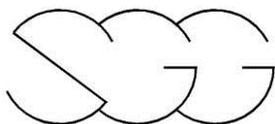


Tutti i diritti sono riservati.
La riproduzione e la divulgazione a terzi e' vietata.

D																
C																
B																
A		29/12/11	De Luca	De Luca	Rossi											
Rev.	Descrizione	Data	Redatto	Verificato	Approvato											
COMMITTENTE : Villa delle Terme S.P.A.				Archivio n° 4169												
				Commessa n° S326												
LOCALITA': CAMPI BISENZIO - (FI)																
INDAGINE: Ricostruzione del sottosuolo - indagine geofisica																
OGGETTO: Rapporto tecnico																
<table border="1"> <tr> <td>4</td><td>1</td><td>6</td><td>9</td><td>S</td><td>G</td><td>G</td><td>0</td><td>1</td><td>A</td> <td>data Dicembre 2011</td> </tr> </table>			4	1	6	9	S	G	G	0	1	A	data Dicembre 2011	N° Copie	N° Pagine	Formato
4	1	6	9	S	G	G	0	1	A	data Dicembre 2011						
Nome file 4169SGG01A.doc					A4 <input checked="" type="checkbox"/> A3 <input type="checkbox"/>											
Coordinatore: Dr. Geol. Claudio Rossi																
 STUDIO DI GEOLOGIA E GEOFISICA S.r.l. STRADA MASSETANA ROMANA , 56 - SIENA - ITALY - Tel. +39 0577 49276 - Fax +39 0577 287254 - e.mail: info@egg.it				CONTROLLO QUALITA' data-sigla												

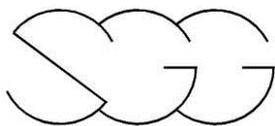


INDICE

1 - INTRODUZIONE.....	3
2 - FINALITÀ DELLA PROSPEZIONE.....	7
3 - PROSPEZIONI ESEGUITE.....	8
4 - PERSONALE E STRUMENTAZIONI IMPIEGATE	9
5 - SICUREZZA E “QUALITÀ”	11
6 - METODOLOGIA DELLE INDAGINI SISMICHE	12
7 - ESECUZIONE DEI RILIEVI.....	17
8 - METODOLOGIA INTERPRETATIVA	18
9 - ANALISI DEI RISULTATI.....	29
APPENDICE.....	37

ALLEGATO

Elaborato	Titolo	scala
4169SGG10A	SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P ED SH, PROVA MASW E MISURE HVSR	1:500



1 - INTRODUZIONE

Nel presente rapporto vengono illustrati i risultati dell'indagine sismica eseguita per conto della società Villa delle Terme S.P.A. nell'ambito della variante urbanistica RUC per il progetto di costruzione di due edifici in località Campi Bisenzio (Provincia di Firenze).

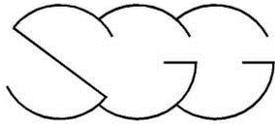
L'indagine sismica è stata eseguita allo scopo precipuo di ricostruire l'assetto geometrico delle formazioni geologiche presenti nell'area e di fornire altresì i valori di rigidità tangenziale a piccole deformazioni del sottosuolo nella zona della Variante al RUC finalizzata alla realizzazione di strutture sanitarie e scolastiche lungo la via Barberinese.

Il complesso delle indagini sismiche da eseguire è stato definito in dettaglio dalla Committenza e l'esecuzione delle singole attività è stata eseguita in stretta osservanza delle "specifiche tecniche" inizialmente consegnate.

Il presente rapporto illustra le metodologie esecutive ed interpretative delle misure sismiche ed i risultati della prospezione secondo un criterio essenzialmente geofisico.

Le indagini sismiche in sito hanno permesso di determinare direttamente la velocità di propagazione, all'interno del mezzo in esame, delle onde di compressione (onde "P"), delle onde di taglio (onde S_H) e delle onde di superficie (onde di Rayleigh e di Love) ed indirettamente, utilizzando i valori delle velocità acquisite, alcune proprietà meccaniche delle litologie investigate.

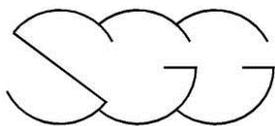
Al fine di minimizzare i limiti dovuti in parte al carattere indiretto delle metodologie geofisiche stesse ed in parte alle caratteristiche del contesto geologico in cui si è operato, i risultati delle indagini sono stati tarati e verificati attraverso le informazioni fornite direttamente da alcune stratigrafie



forniteci direttamente dalla committenza. Tale confronto ha consentito in ultima analisi di compiere elaborazioni dei dati geofisici i cui modelli risultano essere corretti dal punto di vista matematico e fisico e al contempo il più possibile coerenti con la situazione geologica reale.

Le prove geofisiche in generale si sono spinte fino ad incontrare il bedrock sismico, attraversandolo per uno spessore significativo, permettendo così di ricostruire un modello geologico del sottosuolo rappresentativo dell'area in esame. A tal fine per le indagini di superficie (sismica a rifrazione interpretata con metodologia tomografica), è stato realizzato uno schema geometrico avente lunghezza di 120 metri lineari.

Nell'ambito degli studi per la risposta sismica locale, si è invece provveduto alla parametrizzazione dinamica dei terreni. Nello specifico sono state acquisite misure indirette della velocità delle onde di taglio che hanno permesso di determinare la rigidezza iniziale (G_0 o G_{max}), ossia la rigidezza a livelli di deformazione molto bassi. Nell'indagine geofisica svolta tale parametrizzazione è stata ottenuta attraverso misure delle onde di Rayleigh e di Love tramite la tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves). Per quanto riguarda le principali proprietà dinamiche dei terreni, è opportuno ricordare che per sottosuoli naturali, a causa della rapidità delle azioni e del fatto che questi si trovano per gran parte sotto falda, ci si trova in condizioni di drenaggio impedito e pertanto il fenomeno sismico produce deformazioni volumetriche trascurabili, rispetto a quelle distorsionali. Per questo motivo appare giustificato ricondurre la modellazione meccanica di un fenomeno sismico all'analisi degli effetti prodotti da un insieme di onde "S", che si propagano dal substrato alla superficie, con un campo di spostamenti del terreno in pratica orizzontale. Tale assunzione è oltretutto giustificata dal fatto che, da un punto di vista ingegneristico, il moto più verosimile ai fini della verifica sismica dei manufatti è quello orizzontale. In tal senso, a livelli di deformazione bassi, è assunta l'ipotesi che il terreno in esame presenti un comportamento tensione-deformazione di tipo elastico lineare (deformazioni inferiori a 10^{-3} %).



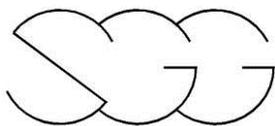
Attraverso i valori di velocità di propagazione delle onde P (V_P) e delle onde S (V_S) si sono determinati, in riferimento alla teoria dell'elasticità, sia alcune delle proprietà meccaniche del mezzo attraversato quali:

- il modulo di deformazione a taglio G_{max} : $(G = \rho \cdot V_S^2)$
- il modulo di Young E : $E = 2\rho \cdot V_S^2 \cdot (1 + \nu)$
- il coefficiente di Poisson ν : $\nu = 0.5 \cdot \left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1 / \left(\left(\frac{V_P}{V_S}\right)^2 - 1\right)$
- il modulo di compressibilità volumetrica E_v : $E_v = \rho \cdot \left(V_P^2 - \frac{4}{3}V_S^2\right)$

dove: ρ = rappresenta la densità del mezzo;
 γ = peso di volume (= $\rho \cdot g$)
 g = l'accelerazione di gravità ;
 ν = è il coefficiente di Poisson,

sia il valore del V_{S30} utile per la classificazione dei terreni nelle categorie di suolo da utilizzare in seguito per la descrizione dell'azione sismica in sito.

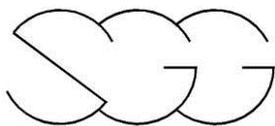
Si ricorda che il parametro V_{S30} corrisponde alla velocità equivalente di propagazione entro i primi 30 metri di profondità delle onde di taglio ed è calcolata con la seguente espressione:



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

dove h_i e V_i indicano rispettivamente lo spessore (in metri) 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 primi 30 metri di profondità.

Le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ($S_r = 100\%$) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tali valori possono non essere rappresentativi delle proprietà meccaniche del materiale in questione secondo le relazioni matematiche espresse in precedenza; invece le velocità delle onde "S" e delle onde di superficie, sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni sotto falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidezza del terreno sono quelle di taglio e, subordinatamente, le onde di superficie. Nei paragrafi successivi saranno descritte le indagini svolte, analizzando le modalità d'esecuzione, le apparecchiature e le modalità interpretative e di restituzione dei dati inerenti alle indagini geofisiche eseguite nell'area di studio.



2 - FINALITÀ DELLA PROSPEZIONE

Le finalità della prospezione sismica, in relazione alle singole attività, possono essere così sinteticamente riassunte:

PROFILI SISMICI A RIFRAZIONE IN ONDE "P" ED "SH"

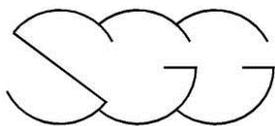
- *Ricostruzione dell'assetto geologico e stratigrafico della porzione più superficiale del sottosuolo;*
- *Definire le velocità sismiche (onde P ed onde S_H) dei vari terreni e rocce presenti nel sottosuolo;*
- *Computo dei moduli elasto-dinamici e del coefficiente di Poisson;*

MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (MASW)

- *Computo della Vs30 del sito.*

ANALISI DEI RAPPORTI SPETTRALI

- *Misura della frequenza di risonanza fondamentale del sito.*



3 – PROSPEZIONI ESEGUITE

3.1 - Tempistica

In relazione al programma d'indagine, le operazioni di campagna si sono svolte nel giorno 20 dicembre 2011.

3.2 - Indagini eseguite

L'indagine eseguita ha avuto la seguente consistenza:

- n° 1 profilo sismico a rifrazione in onde P ed S_H;
- n° 1 prova MASW;
- n° 3 misure HVSR.



- Misura HVSR T1



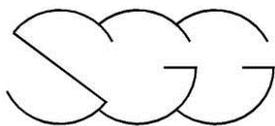
- Misura HVSR T3



- Profilo sismico a rifrazione



- Prova MASW



4 - PERSONALE E STRUMENTAZIONI IMPIEGATE

4.1 - Strumentazioni ed attrezzature impiegate

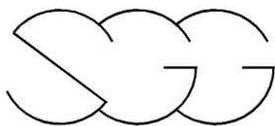
Per l'esecuzione delle misure sperimentali sono state utilizzate le seguenti strumentazione ed attrezzature:

n°	Strumentazione per la sismica a rifrazione	COD. IDENT.
1	Sismografi GEOMETRICS "GEODE" 24 ch - 24 bit EG&G GEOMETRICS - USA	SGG-SI-52 SGG-SI-53
1	Computer portatile Toshiba per registrazione dei dati;	
24	Geofoni orizzontali con frequenza pari a 8 Hz	SGG-SI-03
24	Geofoni verticali con frequenza pari a 4.5 Hz	SGG-SI-02
1	Cavi di collegamento per geofoni con 24 prese intervallate ogni 5 metri	SGG-SI-39h SGG-SI-39i
1	Prolunghe per collegamento geode	SGG-SI-39g
1	Massa battente leggera (6 kg)	
1	Massa battente pesante (30 kg)	
	Linea per trasmissione "trigger"	
	Cavi multipolari di raccordo	
1	tromografo Micromed SpA "TROMINO ENGY PLUS"	SGG-SI-65
2	ricetrasmittenti VHF	

Tutti gli strumenti di misura impiegati, in accordo con il calendario di taratura afferente al "sistema di qualità" in uso presso questo studio, sono tarati presso il LABORATORIO CETACE di Calenzano, afferente alla CESVIT S.p.A. ed accreditato SIT (Servizio di Taratura in Italia).

4.2- Automezzi

Fiat Scudo;



4.3 - Risorse coinvolte

Per l'esecuzione dell'incarico, sono state coinvolte le seguenti risorse:

COORDINAMENTO GENERALE E PROBLEMATICHE COMUNI :

- Responsabile dell'incarico CLAUDIO ROSSI

ACQUISIZIONE DATI SISMICI

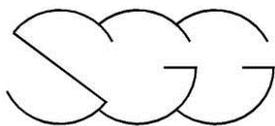
- Responsabile della prospezione sismica JOHNNY DE LUCA

INTERPRETAZIONE DATI SISMICI

- Interpretazione rilievo sismico a rifrazione JOHNNY DE LUCA
- Editing JOHNNY DE LUCA

4.4 - Software utilizzati

Software per interpretazione dati sismici		
Multiple Geode Software	GEOMETRICS – USA	Sistema di gestione del sismografo GEODE, acquisizione e registrazione dei dati sismici
VinMASW 4.3	Eliosoft	MASW
SeisOptPro	Optim Software – USA	Sismica a rifrazione tomografica
SeisOptPicker	Optim Software – USA	Lettura tempi rifrazione
Grilla	Micromed	Misure HVSR



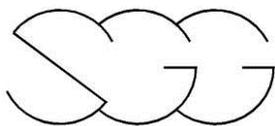
5 - SICUREZZA E “QUALITÀ”

I lavori sono stati eseguiti in conformità al contratto e nello specifico, sono stati prodotti i relativi documenti.

SISTEMA QUALITÀ

In relazione alle “procedure di qualità” la prospezione geofisica è stata eseguita in riferimento alle specifiche SP0302 – SP0901 e all’istruzione ISO9001

Per la registrazione delle varie attività sono stati utilizzati i moduli del sistema qualità in uso.



6 - METODOLOGIA DELLE INDAGINI SISMICHE

6.1 – Sismica a rifrazione

Dalla superficie sono state generate delle onde sismiche compressionali (onde P) e di taglio polarizzate orizzontalmente (onde S_H).

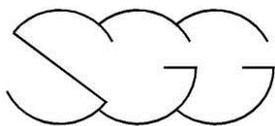
La velocità di propagazione delle onde attraverso un mezzo è legata alle caratteristiche meccaniche delle rocce: tanto più una roccia è tenace e tanto maggiore risulterà la velocità sismica del litotipo interessato dal passaggio dell'onda sismica.

Da un punto di vista teorico la propagazione delle onde sismiche può essere associato alla propagazione delle onde acustiche attraverso un mezzo secondo le leggi dell'ottica. Il principio fondamentale è quello di Huygens, secondo il quale la propagazione avviene per fronti d'onda.

La rifrazione dell'energia elastica è un fenomeno che si verifica quando un fronte di onde sismico incontra una superficie di discontinuità (stratigrafica, tettonica o, nell'ambito dello stesso litotipo, per variazioni di compattazione, fratturazione, ecc.) tra due mezzi diversi.

Le indagini di sismica a rifrazione e/o riflessione consentono di definire lungo un profilo indagato, tramite la velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche presenti, la loro geometria (spessori e superfici di contatto) ed inoltre consentono di stimare i valori dei moduli elastici dei terreni investigati.

La sismica a rifrazione è un metodo di indagine del sottosuolo che utilizza le onde acustiche prodotte da una sorgente, ma che hanno subito un fenomeno di rifrazione lungo le superfici di discontinuità fisica e/o meccanica dei mezzi attraversati. Tale metodologia si basa sull'analisi dei tempi di arrivo delle onde rifratte che, elaborati tramite algoritmi di inversione tomografica, permettono di individuare in profondità le caratteristiche meccaniche degli



strati e di risalire ai moduli elastici dinamici dei terreni investigati tramite l'utilizzo del parametro della velocità sismica.

Tale analisi porta alla ricostruzione di un profilo del sottosuolo (in termini di disposizione geometrica e di caratteristiche meccanico-elastiche dei litotipi presenti al di sotto della zona di indagine) in grado di evidenziare le velocità di trasmissione delle onde elastiche per i diversi corpi attraversati. A differenza del profilo sismico a riflessione, quindi, il prodotto finale conterrà informazioni dettagliate circa la velocità e la profondità delle superfici sismiche e fornirà indicazioni circa i parametri geomeccanici e geotecnici.

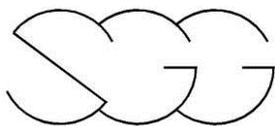
Questi metodi geofisici si basano sulle leggi di Snell. Per questo motivo si deve ricordare che con la sismica a rifrazione non è possibile evidenziare strati di terreno meno tenaci (e quindi caratterizzati da velocità sismiche più basse) che si trovano compresi tra strati di terreno più tenaci e quindi con velocità sismica maggiore.

6.2 – Prova MASW

Lo scopo della prova MASW è quello di ricostruire il profilo di rigidità del sito tramite la misura della velocità di propagazione delle onde di superficie di Rayleigh e di Love con un successivo processo d'inversione, attraverso il quale è fornita una stima indiretta della distribuzione delle V_s (velocità di propagazione delle onde di taglio).

La prova consiste nel produrre in un punto sulla superficie del terreno, in corrispondenza del sito da investigare, una sollecitazione dinamica verticale (per le onde di Rayleigh) ed una orizzontale (per le onde di Love) in un determinato campo di frequenze e nel registrare tramite uno stendimento lineare di sensori le vibrazioni prodotte, sempre in corrispondenza della superficie, a distanze note e prefissate.

L'acquisizione dei dati è stata eseguita utilizzando la strumentazione



classica per la prospezione sismica a rifrazione (a geofono singolo) disposta sul terreno con array lineare da 24 geofoni.

Per ottenere una buona risoluzione della curva di dispersione ed una buona affidabilità del segnale misurato sono state effettuate varie configurazioni spaziali (fig. 5.1 - distanza sorgente – primo ricevitore pari 2.5 m, 5 m e 10 m). L'analisi degli spettri in fase d'elaborazione ha indicato che la configurazione spaziale più adatta per il sito in località Campi Bisenzio corrispondeva ad una spaziatura dei geofoni pari a 5 metri con sorgente posta a 2.5 metri dal 1° geofono (vedere planimetria nella tavola allegata).

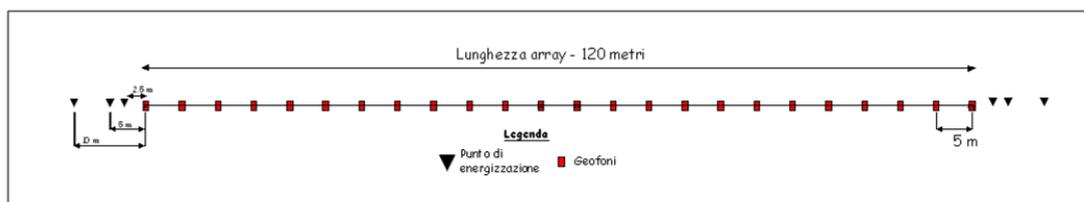


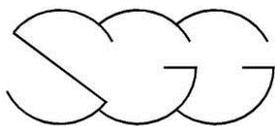
Figura 6.1: rappresentazione schematica di array per prova MASW

6.3 – Misure HVSR

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratios) è basata sulla misura dei rapporti medi fra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali e verticale del rumore sismico ambientale. Le frequenze di risonanza corrispondono ai massimi della funzione che rappresenta rapporti spettrali medi in funzione della frequenza (funzione H/V). L'ampiezza di questi massimi è proporzionale (anche se non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica esistente alla base della copertura.

L'idea di base è quella secondo cui il rapporto H/V consente in media di eliminare il ruolo delle variazioni di intensità delle sorgenti nel corso della registrazione mettendo in evidenza il ruolo della struttura.

Sperimentalmente si osserva che, in presenza di un campo di onde



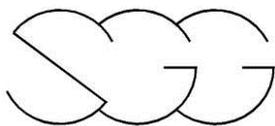
diffuso, la forma della funzione (e in particolare la posizione dei suoi valori massimi) risulta con buona approssimazione stabile nel tempo e fortemente correlata con le caratteristiche del sottosuolo al di sotto del sito di misura.

In particolare, in presenza di forti variazioni nel profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo (legate per esempio alla transizione fra sedimenti soffici e basamento rigido), la funzione H/V mostra dei massimi marcati in corrispondenza della frequenza di risonanza f_r relativa a quella configurazione strutturale (con f_r circa uguale al rapporto fra la velocità media delle onde S fino alla profondità del salto di velocità e il quadruplo di questa profondità).

Generalmente si nota anche una certa correlazione (fortemente non lineare) fra l'entità della variazione di velocità responsabile dei fenomeni di risonanza e l'ampiezza del massimo della funzione H/V (maggiore è il contrasto di impedenza sismica, maggiore è l'entità del massimo).

La struttura del campo di onde presente nel terreno (rumore sismico ambientale, microtremore, rumore sismico o seismic noise) è condizionata dalle caratteristiche delle sorgenti che lo determinano (siano esse naturali o antropiche) e dalle proprietà meccaniche dei terreni. Infatti, ciascuna sorgente genera un treno di onde che raggiunge il punto di misura con caratteristiche che dipendono dall'entità delle sollecitazioni nelle componenti orizzontali e verticali del moto e dalle modalità di propagazione fra la sorgente e il sito in funzione dei fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione che hanno luogo in corrispondenza di variazioni delle proprietà meccaniche dei terreni nel sottosuolo. In genere, nel campo di rumore ambientale, saranno presenti sia onde di volume (P e S in quantità variabili) che onde superficiali (Love e Rayleigh).

Considerando un intervallo di tempo opportunamente lungo (dell'ordine delle decine di minuti), le proprietà medie di un campo di onde sismiche generato da una molteplicità di sorgenti differenti, distribuite casualmente attorno a un punto di misura, tendono ad avere un andamento che non dipende dalle singole sorgenti che hanno generato il campo, ma

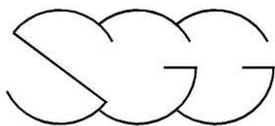


solo dalle proprietà del mezzo in cui le onde si propagano e dal livello energetico medio dell'attività antropica o naturale. In particolare, si può immaginare che, in media, le componenti orizzontali e verticali del moto del suolo tendano a essere sollecitate in modo equivalente, con un'ampiezza media pari al livello medio del rumore in quell'intervallo temporale. In questa ipotesi, i rapporti fra le ampiezze verticali e orizzontali del moto (H/V) saranno statisticamente indipendenti dalle caratteristiche delle sorgenti (dato che le ampiezze delle sollecitazioni sul piano orizzontale e verticale sono mediamente le stesse) e saranno condizionate dai soli effetti di propagazione ovvero dalle caratteristiche del mezzo interessato dal moto sismico. Queste ultime influenzeranno l'ampiezza relativa delle diverse fasi sismiche (onde P, S, Rayleigh e Love) e le direzioni di emergenza delle onde al punto di misura.

Si può dimostrare che la frequenza di risonanza ν_0 di una copertura sedimentaria di spessore H sovrapposta a un basamento rigido e in condizioni di stratificazione piana è data dal rapporto fra la velocità media delle onde S nel sedimento (V_s) e 4 volte lo spessore H ($\nu_0 = V_s/4H$). Utilizzando questa relazione è possibile risalire dalla frequenza di risonanza misurata allo spessore della copertura una volta nota la velocità delle onde di taglio o, viceversa a questa ultima se lo spessore H è noto.

Studi teorici mostrano che se il rumore è effettivamente dominato da onde di volume emergenti da direzioni sub-verticali, l'andamento e l'ampiezza della funzione H/V riflettono quelle della funzione di risposta del deposito sedimentario analizzato. In caso contrario si nota che l'ampiezza dei massimi della funzione H/V è correlata (ma non linearmente) all'entità del contrasto di impedenza sismica presente alla base della copertura.

L'assenza di massimi della funzione H/V suggerisce l'assenza di fenomeni di amplificazione sismica dovuti a fenomeni di risonanza.



7 – ESECUZIONE DEI RILIEVI

7.1 - Rilievo sismico a rifrazione

Nello specifico le principali caratteristiche del rilievo sono state le seguenti:

- *Geofoni attivi simultaneamente: n°24*
- *Spaziatura tra i geofoni: 5 metri;*
- *Spaziatura dei tiri : 15 metri;*
- *Sorgente sismica: massa battente pesante;*
- *Campionamento: 0.25 ms;*
- *Finestra registrazione: 1 sec .*

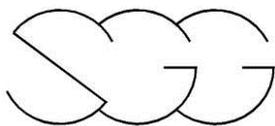
7.2 – Prova MASW

Nello specifico le principali caratteristiche del rilievo sono state le seguenti:

- *Geofoni attivi simultaneamente: n°24*
- *Spaziatura tra i geofoni: 5 metri;*
- *Ofsset: 10 – 5 – 2.5 metri;*
- *Sorgente sismica: massa battente pesante;*
- *Campionamento: 0.25 ms;*
- *Finestra registrazione: 2 sec .*

7.3 – Misure HVSR

Nell'area della variante sono state eseguite tre misure di rumore sismico ambientale a stazione singola per un tempo di registrazione massimo di 30 minuti.



8 – METODOLOGIA INTERPRETATIVA

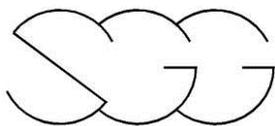
8.1- Profili sismici a rifrazione con metodologia tomografica

Inizialmente l'elaborazione delle tracce sismiche è consistita in un'analisi spettrale dell'intero set di dati raccolti in modo da verificare la distribuzione in frequenza del segnale sismico. Tale procedura ha permesso quindi di definire i suddetti valori per i filtri passa banda utili al conseguimento di una migliore qualità e leggibilità dei dati sismici, soprattutto in riferimento a quelli derivati dalle energizzazioni lontane.

I tempi di primo arrivo delle onde P ed SH poi sono stati individuati attraverso uno specifico programma di picking che consente di apprezzare variazioni di tempo nell'ordine di $0,1 \times 10^{-3}$ sec. Successivamente i tempi letti sono stati tabellati in modo da poterli riportare su di un grafico spazio-tempo, denominato dromocrona, dove sull'asse delle ascisse è ricostruita la geometria dei geofoni e dei punti di scoppio secondo le reciproche distanze, e sull'asse delle ordinate sono riportati i tempi di transito dai vari punti di scoppio ai singoli geofoni.

L'interpretazione tomografica dei profili sismici è stata eseguita tramite lo specifico programma SEISOPT@PRO5 che prevede la suddivisione dello spazio bidimensionale in celle, di forma quadrata o rettangolare secondo una maglia prefissata, con l'attribuzione ad ognuna di un determinato valore di velocità sismica. Successivamente, il programma torna a calcolare il tempo di transito dell'onda sismica attraverso le maglie del modello e confronta tale valore con quello sperimentale, impiegando iterativamente algoritmi di calcolo adeguati ed effettuando un controllo sul tragitto dei raggi sismici. Per successive iterazioni si perviene a dei valori di velocità sismica da associare alle diverse celle che soddisfino contemporaneamente più raggi sismici.

L'interpretazione dei dati, che viene sviluppata effettuando un'analisi di modellazione del sottosuolo su base anisotropica attraverso la suddivisione dello spazio in celle regolari, fornisce, previa elaborazione con

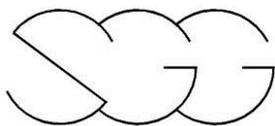


metodologie iterative R.T.C. e algoritmi di ricostruzione tomografica, il campo delle velocità sismiche del sottosuolo. Nel caso specifico per i modelli tomografici finali è stata sempre utilizzata una maglia rettangolare 1.8 x 0.9 m; nella restituzione i valori di velocità sismica attribuiti alle singole celle sono stati rappresentati mediante una scala colorimetrica da 0 a 3500 m/sec per le onde P e da 0 a 500 m/sec per le onde S_H.

Per la determinazione del modello di interpretazione è stato utilizzato il metodo di inversione controllato “*Monte Carlo*” basato su una modellizzazione avanzata, ove i modelli derivati dagli algoritmi vengono accettati o rifiutati basandosi su un criterio statistico. L’accuratezza del modello inverso è definita dallo scarto quadratico medio calcolato tra i tempi di primo arrivo sperimentali ed i calcolati.

Il software di interpretazione (SeisOpt Pro ver. 5.0) restituisce i risultati in termini di affidabilità statistica, ove per *precisione* si intende la sommatoria degli scarti al quadrato tra i valori sperimentali e quelli calcolati fratto il numero dei punti di misura; per *iterazioni* il numero di volte che il programma ha eseguito la verifica del modello totale. In particolare, i risultati in termine d’affidabilità statistica dell’interpretazione operata, risultano essere i seguenti:

profilo sismico N°	precisione media sec²	iterazioni N°
P1	4,362889 e ⁻⁰⁰⁵	43.162
S1	2,622229 e ⁻⁰⁰⁵	92.010



8.2 – Prova MASW

Lungo l'allineamento dello stendimento sismico è stata eseguita una prova MASW, al fine di caratterizzare il sottosuolo attraverso l'ausilio della velocità delle onde superficiali di Rayleigh e di Love. Il metodo "MASW" consente di eseguire un'analisi dei dati sismici in modo tale da poter ricavare il profilo verticale della velocità delle onde S. La metodologia MASW permette altresì di definire il parametro V_{s30} , utile per la classificazione dei terreni nelle categorie di suolo da utilizzare in seguito per la descrizione dell'azione sismica in sito. Si ricorda che il valore del parametro V_{s30} della prova MASW è riportato, per convenzione, al centro del relativo stendimento geofonico. Per l'interpretazione dei dati sperimentali è stato utilizzato uno specifico programma (winMASW Professional Version 4.3). Il profilo verticale di V_s è ottenuto tramite l'inversione (considerando tanto il modo fondamentale che quelli superiori) delle curve di dispersione delle onde di Rayleigh.

La procedura dell'analisi congiunta onde di Rayleigh-Love si sviluppa in due fasi:

- Determinazione degli spettri di velocità sui quali si identificano le curve di dispersione
- Inversione congiunta delle curve di dispersione attraverso l'utilizzo di algoritmi genetici.

L'elaborazione del segnale consiste inizialmente nel calcolo degli spettri di velocità dai dati sismici acquisiti in campagna (Figura 8.1).

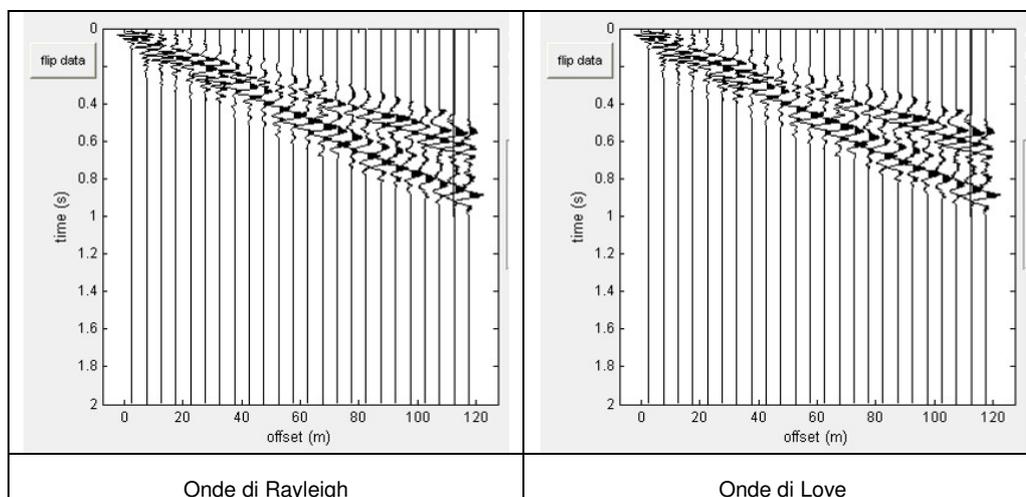
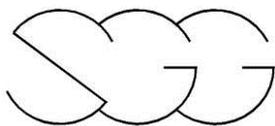


Figura 8.1: dati di campagna.

Sugli spettri di velocità (Figure 8.2) viene eseguito un “picking” della curva di dispersione (soprassegno con pallini bianchi) individuando un insieme di punti che appartengono ad un certo modo (in questo caso al modo fondamentale) di propagazione dell’onda superficiale di Rayleigh e di Love.

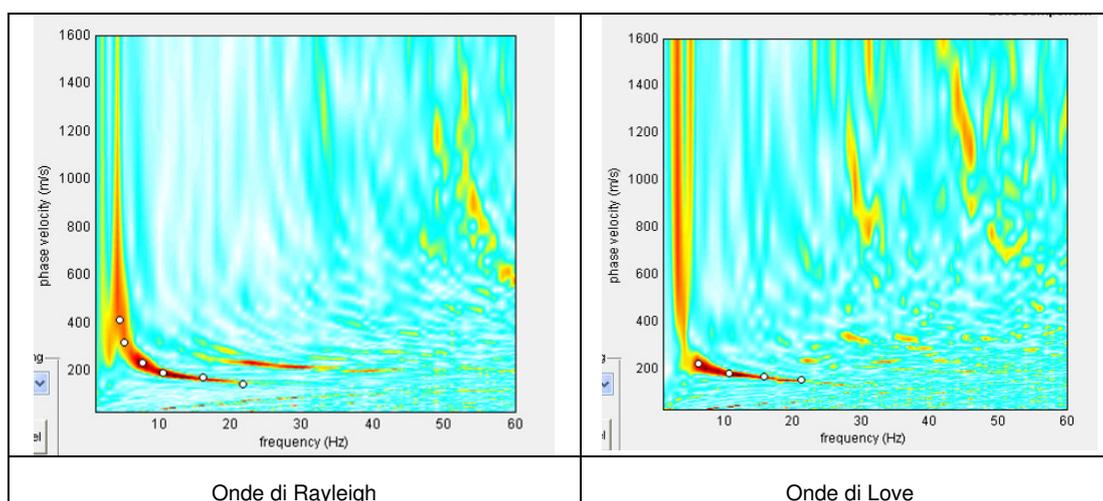
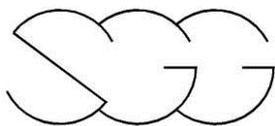


Figura 8.2: spettri di velocità tratti dalle prove MASW e relativi picking.



Allo scopo di ottenere una prima valutazione del possibile modello del terreno sono altresì effettuate delle modellazioni dirette del terreno tramite il calcolo di curve di dispersione appartenenti a modelli a quattro strati, i cui valori di V_s e degli spessori sono definiti sulla base di osservazioni desunte dalle stratigrafie dei sondaggi geotecnici fornitici dalla committenza.

Successivamente per ottenere il profilo verticale di V_s è eseguita l'inversione congiunta delle curve di dispersione precedentemente "piccate".

Tale inversione congiunta è eseguita tramite l'utilizzo di algoritmi genetici che consentono di ottenere soluzioni affidabili ed una stima dell'attendibilità del modello ricavato in termini di deviazione standard.

L'operazione di inversione è ottimizzata definendo uno spazio di ricerca i cui confini sono definiti da valori di V_s e spessori all'interno dei quali si cerca la soluzione.

Tali assunzioni sono fatte sulla base delle conoscenze geologiche del sito e delle informazioni derivate da considerazioni di sismica a rifrazione effettuate direttamente sulle tracce acquisite. Una volta fissati i limiti minimi e massimi dello spazio di ricerca, sono quindi impostati i parametri genetici che definiscono sia il numero di individui (ossia il numero di modelli che costituiscono la popolazione che si evolverà verso soluzioni sempre migliori) sia il numero di generazioni al passare delle quali sono esplorati modelli sempre migliori.

L'analisi dei dati attraverso l'uso di algoritmi genetici porta in ultima analisi alla definizione del profilo verticale della V_s (Figure 8.3) in funzione della profondità con associato il valore del V_s 30.

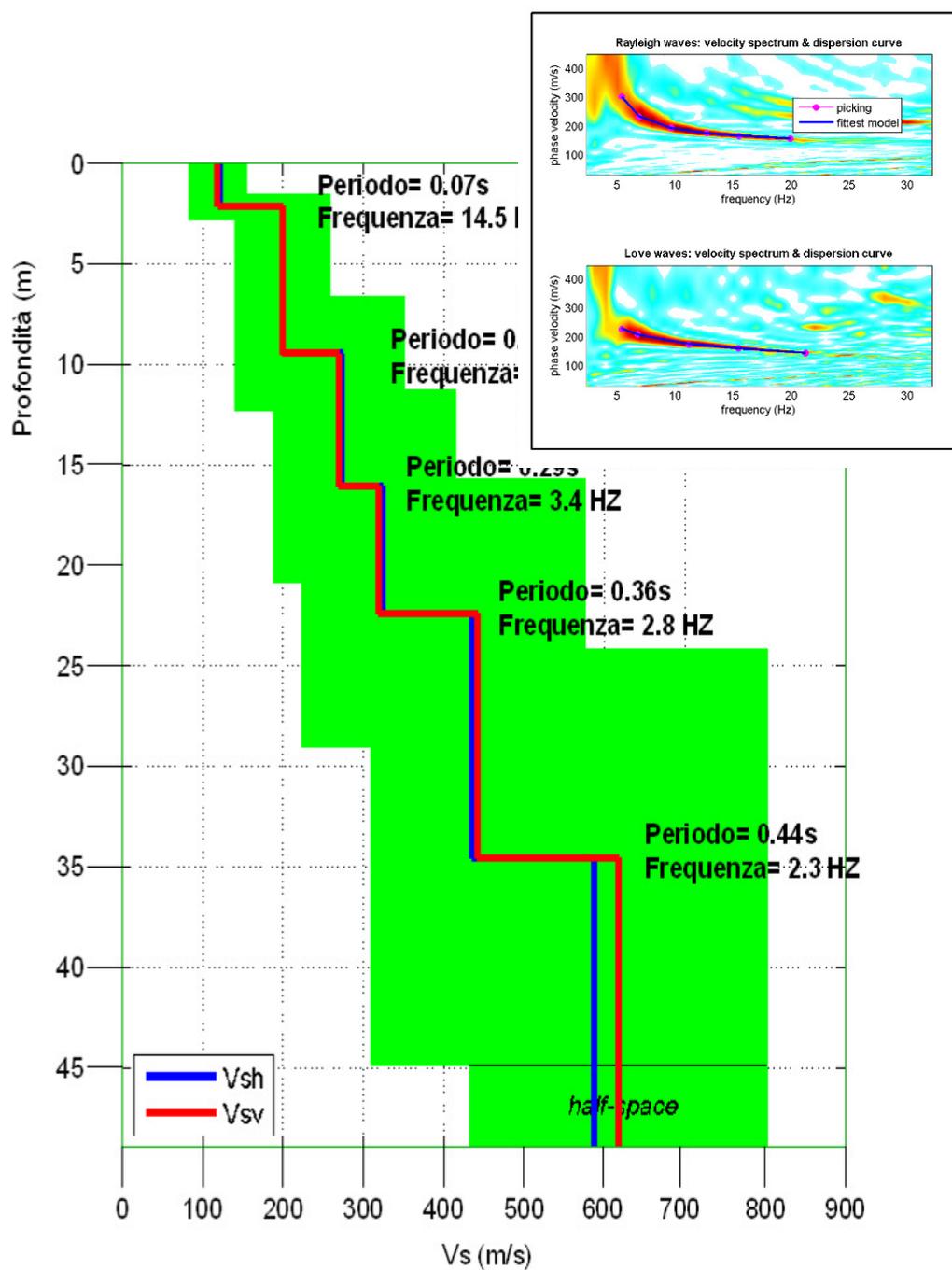
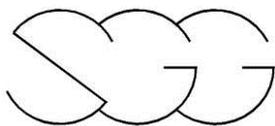


Figura 8.3 modello interpretativo derivato dall'analisi congiunta delle onde di Rayleigh e delle onde di Love, tratto dalla prova MASW 1; V_{s30} modello migliore: 259 m/s, V_{s30} modello medio: 259 m/s



8.3 – Misure HVSR

Le misure della funzione H/V sono state effettuate tramite l'acquisizione del rumore sismico ambientale per tempi di registrazione di 30 minuti. La durata delle registrazioni hanno lo scopo di garantire la corretta misura del campo di rumore generato da una molteplicità di sorgenti dalle diverse direzioni dello spazio.

Le misure sono state effettuate utilizzando un sistema di acquisizione tri-direzionale caratterizzato da sufficiente sensibilità.

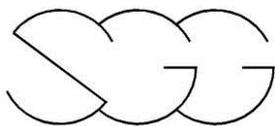
I risultati di ogni analisi presentati in questo lavoro sono stati ottenuti con il software GRILLA, che permette di determinare i rapporti medi fra le componenti spettrali del rumore misurate sul piano orizzontale e verticale. A questo scopo, la serie di rumore ambientale è stata suddivisa in una serie di finestre temporali di uguale durata (finestre di 20 secondi) per ciascuna delle quali è stato determinato lo spettro del moto. Su ciascuna di queste finestre viene calcolato lo spettro di ampiezza del segnale nelle tre componenti. In questa fase è stata applicato un sistema di lisciamento (smoothing) triangolare del 10% adottato per la determinazione dello spettro.

Dopo un opportuno lisciamento, le ordinate spettrali del moto sul piano orizzontale, ottenute mediando opportunamente i valori ottenuti nelle due direzioni principali, sono state divise per quelle ottenute nella direzione verticale.

L'andamento dei rapporti spettrali è stato quindi ottenuto mediando i valori ottenuti per le diverse finestre temporali considerate. Per definire la qualità delle misure sono state anche valutate le variazioni temporali e azimutali dei rapporti spettrali nel corso della sessione di misura e fatta una stima del relativo intervallo di confidenza.

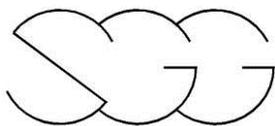
Di seguito sarà brevemente descritta la procedura di analisi seguita:

- a. Ciascuna delle tracce è suddivisa in segmenti o finestre di 20 secondi.



- b. In ogni finestra e per ciascuna delle tracce viene eseguita:
- un'analisi preliminare: eliminazione di trend lineari (detrend) e tapering delle estremità.
 - la trasformata di Fourier (FFT)
 - il lisciamento degli spettri con finestra triangolare ampia una frazione della frequenza centrale (in questo lavoro generalmente il 10%).
- c. Le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali vengono mediate in modo geometrico, e vengono calcolati i rapporti HVSR (f), in ciascuna finestra temporale.
- d. Si calcolano i rapporti HVSR medi ed il relativo intervallo di confidenza al 95%. Alla frequenza di risonanza viene associata una stima dell'incertezza sperimentale.

Lo spettro relativo alla componente orizzontale viene ottenuto effettuando la media (solitamente geometrica) delle due componenti spettrali del rumore sul piano orizzontale. La combinazione delle stime ottenute nelle diverse finestre temporali viene poi utilizzata per costruire la funzione H/V finale e stimare il relativo intervallo di confidenza. In particolare, la funzione H/V è ottenuta facendo la media dei valori delle funzioni H/V calcolate in ogni finestra temporale. Per verificare se le misure sono state effettuate in condizioni ottimali per i fini geognostici (campo di onde diffuso), oltre alla stima della curva H/V, risulta quindi utile valutare l'eventuale presenza di fenomeni direzionali (eterogeneità del campo di rumore) e la stabilità nel tempo della funzione H/V durante la misura (stazionarietà). In presenza di un campo di rumore diffuso il valore della funzione H/V non deve cambiare nel tempo o al variare della direzione. Al contrario, la presenza di sorgenti dominanti o il cattivo posizionamento dello strumento (basculamento) si manifesta come una variazione direzionale e/o temporale dei rapporti H/V.



Sperimentalmente, l'analisi di qualità della misura può essere effettuata confrontando le ampiezze spettrali medie del rumore misurato lungo le due componenti orizzontali, oppure calcolare diversi valori della funzione H/V di volta in volta proiettando lungo direzioni differenti le ampiezze spettrali ottenute sul piano orizzontale. La stazionarietà nel tempo, invece, può essere valutata rappresentando in funzione del tempo le funzioni H/V ottenute nelle diverse finestre temporali considerate (Figura 8.4).

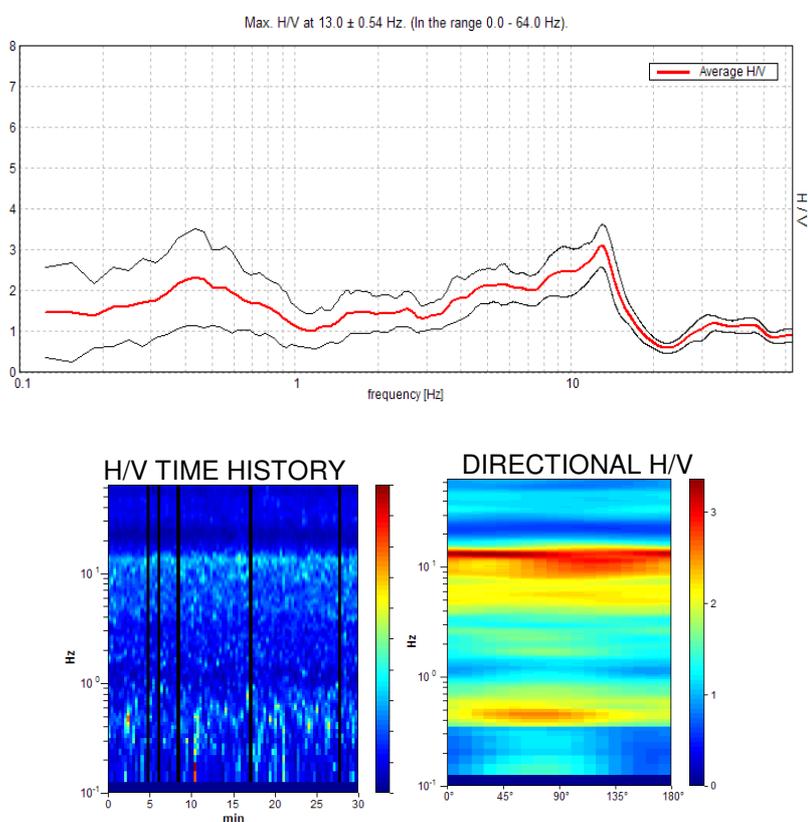
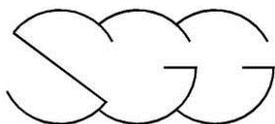


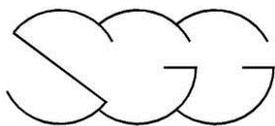
Figura 8.4: Risultati delle analisi di rumore sismico relative a una corretta misura H/V. In alto sono riportati i valori del rapporto spettrale H/V in funzione della frequenza con il relativo intervallo di confidenza al 95%. Sono anche indicati i valori delle frequenze corrispondenti ai massimi della funzione H/V. In basso a sinistra è riportato l'andamento nel tempo (ascissa) dei valori H/V (colori) in funzione della frequenza (ordinata): il grafico ha lo scopo di valutare la stabilità nel tempo della curva H/V. In basso a destra sono invece riportati i valori della funzione H/V (colore) in funzione della frequenza (in ordinata) al variare della direzione del segnale (ascissa): il grafico serve a valutare la direzionalità del segnale registrato.



Ai fini dell'affidabilità e della chiarezza del massimo della funzione H/V, infine è stata effettuata una analisi secondo i criteri determinati nell'ambito del progetto europeo SESAME per l'eliminazione di massimi spuri della funzione H/V, la cui presenza è frutto delle caratteristiche del campo di onde sismiche e non della struttura locale del sottosuolo (Figura 8.5).

Max. H/V at 13.0 ± 0.54 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).					
Criteria for a reliable H/V curve[All 3 should be fulfilled]					
$f_0 > 10 / L_w$		13.00 > 0.50		OK	
$n_c(f_0) > 200$		22100.0 > 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 625 times		OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]					
Exists f^- in $[f_0/4, f_0] A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$		3.531 Hz		OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$		15.875 Hz		OK	
$A_0 > 2$		3.09 > 2		OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$		$ 0.02057 < 0.05$		OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$		$0.26746 < 0.65$		OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$		$0.2614 < 1.58$		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				
$\epsilon(f_0)$	threshold value for the stability condition $\sigma_f < \epsilon(f_0)$				
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 $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$				
Threshold values for σ_f and $\sigma_A(f_0)$					
Freq.range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\epsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ 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

Figura 8.5: Criteri da rispettare per l'ottenimento di una realistica curva HVSR.



Infine, un buon indicatore della qualità del picco H/V può essere ottenuto dall'esame degli spettri singoli. Infatti, massimi fisicamente significativi sono generalmente associati a valori di ampiezza spettrale minima sulla componente verticale. La curva ottenuta nel sito d'indagine può essere considerato come un esempio di picco H/V chiaro e fisicamente significativo (Figura 8.6).

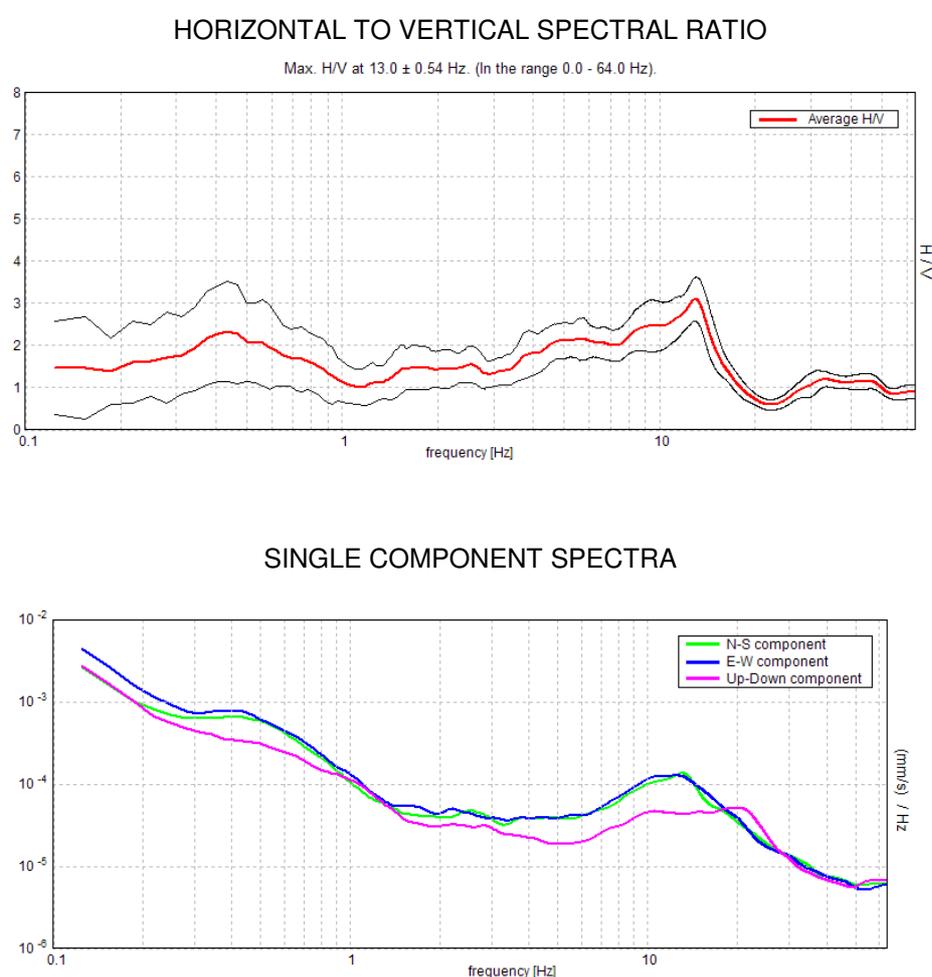


Figura 8.6: Andamento degli spettri relativi a una corretta misura H/V nella quale viene identificato un picco fisicamente significativo. Nella figura superiore è riportato l'andamento della curva H/V (curva rossa) e il relativo intervallo di confidenza (curve nere). Nella figura in basso sono riportati gli andamenti degli spettri di ampiezza del rumore sulla componente verticale (curva magenta) e sulle componenti orizzontali (curve verde e blu).

9 - ANALISI DEI RISULTATI

L'interpretazione dei dati sismici a rifrazione ha permesso di ricostruire un modello geologico e geofisico del sottosuolo concorde con le informazioni desunte dalle stratigrafie dei sondaggi geognostici forniteci direttamente dalla committenza.

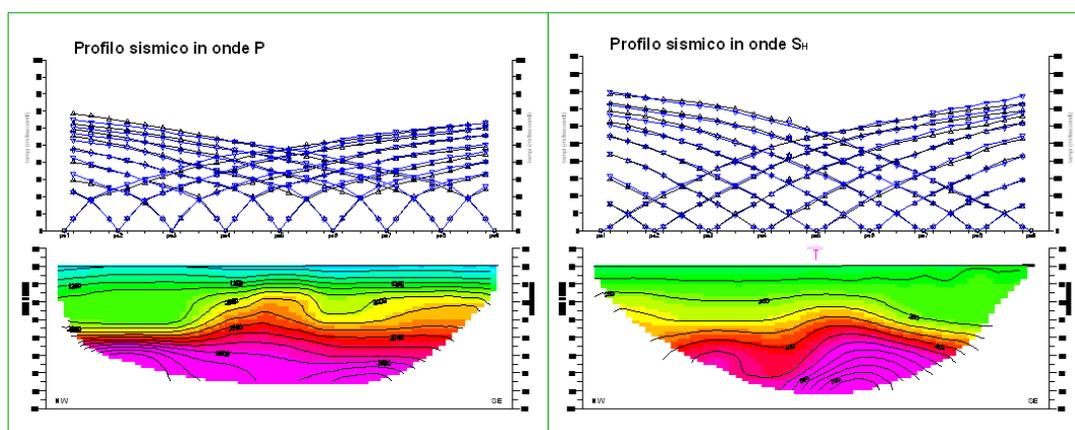
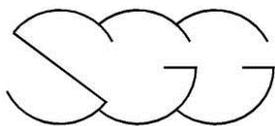


Figura 9.1: Sezioni tomografiche in onde P ed SH e relative dromocroni.

I sismostrati individuati da entrambe le sezioni tomografiche (Fig. 9.1) hanno evidenziato la presenza di uno strato superficiale dello spessore variabile compreso tra i 10 ed i 15 metri e caratterizzato da valori di velocità sismiche inferiori a 2.000 m/s per le onde P e inferiori ai 300 m/s per le onde SH associabile ai terreni meno addensati. Al di sotto di questo sismostrato nelle sezioni tomografiche si osserva come la distribuzione delle velocità sismiche V_p e V_s presenta piccole variazioni laterali raggiungendo valori superiori ai 3.500 m/s per le onde P e superiori ai 450 m/s per le onde SH; tali valori indicano buone caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali costituenti l'area in esame.



L'aumento dei valori di velocità delle onde sismiche di taglio (onde SH) con la profondità è concorde con il modello di V_s determinato attraverso la prova MASW (Fig. 9.2).

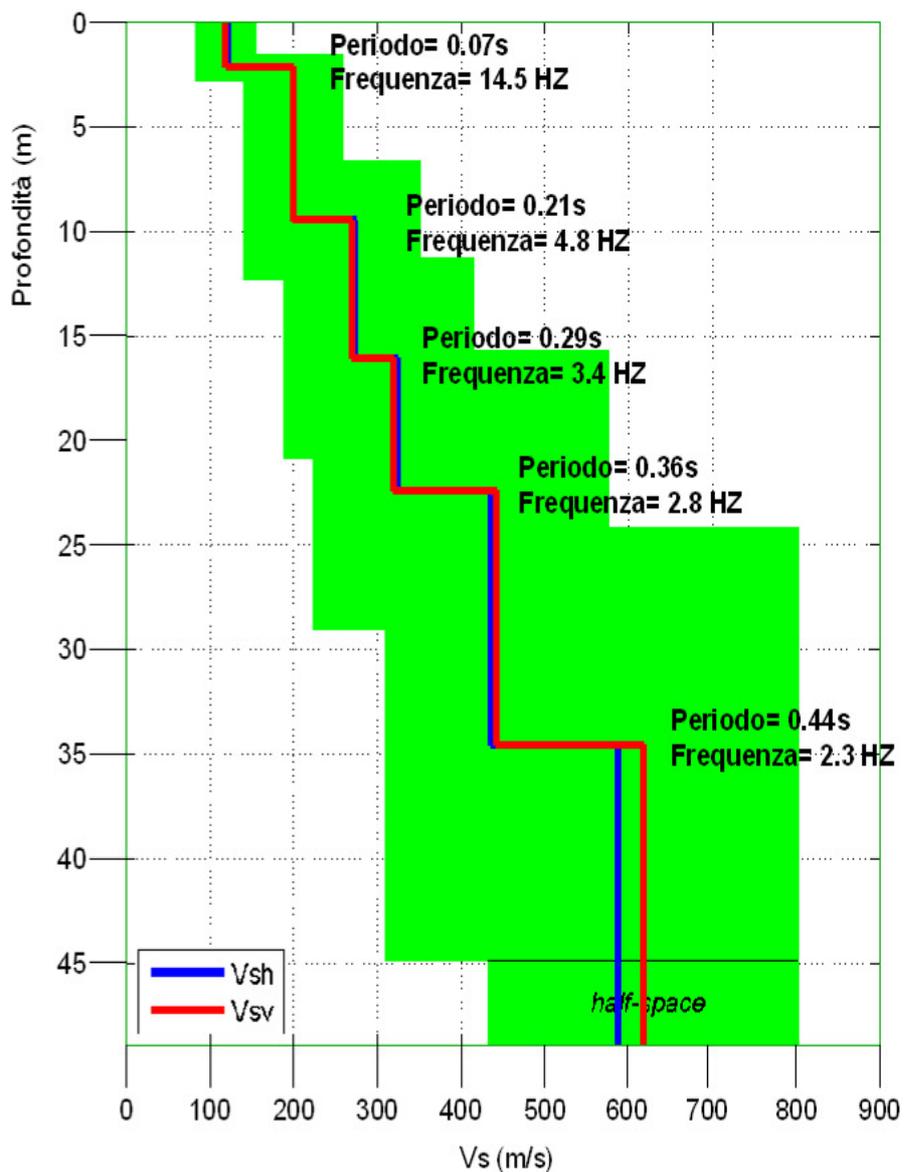
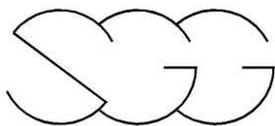


Figura 9.2: Profilo di V_s tratto dalla prova MASW1.



L'analisi delle onde superficiali ha riscontrato la presenza di più discontinuità verticali nella distribuzione delle velocità delle onde di taglio; in particolar modo è stato identificato il seguente modello medio:

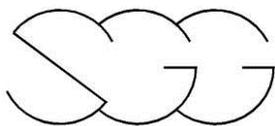
MASW 1

Profondità da (m)	Profondità a (m)	Standard Deviations (m)	V _{sv} (m/s)	Standard Deviations (m/s)	V _{SH} (m/s)	Standard Deviations (m/s)
0.0	2.1	0.0	120	2.0	122	1.4
2.1	9.5	0.2	200	1.1	200	2.3
9.5	16.1	0.1	270	1.2	275	3.2
16.1	22.4	0.3	320	2.1	326	2.1
22.4	34.6	0.9	443	1.9	436	
34.6	~50.0		618	1.5	589	1.0

L'area oggetto dell'indagine geofisica, secondo il valore di V_{s30} di 259 m/s stimato da piano campagna tramite la tecnica MASW, in definitiva può essere collocata, secondo la normativa italiana, in **classe C**.

In figura 9.2 sono state riportate anche le frequenze di risonanza corrispondenti alla serie di salti di V_s individuati attraverso la prova MASW, considerato che la frequenza di risonanza è legata alla profondità della discontinuità ed alla velocità media dei terreni sovrastanti dalla equazione di risonanza:

$$T = \frac{4x \sum_{i=1}^n h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} x h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)}$$



Tali valori sono in accordo con i risultati ottenuti attraverso le tre misure HVSR effettuate nell'area di indagine (Fig. 9.3).

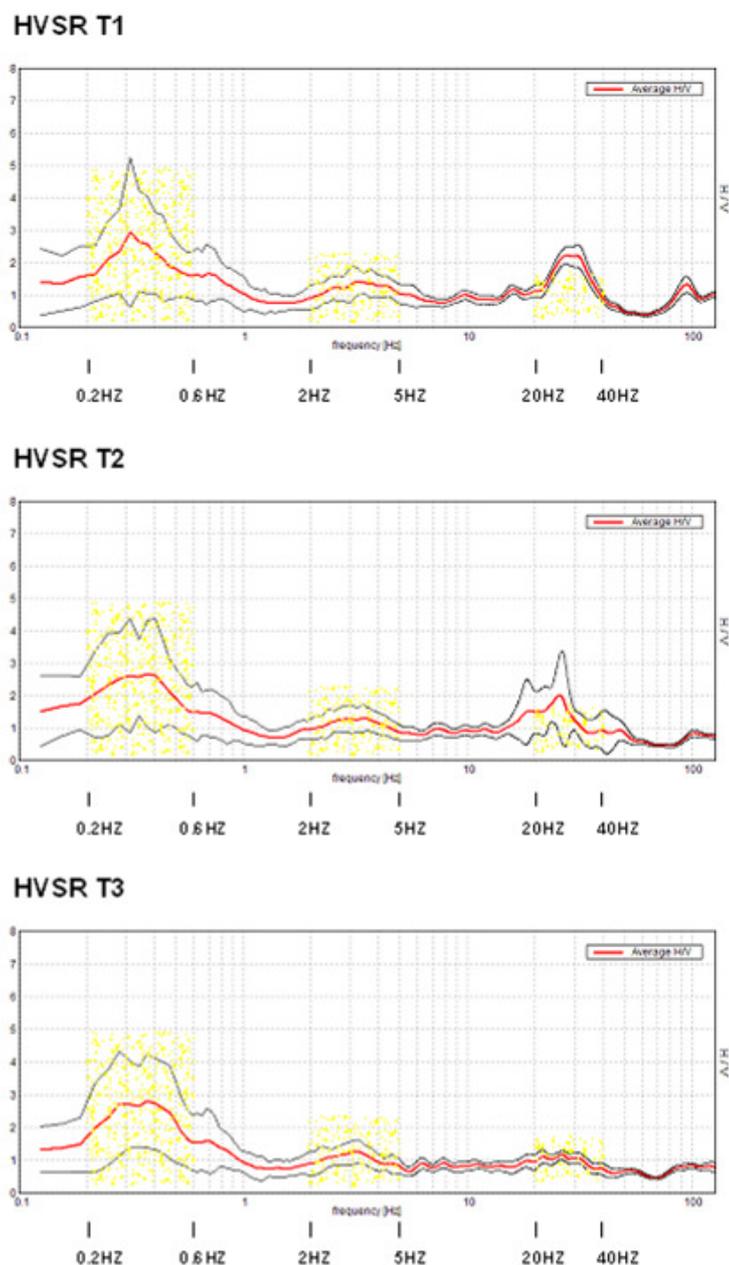
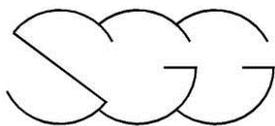


Figura 9.3: Curve H/V derivate dalle tre misure di rumore ambientale a stazione singola T1, T2 e T3.



Le tre misure HVSR effettuate presentano curve H/V aventi lo stesso andamento, aspetto questo che sta ad indicare una sostanziale omogeneità dell'area.

Non sono stati rilevati picchi dalla forma netta e marcata e questo denota l'assenza di forti contrasti di impedenza dovuti al passaggio tra i diversi litotipi che costituiscono il sito.

Tuttavia le misure analizzate hanno evidenziato picchi in frequenza compresi tra i 20 e i 40 Hz, tra i 2 e i 5 Hz e tra gli 0.2 e gli 0.6 Hz.

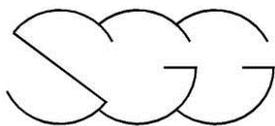
Considerato che la frequenza di risonanza è legata alla profondità della discontinuità ed alla velocità media dei terreni sovrastanti secondo la relazione:

$$f_0 = Vs / 4H,$$

i picchi caratterizzati dalle frequenze più alte (T1= 27.5 HZ, T2= 25.63 HZ, T3= 26.25 HZ) corrispondono ad un contrasto di impedenza sismica molto superficiale (collocabile intorno al primo metro da p.c).

I picchi caratterizzati dalle frequenze comprese tra i 2 ed i 5 HZ (T1= 3.22 HZ, T2= 3.44 HZ, T3= 3.22 HZ) corrispondono a un contrasto di impedenza sismica poco profondo (collocabile intorno ai 15 metri da p.c).

I picchi caratterizzati dalle frequenze comprese tra gli 0.2 e gli 0.6 Hz (T1= 0.31 HZ, T2= 0.38 HZ, T3= 0.38 HZ) corrispondono a un contrasto di impedenza sismica molto profondo (nell'ordine di qualche centinaio di metri).



La mancanza di forti contrasti di impedenza determina nell'analisi delle curve H/V l'assenza di frequenze di risonanza tali da essere considerate come *fondamentali* (vedere i risultati riportati in appendice dove i picchi analizzati non rispettano i parametri stabiliti dal progetto SESAME). Tuttavia è possibile stimare una frequenza di risonanza da considerarsi come fondamentale facendo una analisi congiunta della dispersione delle onde superficiali di Love e le informazioni derivate dalle misure HVSR. Il risultato di tale analisi è riportato nella figura 9.4, dove ad una profondità di circa 52 metri da pc. (profondità alla quale si stima essere posto il bedrock sismico avente velocità delle onde S superiore agli 800 m/s) viene individuato un periodo di 0.51 s corrispondente ad una frequenza di risonanza pari a circa 2.0 HZ.

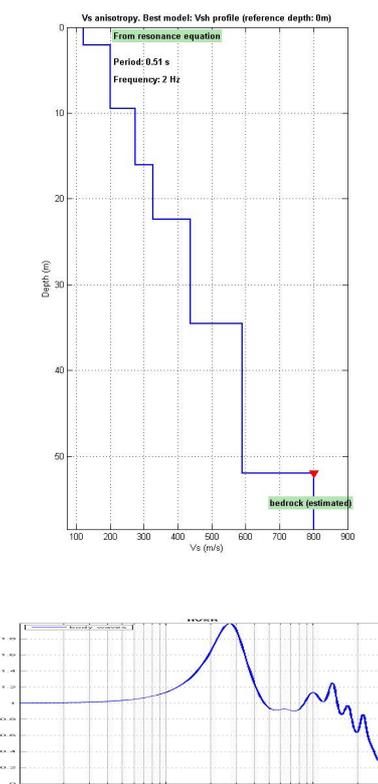
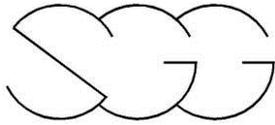
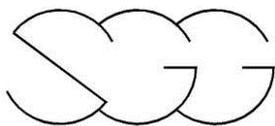


Figura 9.4: Profilo VS del modello considerato con indicato il periodo proprio del sito sulla base dell'equazione della risonanza (in alto); rapporto H/V (in basso).



Sulla base delle velocità sismiche in onde P ed SH ottenute dall'interpretazione tomografica della sismica a rifrazione, al centro dello stendimento per ogni metro di profondità, è stato possibile calcolare, attribuendo ai differenti litotipi i valori di densità desunti da bibliografia, i moduli elastici dinamici dei terreni indagati, di cui si riporta la tabella seguente:

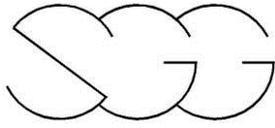
Quota assoluta m (s.l.m.)	densità (kN/m^3)	V_P m/s	V_{SH} m/s	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico (kN/m^2)	modulo Young (kN/m^2)	modulo bulk (kN/m^2)
35.2	18	601	175	0.45	5.61E+04	1.63E+05	5.87E+05
34.3	18	724	182	0.47	6.05E+04	1.77E+05	8.81E+05
33.4	18	867	188	0.48	6.49E+04	1.91E+05	1.29E+06
32.5	18	1011	194	0.48	6.91E+04	2.05E+05	1.78E+06
31.6	18	1141	200	0.48	7.31E+04	2.17E+05	2.29E+06
30.7	19	1354	205	0.49	8.13E+04	2.42E+05	3.44E+06
29.8	19	1561	217	0.49	9.14E+04	2.72E+05	4.60E+06
28.9	19	1760	229	0.49	1.01E+05	3.02E+05	5.86E+06
28.0	19	1943	239	0.49	1.11E+05	3.30E+05	7.16E+06
27.1	19	2094	250	0.49	1.21E+05	3.61E+05	8.33E+06
26.2	19	2207	261	0.49	1.32E+05	3.95E+05	9.26E+06
25.3	20	2280	274	0.49	1.53E+05	4.56E+05	1.04E+07
24.4	20	2324	286	0.49	1.67E+05	4.98E+05	1.08E+07
23.5	20	2356	299	0.49	1.83E+05	5.45E+05	1.11E+07
22.6	20	2388	313	0.49	2.00E+05	5.97E+05	1.14E+07
21.7	20	2427	328	0.49	2.19E+05	6.53E+05	1.17E+07
20.8	20	2479	342	0.49	2.39E+05	7.13E+05	1.22E+07
19.9	21	2545	357	0.49	2.73E+05	8.15E+05	1.35E+07
19.0	21	2623	372	0.49	2.97E+05	8.83E+05	1.43E+07
18.1	21	2709	387	0.49	3.20E+05	9.53E+05	1.53E+07
17.3	21	2801	400	0.49	3.43E+05	1.02E+06	1.63E+07
16.4	21	2896	413	0.49	3.65E+05	1.09E+06	1.75E+07



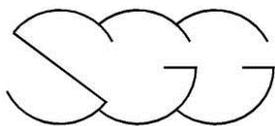
Quota assoluta m (s.l.m.)	densità (kN/m ³)	V _P m/s	V _{SH} m/s	coeff. Poisson	modulo taglio dinamico (kN/m ²)	modulo Young (kN/m ²)	modulo bulk (kN/m ²)
15.5	21	2991	425	0.49	3.86E+05	1.15E+06	1.86E+07
14.6	21	3084	435	0.49	4.05E+05	1.21E+06	1.98E+07
13.7	21	3172	444	0.49	4.23E+05	1.26E+06	2.10E+07
12.8	21	3250	453	0.49	4.40E+05	1.31E+06	2.20E+07
11.9	21	3319	462	0.49	4.57E+05	1.36E+06	2.30E+07
11.0	21	3381	471	0.49	4.76E+05	1.42E+06	2.38E+07
10.1	21	3439	481	0.49	4.96E+05	1.48E+06	2.47E+07
9.2	21	3493	493	0.49	5.20E+05	1.55E+06	2.54E+07
8.3	21	3542	505	0.49	5.47E+05	1.63E+06	2.61E+07
7.4	21	3587	520	0.49	5.79E+05	1.72E+06	2.68E+07
6.5	21	3625	537	0.49	6.17E+05	1.84E+06	2.73E+07
5.6	21	3647	557	0.49	6.65E+05	1.98E+06	2.76E+07
4.7	21	3668	583	0.49	7.29E+05	2.17E+06	2.78E+07
3.8	21	3687	618	0.49	8.16E+05	2.43E+06	2.80E+07
2.9	21	3703	656	0.48	9.20E+05	2.73E+06	2.81E+07

Siena, Dicembre 2011

Dr. Geol. Claudio Rossi

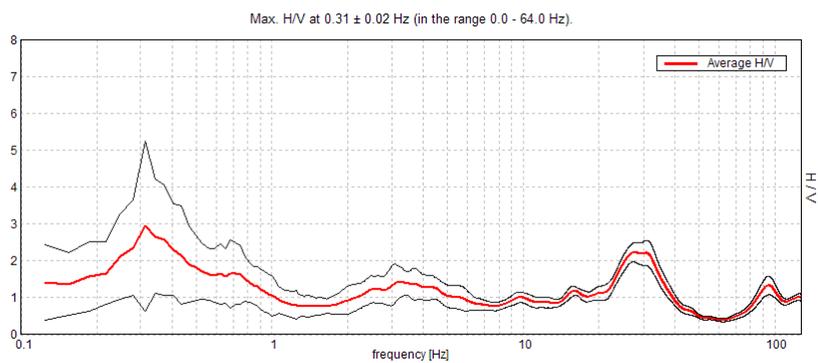


APPENDICE

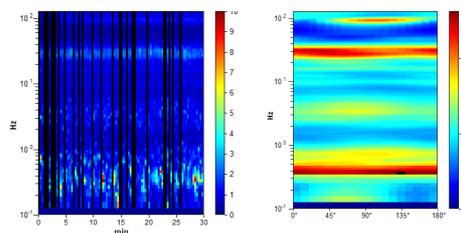


T1

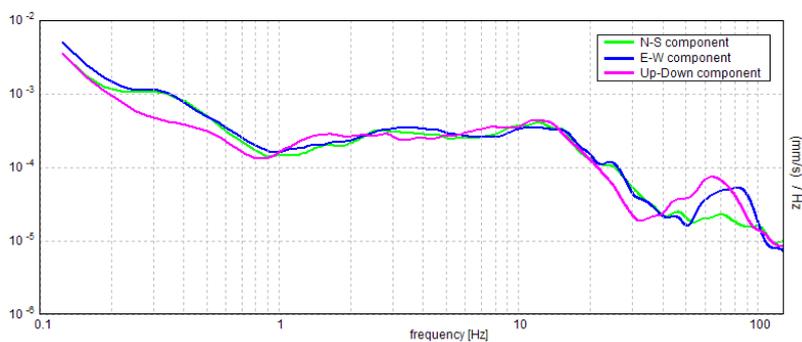
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

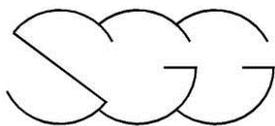


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

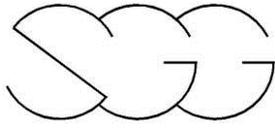




[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 0.31 ± 0.02 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

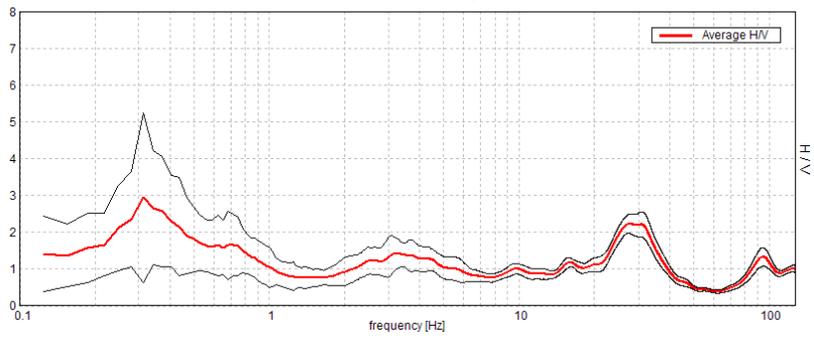
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.31 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$400.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 16 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.156 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.813 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.94 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03846 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.01202 < 0.0625$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$1.1448 < 2.5$	OK	



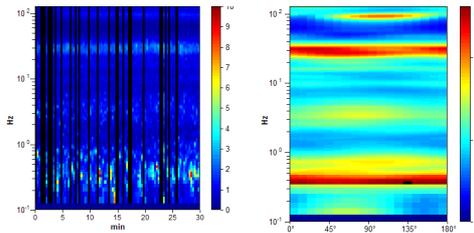
T1

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

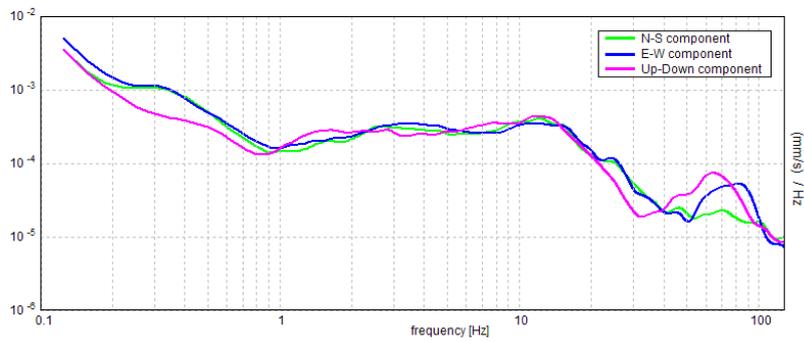
Max. H/V at 3.22 ± 0.04 Hz. (In the range 1.0 - 10.0 Hz).

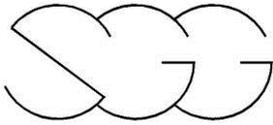


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

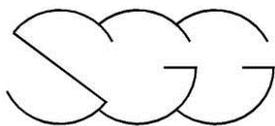




[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 3.22 ± 0.04 Hz (in the range 1.0 - 10.0 Hz).

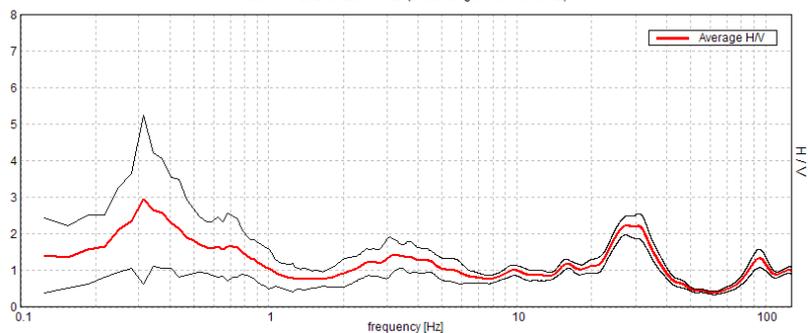
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$3.22 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$4120.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 156 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$1.42 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00557 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.01792 < 0.16094$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2139 < 1.58$	OK	



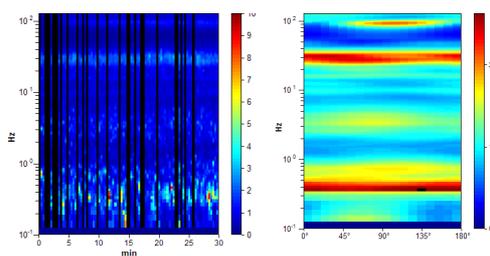
T1

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

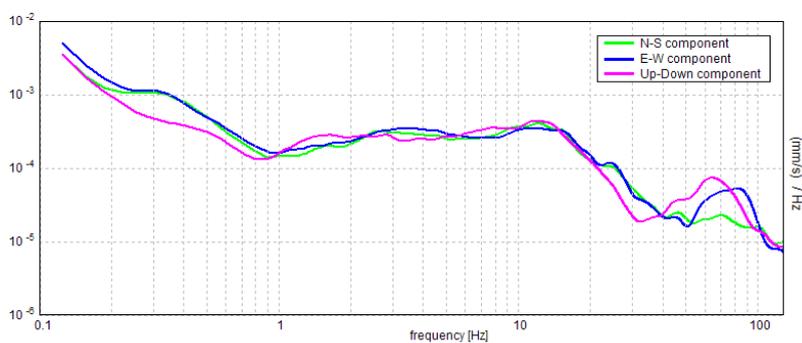
Max. H/V at 27.5 ± 0.34 Hz. (In the range 10.0 - 64.0 Hz).

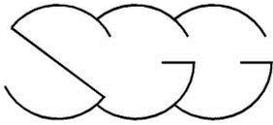


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

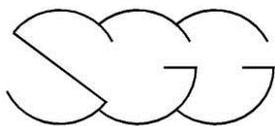




[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

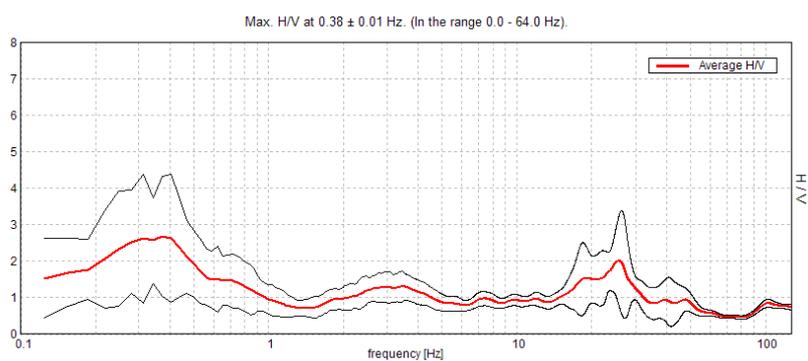
Max. H/V at 27.5 ± 0.34 Hz (in the range 10.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	27.50 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	35200.0 > 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 1321 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	19.906 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	38.438 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.23 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00619 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	0.17033 < 1.375	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.1285 < 1.58	OK	

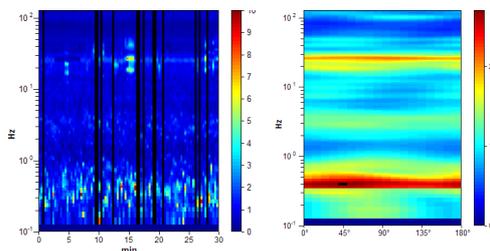


T2

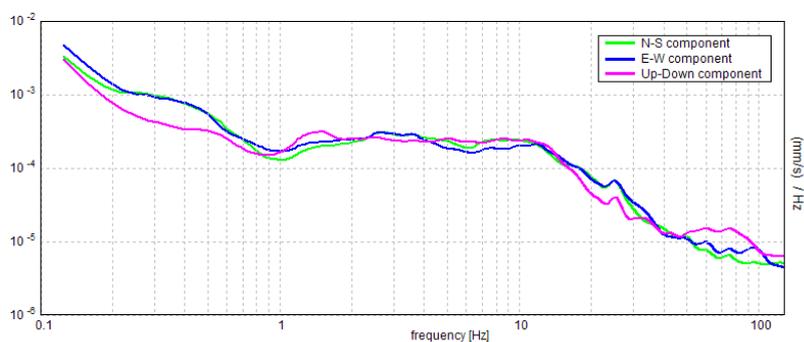
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

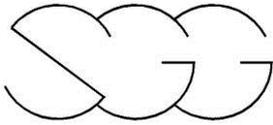


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

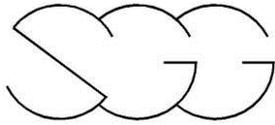
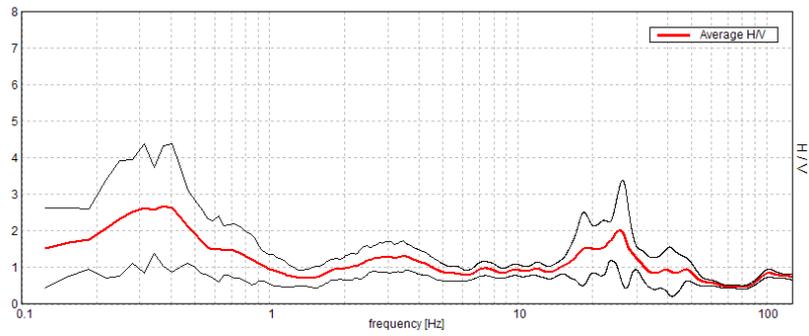
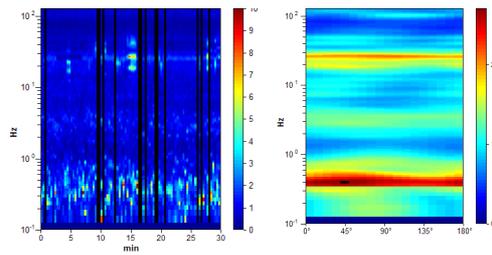
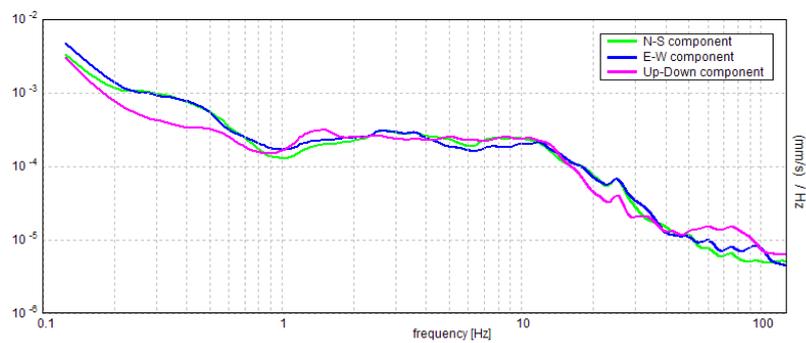


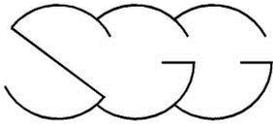


[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 0.38 ± 0.01 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.38 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$570.0 > 200$	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 19 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.094 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.813 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.69 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01949 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.00731 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.8168 < 2.5$	OK	

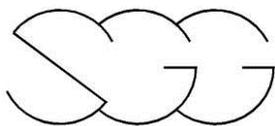
**T2****HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO**Max. H/V at 3.44 ± 0.05 Hz. (In the range 1.0 - 10.0 Hz).**H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V****SINGLE COMPONENT SPECTRA**



[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

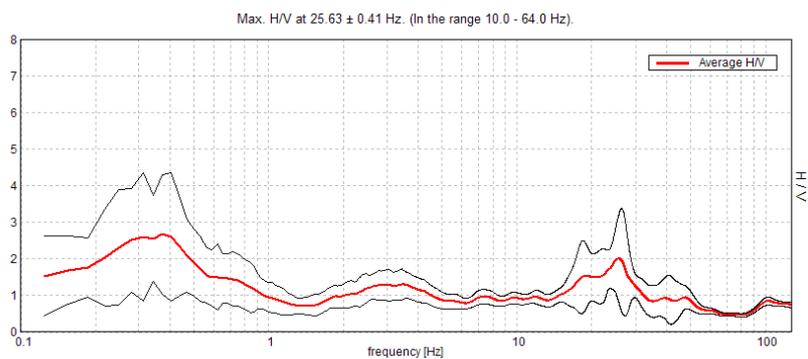
Max. H/V at 3.44 ± 0.05 Hz (in the range 1.0 - 10.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$3.44 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$5225.0 > 200$	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 166 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$1.31 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.00753 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.0259 < 0.17188$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.2111 < 1.58$	OK	

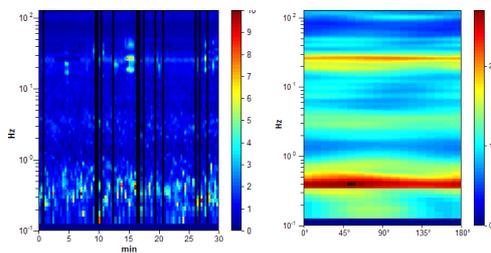


T2

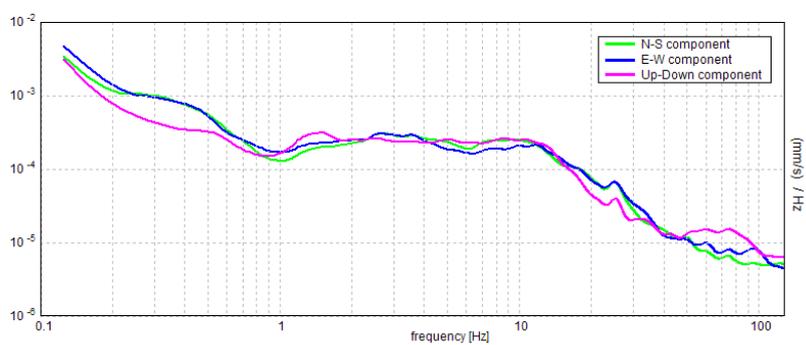
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

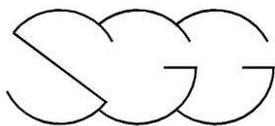


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

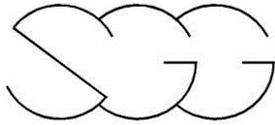




[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 25.63 ± 0.41 Hz (in the range 10.0 - 64.0 Hz).

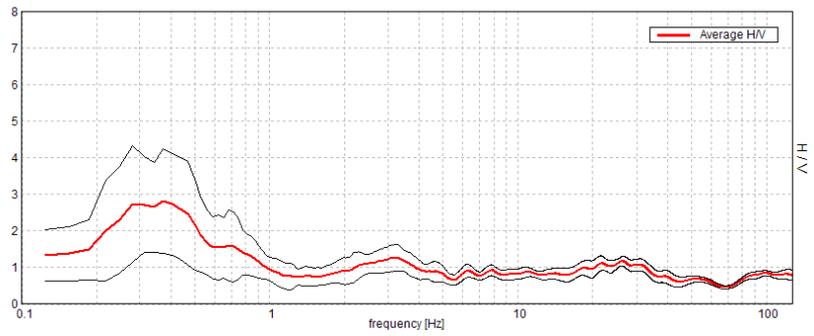
Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	25.63 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	39462.5 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 1231 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	14.813 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	32.375 Hz	OK	
$A_0 > 2$	2.01 > 2	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.00803 < 0.05	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	0.2057 < 1.28125	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.5942 < 1.58	OK	



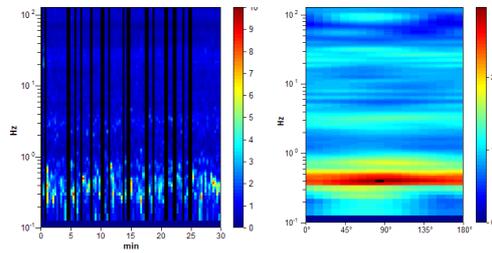
T3

HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

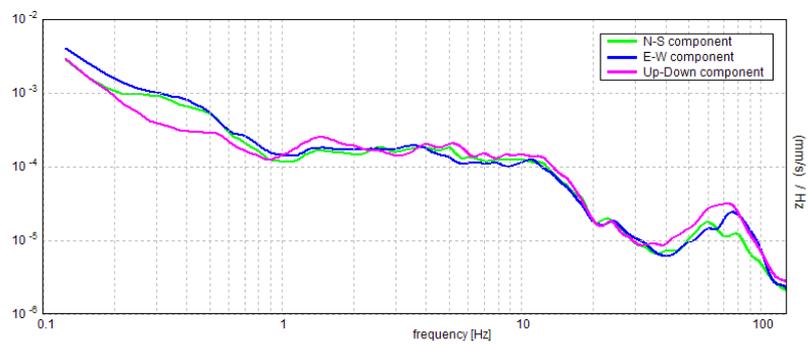
Max. H/V at 0.38 ± 0.02 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

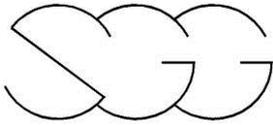


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

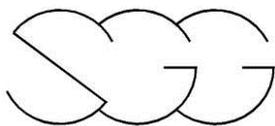




[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

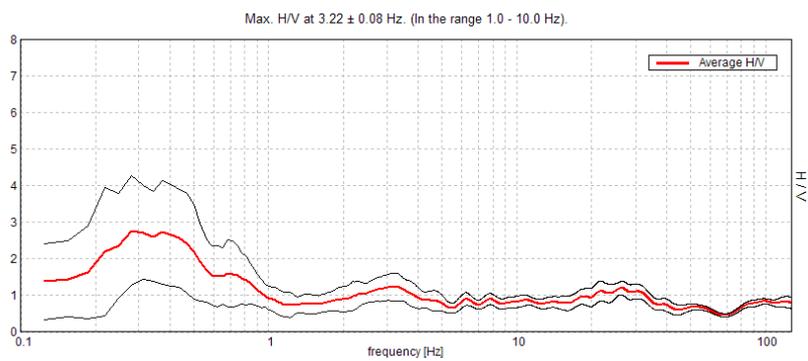
Max. H/V at 0.38 ± 0.02 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$0.38 > 0.50$		NO
$n_c(f_0) > 200$	$502.5 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Exceeded 0 out of 19 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	0.156 Hz	OK	
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	0.813 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$2.82 > 2$	OK	
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.0289 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.01084 < 0.075$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7111 < 2.5$	OK	

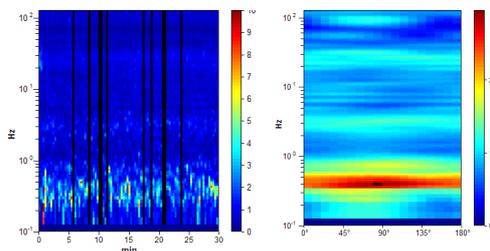


T3

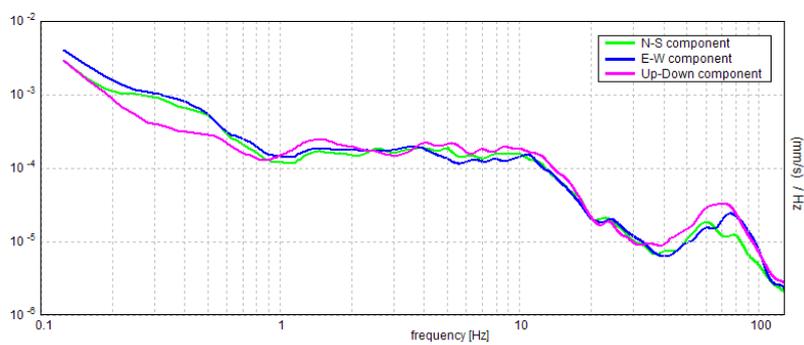
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

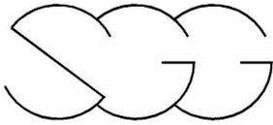


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA

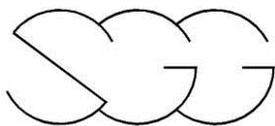




[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

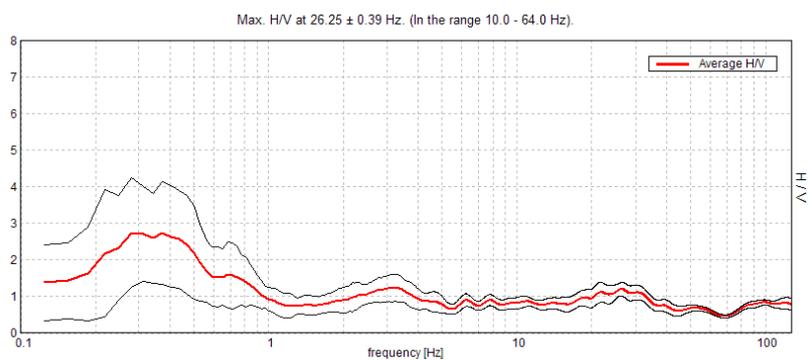
Max. H/V at 3.22 ± 0.08 Hz (in the range 1.0 - 10.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	$3.22 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$5150.0 > 200$	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 156 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$			NO
$A_0 > 2$	$1.24 > 2$		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.01305 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	$0.04201 < 0.16094$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.1881 < 1.58$	OK	

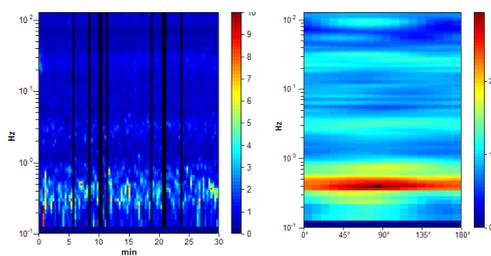


T3

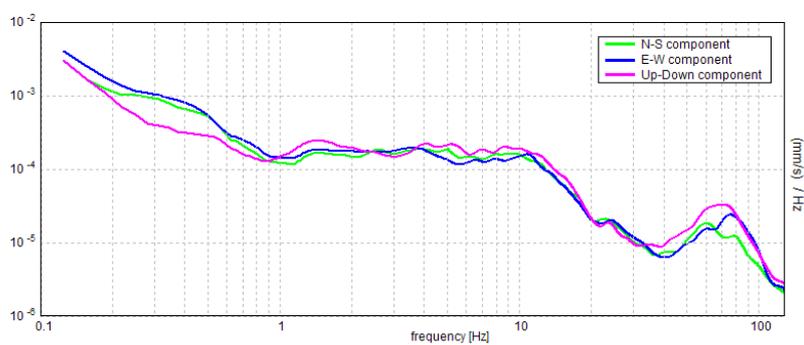
HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO

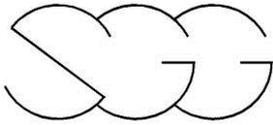


H/V TIME HISTORY DIRECTIONAL H/V



SINGLE COMPONENT SPECTRA





[According to the SESAME, 2005 guidelines. **Please read carefully the [Grilla](#) manual before interpreting the following tables.**]

Max. H/V at 26.25 ± 0.39 Hz (in the range 10.0 - 64.0 Hz).

Criteria for a reliable H/V curve [All 3 should be fulfilled]			
$f_0 > 10 / L_w$	26.25 > 0.50	OK	
$n_c(f_0) > 200$	42525.0 > 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 1261 times	OK	
Criteria for a clear H/V peak [At least 5 out of 6 should be fulfilled]			
Exists f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$			NO
Exists f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	59.719 Hz	OK	
$A_0 > 2$	1.20 > 2		NO
$f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.0074 < 0.05	OK	
$\sigma_f < \epsilon(f_0)$	0.19422 < 1.3125	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	0.0903 < 1.58	OK	