV sull'asse delle (y). Poiché la frequenza è relazionata alla profondità, il grafico HVSR può tramutarsi in un grafico ampiezza del rapporto HV (x) – profondità (y), dove l'ampiezza del rapporto HV (x) descrive in modo relativo l'ampiezza del contrasto di impedenza tra i due mezzi a quella determinata profondità (y). Ciascun picco nel grafico HV corrisponde ad un livello stratigrafico che presenta un contrasto di impedenza rispetto al livello sottostante. Maggiore è il

contrasto di impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco HV, sebbene la relazione tra le due variabili non sia lineare.

I dati raccolti sono stati successivamente processati con software specifico "Easy HVSR" distribuito dalla soc. Geostru per la determinazione della curva HVSR ed avendo come obiettivo principale la ricerca del picco di frequenza naturale

Risultati della prova:	h1
Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	250.00 Hz
Numero campioni:	225000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

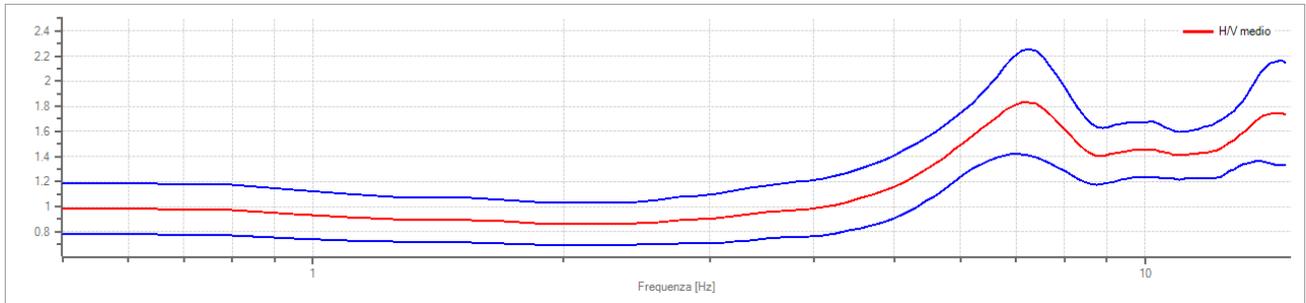


Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
Numero finestre incluse nel calcolo: 25

Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **7,2 ± 0,2 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	

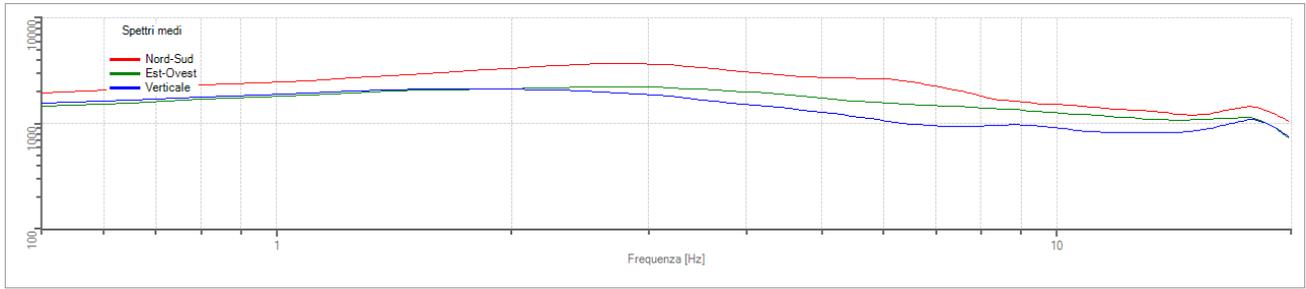
Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	No
$A_0 > 2$	No
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Risultati della prova:

h2

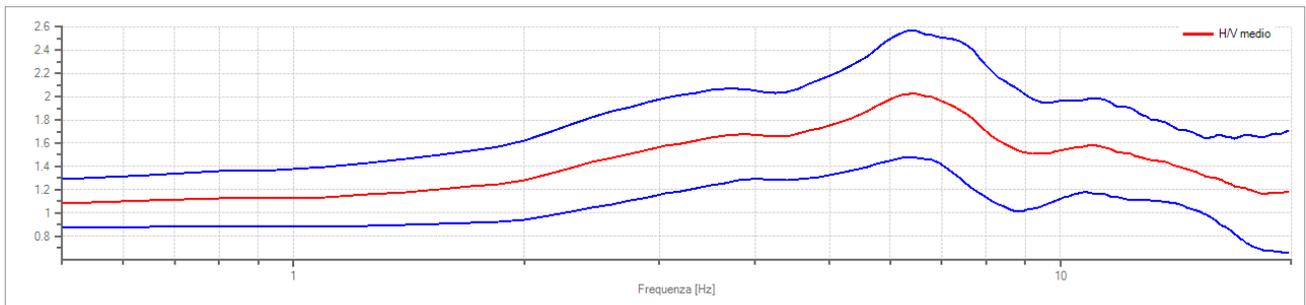
Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	250.00 Hz
Numero campioni:	225000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
 Numero finestre incluse nel calcolo: 27
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **6,35 ± 0,3 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$$f_0 > 10/l_w$$

Ok

$$n_c(f_0) > 200$$

Ok

$$\sigma_A(f) < 2 \text{ per } 0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0 \text{ se } f_0 > 0.5\text{Hz}$$

Ok

$$\sigma_A(f) < 3 \text{ per } 0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0 \text{ se } f_0 < 0.5\text{Hz}$$

Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$

No

$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$

No

$A_0 > 2$

Ok

$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$

Ok

$\sigma_f < \varepsilon(f)$

Ok

$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Ok

Risultati della prova:

h3

Numero tracce:

3

Durata registrazione:

1200 s

Frequenza di campionamento:

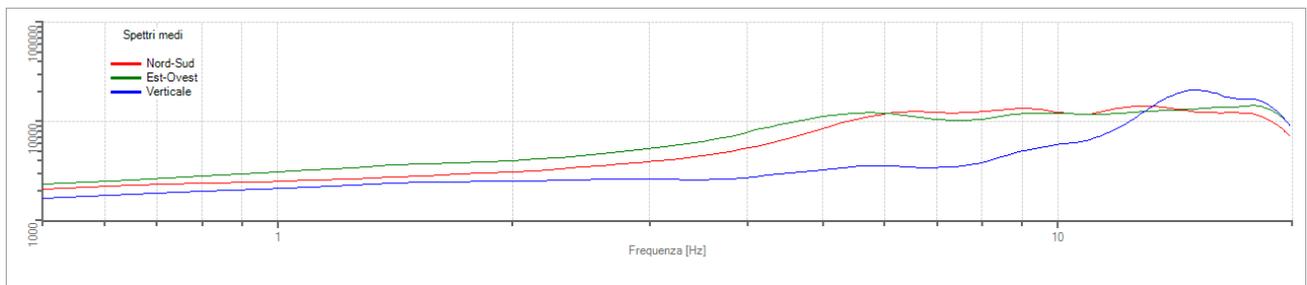
250.00 Hz

Numero campioni:

225000

Direzioni tracce:

Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

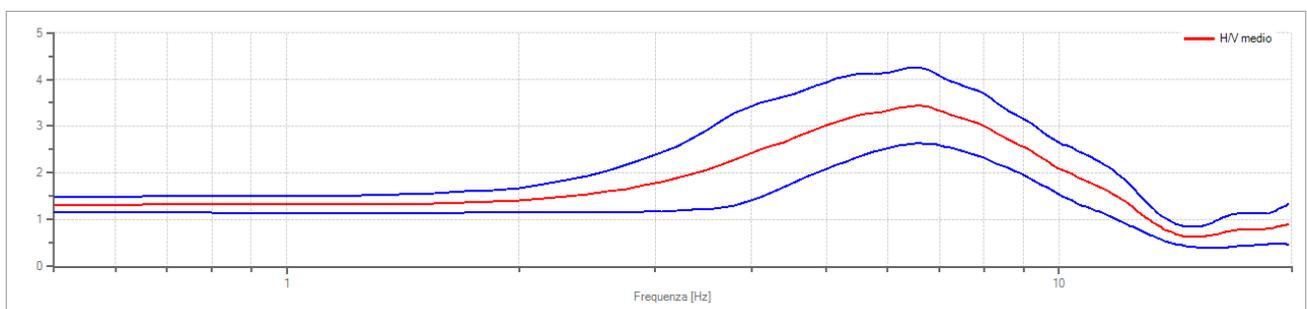
Numero totale finestre selezionate: 36

Numero finestre incluse nel calcolo: 22

Dimensione temporale finestre: 32.768 s

Tipo di lisciamento: Triangolare Costante

Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: $6,5 \pm 0,2$ Hz

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

$f_0 > 10/l_w$
 $n_c(f_0) > 200$
 $\sigma_A(f) < 2$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0,5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0,5\text{Hz}$

ESITO

Ok

Ok

Ok

Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
 $\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
 $A_0 > 2$
 $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
 $\sigma_f < \varepsilon(f)$
 $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Ok

Ok

Ok

Ok

Ok

Ok

Risultati della prova:

h4

Numero tracce:

3

Durata registrazione:

1200 s

Frequenza di campionamento:

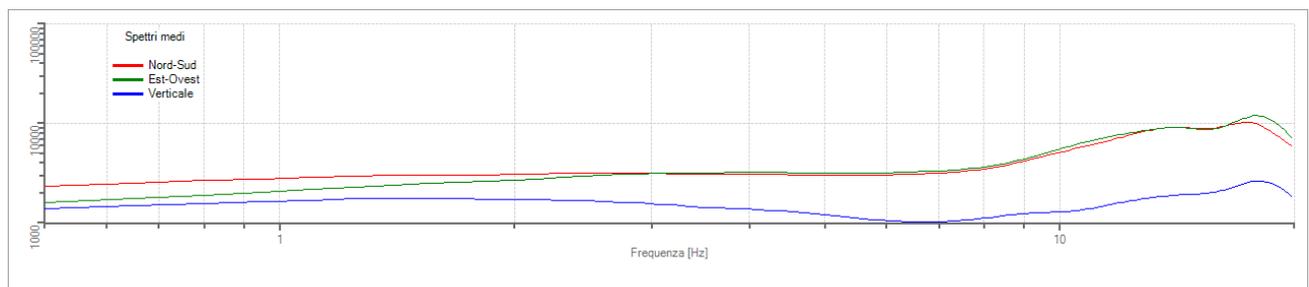
250.00 Hz

Numero campioni:

225000

Direzioni tracce:

Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

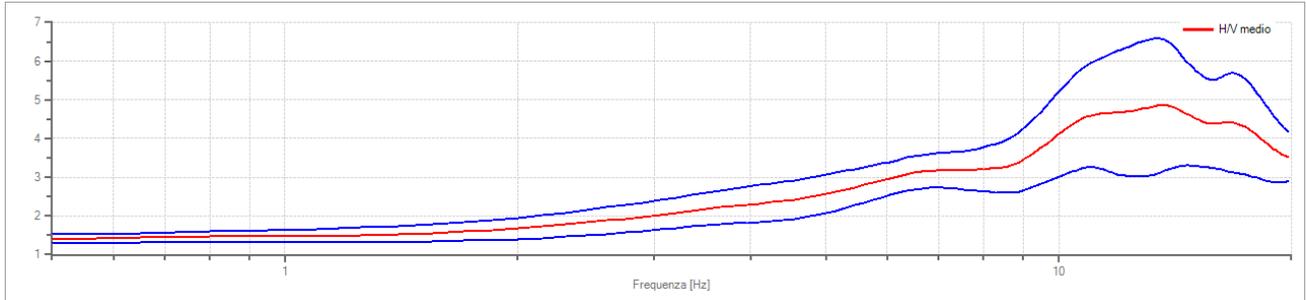


Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36

Numero finestre incluse nel calcolo: 28
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **13,7 ± 0,3 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	

Verifica affidabilità picco:

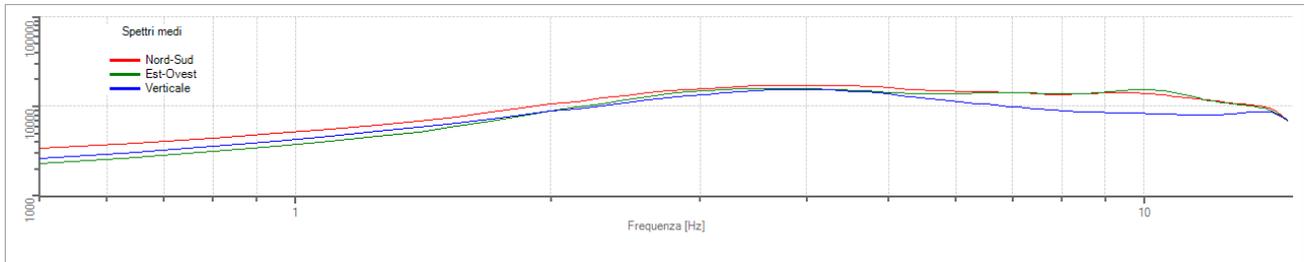
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	Ok
$A_0 > 2$	Ok
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Risultati della prova:

h5

Numero tracce: 3
 Durata registrazione: 1200 s
 Frequenza di campionamento: 250.00 Hz
 Numero campioni: 225000

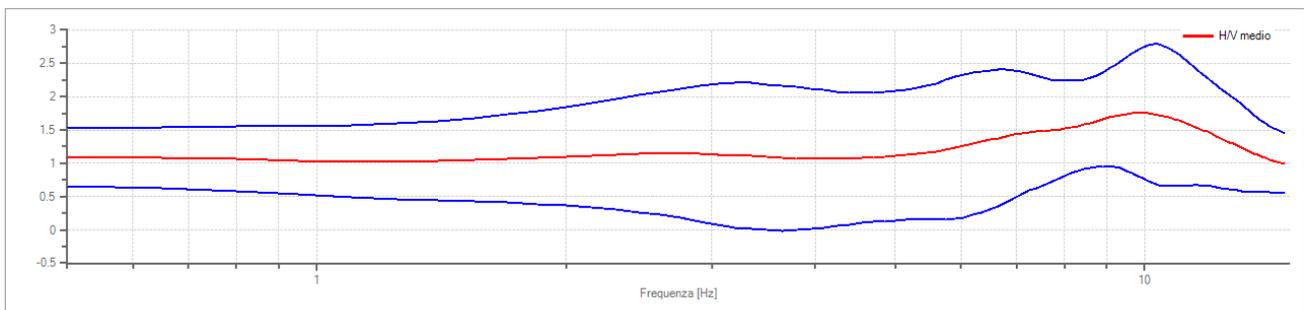
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
 Numero finestre incluse nel calcolo: 30
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **9,9 ± 0,5 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$$f_0 > 10/l_w$$

Ok

$$n_c(f_0) > 200$$

Ok

$$\sigma_A(f) < 2 \text{ per } 0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0 \text{ se } f_0 > 0.5\text{Hz}$$

Ok

$$\sigma_A(f) < 3 \text{ per } 0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0 \text{ se } f_0 < 0.5\text{Hz}$$

Verifica affidabilità picco:

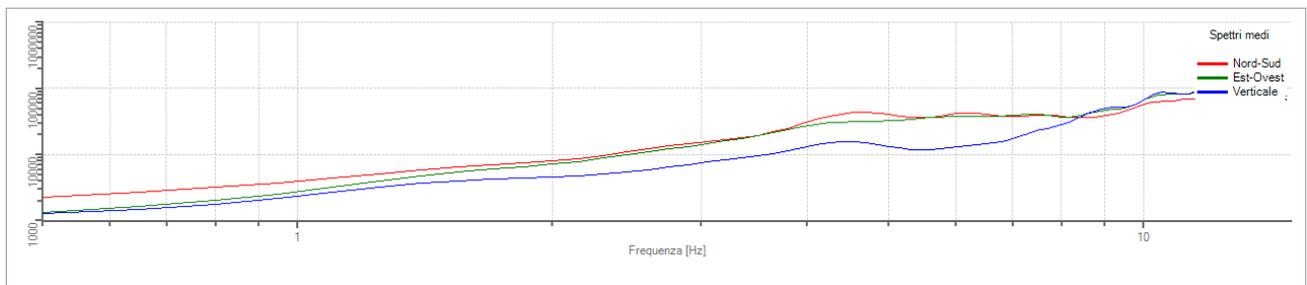
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
 $\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
 $A_0 > 2$
 $f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
 $\sigma_f < \varepsilon(f)$
 $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Ok
 No
 No
 No
 No
 No

Risultati della prova:

h6

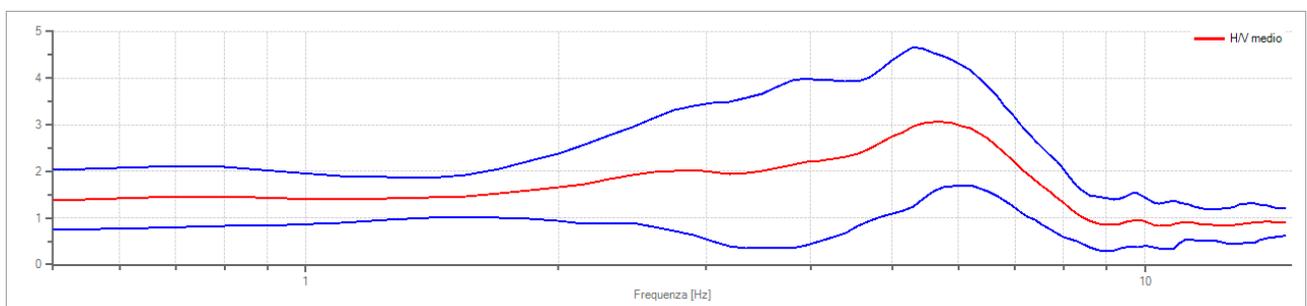
Numero tracce: 3
 Durata registrazione: 1200 s
 Frequenza di campionamento: 250.00 Hz
 Numero campioni: 225000
 Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
 Numero finestre incluse nel calcolo: 27
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: $5,7 \pm 0,4$ Hz

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

$f_0 > 10/l_w$
 $n_c(f_0) > 200$
 $\sigma_A(f) < 2$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0,5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ per $0,5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0,5\text{Hz}$

ESITO

Ok
Ok
Ok

Verifica affidabilità picco:

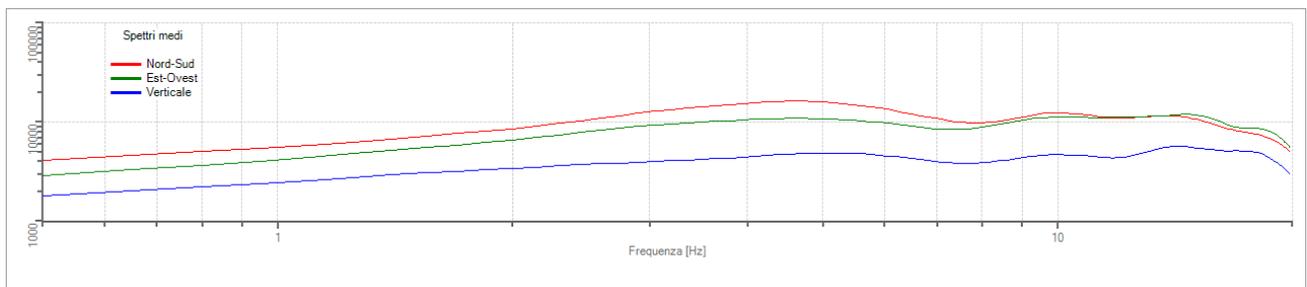
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
 $\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
 $A_0 > 2$
 $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
 $\sigma_f < \varepsilon(f)$
 $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

No
Ok
Ok
No
No
Ok

Risultati della prova:

h7

Numero tracce: 3
 Durata registrazione: 1200 s
 Frequenza di campionamento: 250.00 Hz
 Numero campioni: 225000
 Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

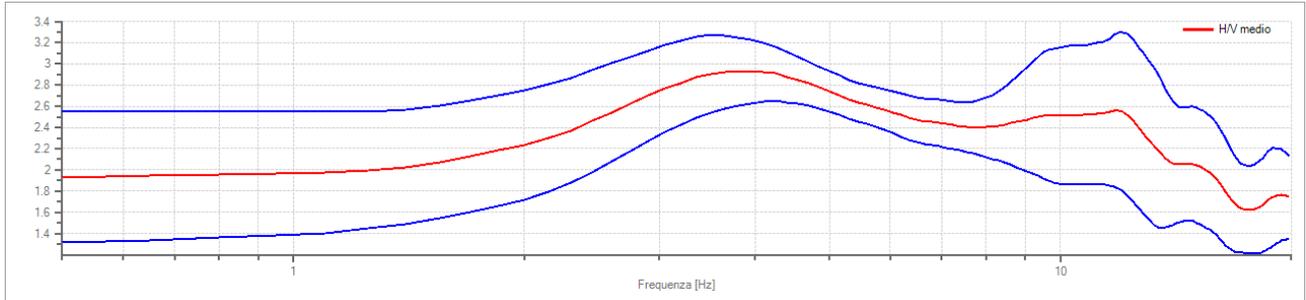


Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36

Numero finestre incluse nel calcolo: 31
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **3,8 ± 0,1 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$	OK
$n_c(f_0) > 200$	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	

Verifica affidabilità picco:

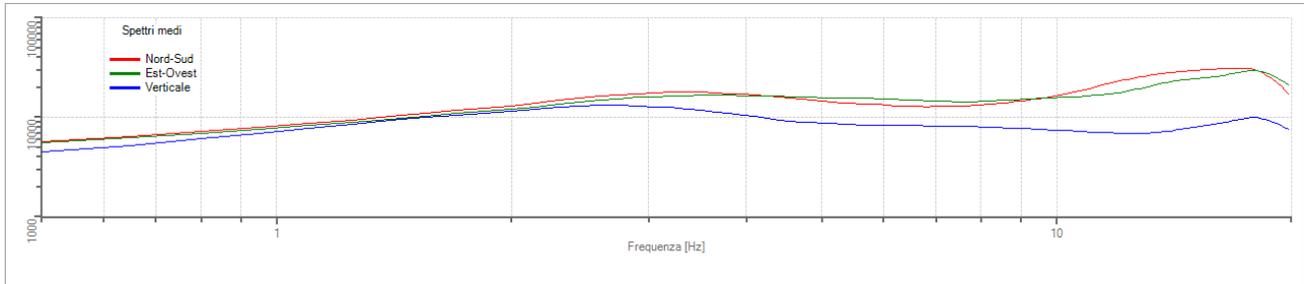
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	No
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	No
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	No
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	No
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Risultati della prova:

h8

Numero tracce: 3
 Durata registrazione: 1200 s
 Frequenza di campionamento: 250.00 Hz
 Numero campioni: 225000

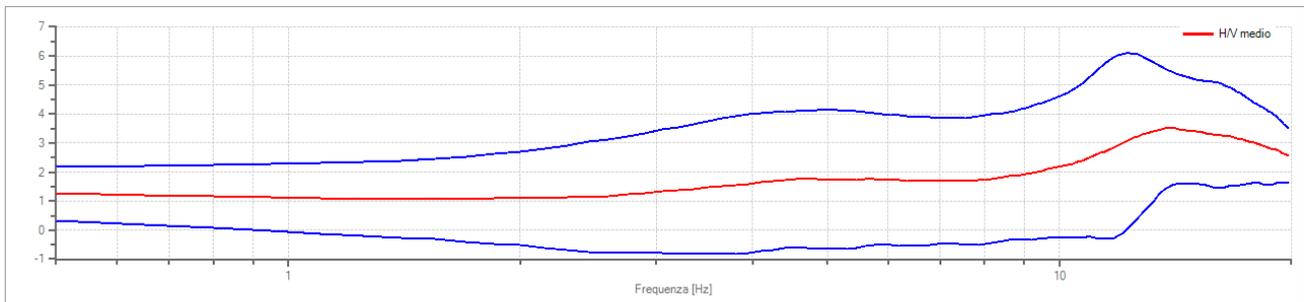
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
 Numero finestre incluse nel calcolo: 28
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **13,8 ± 0,3 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$
 $n_c(f_0) > 200$
 $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$

Ok
 Ok
 Ok

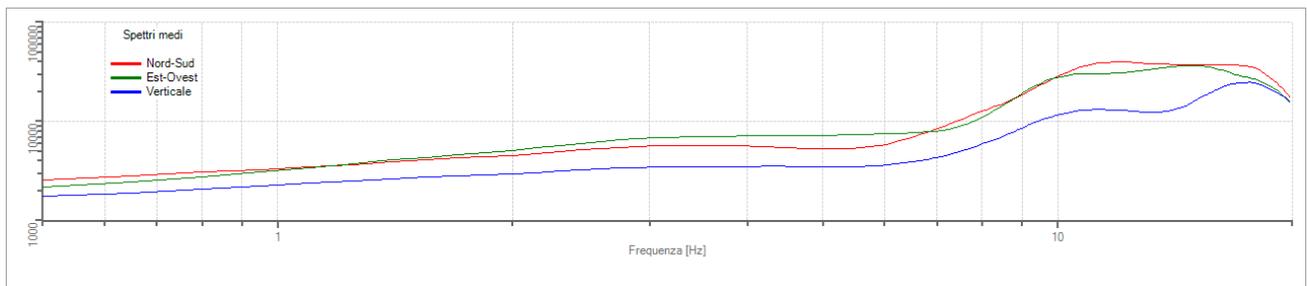
Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	Ok
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	No
$A_0 > 2$	Ok
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	No
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	No
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Risultati della prova:

h9

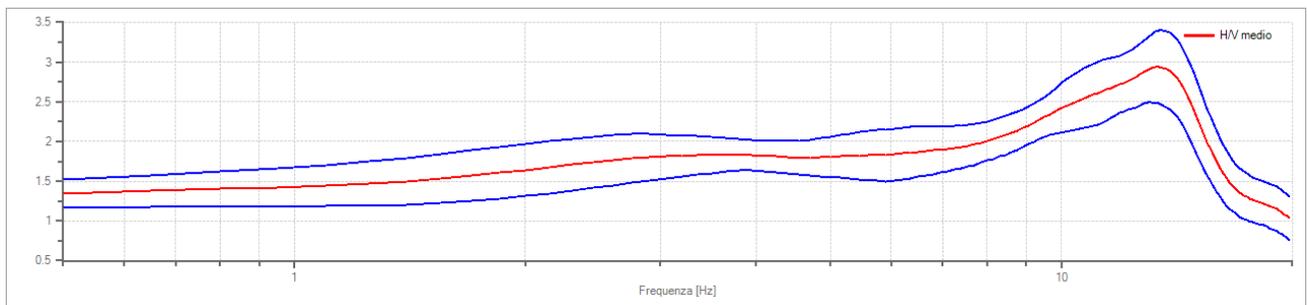
Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	250.00 Hz
Numero campioni:	225000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate:	36
Numero finestre incluse nel calcolo:	32
Dimensione temporale finestre:	32.768 s
Tipo di lisciamento:	Triangolare Costante
Percentuale di lisciamento:	10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **13,4 ± 0,2 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

$f_0 > 10/l_w$
 $n_c(f_0) > 200$
 $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$

ESITO

Ok
Ok
Ok

Verifica affidabilità picco:

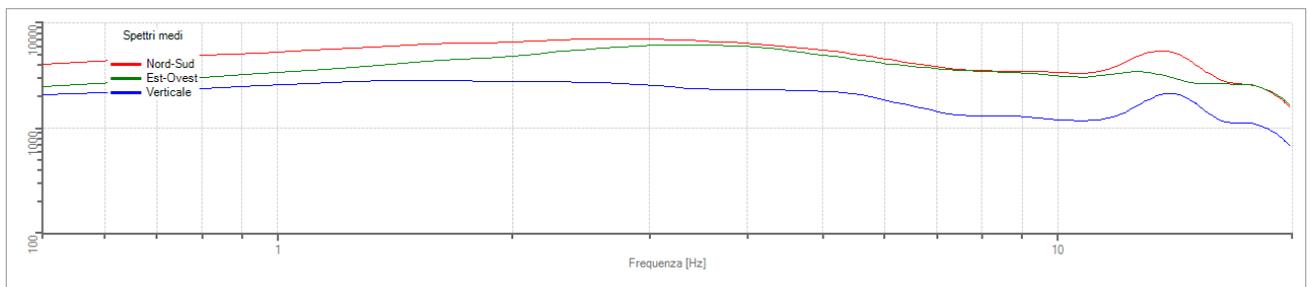
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
 $\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
 $A_0 > 2$
 $f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$
 $\sigma_f < \varepsilon(f)$
 $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

Ok
Ok
Ok
Ok
Ok
Ok

Risultati della prova:

h10

Numero tracce: 3
 Durata registrazione: 1200 s
 Frequenza di campionamento: 250.00 Hz
 Numero campioni: 225000
 Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

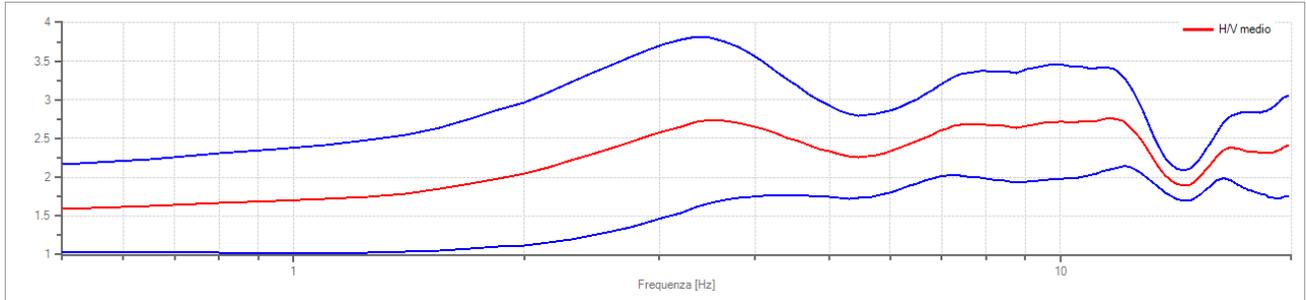


Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36

Numero finestre incluse nel calcolo: 25
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **11,6 ± 0,2 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$	OK
$n_c(f_0) > 200$	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	

Verifica affidabilità picco:

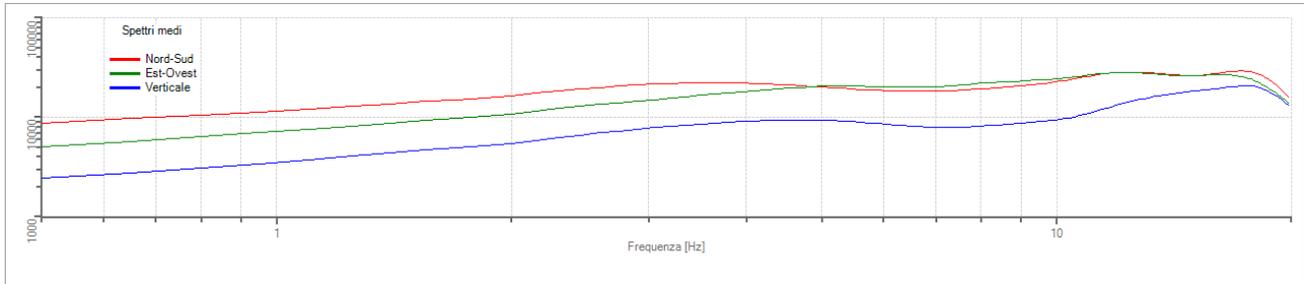
$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	No
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	No
$A_0 > 2$	OK
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	No
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	No
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	OK

Risultati della prova:

h11

Numero tracce: 3
 Durata registrazione: 1200 s
 Frequenza di campionamento: 250.00 Hz
 Numero campioni: 225000

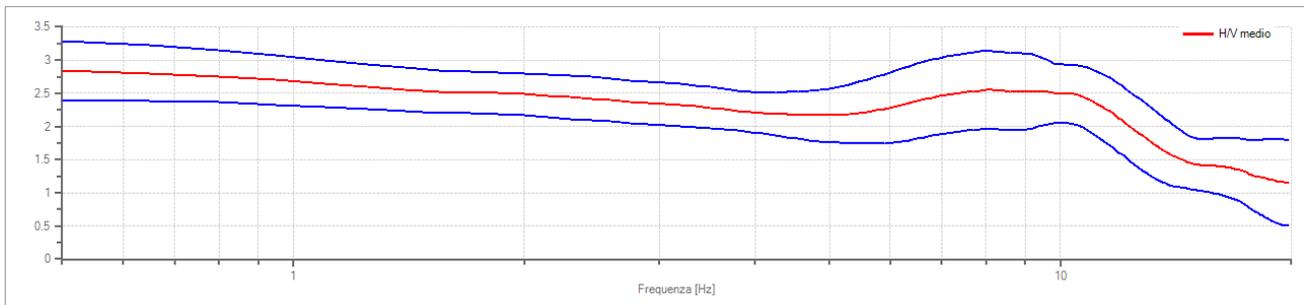
Direzioni tracce: Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
 Numero finestre incluse nel calcolo: 26
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **8,3 ± 0,2 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$
 $n_c(f_0) > 200$
 $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$

Ok
 Ok
 Ok

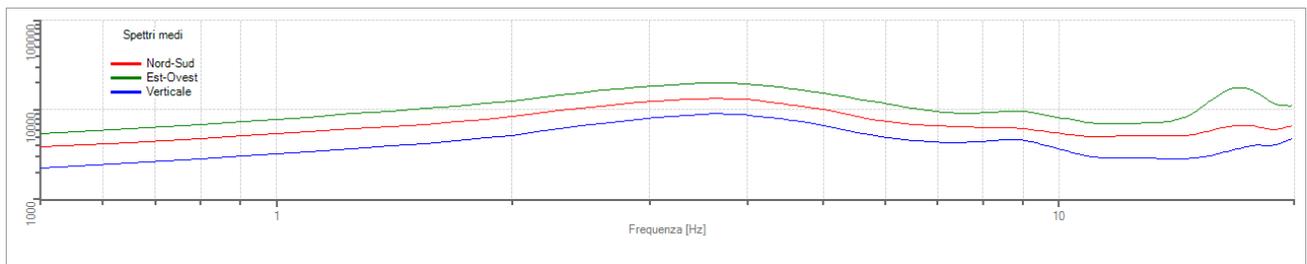
Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	No
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	No
$A_0 > 2$	Ok
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Risultati della prova:

h12

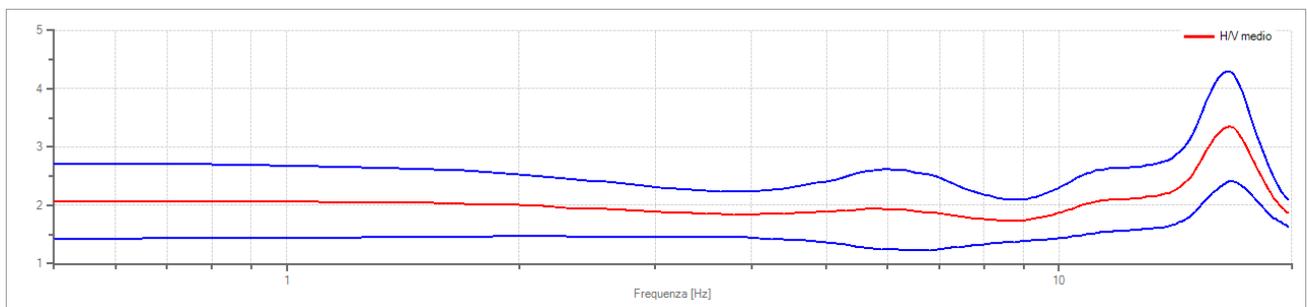
Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	250.00 Hz
Numero campioni:	225000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate:	36
Numero finestre incluse nel calcolo:	32
Dimensione temporale finestre:	32.768 s
Tipo di lisciamento:	Triangolare Costante
Percentuale di lisciamento:	10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **16,7 ± 0,3 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

	ESITO
$f_0 > 10/l_w$	Ok
$n_c(f_0) > 200$	Ok
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Ok
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	

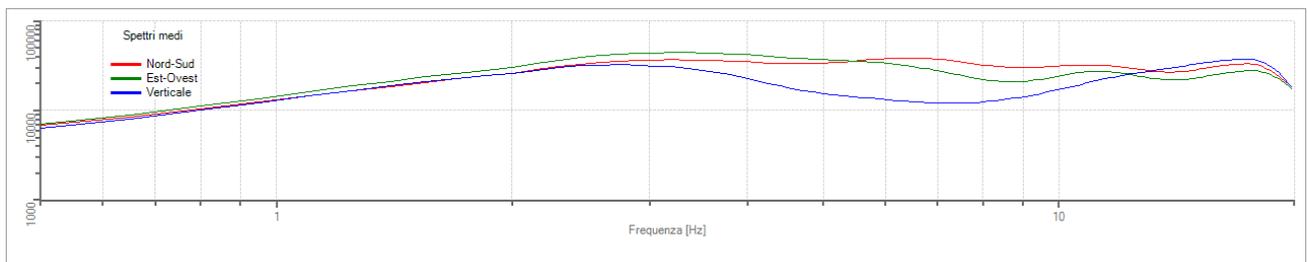
Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	No
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	No
$A_0 > 2$	Ok
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	Ok
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	Ok
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	Ok

Risultati della prova:

h13

Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	250.00 Hz
Numero campioni:	225000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.

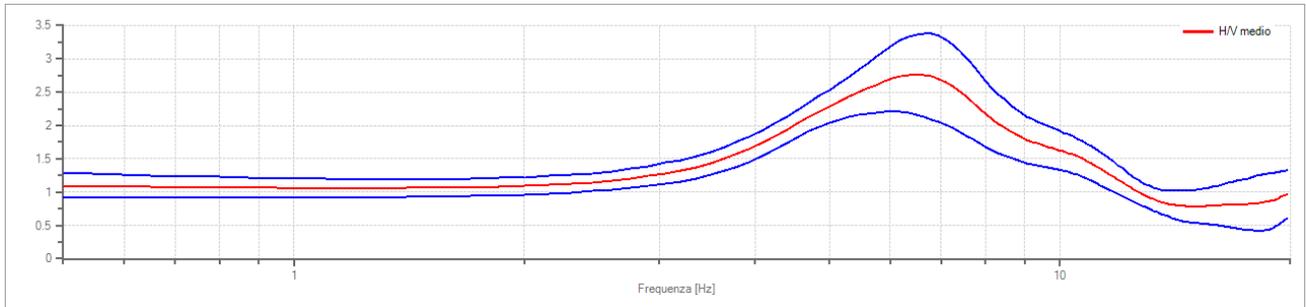


Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate:	36
Numero finestre incluse nel calcolo:	29

Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: **6,5 ± 0,2 Hz**

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

ESITO

$f_0 > 10/l_w$	OK
$n_c(f_0) > 200$	OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	

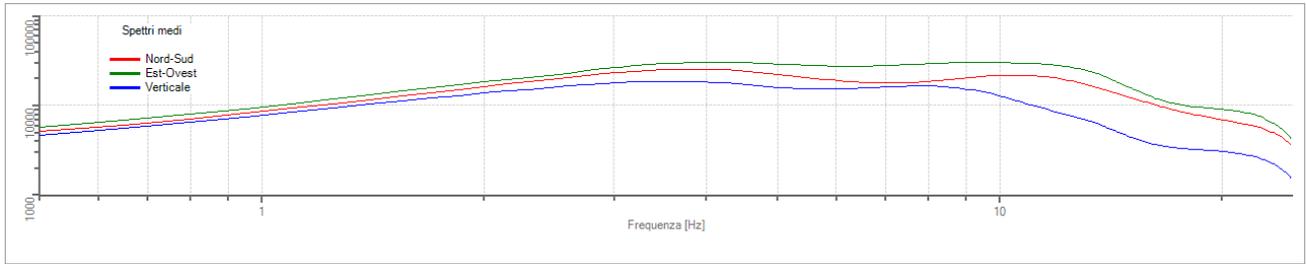
Verifica affidabilità picco:

$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$	OK
$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$	OK
$A_0 > 2$	OK
$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	OK
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	OK
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	OK

Risultati della prova:

h14

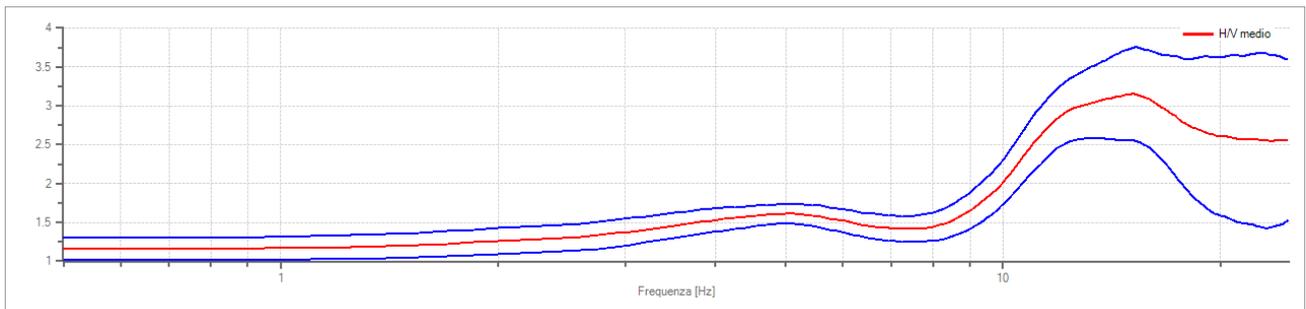
Numero tracce:	3
Durata registrazione:	1200 s
Frequenza di campionamento:	250.00 Hz
Numero campioni:	225000
Direzioni tracce:	Nord-Sud; Est-Ovest; Verticale.



Spettri medi nelle tre direzioni

Analisi spettrale

Numero totale finestre selezionate: 36
 Numero finestre incluse nel calcolo: 28
 Dimensione temporale finestre: 32.768 s
 Tipo di lisciamento: Triangolare Costante
 Percentuale di lisciamento: 10.00 %



Rapporto spettrale H/V e suo intervallo di fiducia

Risultati:

Frequenza del picco del rapporto H/V: $15,2 \pm 0,2$ Hz

Verifiche SESAME:

Verifica affidabilità curva:

$f_0 > 10/l_w$
 $n_c(f_0) > 200$
 $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$
 $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5 \cdot f_0 < f < 2 \cdot f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$

ESITO

Ok
 Ok
 Ok

Verifica affidabilità picco:

$$\exists f^- \in [f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0/2$$

OK

$$\exists f^+ \in [f_0, 4 \cdot f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0/2$$

OK

$$A_0 > 2$$

OK

$$f_{picco}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$$

OK

$$\sigma_f < \varepsilon(f)$$

OK

$$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$$

OK

Roma, Febbraio 2013.

IL GEOLOGO
Giacinto Angelucci

Documentazione fotografica



Acquisizioni dei dati sismici relativi alla prova MASW



Acquisizioni dei dati sismici relativi alle prove HVSR