

LINEE GUIDA PER LA MISURA DEL RUMORE DI FONDO DEL TERRENO CON STAZIONE SINGOLA MEDIANTE IL METODO HVSR

Principi del metodo

Il metodo HVSR con singola stazione è stato inizialmente sviluppato in Giappone da Nogoshi e Igarashi (1971) per caratterizzare la risposta di sito sotto azione sismica ed è stato successivamente reso popolare e diffusa al mondo occidentale da Nakamura (1989). Questo metodo consiste nel calcolo del rapporto (tipicamente indicato come H/V) della media delle componenti orizzontali rispetto alla componente verticale dello spettro di Fourier del rumore ambientale, registrato in un unico sito da un sensore tridimensionale (velocimetro 3D). L'evidenza empirica, supportata da simulazioni numeriche, indica che il massimo del rapporto spettrale H/V avviene, generalmente, a livello o vicino alla frequenza di risonanza fondamentale del sito, a condizione che vi sia un contrasto d'impedenza sufficientemente forte in profondità (si veda ad esempio Bonilla et al, 1997; Bour et al, 1998; Bard, 1999; Woolery e Street, 2002; Haghshenas et al., 2008). Visto il basso costo di acquisizione e della semplicità di utilizzo, questo metodo è ampiamente usato in progetti di Microzonazione Sismica e per calibrare la Risposta Sismica Locale relativamente ad analisi numeriche. Poiché la frequenza fondamentale di un sito è legata alla velocità media delle onde di taglio del profilo del terreno e dal suo spessore, il metodo viene spesso utilizzato come strumento di esplorazione geofisica per stimare uno dei questi due parametri, conoscendo l'altro.

Stato attuale nella pratica di acquisizione

Attualmente in Italia non ci sono norme che regolano le modalità di acquisizione del rapporto spettrale H/V, in quanto il metodo è ancora in fase di sviluppo; ciò fa sì che sono possibili, tra operatori diversi, differenze significative sull'acquisizione, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati. Tuttavia, gli orientamenti formulati nell'ambito del quadro di un grande progetto SESAME (progetto europeo, Site Effects Assessment Using Ambient Excitations) che ha coinvolto 14 istituti di ricerca e 85 scienziati, stanno lentamente diventando uno standard mondiale.

Queste linee guida sono state pubblicate in un rapporto di 62 pagine (Bard, 2004) e in un numero speciale del Bollettino di Ingegneria Sismica (Bard, 2008) nel quale vengono ulteriormente sviluppati alcuni aspetti. Molte pubblicazioni hanno dato sostegno ai risultati del progetto SESAME (ad es. Maresca et al., 2011), sebbene siano state messe in discussione alcune procedure di analisi ad esempio Parolai et al. 2009, sulla l'utilità di escludere i transienti; Castellaro e Mulargia 2009), sui criteri di identificazione picco e registrazione su un terreno artificiale rigido; Cara et al. 2010, sulla stabilità di H/V nel tempo). Si rimanda alle linee guida SESAME per una descrizione dettagliata.

Limitazioni del metodo

Il metodo del rapporto spettrale H/V si basa sul presupposto fondamentale che la componente verticale della registrazione del rumore ambientale non è influenzata dal "sovraccarico" del terreno, mentre lo sono le componenti orizzontali. Tuttavia, il quadro teorico che giustifichi questa ipotesi non è ancora ben chiaro e il significato fisico del rapporto spettrale H/V è ancora in studio (si veda ad esempio Lunedei e Albarello, 2010 e Sanchez- Sesma et al., 2011).

Bonnefoy - Claudet et al., 2006 hanno dimostrato, per esempio, che a seconda della distribuzione spaziale della sorgente del rumore e la sua natura, il contrasto d'impedenza suolo/roccia, lo spessore dello strato di copertura e la forma del rapporto spettrale H/V potrebbero essere spiegati per mezzi stratificati orizzontalmente, mediante semplice risonanza delle onde di taglio, l'ellitticità del modo fondamentale delle onde di Rayleigh o dalla fase Airy del modo fondamentale delle onde di Love.

La complessa interazione tra *onda-campo di disturbo* e la struttura geologica non è ancora ben compresa e ciò limita le informazioni che possono essere recuperate in modo affidabile da misure di singole stazioni. Il rapporto spettrale H/V da solo non può essere invertito in un profilo di velocità delle onde di taglio, salvo ulteriori informazioni fornite dal contributo di onde Rayleigh, onde di

Love e dalla profondità del bedrock (ad esempio Castellaro e Mulargia , 2009b; Hobiger et al, 2009, Foti et al , 2011).

Un'altra conseguenza di questa interazione complessa è che l'ampiezza del picco (s) del rapporto H/V non è proporzionale all'amplificazione del moto del suolo (ad esempio Bonilla et al , 1997; Bard , 1999). L'interfaccia geologica che si riferisce al picco sulle curve H/V o del picco minimo di frequenza o il contrasto di impedenza più grande, in molti casi non è sempre all'inizio della roccia (bedrock), ma può essere in un'interfaccia all'interno del terreno di copertura.

Ciò significa che in molti contesti geologici il metodo H/V è in grado di recuperare le informazioni relative del primo e più forte contrasto d'impedenza e quindi non può essere utilizzato come strumento di esplorazione per mappare la topografia del substrato roccioso (bedrock), tali e/o simili comportamenti sono stati documentati da Lunedei e Albarello (2010).

Nel caso di valli sepolte profonde e strette gli effetti 2D o 3D possono dominare il pattern di risonanza e quindi, stimare la profondità della roccia o la velocità media delle onde di taglio con un modello 1D può portare a gravi errori soprattutto in prossimità dei bordi del bacino, come studiato da Cornou et al . (2007) e Gueguen et al. (2007); inoltre, le curve H/V non possono visualizzare un picco, in queste situazioni, ma piuttosto un ampio plateau che complica l'identificazione della frequenza fondamentale di sito. Il metodo H/V è anche segnalato per essere inefficiente (cioè un picco non interpretabile) per le strutture sedimentarie complesse in cui non è la singola interfaccia che controlla il rapporto di impedenza, anche se si verifica una significativa amplificazione dell'onda sismica durante i terremoti (Chavez - Garcia , 2009) .

Infine, va tenuto presente che le vibrazioni di rumore ambientale sono di ampiezza molto bassa rispetto a quelle generate da un forte terremoto; di conseguenza, la frequenza fondamentale di sito determinata dalla curva H/V può non essere rappresentativa della frequenza reale del terreno (solitamente è più bassa a causa del comportamento non lineare dei terreni sotto scossa sismica).

Attrezzatura necessaria

Sono necessari un sensore a tre componenti e un digitalizzatore di segnale con dinamica ad almeno 16 bit. Come regola generale è raccomandato di utilizzare sismometri (velocimetri) che hanno la loro frequenza naturale più bassa della frequenza di interesse, che, ai fini del metodo H/V, dovrebbe essere la frequenza fondamentale il sito più un margine di sicurezza. A causa di un livello relativamente alto di rumore intrinseco, gli accelerometri devono essere evitati. Secondo le linee guida SESAME (Guiller et al., 2008), il sensore più versatile è un sismografo con periodo di 5 s (0,2 Hz). A seconda delle case produttrici i sensori e i digitalizzatori possono essere integrati in sistemi di misura *all-in-one*, ma sono più frequenti sensori indipendente. La frequenza di campionamento deve essere > 60-100 Hz (Sampling time < 15-10 ms).

Procedure di raccolta dati

Il parametro più importante per una buona acquisizione HVSR è la durata di registrazione. Il concetto base per stabilire la durata di acquisizione è il seguente:

- più si ha un ambiente rumoroso (ad es. traffico stradale pesante nelle vicinanze, le condizioni atmosferiche sono pessime, presenza di industrie ecc.) e più lunga è la durata della registrazione da effettuare.

Secondo le linee guida SESAME, la durata minima consigliata dovrebbe variare dai 10 (2 Hz) a 20 (4,5 Hz) minuti per i siti con un frequenza fondamentale compresa tra 10 Hz e 0,2 Hz rispettivamente.

Sottolineiamo che questi valori sono il minimo raccomandato: nel dubbio, è preferibile registrare per un periodo più lungo di quanto strettamente necessaria in base alla frequenza fondamentale anticipata e su una stima di possibili contaminazione per segnale transitori (transienti).

Per l'accoppiamento terreno/sensore, un appoggio direttamente sul terreno naturale è sempre preferibile. Il contatto terreno/sensore deve rimanere stabile durante l'acquisizione e non deformare, in caso contrario, il sensore può inclinarsi e la forma della curva H/V può essere modificata. Misure su terreni artificiali molto rigidi (come pavimentazioni) sovrapposti a terreni morbidi dovrebbero

essere evitate; in questo caso, in quanto l'inversione di velocità prossima alla superficie può cancellare il picco della curva H/V e rendere l'analisi più problematica, come evidenziato da Castellaro e Mulargia (2009). Le misurazioni dovrebbero essere evitate durante giorni ventosi, soprattutto per i siti avente una frequenza fondamentale inferiore a circa 1 a 2 Hz, in quanto il vento può influenzare fortemente la curva H/V per le frequenze di questo tipo (registrazioni accettabili possono ancora essere ottenute se il sensore è sepolto in una buca e/o protetto efficacemente contro il vento diretto). Evitare fonti di rumore, come traffico automobilistico o addirittura calpestio di persone, in quanto possono generare forti transienti (disturbi di breve durata nella registrazione).

I transienti sono stati segnalati come possibili effetti negativi sulla curva H/V come citato dal gruppo SESAME, Castellaro e Mulargia, 2010, anche se Parolai et al. 2009 è di opinione opposta.

Le vibrazioni generate da macchinari (industrie) sono una più seria preoccupazione per i picchi spuri ed estranei a strutture geologiche sotterranee e possono notevolmente influenzare la forma della curva H/V per frequenze superiori a 1 Hz (Chatelain et al, 2008; Cara et al, 2010); Infatti, se questi picchi sono nella gamma di frequenza di risonanza del sito filtrando il record per rimuoverli si altera il segnale registrato; l'unica soluzione applicabile è di rifare la misura in orari in cui i macchinari non funzionano o sono spenti.

La distanza minima dalla quale il rumore ambientale non è influenzato da strutture e/o edifici è ancora dibattuta, ma in assenza di altre informazioni, occorre osservare una distanza non inferiore a circa 15 m; questo valore è basato sullo studio di Castellaro e Mulargia (2010), che hanno dimostrato che sono soddisfatte le condizioni di campo libero (free-field) a circa 12 metri dalle strutture "pesanti". Per una singola analisi di risposta di sito è importante non fare mai affidamento su una singola misurazione, sono necessarie almeno tre registrazioni e devono essere effettuate, preferibilmente, in diversi momenti della giornata o in giorni diversi, per verificare la stabilità della curva H/V. Per gli studi di microzonazione sismica, le misurazioni devono essere inizialmente effettuate a grande spaziatura (circa 500 m) e successivamente ad interasse più piccolo (circa 250 m. o meno) nelle zone in cui si osservano apprezzabili variazioni spaziali della frequenza fondamentale di sito.

Teoria di analisi

Non vi è alcuna particolare teoria dietro l'elaborazione delle registrazioni di rumore ambientale, ma piuttosto una soluzione fondata sui principi statistici, convalidata dall'esperienza. Le linee SESAME raccomandano una procedura di elaborazione che richiede cinque fasi principali:

- a) Ciascuno dei tre componenti di un record è diviso in diverse finestre temporali di uguale o variabile lunghezza. La lunghezza della finestra viene scelta secondo criteri basati sulla frequenza fondamentale del sito e sulla rappresentatività statistica della curva H/V da determinare. I transienti possono essere tolti manualmente oppure utilizzando un algoritmo automatico "anti-trigger".

- b) gli spettri di Fourier vengono calcolati per ogni finestra di tempo e sono smussati per eliminare i picchi che possono creare artefatti sulla curva H/V con un filtro logaritmico Konno-Ohmachi (Konno e Ohmachi, 1998) il cui parametro di larghezza di banda ha un valore di 40.

- c) I due spettri di Fourier orizzontali sono fusi con una media quadratica per ogni finestra.

- d) Il rapporto spettrale H/V è calcolato per ogni finestra.

- e) I rapporti spettrali H/V sono mediati su tutte le finestre con una media geometrica di ogni singola curva H/V con successivo calcolo della deviazione standard. È pratica, quasi obbligatoria, l'analisi sistematica delle curve H/V in combinazione con gli spettri di Fourier delle componenti di rumore ambientale per rilevare anomalie, ad esempio i picchi spuri di origine industriale.

Incertezza nel valutare la frequenza di picco

Nelle linee guida SESAME ci sono due serie di criteri per stimare se la frequenza del picco principale di una curva H/V può essere considerato attendibile come frequenza fondamentale del sito (o la frequenza relativa al primo forte contrasto di impedenza in profondità).

Il primo set è finalizzato a valutare l'affidabilità della curva H/V e la qualità della registrazione; mentre il secondo gruppo è utilizzato per valutare la chiarezza del picco. Questi criteri sono adatti a quasi tutte le situazioni e sono stati ideati per usarli senza alcuna informazione sulle condizioni geologiche e sul sito di registrazione.

Consigli per il Reporting

E' buona norma specificare sistematicamente il tipo di apparecchiatura utilizzata e di documentare le condizioni in cui viene registrato il rumore ambientale. La relazione dovrebbe presentare la media degli spettri di Fourier calcolata per le tre componenti, la curva H/V media e l'intervallo della sua deviazione standard, la frequenza del picco principale (se presente) ed i valori di affidabilità e trasparenza secondo i criteri SESAME. Lo spettro della curva inoltre dovrebbe avere un range compreso almeno tra 0,2 e 40 hz.

Valutazione della qualità delle misure HVSR

Si propone, quale metodi di valutazione della qualità tecnica delle misure HVSR acquisite, la classificazione proposta da Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro, 2011. L'Obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati.

La classificazione di Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro, 2011 si divide in 3 classi principali: **Classe A**, **Classe B** e **Classe C**.

Classe A: H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola.

1. la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (*stazionarietà*)
2. le variazioni azimuthali di ampiezza non superano il 30% del massimo (*isotropia*)
3. non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (*assenza di disturbi*)
4. i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (*plausibilità fisica*)
5. i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (*robustezza statistica*)
6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (*durata*)

ECCEZIONE per la Classe A: misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con *ampiezza circa pari a 1*, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile.

Classe B: curva H/V sospetta (da "interpretare"): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

1. almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE per la Classe A

Classe C: curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

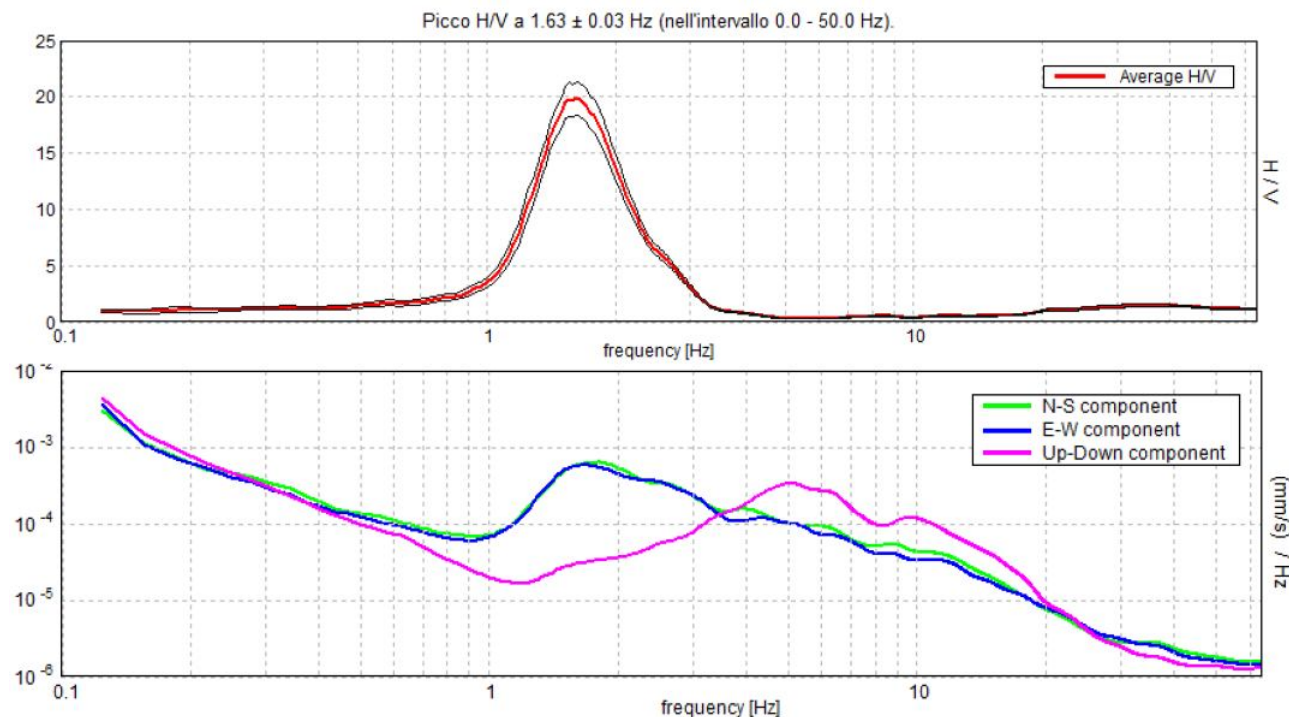
1. misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura
2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia:

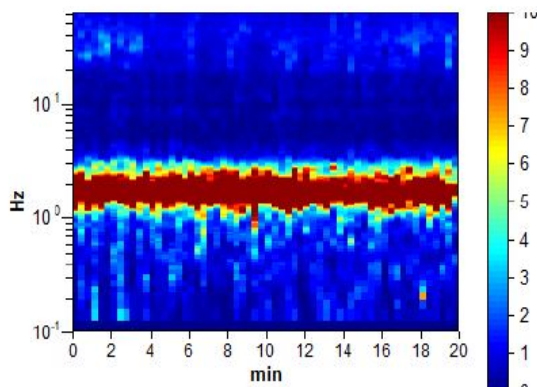
Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: *possibile risonanza*

Tipo 2. Non presenta picchi "chiari" nell'intervallo di frequenze di interesse: *assenza di risonanza*

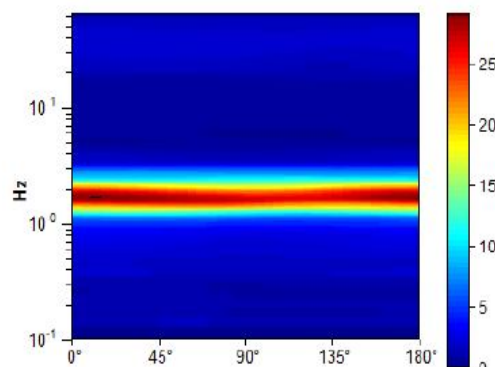
Classe A1: Le variazioni azimuthali non superano il 30% e viene identificato almeno un picco chiaro.



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



Picco H/V a 1.6 ± 0.03 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

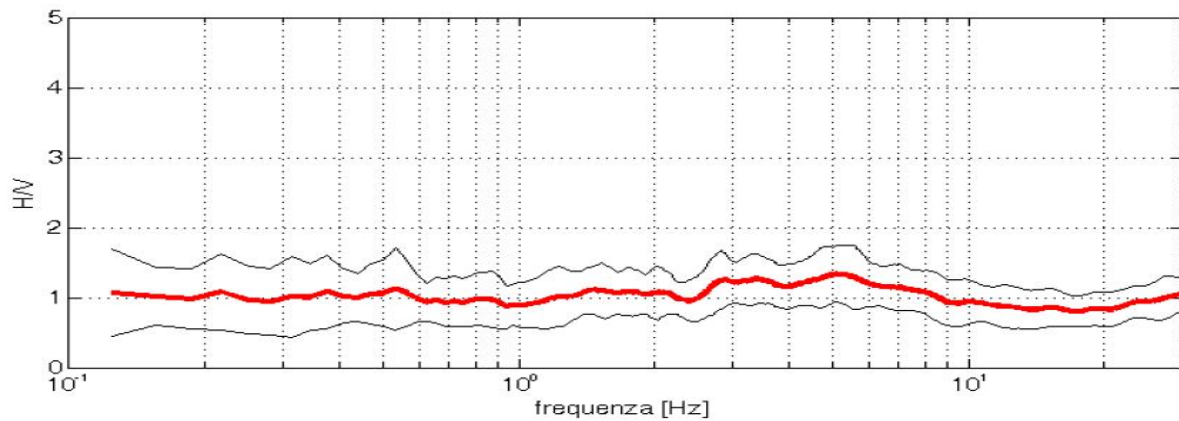
$f_0 > 10 / L_w$	$1.63 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$1950.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 79	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	1.219 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	2.219 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$19.86 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0092 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \sigma(f_0)$	$0.01495 < 0.1625$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7439 < 1.78$	OK	

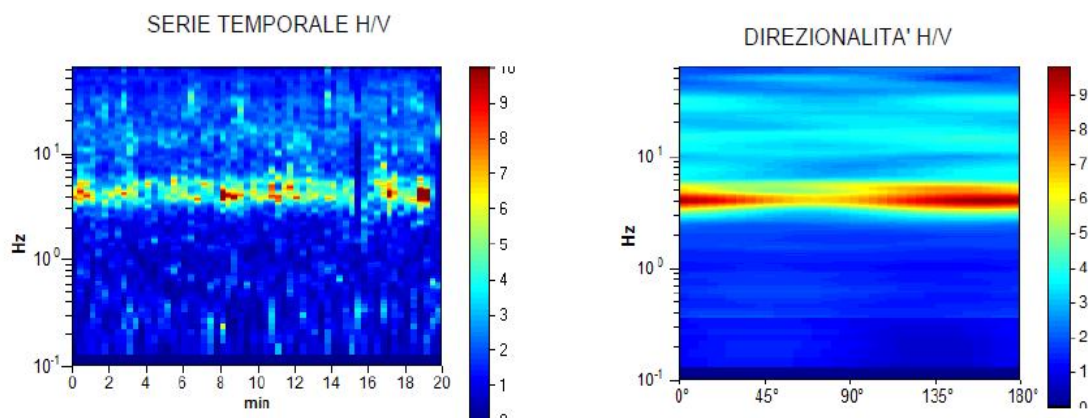
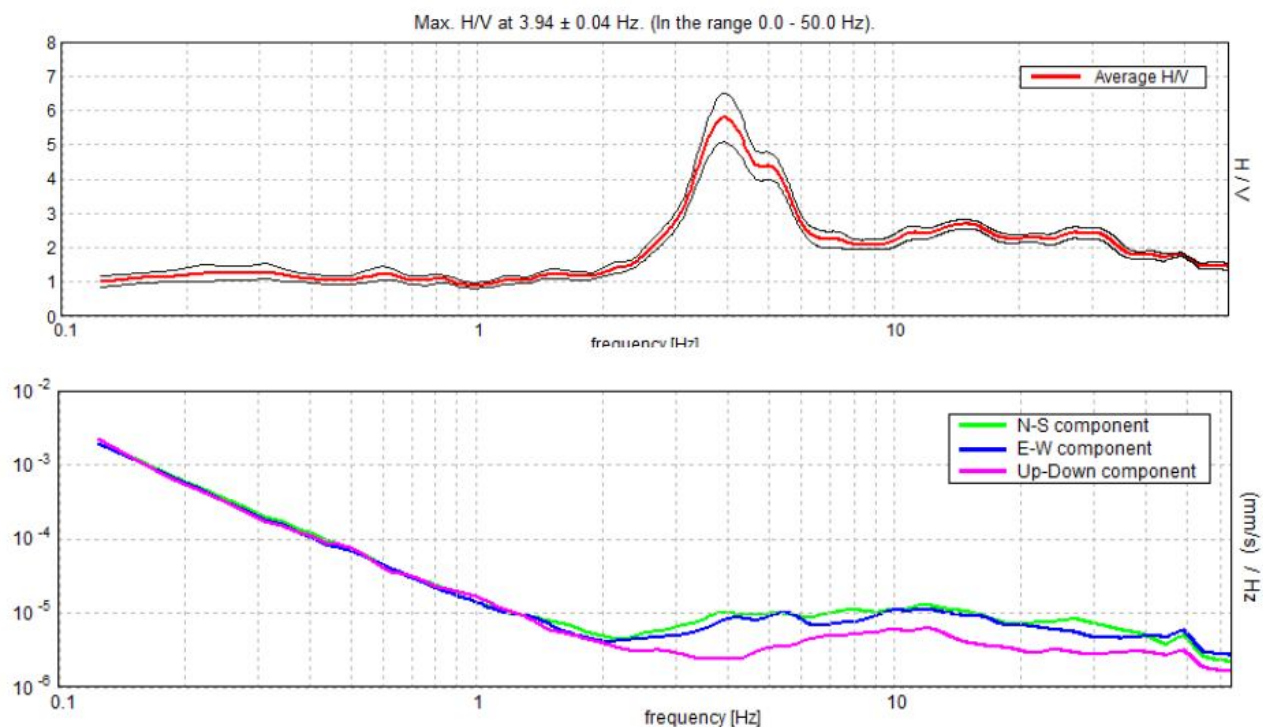
ECCEZIONE per la Classe A: curva H/V e con ampiezza circa pari a 1



N.B.

In presenza di gradienti di velocità regolari senza significativi contrasti di impedenza la metodologia HVSR, generalmente, non riesce ad evidenziare alcun picco di amplificazione. Inoltre, nelle condizioni in cui il bedrock, ovvero il contrasto di impedenza più significativo, è molto profondo (picchi teorici di risonanza inferiori a 1 Hz) è possibile non riuscire ad estrapolare, dai rapporti H/V alcun picco significativo. In questi casi, la curva H/V apparirà piatta, con *ampiezza circa pari a 1* e il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile. In questa circostanza la misura può ricadere nella classe A, ma si consiglia di ripetere l'acquisizione per confermare l'effettiva assenza di massimi significativi.

Classe B1: non soddisfa le condizioni di isotropia e non ha un picco chiaro



Picco H/V a 3.9 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

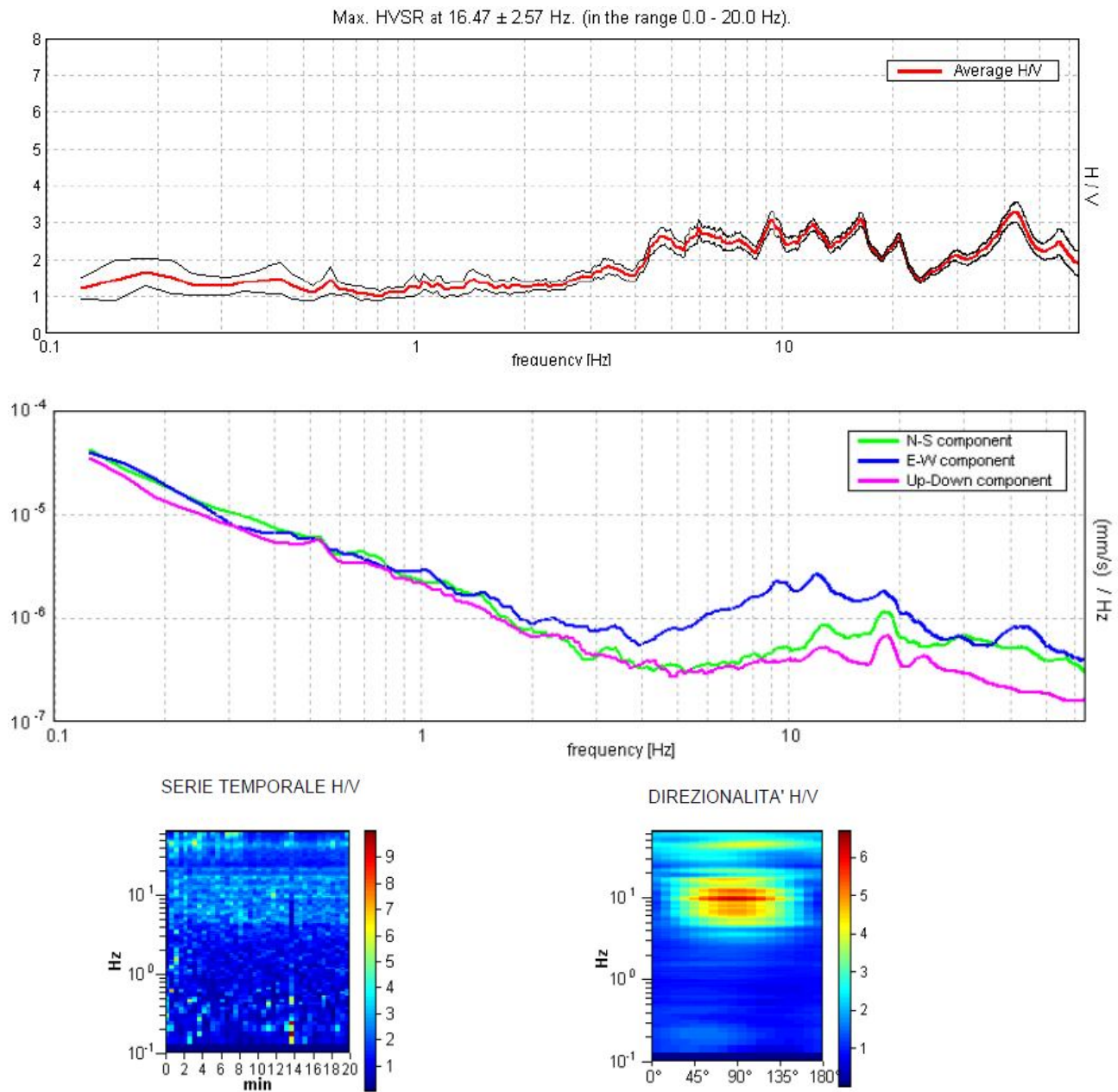
$f_0 > 10 / L_w$	$3.94 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$4725.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 190	OK	
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$			

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

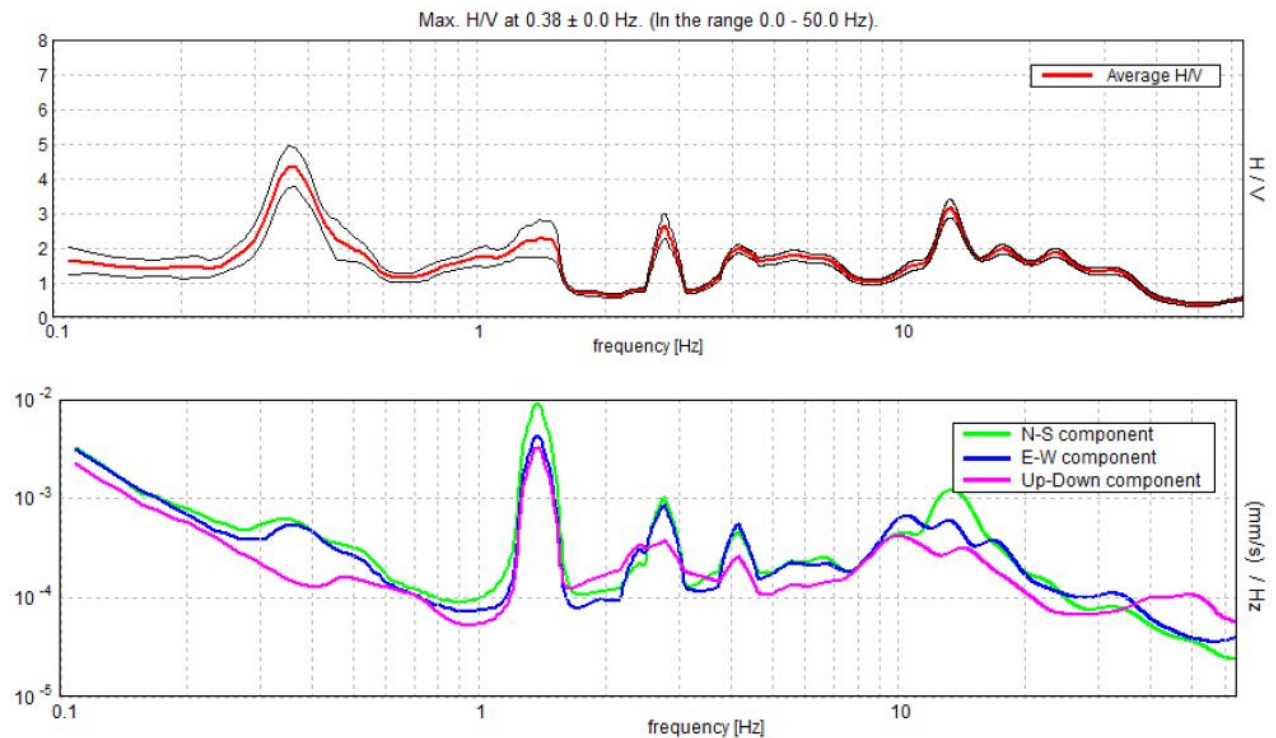
Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	3.031 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	5.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$5.79 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00462 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.01818 < 0.19688$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.3534 < 1.58$	OK	

Classe B2: forte direzionalità e possibili disturbi elettromagnetici in assenza di picchi chiari

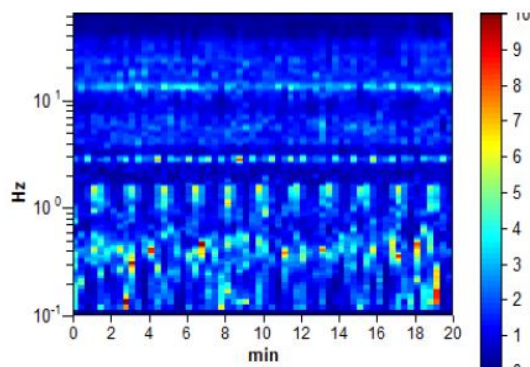


Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10 / L_w$	$16.47 > 0.33$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$19762.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 792 times	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 $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	23.063 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$3.08 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.07625 < 0.05$		NO
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$1.25582 < 0.82344$		NO
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.0882 < 1.58$	OK	

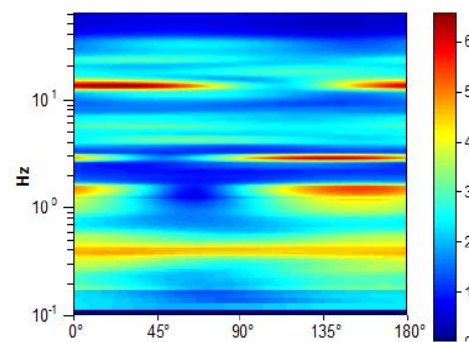
Classe C: misura non interpretabile sopra 1Hz a causa di forti disturbi elettromagnetici



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



Picco H/V a 0.38 ± 0.0 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile

[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$0.38 > 0.25$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$450.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 37	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro

[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f) < A_0 / 2$	0.281 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	0.484 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$4.34 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00621 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f)$	$0.00233 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f) < \theta(f)$	$0.2752 < 2.5$	OK	