

Dott. Geol. Matteo Isotton



INDAGINI SISMICHE CON ONDE DI SUPERFICIE MASW E MICROTREMORI HVSr, ESAC e ReMi

Relazione tecnica



Spin-Off Accademico



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI TRIESTE



codice commessa	Es19081
responsabile	Roberta Zambrini
commessa	
nome documento	relazione tecnica
versione	00
data	19 Luglio 2019

Esplora S.r.l. | p.i.\cf\cciaa Trieste 01220560328 | c.d. KRRH6B9 | rea Trieste 133657 | c.s. € 15.000 i.v.
Sede legale e operativa: via E. Weiss 1 – 34128 Trieste, Italia | www.esplorasrl.it | info@esplorasrl.it |
esplorasrl@arubapec.it



sommario

1.	PREMESSA.....	3
2.	RILIEVO SISMICO CON TECNICA MASW	5
2.1.	PRINCIPI FISICI	5
2.2.	ACQUISIZIONE DATI	7
2.3.	ELABORAZIONE DATI	9
3.	RILIEVI SISMICI PASSIVI	13
3.1.	PRINCIPI FISICI	13
3.1.1	HVSR.....	14
3.1.2	ReMi.....	15
3.1.3	ESAC.....	15
3.2.	ACQUISIZIONE DATI.....	18
3.2.1	HVSR.....	18
3.2.2	ReMi.....	18
3.2.3	ESAC.....	18
3.3.	ELABORAZIONE DATI.....	20
3.3.1	HVSR.....	20
3.3.2	ReMi.....	21
3.3.3	ESAC.....	21
4.	RISULTATI.....	24
5.	ALLEGATO A-RISULTATI MASW	25
6.	ALLEGATO B-RISULTATI HVSR	26
7.	ALLEGATO C- RISULTATI REMI	34
8.	ALLEGATO D-RISULTATI ESAC.....	35

1. Premessa

La presente relazione è la sintesi finale delle indagini svolte nella località Cusighe a Belluno, in data 12 luglio 2019.

Sono state eseguite n°1 prospezioni geofisiche mediante tecnica MASW, n°1 prospezioni geofisiche mediante tecnica ESAC, n°1 prospezione geofisiche mediante tecnica ReMi e n°2 prospezioni geofisiche mediante tecnica HVSR, allo scopo di determinare il parametro normativo V_{seq} che classifica il suolo sismicamente, e verificare eventuali fenomeni di risonanza stratigrafica e fornire un profilo di velocità delle onde di taglio con la profondità.



Figura 1 Ubicazione dell'area di indagine presso località Cusighe, Belluno

L'area è costituita da un campo situato tra la Via Largo Ugo Neri a Sud e la linea ferroviaria a Nord. All'interno del campo, di dimensioni circa 100x100 metri, sono state definite le geometrie dei diversi stendimenti in maniera da interessare tutta l'area di indagine

I risultati delle indagini vengono allegati alla presente relazione.

Secondo le NTC vigenti nell'ambito progettuale, oltre alla caratterizzazione dei terreni dal punto di vista geotecnico, è prevista la caratterizzazione dei terreni mediante la determinazione del parametro V_{seq} tramite l'impiego di diverse metodologie geofisiche dirette ed indirette, che è così definito:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

con

h_i = spessore dello strato i -esimo

$V_{S,i}$ = velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato

N = numero di strati

H = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/sec

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Di seguito si riporta la tabella di riferimento:

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tabella 1 Categorie del sottosuolo

2. Rilievo Sismico con Tecnica MASW

2.1. Principi fisici

Il metodo di indagine MASW consente la classificazione sismica dei suoli in quanto fornisce il profilo di velocità entro i primi 30 metri di profondità. Questa tecnica è da considerarsi metodo attivo in quanto le onde che vengono registrate sono prodotte dall'operatore.

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla dispersione delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo. Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh (rispetto a quelle di Love), che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. Nel metodo MASW, molto simile al metodo a rifrazione, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono registrate da uno stendimento lineare di geofoni collegati ad un sismografo. Questo metodo generalmente consente di ottenere una distribuzione delle velocità in funzione della frequenza, cioè la curva di dispersione di cui vedasi qualche esempio nelle immagini sottostanti. La dispersione è una deformazione di un treno d'onde dovuta ad una variazione di propagazione di velocità con la frequenza e come regola generale le componenti a frequenza minore penetrano più in profondità rispetto a quelle a frequenza maggiore.

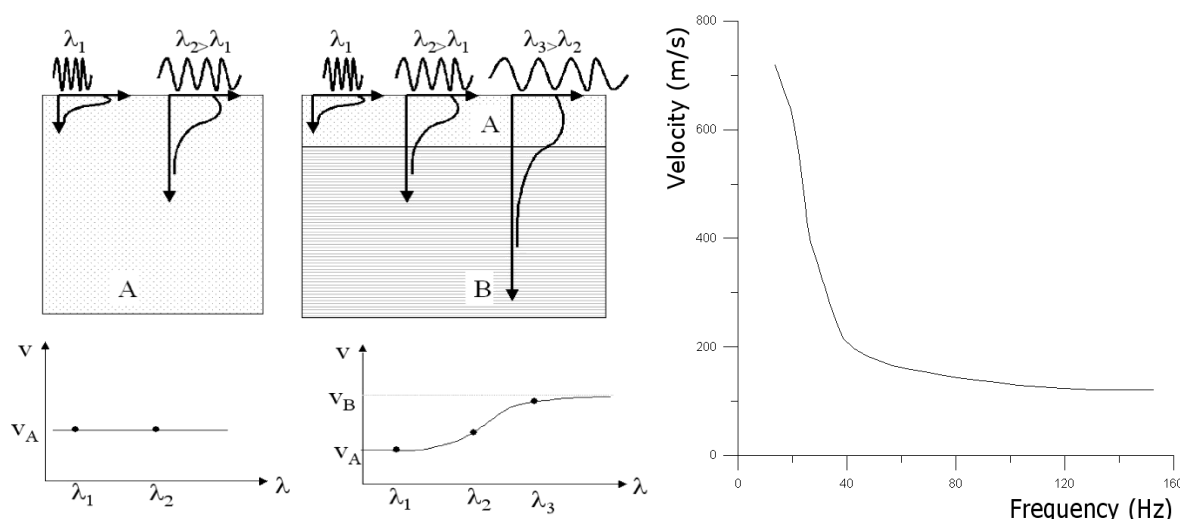


Figura 2 curve di dispersione in funzione di lunghezza d'onda e frequenza – caso A mezzo non stratificato – caso B mezzo stratificato

In pratica l'ondina sismica, inizialmente compatta, durante la sua propagazione in un mezzo stratificato si disperde perdendo la sua compattezza. Il segnale "si spalma" in profondità in quanto talune componenti viaggiano a velocità superiori ad altre. Nelle indagini MASW e ReMi le velocità che si vanno a definire e ad analizzare si riferiscono a precise frequenze e vengono dette velocità di fase.

Queste considerazioni sono vere fino a circa un valore pari a $\lambda/3$ (*STEADY STATE APPROXIMATION*), ed è il motivo per il quale vengono utilizzate le onde di superficie (in particolare Rayleigh), poiché esiste entro questa profondità un'analogia fra onde di superficie e onde di taglio, più complesse da registrare, e per la quale le loro velocità sono molto simili ($V_r = 0.9V_s$).

La densità e la velocità delle onde di pressione sono in questo caso marginali (Dal Moro, 2012).

Il calcolo del profilo delle velocità delle onde Rayleigh dal rapporto Velocità/frequenza, può essere convertito mediante opportuni software.

E' bene considerare che la relazione è $\lambda = V/f$, e che per avere penetrazione almeno fino a 30m in terreni con Velocità di fase pari a 250m/s occorre avere frequenze minori di 3Hz.

L'elaborazione del dato di onde di superficie, consiste sostanzialmente in tre fasi:

- 1) la prima fase prevede il calcolo dello spettro della velocità di fase apparente sperimentale che si estrae dallo spettro nel dominio frequenza-numero d'onda; per ogni prefissata frequenza f si cerca il numero d'onda k per il quale lo spettro raggiunge un massimo; la corrispondente velocità di fase apparente è data dalla formula:

$$c(\omega) = 2\pi f/k_{max}$$

I massimi dello spettro $f-k$ determinano quindi lo spettro di velocità nel grafico velocità di fase-frequenza, sul quale verrà effettuato il picking per determinare la curva di dispersione sperimentale.

- 2) la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica, applicando la trasformata di Fourier alla Funzione di Green o Funzione di Trasferimento del semispazio stratificato, nota in forma analitica (Aki, K. And Richards, P. G., 1980) nel dominio spazio-frequenza;
- 3) la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente il numero, lo spessore h , il coefficiente di Poisson degli strati che costituiscono il modello di sottosuolo, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la curva di dispersione sperimentale e la curva di dispersione numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

In genere, quando l'errore relativo tra curva sperimentale e curva numerica è compreso tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio V_s e quindi il tipo di suolo sismico rappresentano una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico.

La curva di dispersione sperimentale non è però quasi mai univoca, ma l'energia si distribuisce diversamente alle varie frequenze, ossia il terreno presenta più "modi" di vibrare oltre quello fondamentale.

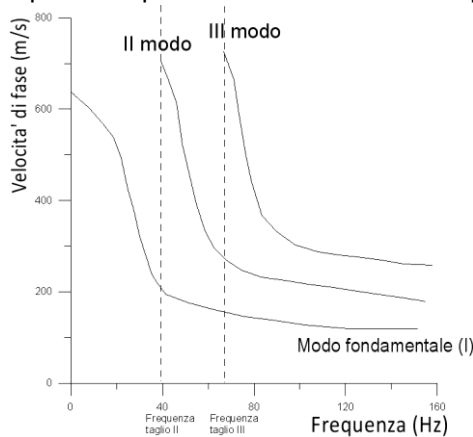


Figura 3 curve di dispersione dei vari modi di vibrazione del terreno

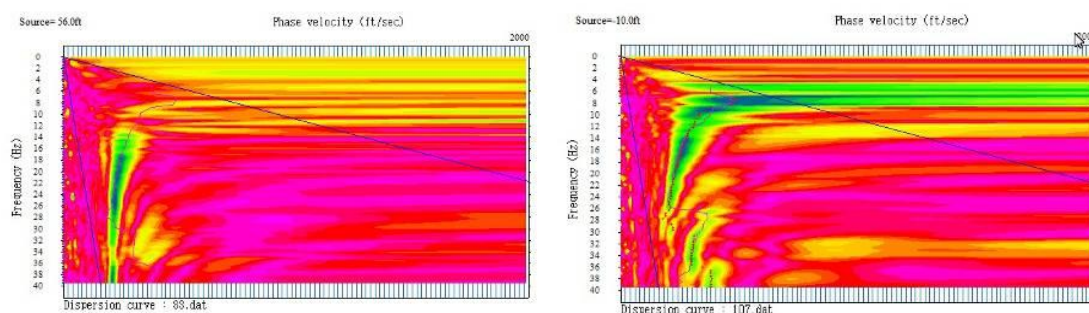


Figura 4 spettri di velocità sperimentali in cui domina nella prima immagine il modo fondamentale e nella seconda sono presenti anche i modi superiori

In genere la difficoltà sta nell'eseguire il "picking" della curva di dispersione del modo fondamentale e non nei modi superiori (che forniscono velocità più elevate) poichè non sempre è ben visibile in particolare in profondità. E' buona prassi fare stendimenti medio lunghi o prove con tecniche diverse, ad esempio REMI, ESAC o HVSR che consentono di analizzare frequenze minori per arrivare in profondità.

2.2. Acquisizione dati

L'acquisizione dei dati è stata effettuata con lo strumento "GEODE - Geometrics" a 24 canali. Il GEODE è uno strumento modulare, alimentato con batterie esterne da 12 Volt, guidato da una unità di controllo esterna (PC portatile).

Le caratteristiche principali dello strumento sono le seguenti:

- 24 bit di risoluzione
- Larghezza di banda: 1.75 Hz – 20000 Hz
- Intervalli di campionamento da 0.02 ms. (50000 campioni/secondo) a 16 ms.
- Range dinamico di sistema 144 dB (110 dB misurato, a 2 ms.)
- Distorsione: 0.0005%
- Consumo: 7 Watts/12 canali
- Tenuta stagna a prova di immersione
- Accuratezza del trigger: 1/32 del passo di campionamento
- Software per l'acquisizione e per l'interpretazione di dati a rifrazione e a riflessione incluso nel sistema operativo (SGOS), guidato dal Seismodule controller software caricato su PC portatile
- Sorgente di energia e funzione trigger

L'energia viene inviata al terreno con una massa battente (mazza) di kg 10, collegata da un cavo al GEODE. Sul manico della mazza è montato un dispositivo che invia allo strumento il segnale che dà inizio alla registrazione. La funzione di trigger è data da un circuito elettrico che si chiude quando la massa battente colpisce la piastra, permettendo al sistema di iniziare la registrazione. Lo strumento di registrazione permette di sommare i segnali provenienti da più battute successive, al fine di massimizzare il rapporto segnale/rumore.

Lo stendimento utilizzato per l'analisi della dispersione delle onde di superficie presenta le seguenti caratteristiche:

- Lunghezza = 69m;
- Distanza intergeofonica = 3m;
- Energizzazioni mediante mazza: -8m, 77m;

Sono stati utilizzati n°24 geofoni, e la frequenza di campionamento adottata è stata di 1000 Hz. Per attenuare il rumore incoerente, per ogni punto di energizzazione, è stato effettuato uno stacking verticale con un numero di battute maggiore o uguale a 5.

Per la generazione delle onde di Rayleigh è stata utilizzata una piastra di battuta metallica (configurazione ZVF), mentre per la generazione delle onde di Love è stata utilizzata una traversina in legno (configurazione THF) (vedi Hermann, 2003; Dal Moro & Ferigo, 2011).



Figura 5 Fasi di acquisizione



Figura 6 ubicazione dello stendimento MASW

2.3. Elaborazione dati

Per l'analisi dei dati si è adottato il software WinMASW Academy della Eliosoft.

I dati MASW relativi tanto alle onde di Rayleigh che di Love (tracce sperimentali + spettri di velocità) vengono riportati in Figura 7. Generalmente, i dati relativi alle onde di Rayleigh presentano uno spettro di velocità ove onde guidate e diffrazioni rendono più difficoltoso procedere ad un'interpretazione (e.g. Safani et al., 2005) con predominanza dei vari modi superiori rispetto a quello fondamentale, rispetto alle onde di Love, le quali tipicamente presentano spettri di velocità meno affetti da queste problematiche (Safani et al., 2005; Dal Moro, 2011; Dal Moro & Ferigo, 2011).

Nei dati acquisiti, tale situazione si verifica principalmente per frequenze superiori a circa 18 Hz; tuttavia, in entrambi i dataset (Rayleigh e Love) il modo fondamentale risulta chiaramente riconoscibile.

Come primo approccio, è stata effettuata una modellazione diretta, a partire dalle conoscenze stratigrafiche note, cercando la maggiore coerenza possibile tra la distribuzione di energia nello spettro di velocità e le curve di dispersione teoriche del modello generato (Figura 8).

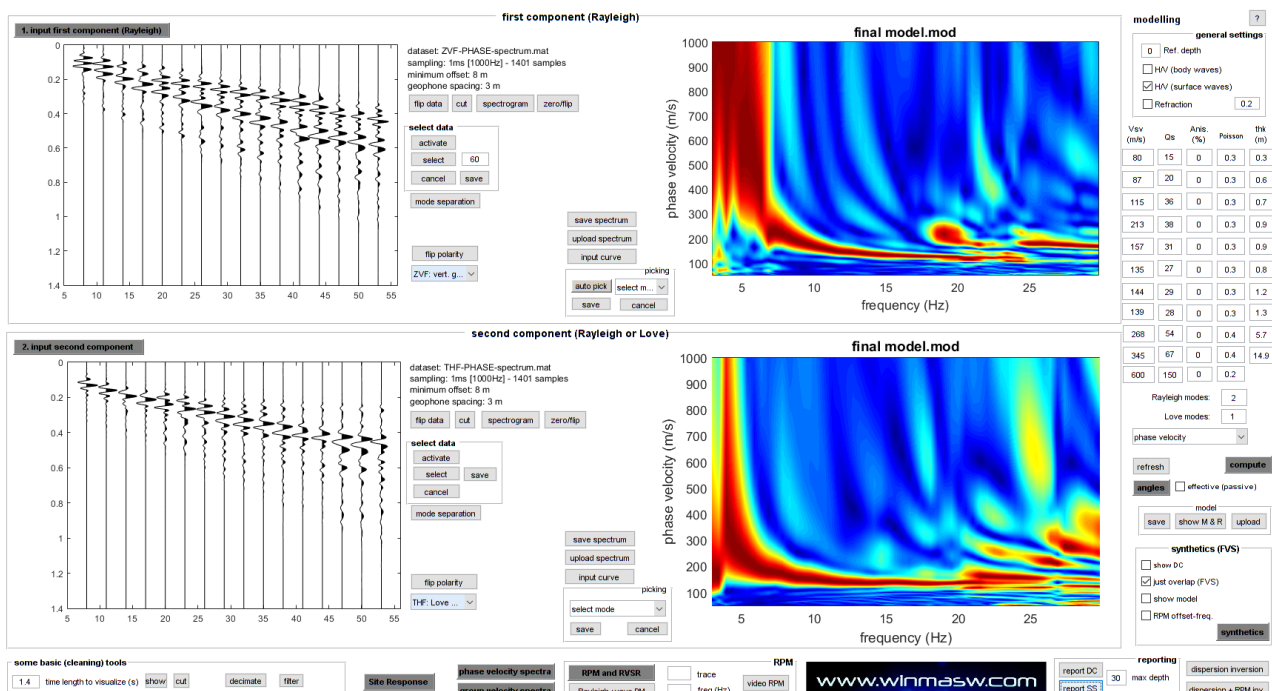


Figura 7 Dati MASW - il pannello riporta in alto le tracce e lo spettro di velocità relativi alla componente ZVF (onde di Rayleigh), mentre in basso riporta le tracce e lo spettro di velocità relativi alla componente THF (onde di Love).

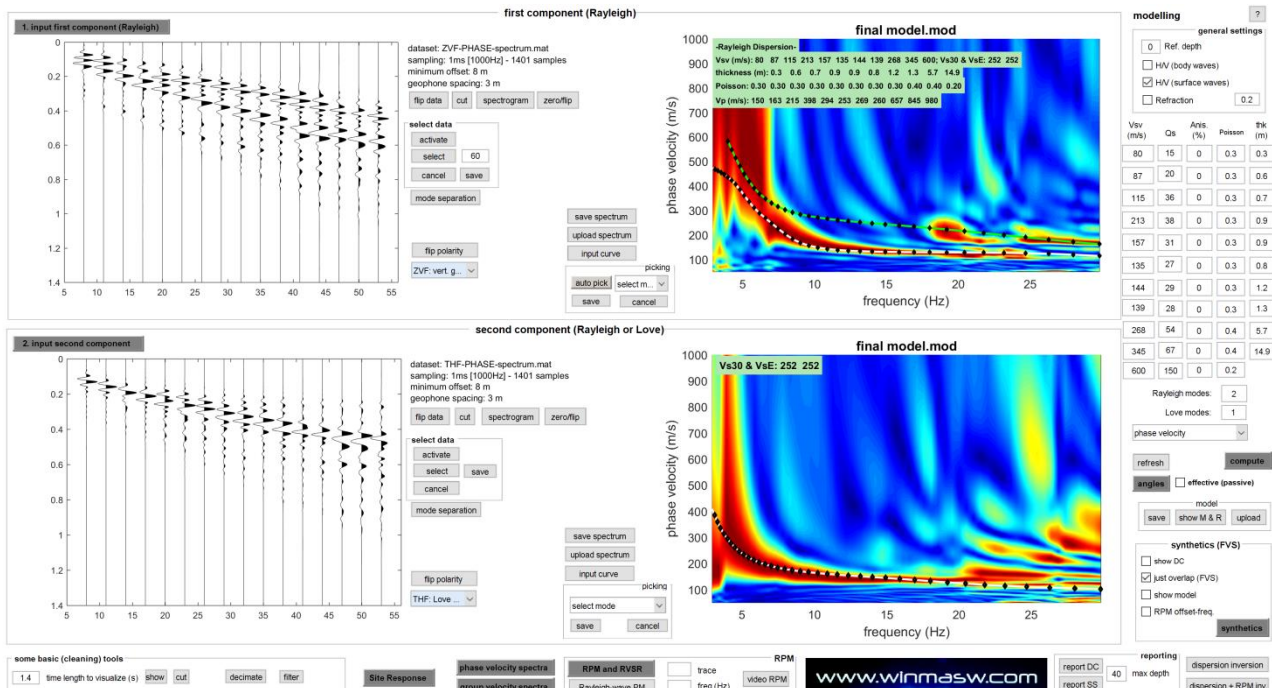


Figura 8 Dati MASW - il pannello riporta in alto le tracce e lo spettro di velocità relativi alla componente ZVF (onde di Rayleigh), mentre in basso riporta le tracce e lo spettro di velocità relativi alla componente THF (onde di Love). In evidenza sugli spettri di velocità le curve di dispersione teoriche del modello generato.

Il modello generato in questa prima fase è rappresentato in Figura 9.

Vsv (m/s)	Qs	Anis. (%)	Poisson	thk (m)
80	15	0	0.3	0.3
87	20	0	0.3	0.6
115	36	0	0.3	0.7
213	38	0	0.3	0.9
157	31	0	0.3	0.9
135	27	0	0.3	0.8
144	29	0	0.3	1.2
139	28	0	0.3	1.3
268	54	0	0.4	5.7
345	67	0	0.4	14.9
600	150	0	0.2	

Rayleigh modes: 2
Love modes: 1

Figura 9 Dati MASW – Modello di sottosuolo generato nella fase di modellazione diretta.

L'approccio FVS (Full Velocity Spectrum) basato sull'analisi dell'intero spettro di velocità senza passare attraverso una fase di interpretazione in termini di curve di dispersione modali ha anch'essa evidenziato un buon *misfit* tra gli spettri di velocità dei dati di campagna e le tracce sintetiche precedentemente calcolate (Figura 10).

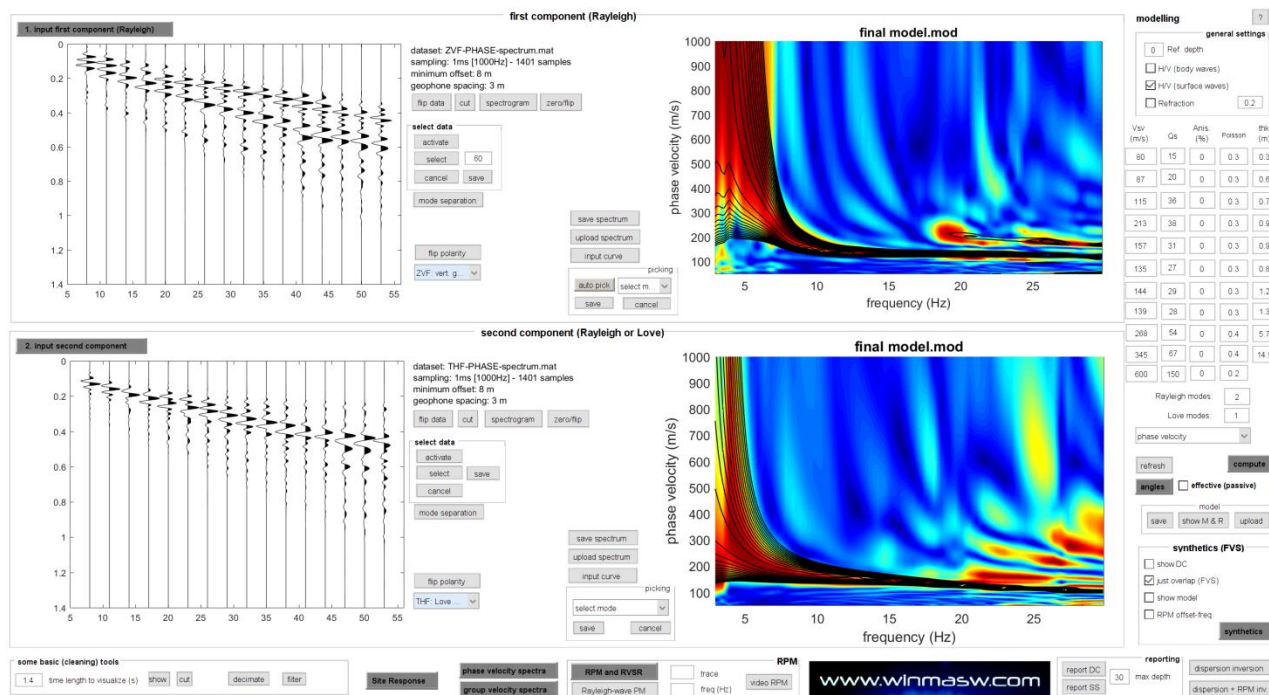


Figura 10 Dati MASW – Spettri di velocità dei dati di campagna e linee di contour relative allo spettro del modello calcolato.

Lo stesso modello ha fornito un buon *misfit* con la misura HVSR BEL-1 (Figura 11).

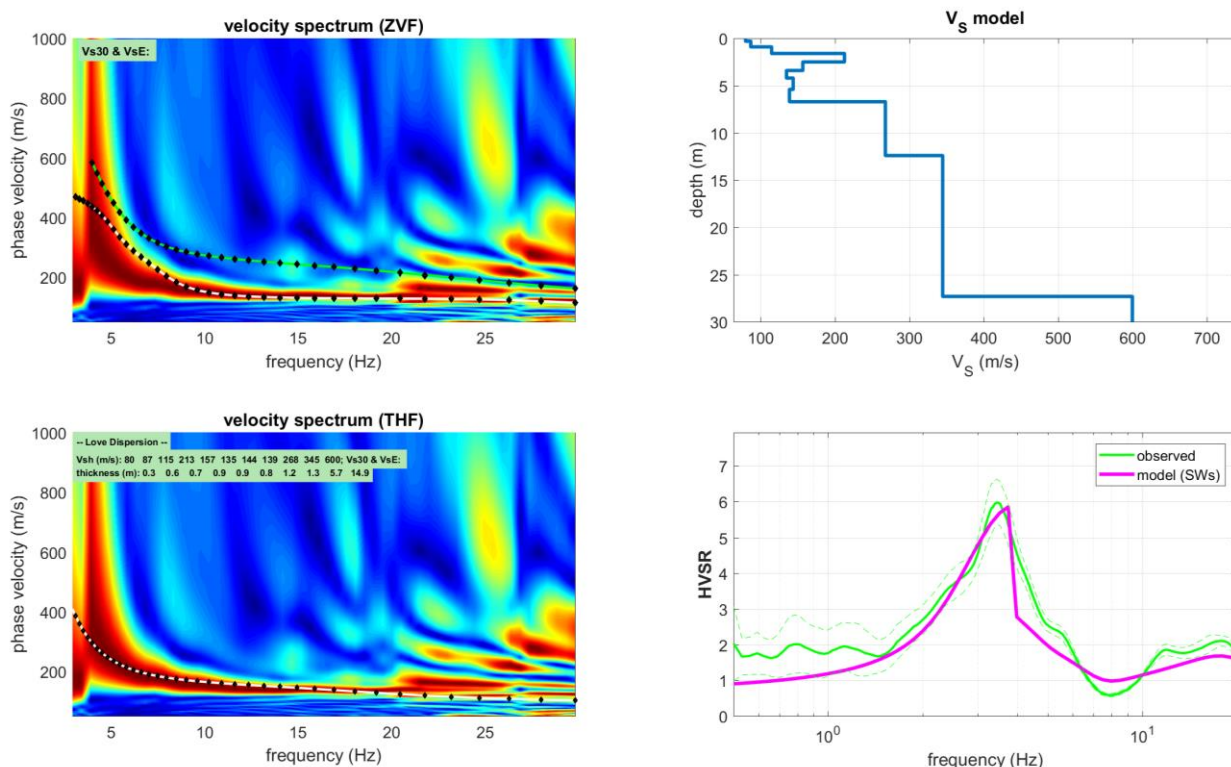


Figura 11 Dati MASW – a sx, spettri di velocità e curve di dispersione, a dx profilo V_s e confronto tra curva teorica e sperimentale HVSR del modello generato.

A partire dal modello di partenza, si è successivamente passati all'inversione congiunta dei dati MASW (in particolare le onde di Love, le quali tipicamente presentano spettri di velocità meno affetti dalle problematiche che affliggono invece le onde di Rayleigh) e i dati HVSR BEL-1, per i cui risultati grafici si rimanda al Capitolo 5.

Il modello da inversione così ottenuto ha sostanzialmente confermato quanto già delineato con il modello diretto, evidenziando in generale la presenza di terreni a grana fina scarsamente consistenti ($V_s < 180$ m/s) fino ad una profondità di circa 6,7÷6,9m dal piano campagna.

Al di sotto di questo primo strato, i depositi incrementano il loro grado di addensamento ($V_s > 266$ m/s) in maniera pressoché graduale fino al substrato geologico ($V_s \geq 600$ m/s), presente a profondità comprese tra i 25 e i 30m, il quale tuttavia non risulta substrato sismico, in quanto le V_s al suo interno non superano gli 800m/s (substrato marnoso-arenaceo – rocce tenere).

Il valore V_{s30} relativo al modello più vicino ai dati sperimentali ("Minimum distance model") è risultato essere pari a 248m/s, mentre quello medio ("Mean Model") è risultato essere pari a 254m/s.

Nel complesso, si ritiene di poter classificare il terreno come appartenente alla categoria C, secondo le nuove NTC 2018.

3. Rilievi Sismici Passivi

3.1. Principi fisici

I metodi sismici passivi HVSr (Horizontal to Vertical Spectral Ratio). e ReMi (Refraction Microtremors) si basano entrambi sull'analisi di registrazioni di microtremori ambientali. In particolare il primo metodo valuta quali siano le frequenze amplificate in caso di sisma, mentre il secondo è analogo al metodo descritto nel precedente capitolo MASW e fornisce un profilo di velocità delle onde di taglio in profondità, e permette di determinare il parametro Vs30.

Il tremore sismico esiste ovunque sulla superficie della Terra ed è costituito principalmente da onde superficiali, anche se nella realtà, la vera natura del fenomeno non è perfettamente chiara. E' prodotto essenzialmente dal vento e dalle onde marine ma anche l'attività industriale o il traffico stradale generano questo tipo di tremore la cui frequenza si attenua allontanandosi dalla sorgente. Esiste uno spettro caratteristico per il cosiddetto "rumore di fondo" legato al moto ondoso oceanico i cui effetti si propagano per migliaia di km a cui si aggiungono gli effetti locali dovuti a sorgenti di natura artificiale. L'aspetto più interessante è che il tremore o rumore sismico agisce come sorgente di eccitazione per la risonanza del sottosuolo e degli edifici.

Per rumore sismico di fondo si intende quindi una sollecitazione il cui spettro è ugualmente ricco in tutte le frequenze. Un'amplificazione di una determinata frequenza dovrebbe quindi essere legata ad un effetto di sito. Tale frequenza è da considerarsi come la frequenza di oscillazione predominante di quel terreno, che, per evitare pericolosi fenomeni di risonanza, dovrebbe essere sufficientemente diversa da quella delle strutture. E' infatti noto che il verificarsi di fenomeni di risonanza può causare un incremento dei danni subiti dalle strutture. La possibilità di utilizzare i microtremori per predire la risposta sismica in un sito in caso di sisma non è ancora ben definita ed oggetto di dibattiti scientifici.

Il metodo dei microtremori (Kanai e Tanaka, 1961; Iwasaki e Sukamoto, 1977) si basa sull'assunto che in ogni sito la curva di distribuzione dei periodi dei microtremori mostra una buona correlazione con quella ottenuta da registrazioni di terremoti effettuate nello stesso sito. Secondo questa ipotesi, è sufficiente registrare il rumore sismico di fondo presente in un sito per predire la forma dello spettro di un terremoto distruttivo; in particolare il periodo predominante di un terremoto dovrebbe essere strettamente connesso con quello dei microtremori.

Dal punto di vista analitico si ha che: se in una certa area il rumore ambientale è costante, cioè, non vi sono sorgenti di rumore antropico localizzato e predominante, $N(w)$ rappresenta lo spettro di tale rumore quale verrebbe misurato direttamente al bedrock.

In superficie si avrà nei diversi punti 1, 2,..., k:

$$N_1(w) = N(w) * H_1(w), N_2(w) = N(w) * H_2(w), \dots, N_k(w) = N(w) * H_k(w)$$

dove $H_1(w), H_2(w), \dots, H_k(w)$ sono le funzioni di trasferimento (caratteristica del terreno) dei siti 1, 2, ..., k. Supponendo che nei precedenti siti incidano le onde sismiche generate da un terremoto a distanza notevolmente maggiore rispetto alla distanza tra i punti di osservazione ed essendo $A(w)$ lo spettro del terremoto al bedrock (indifferentemente accelerazione, velocità o spostamento), in superficie si otterrà:

$$A_1(w) = A(w) * H_1(w), A_2(w) = A(w) * H_2(w), \dots, A_k(w) = A(w) * H_k(w)$$

Ipotizzando che $H_1(w), H_2(w), \dots, H_k(w)$ siano le stesse in caso di debole o di forte movimento del suolo, si ha:

$$A_1(w)/N_1(w) = A_2(w)/N_2(w) = \dots = A_k(w)/N_k(w) \text{ e di conseguenza } A_2(w)/A_1(w) = N_2(w)/N_1(w) = H_2(w)/H_1(w)$$

In pratica ciò significa che il rapporto spettrale tra due siti è uguale sia per registrazioni del rumore di fondo che per sollecitazioni prodotte da forti terremoti. Quindi, si può ricavare la risposta di un generico sito k-esimo ad un evento sismico, noto lo spettro dei microtremori nei siti 1 e k, che sarà data da:

$$A_k(w) = N_k(w) * (A_1(w)/N_1(w)).$$

Da notare che la stabilità temporale nello spettro del microtremore è quindi la condizione necessaria per l'applicabilità di tale metodo ai fini della determinazione del periodo proprio dei terreni superficiali del sito in prospettiva di protezione sismica.

3.1.1 HVSR

La tecnica HVSR .è stata applicata per la prima volta da Nogoshi e Igarashi nel 1970 e successivamente ripresa e resa celebre da Nakamura nel 1989 che la utilizzò come metodologia per la determinazione dell'amplificazione sismica locale.

La cosiddetta tecnica di Nakamura (HVSR) valuta il rapporto spettrale tra le componenti orizzontali e verticali del moto (rapporto H/V).e consente di stimare in via qualitativa e, attraverso procedure semplificate di inversione, le funzioni di amplificazione dei suoli dalle misure di tremore ambientale. Le principali assunzioni implicite in questa metodologia sono che i microtremori derivano sia da onde di volume SH incidenti verticalmente e sia da onde superficiali (prevalentemente di Rayleigh, Lachet and Bard,1994) e che la componente verticale (V) del noise nel passare dal bedrock alla superficie non subisce amplificazione.

Se assumiamo che in un semispazio di terreno due strati differiscano, in modo rilevante, in termini di velocità sismica e densità (contrasto di impedenza acustica), e che la risonanza sia legata alla lunghezza d'onda incidente pari a 4 volte lo spessore h del primo strato (ipotesi $\lambda/4$), si può ricavare una stima della profondità del rifrattore sismico dal riconoscimento della frequenza di risonanza propria del sottosuolo (Ibs-Von Seht e Wohlenberg, 1999).

Dunque il riconoscimento della frequenza di risonanza propria del sito, ricavato dal rapporto spettrale H/V del rumore sismico, permette, nota una stima delle V_s , la determinazione delle profondità dell'orizzonte sismicamente riconoscibile.

Il metodo di Nakamura è stato adottato, negli ultimi anni da vari autori per la stima della risposta di sito, con risultati e valutazioni sul metodo spesso contrastanti.

In generale a tale metodo viene riconosciuta la capacità di prevedere il primo modo di vibrazione dei terreni, con qualche imprecisione nella stima della ampiezza (Gallipoli et al., 2000: Mucciarelli e Gallipoli, 2000, Castellaro et al., 2005).

La risonanza è un fenomeno fisico che interviene quando si verifica una variazione di impedenza acustica I tra due mezzi ($I=pv$, dove p è la densità del mezzo attraversato e v è la velocità di propagazione delle onde sismiche nello stesso). Nell'esempio semplificato di un sistema omogeneo e isotropo a due strati, quando all'interfaccia tra i due mezzi il rapporto delle impedenze supera il 25%, si genera un picco sulla curva del rapporto spettrale H/V in corrispondenza della frequenza di risonanza del sito (f_0). Tale frequenza dipende dalla profondità dell'interfaccia che genera il contrasto di impedenza (H) e dalla velocità media di propagazione delle onde di taglio (V_s) nello strato superficiale secondo la formula $f_0=V_s/4H$.

Da ciò ne consegue che, a parità di V_s dello strato più superficiale, maggiore è la frequenza del picco di risonanza del sito e minore è la profondità della discontinuità che lo genera all'interno del sottosuolo.

Viceversa, l'assenza di picchi di risonanza significativi sulla curva del rapporto spettrale H/V, indica sostanziale omogeneità all'interno del sottosuolo. Tale situazione si verifica o in siti su roccia o in siti in cui la velocità di propagazione delle onde di taglio aumenta gradualmente con la profondità, senza significative variazioni di impedenza all'interno dello stesso.

Tuttavia, se la velocità delle onde di taglio per lo strato superficiale non è nota, esistono infinite soluzioni tutte ugualmente valide; per ovviare a tale problema e fornire un profilo di velocità con la profondità, è necessario vincolare la curva H/V; per fare ciò occorre tarare le indagini HVSR, effettuando una misura in corrispondenza di un punto in cui è nota la profondità di un orizzonte da prove dirette (sondaggi o prove penetrometriche) e riconoscere il rispettivo marker sulla curva H/V. Solo in questo modo è possibile conoscere la V_s dello strato superficiale ed estendere in maniera areale le indagini effettuate.

L'ulteriore ipotesi che il rapporto spettrale H/V possa ritenersi una buona approssimazione dell'ellitticità del modo fondamentale della propagazione delle onde di Rayleigh, permette di confrontare questi due al fine di ottenere una stima della validità del profilo stratigrafico calcolato. I due picchi localizzati a frequenze vicine tra loro, unitamente alla forma delle due curve (rapporto spettrale H/V e curva di ellitticità) che mostrano un andamento "simile", rappresentano un buon indicatore della validità del modello proposto.

Il grafico HVSR è generalmente un grafico frequenza–ampiezza del rapporto H/V ma non è detto che ciascun picco nel grafico H/V corrisponde ad un livello stratigrafico poiché per essere tale deve sottostare ad alcune regole (Dal Moro, 2012):

- un picco di origine antropica ha due differenti specificità – è più stretto in termine di frequenza ed è determinato dal fatto che tutte e tre le componenti mostrino un picco con la componente verticale di minore ampiezza (fattore che fa aumentare il rapporto H/V);
 - Nello spettro delle componenti, il picco litostratigrafico ha la componente verticale che scende rispetto a quelle orizzontali, lungo un non limitato range di frequenze (forma a ogiva del segnale).
- Inoltre, maggiore è il contrasto di impedenza, maggiore è l'ampiezza attesa del picco H/V sebbene la relazione tra le due variabili non sia lineare.

È ovvio che il numero di picchi visibili in un grafico HVSR dipende dal contrasto, dalla distanza tra le due discontinuità e dalla funzione di lisciamento impiegata. Un contrasto basso tra due discontinuità vicine le renderà difficilmente individuabili singolarmente ed allo stesso tempo un lisciamento ampio, agendo da filtro passa basso, renderà coalescenti le discontinuità minori. Per le stesse ragioni l'aumento del lisciamento porta anche ad una diminuzione dell'ampiezza assoluta di ciascun picco.

3.1.2 ReMi

Con questa metodologia, nota come ReMi (Refraction Microtremors), si acquisiscono i segnali dei microtremori rifratti ambientali e si ricostruisce il profilo verticale delle velocità delle onde sismiche di taglio (V_s) con procedimenti di modellazione diretta delle velocità di fase delle onde relative ai rumori sismici locali, rifratte alla superficie.

Come per il metodo MASW vengono usate le onde superficiali di Rayleigh per la determinazione dei parametri di comportamento meccanico dei terreni a bassi livelli di deformazione, modulo di taglio e coefficiente di smorzamento, e il metodo si basa sulle proprietà dispersive che queste onde subiscono durante l'attraversamento di tali terreni.

La metodologia permette di raggiungere livelli di profondità generalmente compresi fra 1/4 e 1/3 della lunghezza dello stendimento dei geofoni poiché registrando microtremori in generale lo spettro è caratterizzato meglio alle basse frequenze rispetto alle MASW. Inoltre, lo studio analitico del metodo ReMi consente di operare favorevolmente in ambienti fortemente inquinati da rumori urbani e/o industriali.

3.1.3 ESAC

Il metodo di indagine ESAC (Extended Spatial Autocorrelation Method) è basato sul risultato di Aki (1959) secondo il quale la funzione di correlazione media fra le registrazioni di un rumore isotropo effettuate su sensori verticali distribuiti nelle diverse direzioni a parità distanza r da un sensore centrale, ha una forma nota (funzione di Bessel del primo ordine).

$$\overline{\rho}(r, \omega_0) = J_0\left(\frac{\omega_0 r}{c(\omega_0)}\right)$$

La forma di questa funzione di Bessel ad una data frequenza ed una data distanza r è controllata dal valore della velocità di fase.

Nel metodo ESAC si registra, quindi, il segnale relativo a microtremori spontaneamente presenti nell'ambiente, cioè sollecitazioni di qualsiasi origine, provenienti da sorgenti ignote e isotropiche (disposte in tutte le direzioni) rispetto ad uno stendimento sismico non lineare. In assenza di spazi sufficientemente lunghi e in presenza di ambienti urbanizzati, acquisizioni con stendimenti 2D (a "L", croci o cerchi) e di breve durata, consentono in maniera speditiva ed economica l'analisi del microtremore sismico. L'acquisizione secondo una geometria bidimensionale ovvia ad alcuni problemi legati alle velocità apparenti, presenti nei dati acquisiti mediante array unidirezionali (ReMi).

Uno stendimento ESAC è realizzato mediante l'utilizzo della classica strumentazione per l'esecuzione di una prospezione sismica a rifrazione con geofoni a componenti verticale da 4,5 Hz disposti secondo una geometria 2D (a "L", croci o cerchi – Figura 12).

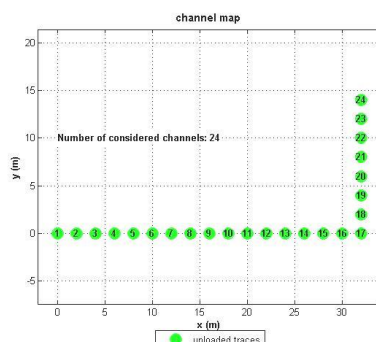


Figura 12 esempio di stendimento ESAC a "L"

Al contrario di ciò che avviene con le tecniche attive, il metodo ESAC, consente una rapida ed agevole acquisizione dei dati senza dover operare con una sorgente attiva e l'acquisizione può essere eseguita, al limite, anche da un solo operatore (Figura 13).

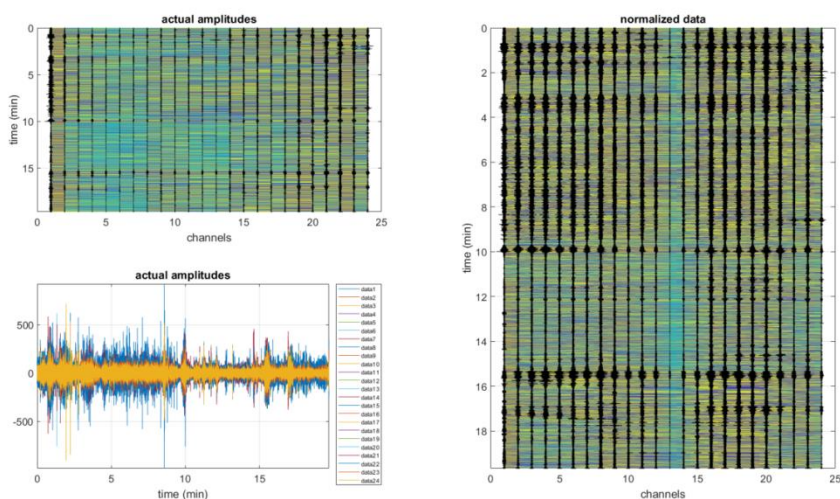


Figura 13 Esempio di dati acquisiti

Con la metodologia ESAC viene studiata la direzionalità del microtremore e valutata la velocità di fase alle diverse frequenze (Figura 14).

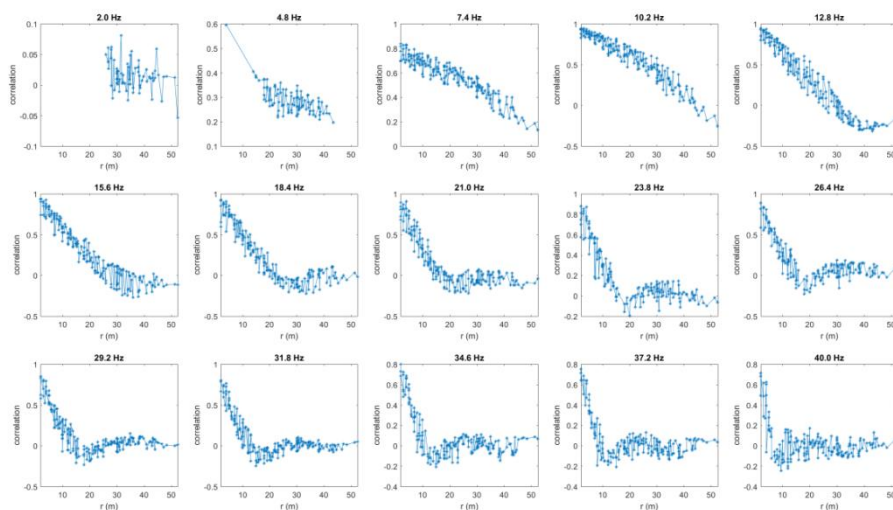


Figura 14 Coefficienti di correlazione in funzione della distanza tra ricevitori

Il metodo consente di definire la cosiddetta curva di dispersione effettiva, che rappresenta una combinazione delle diverse curve modali “pesate” in base al loro specifico contenuto energetico nel sito (Figura 15).

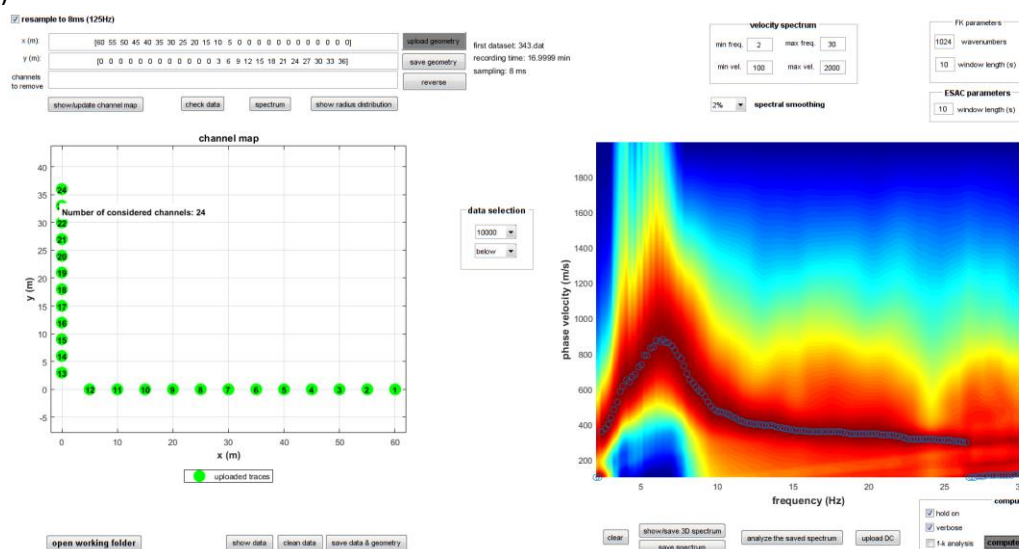


Figura 15 esempio di curva di dispersione effettiva

Un vantaggio quindi della tecnica ESAC è quello di non dovere identificare (come in altre metodologie) i vari modi di vibrazione, che sono invece trattati, più semplicemente, in modo unitario.

Mediante software dedicato viene calcolata automaticamente la curva di dispersione effettiva, dalla quale può essere eseguita la modellazione delle velocità di taglio (V_s).

3.2. Acquisizione Dati

3.2.1 HVSr

Le 2 acquisizioni HVSr sono state eseguite mediante un sismografo triassiale nelle vicinanze dello stendimento utilizzato per la prova MASW e ESAC, e al centro dello stendimento REMI, rispettivamente le prove Bel-1 e Bel-2 mostrate in Figura 17.

I dati HVSr sono stati acquisiti per 20 minuti a sito con una frequenza di campionamento di 128 Hz, come indicato dalle raccomandazioni del progetto SESAME. Per tutte le misure, si è orientato lo strumento nella direzione Nord.

Per le registrazioni del “noise” è stata utilizzata una stazione singola sismica digitale compatta e leggera, equipaggiata con sismometro a banda larga e ad alta sensibilità (Tromino – Micromed S.p.a., Figura 16).

Il Tromino possiede l’ottimizzazione automatica del guadagno per ogni campione, una frequenza di campionamento fino a 1024 campioni per secondo, accuratezza relativa $>10^{-4}$ nell’intervallo di frequenze 0.1-200 Hz e lascia imperturbato il campo d’onda presente nell’ambiente memorizzando i dati in una scheda interna senza il bisogno di nessun tipo di cavo o collegamento esterno.

Lo strumento dispone di 3 canali connessi a tre velocimetri elettrodinamici ad alta risoluzione disposti secondo 3 direzioni ortogonali, più un canale per il collegamento GPS. Le acquisizioni sono state eseguite in assenza di vento e in sostanziali condizioni di basso rumore ambientale, scegliendo una finestra temporale di acquisizione di 20 minuti, per garantire la stabilità del segnale e filtrare eventuali fenomeni transienti.

Per l’esecuzione corretta di queste misure sono state tenute in considerazione le indicazioni contenute nel Progetto SESAME (Site EffectS Assessment using Ambient Excitations, 2004).

3.2.2 ReMi

Per lo stendimento ReMi sono stati impiegati 24 geofoni orizzontali, spazati 5 metri, con lunghezza totale dello stendimento di 115 metri.

Sono state eseguite 20 registrazioni da 30sec ciascuna con intervallo di campionamento verticale di 2msec.

L’ubicazione dello stendimento è riportata in Figura 17.

3.2.3 ESAC

Per lo stendimento ESAC (Extended Spatial AutoCorrelation) si è optato per una geometria ad “L”, dove il lato lungo NW-SE coincide con parte dello stendimento MASW, e dove i primi 13 geofoni sono stati spazati di 5 metri. Il lato W-E perpendicolare al precedente, ha spaziatura tra i geofoni di 4 metri. L’ubicazione dello stendimento è riportata in Figura 17.

Sono stati acquisiti un totale di 15 files, con intervallo temporale di campionamento di 2 millisecondi e lunghezza di registrazione pari a 60 secondi.



Figura 16 posizionamento dello strumento Tromino, la freccia indica il Nord

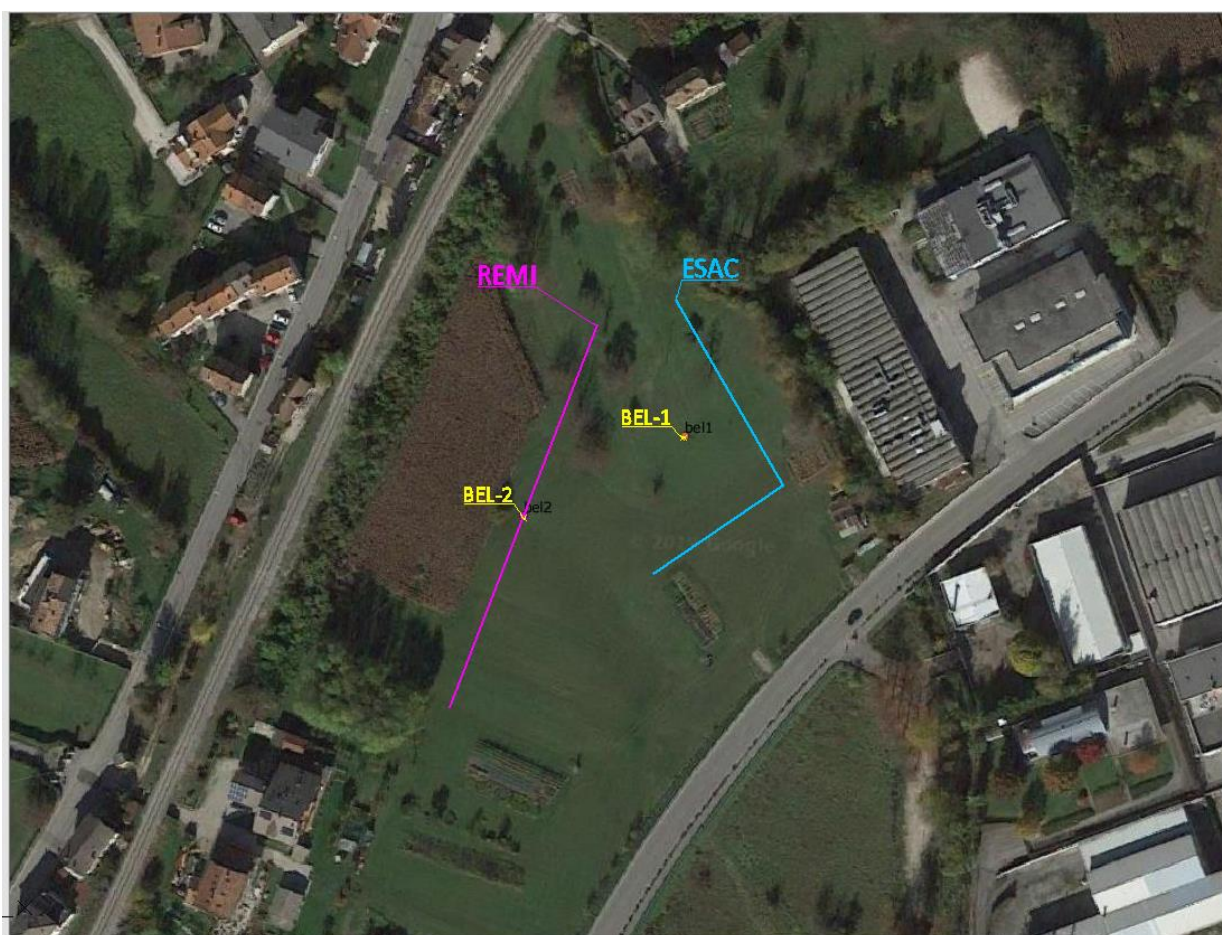


Figura 17 ubicazione e geometria degli stendimenti a sismica passiva

3.3. Elaborazione Dati

3.2.1 HVSR

L'elaborazione dei dati HVSR Bel-1 e Bel-2 è stata effettuata mediante software Grilla (MOHO Science and Technology) e software open source GEOPSY.

Il software Grilla permette di archiviare e analizzare il segnale HVSR registrato dal Tromino; esso permette la visualizzazione parziale o globale di tutto il record suddiviso nelle 3 componenti (2 longitudinali ed una verticale) e per l'operatore c'è la possibilità di intervenire sulle tracce prima dell'analisi spettrale.

In fase preliminare la computazione è stata applicata all'intera traccia per analizzare lo spettro globale e da lì si sono selezionate le porzioni temporali di segnale pulito o con un minor contenuto di rumore, per ri-effettuare l'analisi. Il software consente di selezionare più celle contemporaneamente per fare in modo di tralasciare punti di rumore isolati.

La trasformata di Fourier viene applicata su finestre di durata 20 secondi ed è stato generalmente applicato uno smoothing al 10% su finestra triangolare.

La procedura di elaborazione è quindi consistita in:

- suddivisione del segnale temporale in finestre di 20s;
- smoothing (triangolare proporzionale) 10%;
- Filtraggio: selezione manuale sullo spettro di ampiezza delle finestre temporali su cui effettuare l'analisi

La curva H/V per la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo esprime il rapporto fra ampiezze spettrali medie del rumore ambientale misurato nelle componenti orizzontali (H) e verticali (V) del moto, fornendo le indicazioni sulle caratteristiche dinamiche del sottosuolo.

I picchi sono stati individuati principalmente basandosi sulla depressione della componente verticale rispetto a quelle orizzontali nel grafico relativo agli spettri delle singole componenti, ossia il punto in cui il rapporto H/V risulta massimo.

Su entrambi i punti di analisi è presente un picco sulla curva H/V attorno alla frequenza di 3.5 Hz .

Il picco risulta ben definito e può essere associato al contrasto di impedenza del substrato.

	Coord. WGS84 UTM33N		F0 (Hz)	H/V
	EST(m)	NORD(m)		
BEL-1	286233,15	5115615,882	3,4	6,4
BEL-2	286188,41	5115593,566	3,7	6

Tabella 2 Tabella riassuntiva dei risultati HVSR

L'analisi di direzionalità effettuata mediante Geopsy conferma il massimo valore di H/V in corrispondenza della frequenza 3.5Hz su tutte le direzioni, escludendo interferenze da rumori antropici locali.

Tale frequenza è stata quindi considerata frequenza di risonanza per l'area in esame.

In ognuna delle 2 misure, i criteri SESAME per una curva H/V affidabile (primi 3 criteri) sono verificati attendibili (*robustezza statistica*).

Sulla base dei valori di velocità ottenuti dalle indagini MASW, è stato ricostruito il modello sintetico per il calcolo della V_{s30} , risultante 279m/s e profondità del substrato tra 25-30metri, in accordo con le indagini MASW.

Vengono riportati in Allegato B i grafici e le tabelle relativi all'indagine HVSR effettuata.

3.2.2 ReMi

L'elaborazione dati è stata effettuata con software dedicato ReMi della Optim Softwares, che consente di ottenere tramite algoritmo di inversione, i profili della velocità delle onde S sino ad una profondità di 30 m, usando unicamente il rumore ambientale. La procedura consiste nell'eseguire un picking su una curva di dispersione risultante dalla somma delle registrazioni eseguite. Come per la MASW si inseriscono il numero di strati e le velocità in modo tale da rappresentare al meglio la curva di dispersione reale.

L'elaborazione ha restituito un grafico (vedi Allegato C) che riporta la curva di dispersione ottenuta dal fitting dei punti risultanti dal picking dello spettro come per la MASW, ed il profilo delle velocità-profondità delle onde di taglio con l'indicazione della Vs30 calcolata, espressa in metri/secondo.

Il valore di Vs30 ottenuto è pari a 334.29m/s, che si discosta dal valore ottenuto dall'indagine MASW di 254m/s. Per questo motivo è più opportuno considerare i risultati derivanti della MASW per una classificazione degli strati più superficiali e dei risultati derivanti dalle indagini di microtremore per gli strati più profondi da 15-30m.

Il risultato ottenuto dall'indagine ReMi ad ogni modo, ricade all'interno della classe C secondo le nuove NTC 2018.

3.2.3 ESAC

In generale, i dati acquisiti non sono stati di buonissima qualità (Figura 20); infatti, alcune tracce sono state rimosse in quanto presentavano una buona correlazione (Figura 18).

Tale aspetto ha aumentato il fenomeno di aliasing spaziale, evidente soprattutto per frequenze superiori a 15 Hz (Figura 21). In ogni caso, la curva effettiva è risultata ben definita nell'intervallo 7÷15 Hz (Figura 21), con valori della velocità di fase compatibili con quanto evidenziato dall'indagine MASW, V_{s30} 254m/s

L'inversione congiunta dei dati ESAC e HVSr ha fornito un ottimo *misfit*; il modello di sottosuolo ottenuto è compatibile con quello invertito dalle indagini MASW+HVSr; l'unica differenza sostanziale sta nella profondità del substrato il quale, sulla base delle tecniche di sismica passive, risulta di qualche metro più superficiale (< 25m). I grafici relativi all'inversione ESAC+HVSr sono riportati nell' Allegato D della presente relazione.

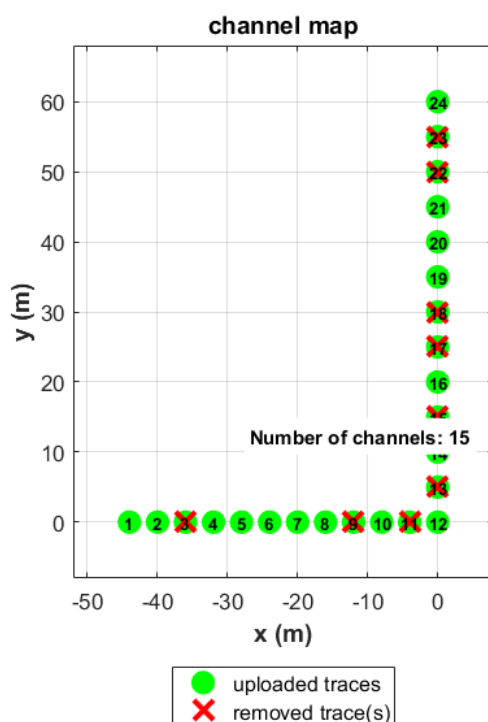


Figura 18 Tracce rimosse

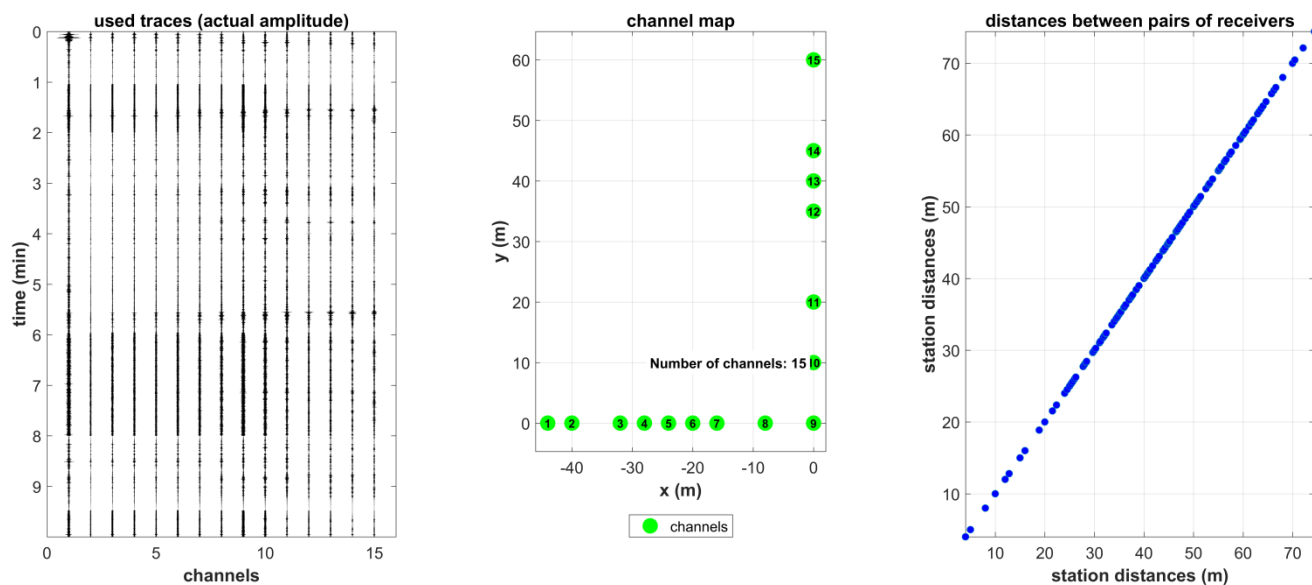


Figura 19 Dati originali e geometria di acquisizione

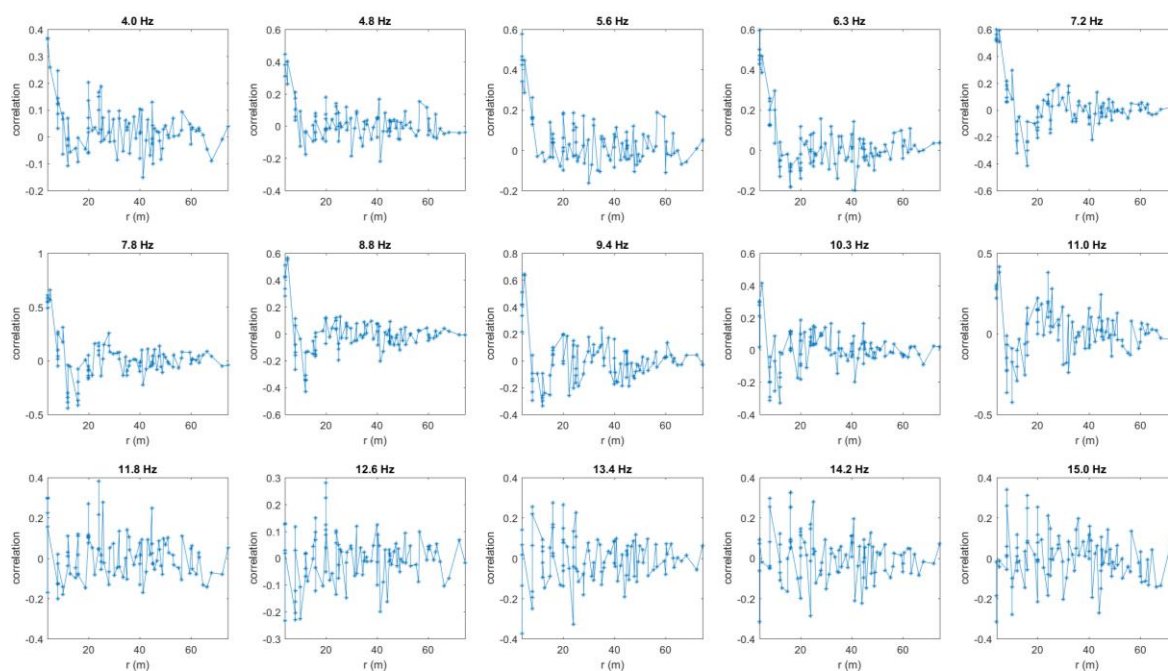


Figura 20 Coefficienti di correlazione in funzione della distanza tra ricevitori per 15 frequenze campione



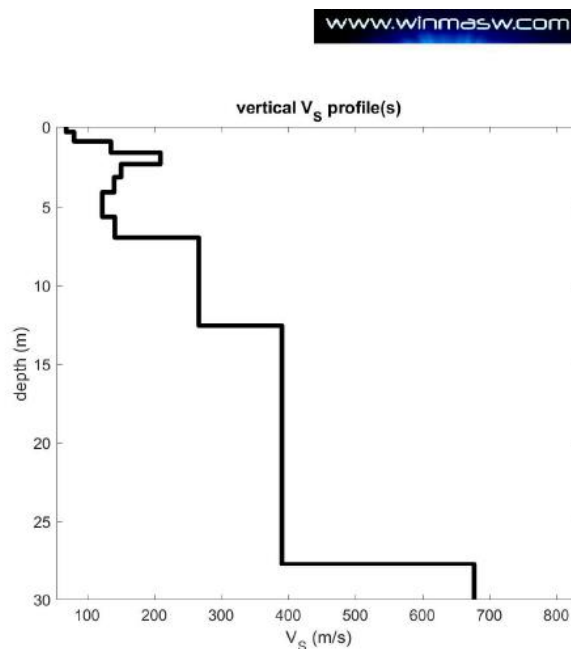
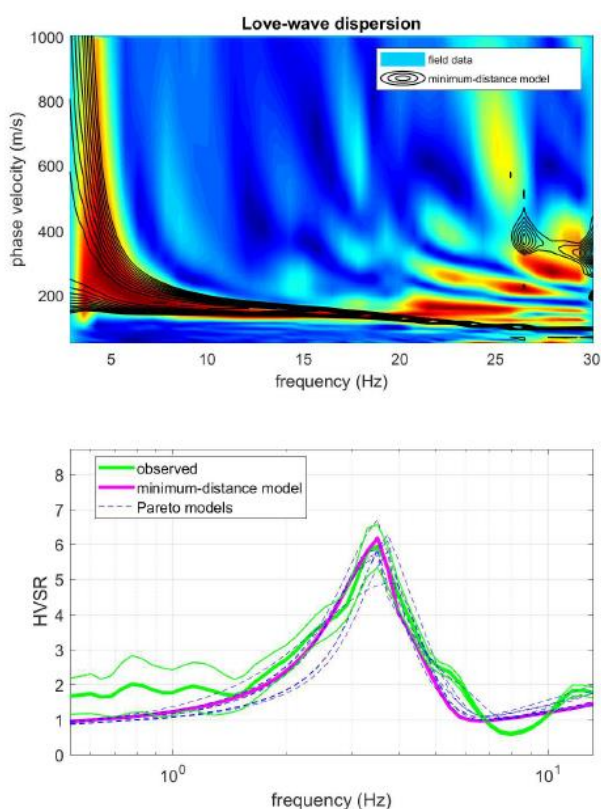
4. Risultati

I risultati delle analisi effettuate nel sito di indagine a Cusighe (BL) si trovano tra di loro in accordo fornendo come risultato un valore di V_{s30} tra 250 e 335m/s e profondità del substrato sismico superiore a 30 metri. Sulla base di questi risultati, l'integrazione delle diverse metodologie di sismica attiva MASW e passiva ESAC, HVSR, e ReMi consente quindi di attribuire al suolo la categoria **classe C** – Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente comprese tra 180 e 360 m/s .

INDAGINE	VS30
MASW	254m/s
ESAC	254m/s
HVSR	279m/s
ReMi	334,29m/s

Tabella 3 Tabella riassuntiva dei risultati ottenuti con le diverse tecniche

5. Allegato A-Risultati MASW



Love-wave dispersion file: THF-PHASE-spectrum.mat
H/V curve: EqualizedFile.hv
 V_{s30} & V_{sE} (minimum distance model): 248 248 m/s

Minimum-distance model (minimum distance from the Utopia point)

V_{sh} (m/s): 64, 72, 136, 236, 133, 154, 107, 173, 257, 454, 608

Thickness (m): 0.3, 0.5, 0.6, 0.6, 0.8, 1.6, 1.5, 1.4, 8.0, 17.0

V_{s30} and V_{sE} (m/s): 248.0, 248.0

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 6 8 31 101 30 41 19 52 133 406 754

Mean model:

V_s (m/s): 68, 80, 135, 209, 150, 140, 122, 141, 266, 390, 677

Thickness (m): 0.3, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 1.0, 1.5, 1.3, 5.6, 15.2

V_{s30} and V_{sE} (m/s): 254 254

Minimum V_{sE} (m/s): 241

Maximum V_{sE} (m/s): 267

6. Allegato B-Risultati HVSr

Risultati prova HVSr BEL-1

Strumento: TRZ-0020/01-09

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 12/07/19 09:07:28 Fine registrazione: 12/07/19 09:27:29

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 63% tracciato (selezione manuale)

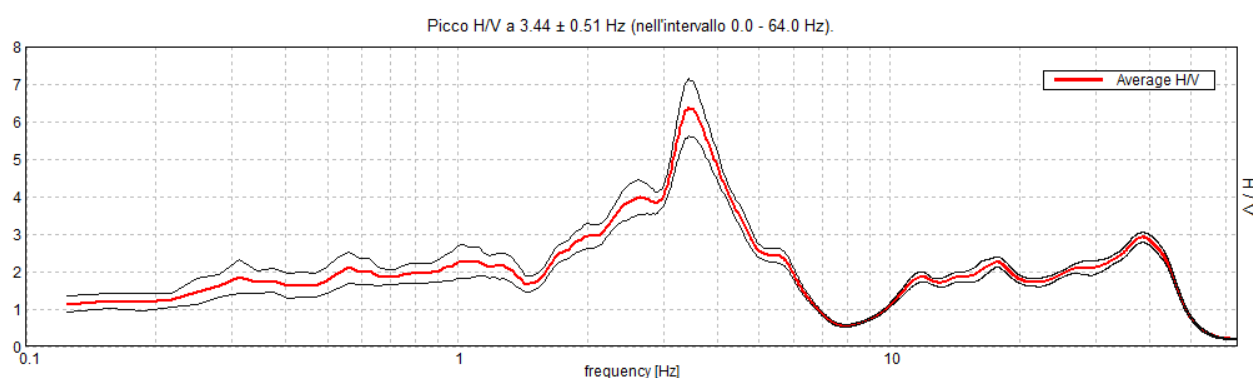
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

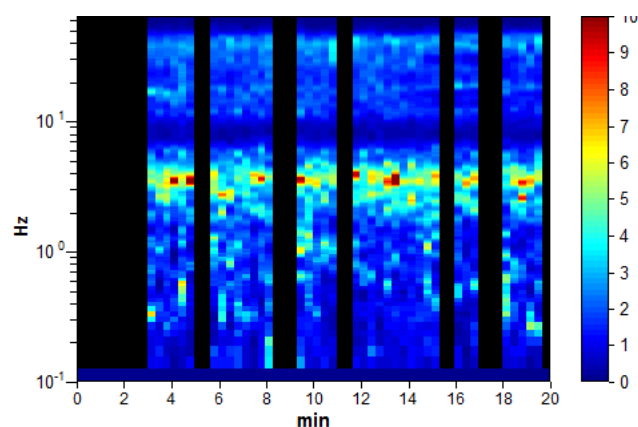
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

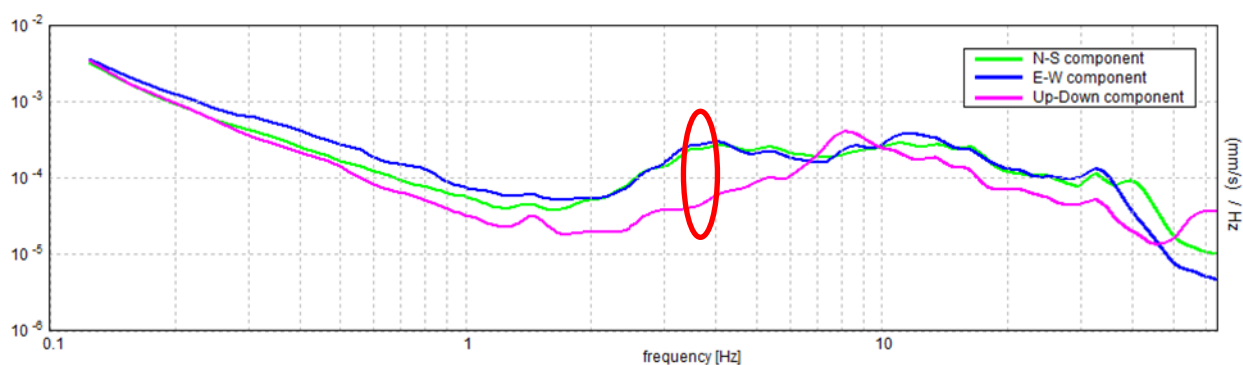
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



SERIE TEMPORALE H/V

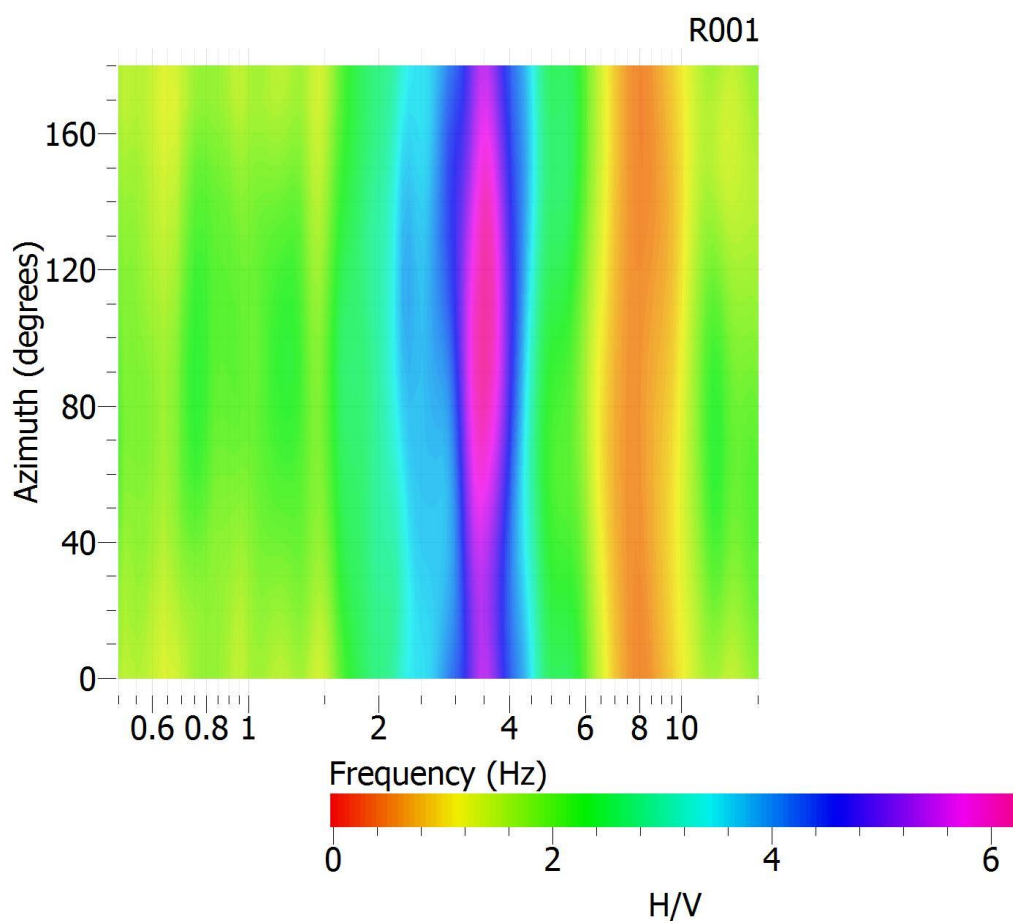


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

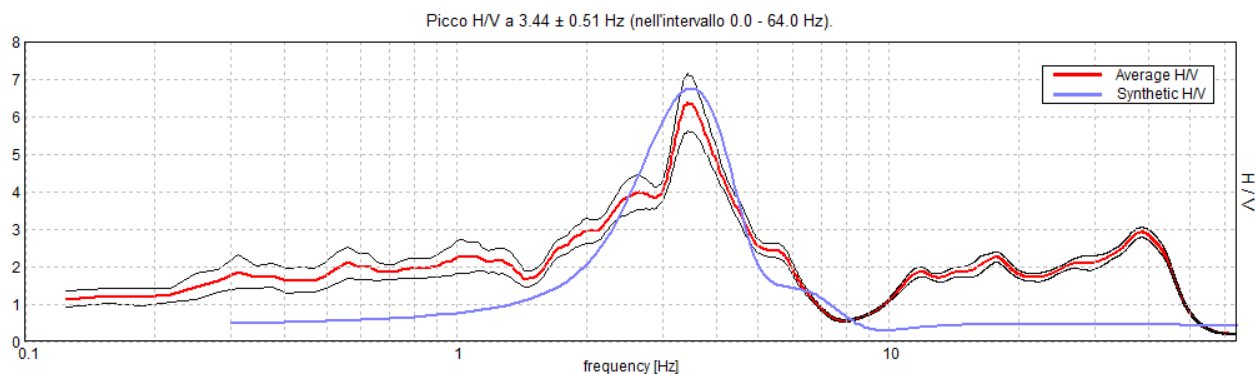


ANALISI DIREZIONALE H/V

Massimo H/V costante da tutte le direzioni alla frequenza di 3.5Hz

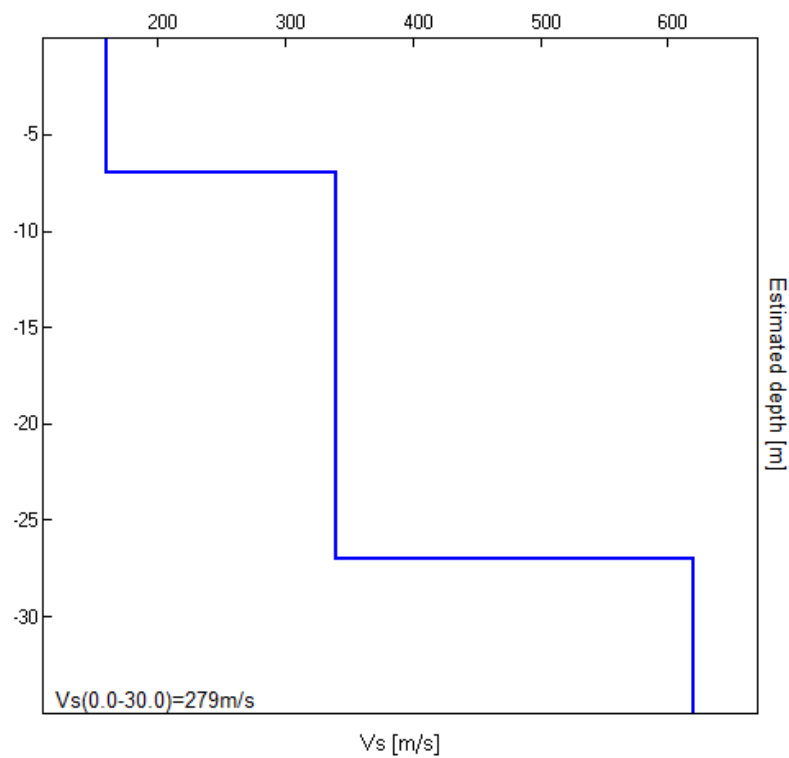


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
7.00	7.00	160	0.42
27.00	20.00	340	0.42
30.00	3.00	620	0.40
inf.	inf.	620	0.40

$V_s(0.0-30.0)=279\text{m/s}$



Picco H/V a 3.44 ± 0.08 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$3.44 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$3025.0 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 166	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	2.219 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	4.656 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$6.47 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.02218 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.07626 < 0.17188$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.7011 < 1.58$	OK	

L_w	lunghezza della finestra
n_w	numero di finestre usate nell'analisi
$n_c = L_w n_w f_0$	numero di cicli significativi
f	frequenza attuale
f_0	frequenza del picco H/V
σ_f	deviazione standard della frequenza del picco H/V
$\varepsilon(f_0)$	valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$
A_0	ampiezza della curva H/V alla frequenza f_0
$A_{H/V}(f)$	ampiezza della curva H/V alla frequenza f
f^-	frequenza tra $f_0/4$ e f_0 alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$
f^+	frequenza tra f_0 e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$
$\sigma_A(f)$	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
$\sigma_{\log H/V}(f)$	deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$
$\theta(f_0)$	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
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Risultati prova HVSR BEL-2

Strumento: TRZ-0020/01-09

Formato dati: 16 byte

Fondo scala [mV]: n.a.

Inizio registrazione: 12/07/19 11:17:25 Fine registrazione: 12/07/19 11:37:26

Nomi canali: NORTH SOUTH; EAST WEST; UP DOWN

Dato GPS non disponibile

Durata registrazione: 0h20'00".

Analizzato 63% tracciato (selezione manuale)

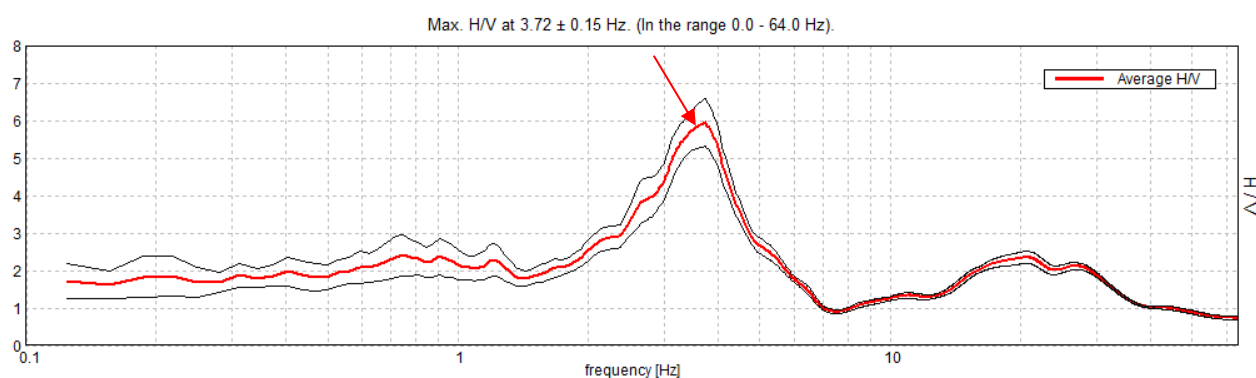
Freq. campionamento: 128 Hz

Lunghezza finestre: 20 s

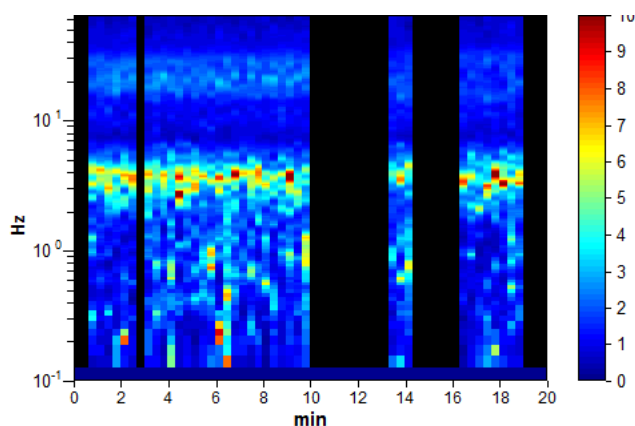
Tipo di lisciamento: Triangular window

Lisciamento: 10%

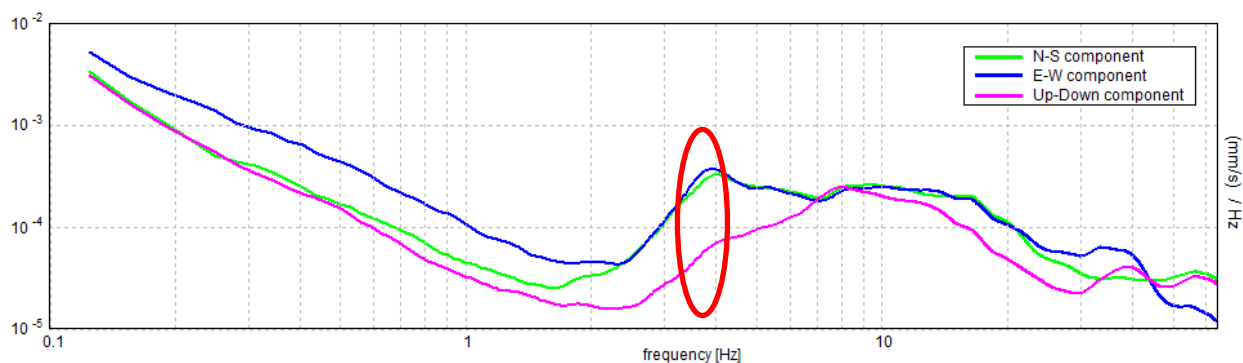
RAPPORTO SPETTRALE ORIZZONTALE SU VERTICALE



SERIE TEMPORALE H/V

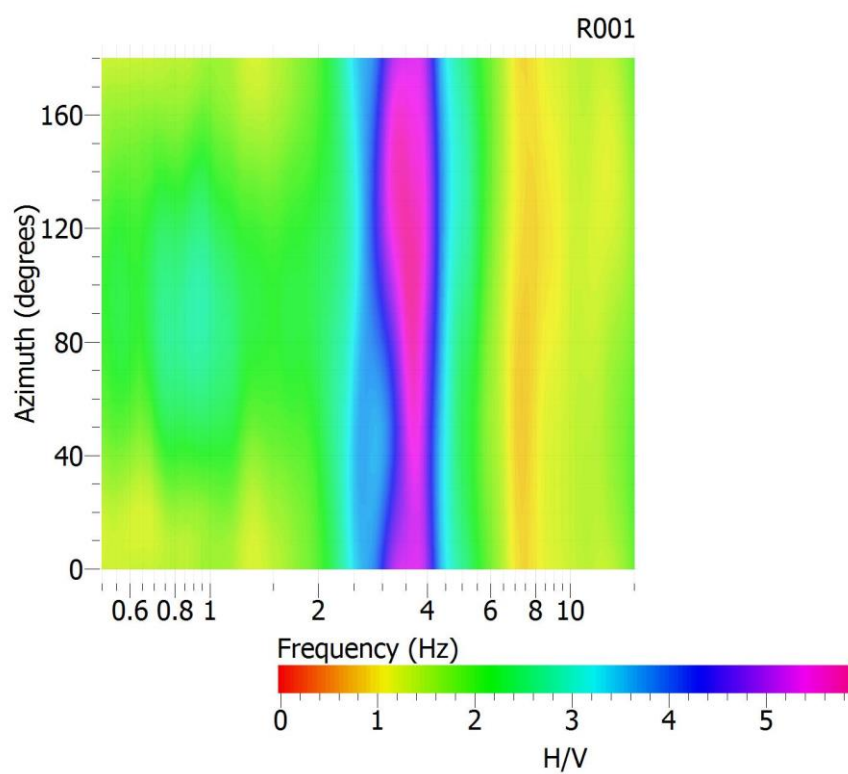


SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI

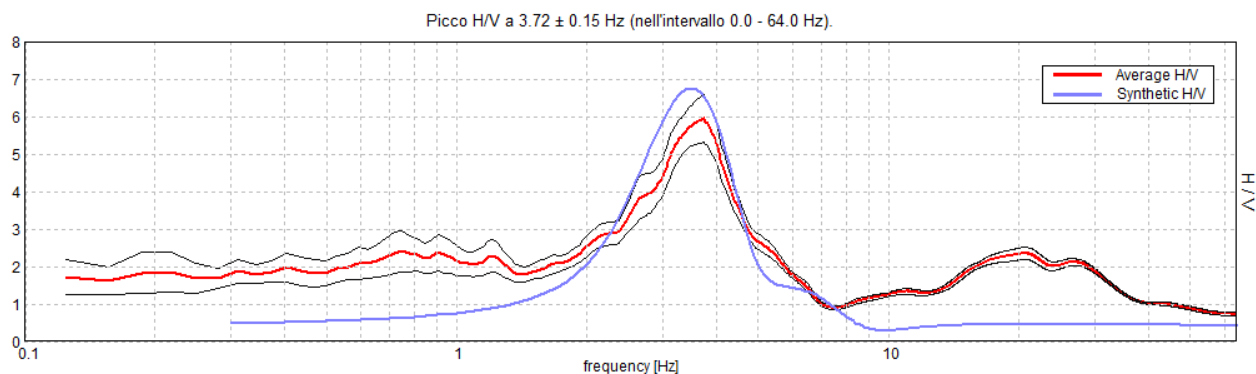


ANALISI DIREZIONALE H/V

Massimo H/V costante da tutte le direzioni alla frequenza di 3.5/3.8 Hz

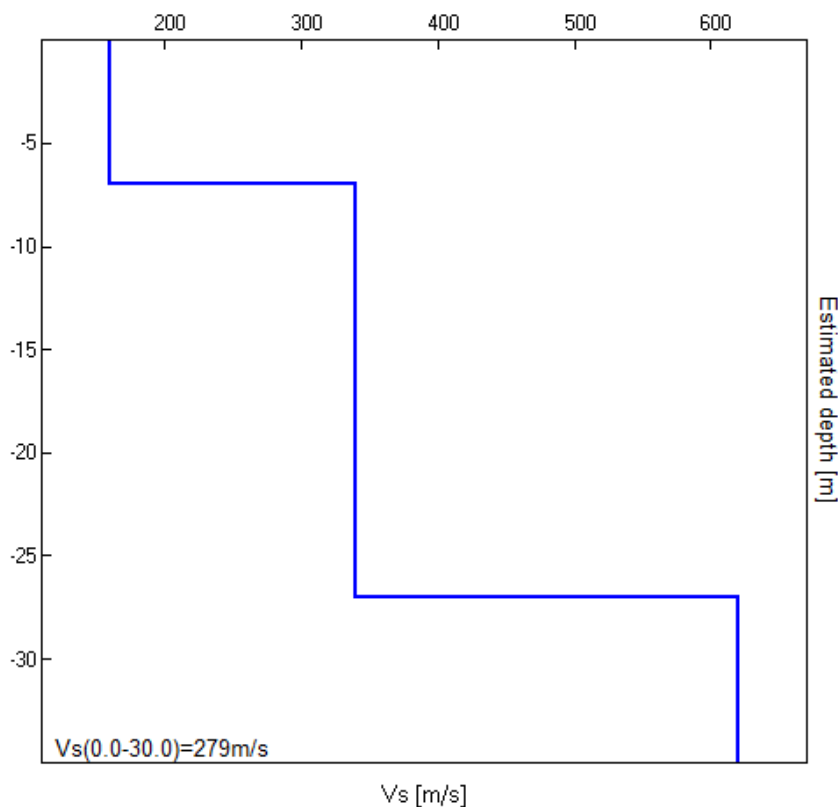


H/V SPERIMENTALE vs. H/V SINTETICO



Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
7.00	7.00	160	0.42
27.00	20.00	340	0.42
30.00	3.00	620	0.40
inf.	inf.	620	0.40

$V_s(0.0-30.0)=279\text{m/s}$



Picco H/V a 3.72 ± 0.15 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).

Criteri per una curva H/V affidabile
[Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

$f_0 > 10 / L_w$	$3.72 > 0.50$	OK	
$n_c(f_0) > 200$	$2826.3 > 200$	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 180	OK	

Criteri per un picco H/V chiaro
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$	2.375 Hz	OK	
Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$	4.75 Hz	OK	
$A_0 > 2$	$5.94 > 2$	OK	
$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	$ 0.03953 < 0.05$	OK	
$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$	$0.14701 < 0.18594$	OK	
$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$	$0.6298 < 1.58$	OK	

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

Valori di soglia per σ_f e $\sigma_A(f_0)$

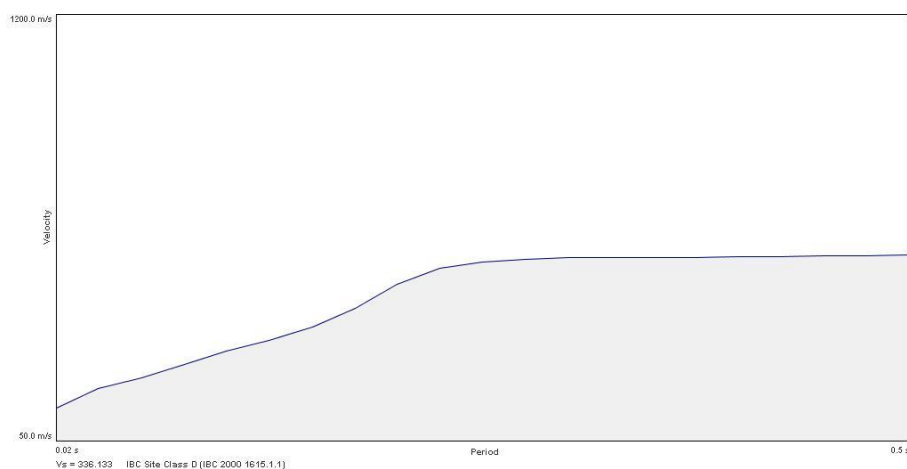
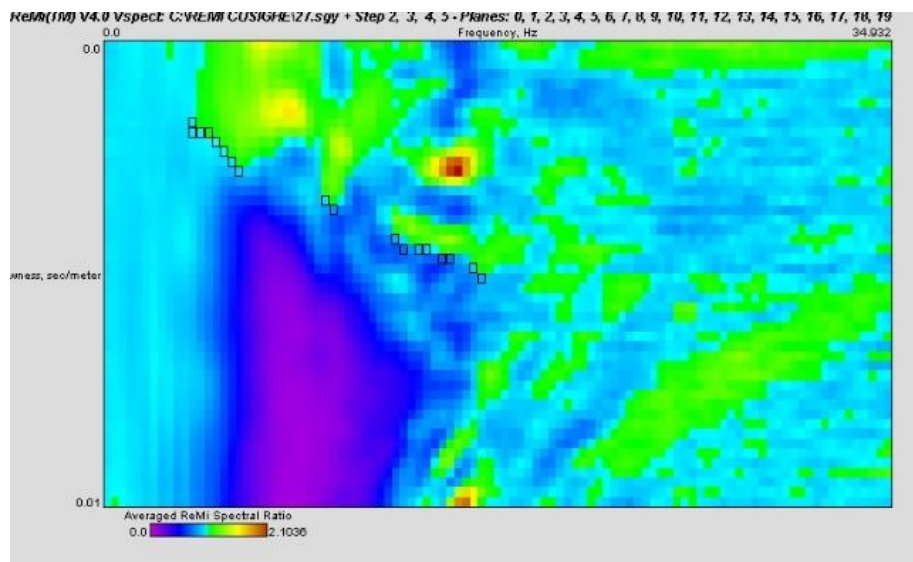
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.2 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

7. Allegato C- Risultati ReMi

ReMi

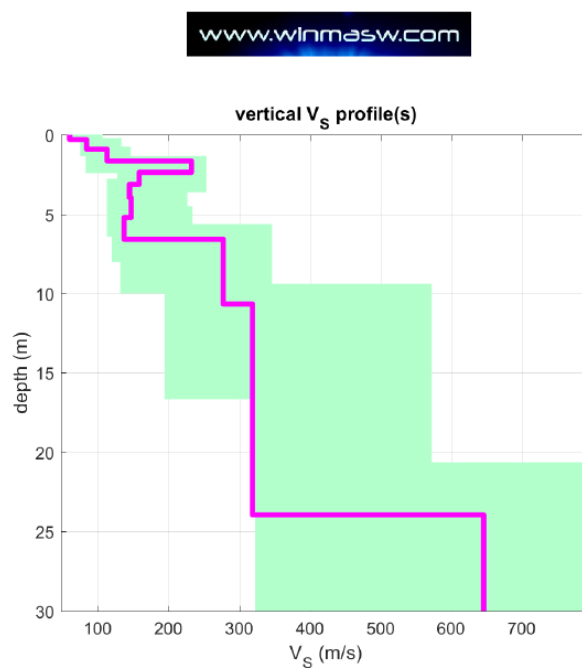
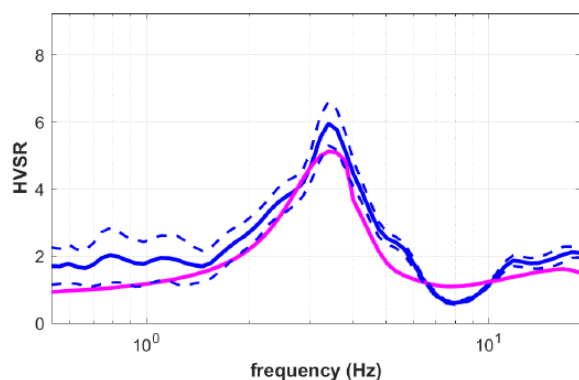
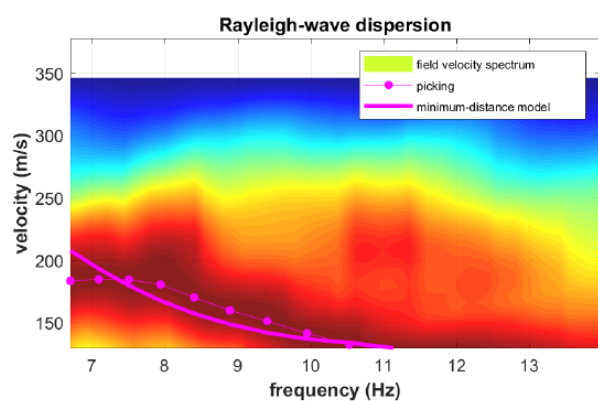
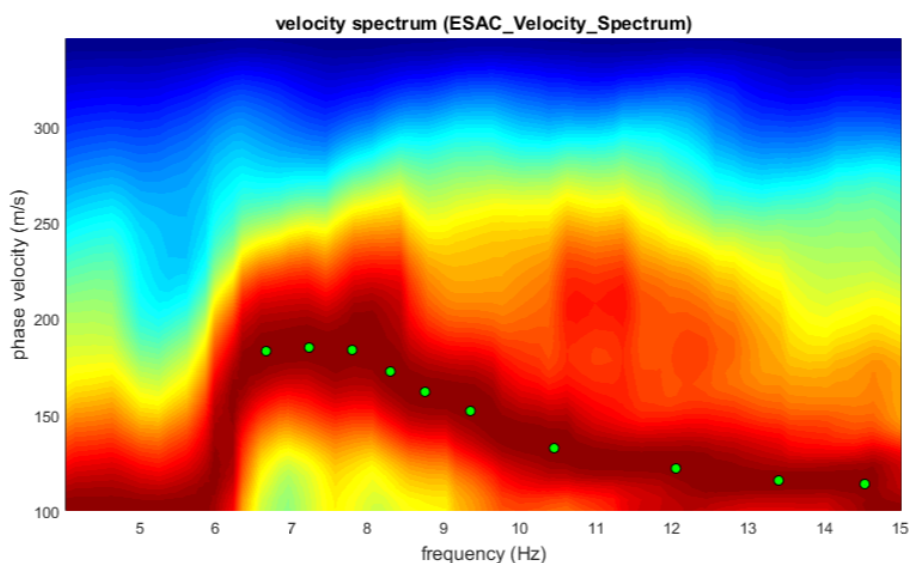
$V_{S30} = 334.29 \text{ m/s}$

Spettro, curva di dispersione e profilo V/profondità



Density		Shear Velocity	
2.0 m	2.0 g/cc	282.227 m/s	
9.25 m	2.0 g/cc	384.025 m/s	
25.75 m	2.0 g/cc	675.104 m/s	
37.0 m	2.0 g/cc	1130.014 m/s	
50.0 m	2.0 g/cc		

8. Allegato D-Risultati ESAC



Surface-wave dataset: ESAC_Velocity_Spectrum.mat
H/V dataset: EqualizedFile.hv

V_{s30} and V_{sE} (minimum-distance model): 257 257 m/s *half-space*
 V_{s30} and V_{sE} (mean model): 254 254 m/s

Minimum-distance model (minimum distance from the Utopia point)

V_{sv} (m/s): 60, 84, 113, 232, 158, 145, 147, 137, 278, 319, 646

Thickness (m): 0.3, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.8, 1.2, 1.4, 4.1, 13.3

V_{s30} and V_{sE} (m/s): 257.0, 257.0

Seismic/Dynamic Shear modulus (MPa) (approximate values): 5 11 21 97 43 36 37 32 144 200 858

Mean model:

V_s (m/s): 61, 81, 107, 213, 157, 135, 144, 142, 268, 337, 680

Thickness (m): 0.3, 0.6, 0.7, 0.7, 0.8, 0.8, 1.2, 1.3, 4.6, 14.9

V_{s30} and V_{sE} (m/s): 254 254

Minimum V_{sE} (m/s): 251

Maximum V_{sE} (m/s): 258