



GUIDA OPERATIVA SISMICA PASSIVA HVSR

TECNICA HVSR

La tecnica di sismica passiva a stazione sismica o HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è totalmente non invasiva e si può applicare ovunque senza nessun tipo di perforazione e non ha bisogno di energizzazioni esterne diverse dal rumore ambientale che in natura esiste ovunque.

Le registrazioni di microtremore ambientale nelle sue tre componenti spaziali, rappresentano uno strumento per una microzonazione speditiva ed economica anche se le potenzialità della tecnica sono ancora dibattute ma la capacità di rilevare le frequenze di risonanza degli strati più superficiali è ormai accertata.

Più nel dettaglio il microtremore ambientale (noise sismico) è un movimento minimo (nell'ordine di 10^{-2} - 10^{-6} mm) del terreno presente in qualsiasi punto della superficie terrestre e consiste per lo più nelle onde di superficie (Rayleigh e Love) prodotte dall'interferenza costruttiva delle onde P e S negli strati superficiali. Viene prodotto anche dal vento e dalle onde del mare e a frequenze alte da sorgenti di carattere antropico (industrie e traffico veicolare).

Il metodo si dice passivo in quanto il rumore non è generato ad hoc, come ad esempio le prospezioni attive e i risultati che si possono ottenere sono:

- la frequenza caratteristica di risonanza del sito, parametro fondamentale per il corretto dimensionamento degli edifici così da evitare l'effetto della "doppia risonanza";
- la frequenza fondamentale di risonanza di un edificio qualora la misura viene effettuata all'interno dello stesso;
- stimare la velocità delle onde di taglio V_s a patto che si dispone di informazioni aggiuntive sul modello geologico del sottosuolo o si hanno informazioni di letteratura sul sito in esame (per es. profondità del bedrock sismico, stratigrafie da sondaggi a c.c. o profili V_s da prove MASW o di sismica a rifrazione) .

In termini di stratigrafia del sottosuolo, il principio su cui si basa la presente tecnica è rappresentato dalla definizione di strato inteso come unità distinta da quelle sopra e sottostanti per un contrasto di impedenza, ossia per il rapporto tra i prodotti di velocità delle onde sismiche nel mezzo e densità del mezzo stesso.

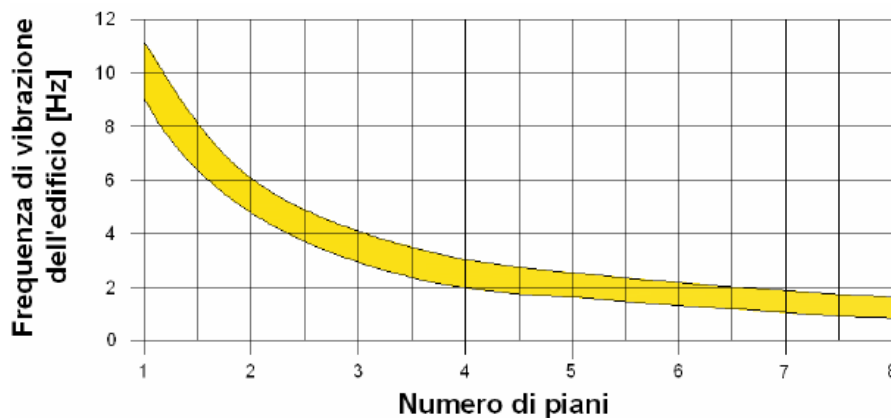
Conoscendo la posizione del contrasto di rigidità è più agevole in fase di processing determinare il profilo Vs più plausibile che generi un picco di risonanza coincidente con la curva registrata.

Per scopi strutturali si fa riferimento al grafico H_i/H_0 in cui si valutano gli spostamenti solo sul piano orizzontale alle varie frequenze dei vari piani (H_i) rispetto al piano di fondazione (H_0) preso come riferimento. Ciò per rimuovere dalle registrazioni l'effetto del sottosuolo (effetto di sito).

Pertanto, al fine di determinare con maggior esattezza i fenomeni di "Doppia Risonanza" tra terreno e struttura, il numero di registrazioni minime sono 3: una misura al piano alto della struttura, una al piano fondale (queste per risalire alla frequenza fondamentale della struttura) e una misura esterna per identificare la frequenza fondamentale del sito.

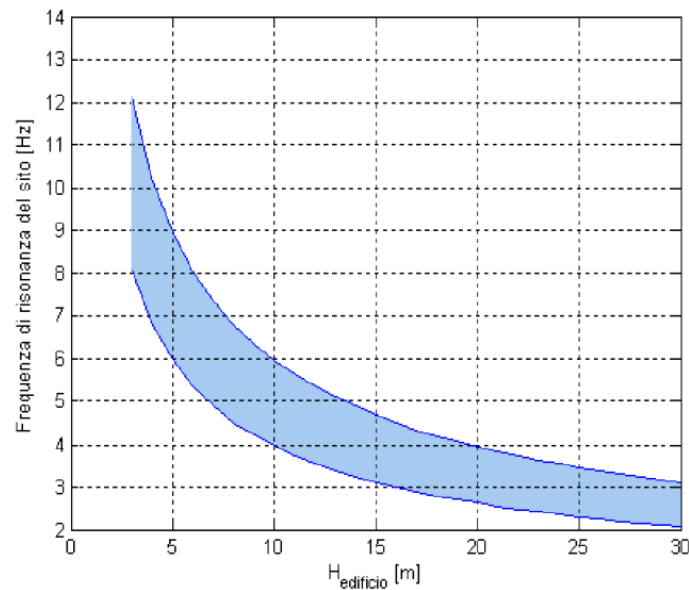
Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può pertanto in prima approssimazione essere calcolata secondo la formula:

$$10\text{Hz}/ \text{numero di piani.}$$



I progettisti devono evitare, o se non è possibile quanto meno tenere in debita considerazione nel dimensionamento delle strutture, i fenomeni di "doppia risonanza" che causa un'ulteriore amplificazione sismica con conseguente aumento della sollecitazioni.

Di seguito si riporta un grafico che illustra la relazione tra altezza di un edificio in c.a. e frequenza di risonanza del sito



PROCEDURA

Scopi stratigrafici

Si consiglia di iniziare a fare le registrazioni in zone in cui si conosce la stratigrafia meglio se questa desunta da sondaggi o prove in sito; è opportuno, inoltre, avere assenza di traffico e di vento.

Si consiglia di posizionare il sensore lontano da strutture antropiche e da sorgenti di rumore costante.

Al fine di ridurre al massimo effetti elettromagnetici si consiglia di utilizzare tutto il cavo a disposizione di collegamento al ricevitore.

E' consigliabile posizionare lo strumento su terreno libero in modo da mantenerlo oltre che perfettamente solidale anche al riparo da possibili agenti di disturbo.

Importante è la messa in bolla dello strumento al fine di minimizzare gli errori come ad esempio il cosiddetto "effetto del tilting" che può essere provocato da un cambiamento della livellazione mentre si effettua la misura producendo una perturbazione della forma della curva H/V risultante soprattutto nella sua parte in bassa frequenza.

Orientare il N sul sensore secondo il nord geografico per convenzione; in questo caso il terzo canale, (connessione al geofono orizzontale N-S) è quello maggiormente eccitato.

Si procede alla messa in piano per mezzo di piedini con ghiere di regolazione e bolla di livello. Per l'utilizzo su terreni si possono cambiare i piedini da superficie con i puntali da terreno e livellare il sensore.

Una volta che il sensore si è posizionato si può iniziare la registrazione.

I parametri da impostare per la misura sono essenzialmente la frequenza di campionamento e la durata. Il guadagno deve essere lo stesso per i tre canali (si consiglia di impostare 12-36 db).

Scopi ingegneristici

La stessa strumentazione è idonea anche sulle strutture per la loro caratterizzazione dinamica (modi di vibrare). Le misurazioni dovranno essere effettuate ai vari piani della costruzione (o almeno al piano terra e all'ultimo), rigorosamente sulla stessa verticale e con l'orientazione degli assi dello strumento coincidenti con quelli (longitudinale e trasversale) dell'edificio.

La frequenza di campionamento da impostare è di 250 campioni al secondo.

In linea generale, dal momento che le frequenze di interesse ingegneristico non superano i 25Hz la frequenza di campionamento non deve essere inferiore ai 50 Hz.

In genere per la tecnica HVSR non è vantaggioso utilizzare frequenze superiori a 500 Hz, in quanto ciò comporta un aumento delle dimensioni dei file e dei tempi di elaborazione, senza sostanziali miglioramenti della capacità o della precisione di analisi.

L'Acquisizione a tempo deve essere almeno di 10 minuti e può durare anche 20-30 minuti al fine di una migliore stabilizzazione del segnale.

La misura di microtremore è un fenomeno detto stocastico quindi, per avere validità statistica, è necessaria una enorme quantità di dati; questi si ottengono registrando per una durata commisurata alla frequenza di risonanza di interesse.

In generale quindi per avere un dato più concreto riguardante un bedrock sismico profondo (basse frequenze di risonanza) sarà più validata una registrazione con tempo più lungo rispetto ad un bedrock sismico più superficiale.

Mentre si sta registrando evitare di muoversi nell'area prossima al sensore.

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.

In presenza di pavimentazione la misura può essere fortemente condizionata specie nella parte ad alta frequenza poiché è come se la registrazione fosse effettuata al tetto di una formazione costituita da uno strato molto rigido (pavimentazione) al di sopra di uno strato più soffice.

Per i geofoni con frequenza propria minore di 4,5 si possono avere fenomeni di deriva del segnale con il tempo e hanno bisogno quindi di una maggiore durata temporale per "stabilizzarsi".

In generale per misure di microtremori si impostano sui tre canali gli stessi valori di amplificazione.

Sullo strumento nella parte bassa sono indicati il numero di canali che saranno registrati e la frequenza di campionamento; questo parametro sullo strumento Vibralog è fissata a 250 Hz.

Con Vibralog il formato interno del file di registrazione è binario e non è direttamente leggibile dai più diffusi software di elaborazione; per questo motivo viene fornita un'utilità di conversione che consente di esportare il file in formato .seg2.

Il processing dei dati acquisiti si potrà effettuare con il software HVLab applicazione sviluppata con lo scopo di consentire all'utente il calcolo della frequenza di risonanza di un sito o di una struttura edilizia attraverso la registrazione della misura di microtremore.

La tecnica applicata è quella a singola stazione, originariamente proposta da Y. Nakamura. In estrema sintesi questa prevede:

- l'acquisizione delle vibrazioni attraverso una terna ortogonale di sensori velocimetrici (geofoni) per un tempo sufficientemente lungo (tipicamente alcuni minuti);
- la trasformazione dei segnali nel dominio delle frequenze per ciascuna delle tre componenti (X, Y e Z);
- il calcolo del rapporto tra gli spettri di potenza delle componenti orizzontali (H) e quello della componente verticale (V);
- l'individuazione della frequenza di vibrazione f_0 in corrispondenza della quale il suddetto rapporto presenta un picco significativo.

L'applicazione della tecnica, teoricamente semplice, richiede all'atto pratico di ricorrere ad una serie di accorgimenti per ottenere risultati attendibili. Il documento "*Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations – measurements, processing and interpretation*", prodotto dal progetto di ricerca europeo SESAME nel 2004, è una sintesi delle procedure sia per l'acquisizione dei dati che per la loro corretta elaborazione ed interpretazione.

HVlab è basato principalmente su tali linee guida ed implementa i criteri di valutazione dei risultati introdotti nel documento, fornendo in tal modo uno strumento effettivamente utilizzabile per una classificazione rapida dei picchi del rapporto H/V.

a di elaborazione

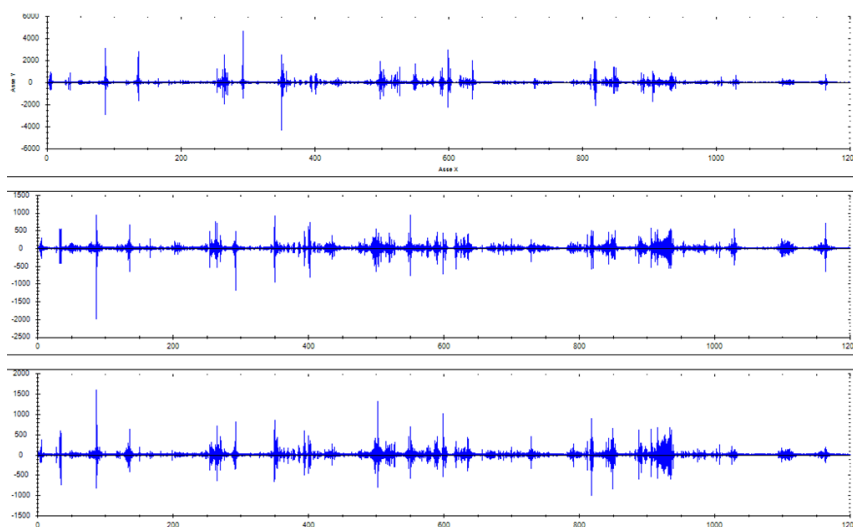
La prima operazione da eseguire è l'importazione dei dati acquisiti:

'Importa...' nel riquadro 'Segnali registrati';

selezionare il tipo di file da caricare;

portarsi sulla cartella contenente il file, selezionarlo e fare click su 'Apri'.

Traccia registrata



La prima traccia trovata nel file viene attribuita al sensore della componente verticale (z), mentre la seconda e la terza rispettivamente alla componente orizzontale orientata ad Est (x) e a quella orientata a Nord (y).

Questa corrispondenza rispecchia la configurazione con cui viene fornita la strumentazione MAE.

E' buona norma verificare che i valori riportati nelle caselle: 'tracce', 'frequenza' e 'durata totale' corrispondano alle modalità di acquisizione utilizzate. La fase successiva prevede l'individuazione di un numero sufficiente di finestre temporali all'interno dell'intera registrazione, adatte all'analisi HVSR.

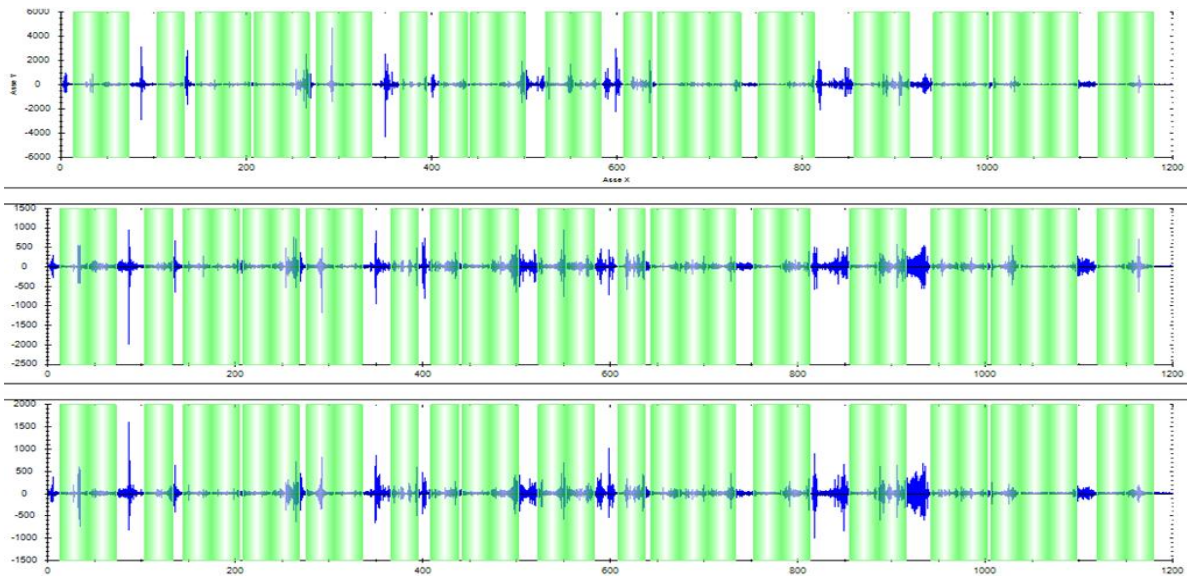
I criteri principali per la selezione di tali finestre sono due:

- la durata, che deve essere tale da garantire che in ognuna di esse siano presenti almeno dieci periodi della frequenza di picco f_0 (primo criterio di affidabilità secondo SESAME);
- l'assenza al loro interno di eventi transitori, dovuti a sorgenti locali.

Finestre selezionate_rimozione transienti

L'operazione di selezione delle finestre temporali può essere raffinata manualmente:

- per eliminarne una tenere abbassato il tasto CTRL sulla tastiera e fare doppio click su di essa con il mouse;
- per aggiungere una finestra fare doppio click sul sismogramma nel punto in cui si desidera che essa inizi. E' possibile utilizzare anche finestre temporali parzialmente sovrapposte.
- Per visualizzare in dettaglio una parte dei sismogrammi, tracciare un rettangolo intorno ad essa con il puntatore del mouse, tenendo premuto il tasto sinistro del mouse. Altre opzioni si attivano con un click del tasto destro del mouse sul grafico.



Per migliorare la coerenza tra le curve è possibile scartare le eventuali finestre temporali palesemente anomale, ad esempio quelle fuori dall'intervallo di confidenza. A tale scopo fare click su una curva da eliminare per selezionarla.

Nel riquadro dei sismogrammi sarà evidenziata la finestra temporale corrispondente, che potrà quindi essere rimossa con CTRL+doppio-click.

Si procede con l'elaborazione e viene visualizzato il grafico risultante dall'analisi HVSR premendo il tasto 'Elabora' ed in pochi secondi si ottiene il risultato dell'analisi HVSR.

Il grafico mostra una curva di colore ciano per ogni finestra, che descrive la variazione del rapporto H/V con la frequenza. La curva in rosso rappresenta la loro media e quelle in azzurro, tratteggiate, delimitano l'intervallo di confidenza al 68% intorno ad essa.

HVlab è in grado di individuare la maggior parte dei picchi del suddetto rapporto e di classificarli secondo i criteri proposti nelle linee guida del progetto SESAME già citato.

Le condizioni di affidabilità della curva HVSR (criteria for a reliable H/V curve) sono le prime tre della tabella riportata; le condizioni di chiarezza del picco massimo in frequenza della curva HVSR (criteria for a clear H/V peak) sono le ultime sei (SESAME European research project). I Ricercatori del progetto SESAME suggeriscono di ammettere come affidabile una curva HVSR che soddisfi tutti e 3 i criteri di affidabilità (reliable H/V curve),

invece suggeriscono di ammettere come chiaro un picco che soddisfi almeno 5 su 6 dei criteri di chiarezza (clear H/V peak).

Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]	$f_0 > 10 / L_w$ $n_c(f_0) > 200$ $\sigma_A(f) < 2$ 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 $f_0 < 0.5\text{Hz}$
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ $A_0 > 2$ $f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ $\sigma_f < \epsilon(f_0)$ $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$

L_w n_w $n_c = L_w n_w f_0$ f f_0 σ_f $\epsilon(f_0)$ A_0 $A_{H/V}(f)$ f^- f^+ $\sigma_A(f)$ $\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$ $\theta(f_0)$	lunghezza della finestra numero di finestre usate nell'analisi numero di cicli significativi frequenza attuale frequenza del picco H/V deviazione standard della frequenza del picco H/V valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \epsilon(f_0)$ ampiezza media della curva H/V alla frequenza f_0 ampiezza media della curva H/V alla frequenza f frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ 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 deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$
---	--

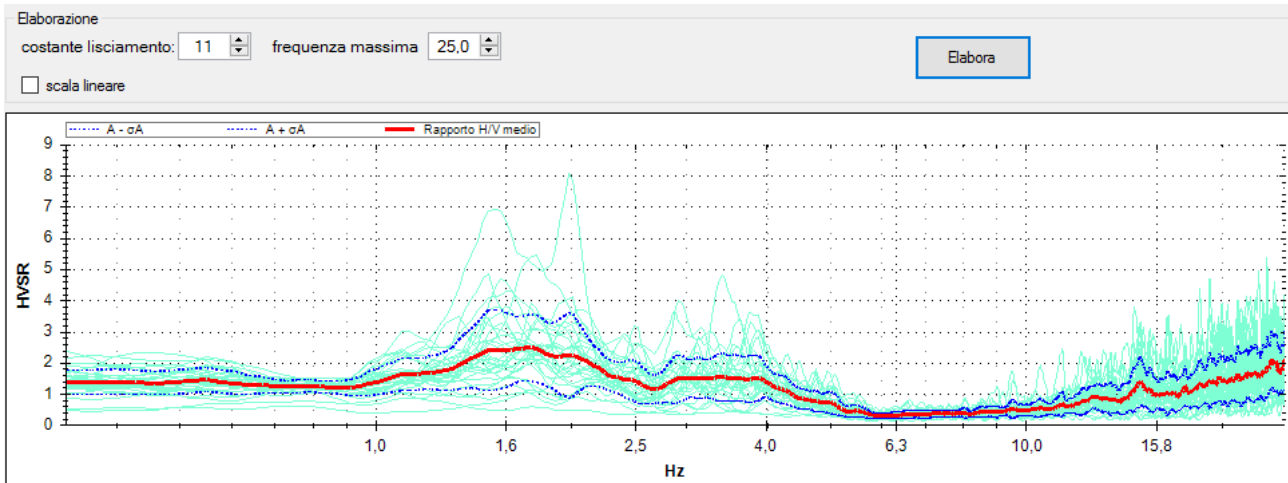
Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
$\epsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$	0.48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

La regolarità delle curve può essere invece variata (entro certi limiti) agendo sul valore della casella 'costante lisciamento'. Questo determina il numero di intervalli elementari di frequenza, ovvero di punti in orizzontale, utilizzati per l'applicazione di un filtro a media mobile pesata, con pesi a distribuzione triangolare. Valori più alti consentono di lisciare maggiormente le curve, ma tendono a nascondere i picchi di piccola e media apertura e a determinare una fusione di più picchi adiacenti tra loro. Al contrario i valori più bassi evidenziano anche picchi di modesta entità, che però potrebbero avere origine antropica, piuttosto che naturale. Occorre in genere sperimentare valori diversi del parametro per trovare il compromesso migliore.

E' utile, talvolta, confrontare direttamente gli spettri di potenza dei segnali registrati sulle tre componenti del sensore (ad esempio per la discriminazione tra picchi di origine

industriale o naturale). Il riquadro degli spettri viene mostrato quando si fa click sulla voce 'Spettri' del menu 'Visualizza' ed aggiornato quando si seleziona una delle curve H/V.

Dopo aver effettuato le modifiche sulla selezione delle curve o sui parametri, premere di nuovo il bottone 'Elabora' per vederne l'effetto.



Normalmente il grafico viene presentato con l'asse delle frequenze in scala logaritmica, per dare più enfasi all'andamento delle curve nella fascia delle frequenze più basse, di maggiore interesse.

In fase di interpretazione, bisogna innanzitutto accertarsi di aver scartato tutti gli eventuali picchi di origine industriale. Quindi, nel caso in cui si abbia un picco netto, si può supporre la presenza di un alto contrasto di impedenza ad una qualche profondità, responsabile di un'amplificazione del moto del suolo ad una frequenza caratteristica pari ad f_0 .

Se lo spessore dei sedimenti al di sopra del bedrock è noto, la velocità delle onde S in questo strato superficiale è approssimativamente V_s . Le frequenze a cui si manifesta la risonanza sono descritte dalla relazione: $f = V_s / 4h$ (formula semplificata) dove V_s è la velocità delle onde di taglio nello strato che risuona e h è lo spessore di detto strato.

Calcolo Vs30

La velocità delle onde di taglio nello strato di copertura (V_{s0}) può essere stimata a partire dalla frequenza di risonanza fondamentale (f_0), dallo spessore dello strato di copertura (H) e dalla velocità del substrato roccioso (V_{s1}) sottostante:

frequenza di risonanza (f_0): 0,00 Hz

spessore primo strato (H): 0,00 m

velocità del bedrock (V_{s1}): 10 m/s


velocità primo strato (V_{s0}): 600 m/s

velocità media (V_{s30}): 600 m/s

categoria di suolo: B

Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessore di diverse

Calcola



Per quanto spiegato in questo manuale e soprattutto in letteratura scientifica, il metodo HVSR è stato concepito per determinare la frequenza di risonanza fondamentale del sito, con la speranza anche di determinare la funzione di amplificazione sismica, cosa che con le conoscenze odierne non è ancora possibile.

Tuttavia se sono disponibili appropriate informazioni geologico-geotecniche da altre indagini, come per esempio la profondità del bedrock sismico, oppure la successione stratigrafica delle unità geotecniche, oppure la misura diretta del profilo di V_s tramite MASW-REMI, sismica a rifrazione, cross-hole, etc., allora la misura della frequenza di picco di risonanza di sito costituisce un ulteriore vincolo alla indeterminatezza del profilo di V_s e può essere un valido contributo per stimare il parametro $V_{s,30}$ utile per la classificazione sismica dei suoli.

