

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

MICROZONAZIONE SISMICA

Prove MASW

Regione Emilia-Romagna

Comune di Traversetolo



Regione	Soggetto realizzatore	Data
Emilia-Romagna	Dott. Geol. Emiliano Occhi	Maggio 2018

A. METODOLOGIA MASW

La tecnica MASW (*Multi-channel Analysis of Surface Waves*) consiste nell'analisi della dispersione delle onde di superficie al fine di definire il profilo verticale della velocità di propagazione delle onde di taglio S (Park et al., 1999).

Nella tabella C6.2.I della CIRCOLARE 2 Febbraio 2009 n. 617 C.S.LL.PP., dove si elencano le indagini di tipo geofisico con strumentazione in superficie, si parla di prova SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*). La procedura MASW non è altro che una prova SASW multicanale ed è pertanto più completa ed affidabile; di conseguenza risulta in accordo con le NTC08.

Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, 1999) o in una combinazione di entrambi. Nel metodo attivo, eseguito nel seguente sito in studio, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Si ottiene una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel *range* di frequenze compreso tra 5 Hz e 70 Hz, quindi dà informazioni sui primi 30-50 m di profondità.

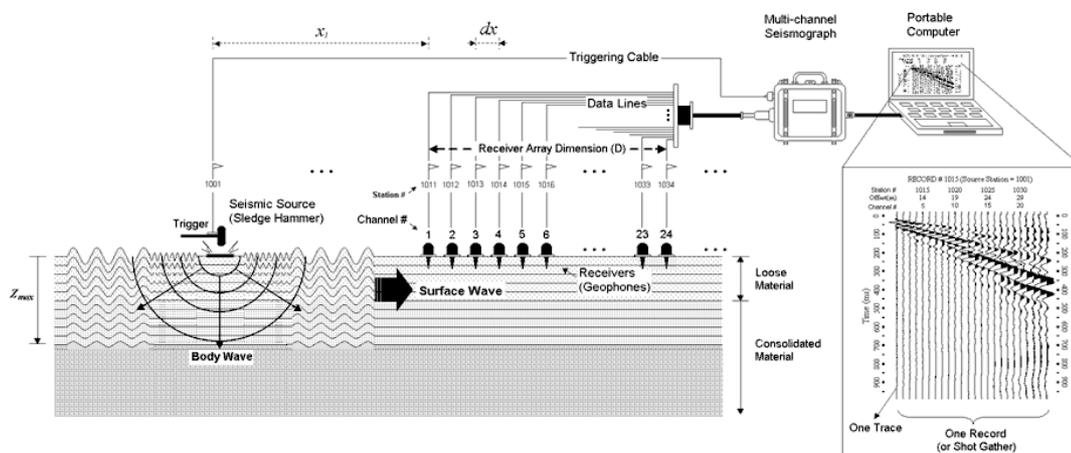
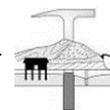


Figura 1. Metodo MASW attivo.

Quando si energizza il sito in un punto della sua superficie libera si generano diversi tipi di onde: se la sorgente è perpendicolare alla superficie libera si originano onde appartenenti al piano verticale (onde P, onde Sv, onde di Rayleigh e onde rifratte), se la sorgente è parallela alla superficie libera si generano onde appartenenti al piano orizzontale (onde Sh e onde di Love).

La MASW classica/standard consiste nella registrazione della propagazione di una classe di onde di superficie e specificatamente delle onde di Rayleigh: queste ultime vengono generate da una sorgente ad impatto verticale. Due sono gli aspetti che rendono il contributo delle onde di Rayleigh prevalente sul contributo delle onde P e Sv. Il primo aspetto è che le onde di Rayleigh trasportano circa i due terzi dell'energia generata dalla sorgente. Il secondo aspetto è che allontanandosi dalla sorgente le onde di Rayleigh subiscono un'attenuazione geometrica inferiore rispetto alle onde P e Sv, in quanto si propagano secondo fronti d'onda cilindrici e non sferici (come le altre onde) viaggiando con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase (Achenbach, 1999, Aki e Richards, 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del sottosuolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano la porzione più profonda del sottosuolo.



In queste indagini accanto all'acquisizione MASW in Rayleigh viene proposta anche l'analisi della dispersione delle onde di Love, da analizzare congiuntamente alle Rayleigh, per meglio definire il substrato e superare talune ambiguità interpretative che possono presentarsi sugli spettri di velocità riferiti solo alle onde di Rayleigh. Le acquisizioni in onde di Love non possono sostituire completamente quelle in onde di Rayleigh ma la chiarezza dei loro spettri di velocità risulta di estrema utilità allorché gli spettri delle onde di Rayleigh risultino di ardua interpretazione in relazione alla presenza di forti segnali scatterati e all'intrecciarsi di diversi modi. L'unica differenza tra le Rayleigh e le Love sta nel fatto che queste ultime si formano solo in caso di gradiente di velocità "positivo".

Sono inoltre state eseguite misure di microtremori atte ad analizzare il rapporto spettrale H/V (Horizontal to Vertical Spectral Ratio - HVSR) utile a definire eventuali risonanze di sito e, unitamente a misure di dispersione delle onde di superficie, a meglio vincolare il profilo VS (Dal Moro, 2010; 2011). A causa della pesante non-univocità della soluzione una modellazione del solo HVSR senza quantitative informazioni sulle VS da parte di misure MASW non risulta sufficientemente affidabile.

B. ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione dei dati è stata eseguita tramite l'utilizzo di un sismografo 24 canali (modello Echo 2002) collegato a geofoni orizzontali e orizzontali aventi frequenza propria di 4.5 Hz.

È stato realizzato uno stendimento sismico lineare di 12 o 24 geofoni e tempo di acquisizione pari a 1 secondo.

L'acquisizione delle onde di Love è del tutto analoga a quelle di Rayleigh, cambia solo il tipo di sorgente e l'orientazione dei geofoni orizzontali (asse perpendicolare allo stendimento per le Love e asse parallelo per le Rayleigh, vedi figura seguente).

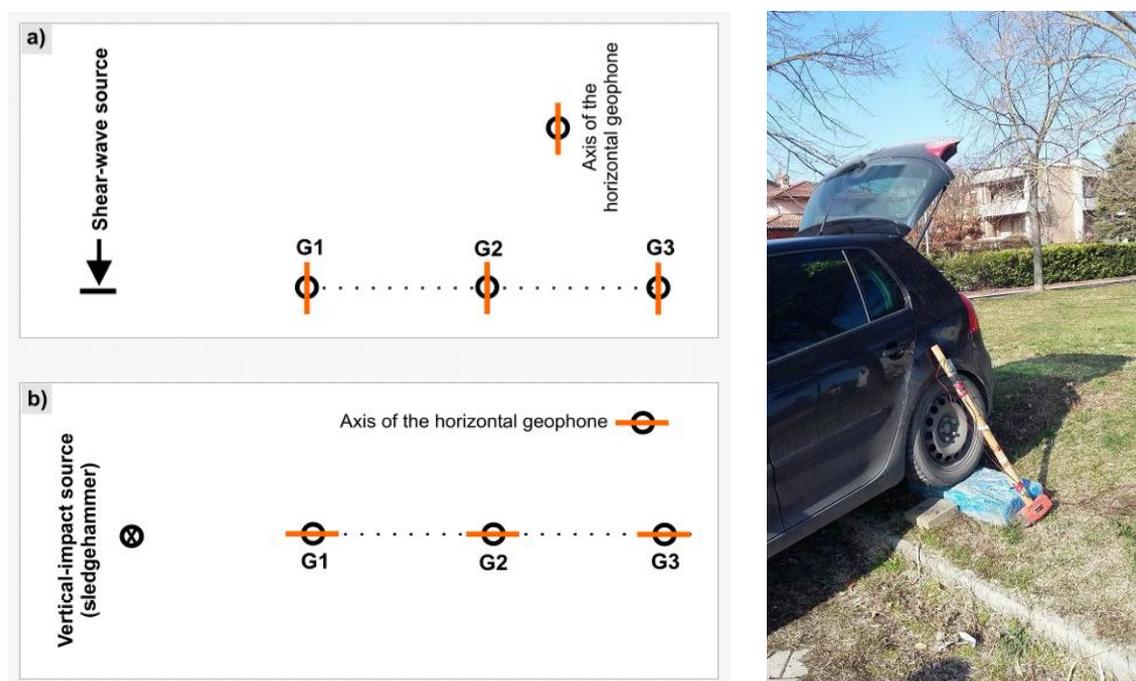
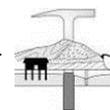


Figura 2. Acquisizione di dati: a) stendimento per acquisizione dati utili ad analizzare la dispersione delle onde di Love; b) stendimento per acquisizione dati utili ad analizzare la dispersione delle onde di Rayleigh (componente radiale). Nella fotografia a destra la battuta di taglio su piastra in polipropilene.

L'energizzazione è stata effettuata in posizione esterna rispetto al geofono 12 o 24 con offset pari all'interdistanza geofonica; per le onde di Rayleigh si è utilizzata una mazza battente di 8 kg ad



impatto verticale su piastra metallica, per quelle di Love una mazza battente ad impatto di taglio su piastra in polipropilene.

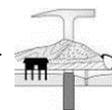
Le acquisizioni utili ad analizzare il rapporto spettrale H/V (HVSR) sono state eseguite utilizzando lo strumento SR04-GEOBOX, dotato di sensore a 2.0 Hz (Sara electronic instruments). L'analisi dei dati acquisiti è stata eseguita utilizzando il software WINMASW 6.0 versione Professional.

C. ELABORAZIONE DATI MASW+HVSR “Piazza Vittorio Veneto”

È stato realizzato uno stendimento con lunghezza di 27,5 metri e spaziatura di 2,5 metri tra i 12 geofoni verticali e orizzontali utilizzati.



Figura 3. Stendimento sismico (a sinistra) e acquisizione HVSR (a destra).



Dai sismogrammi acquisiti nel dominio spazio-tempo si determinano mediante la trasformata di Fourier gli spettri nel dominio frequenza-ampiezza e successivamente attraverso il metodo denominato *phase shift* gli spettri nel dominio frequenza-velocità.

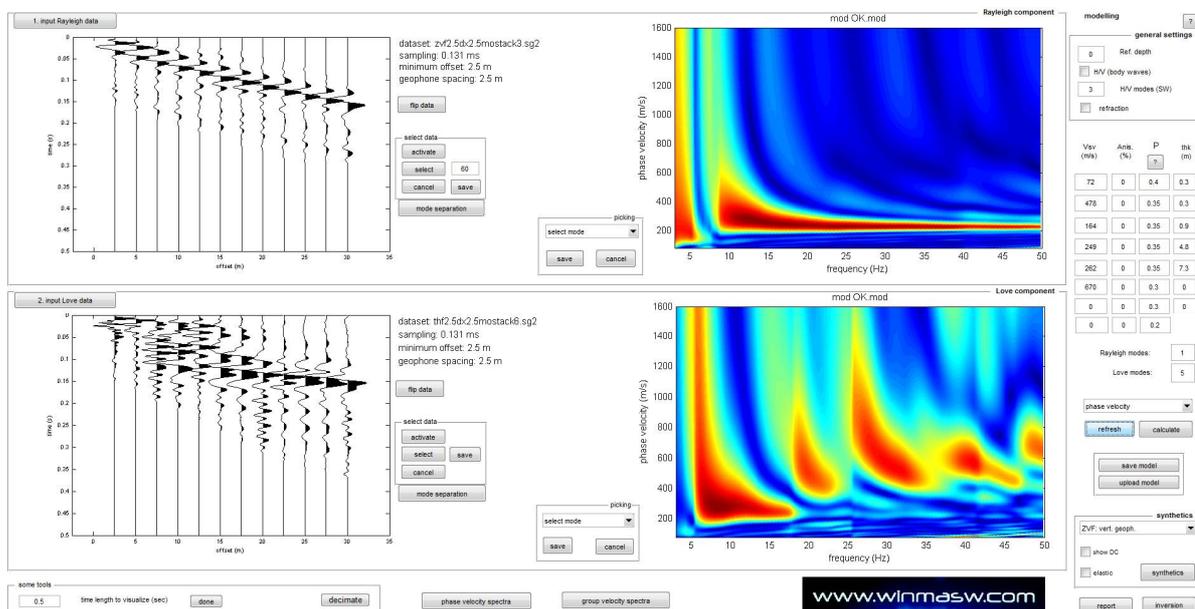


Figura 4. Acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh (ZVF) in alto e delle onde di Love (THF) in basso. Sulla sinistra le tracce sismiche acquisite (sismogramma), sulla destra gli spettri di velocità.

Successivamente alla pulizia del dato si è proceduto alla modellazione diretta delle curve di dispersione. Lo spettro delle onde Rayleigh presenta il solo modo fondamentale. Lo spettro delle onde di Love evidenzia, oltre al modo fondamentale, dominante tra 5 e 18 Hz, frammenti dei primi tre modi superiori.

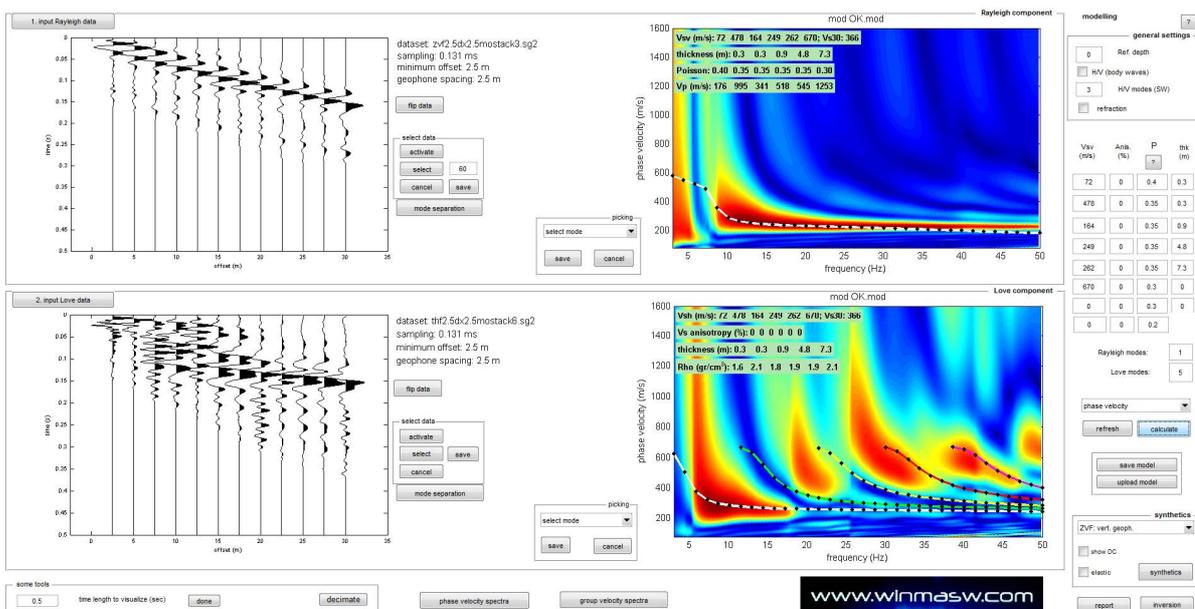
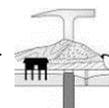


Figura 5. Spettri di velocità con sovrapposte le curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori per la componente verticale delle onde Rayleigh (ZVF) e per le onde di Love (THF).



Allo scopo di definire il periodo di risonanza di sito e migliorare (tramite analisi congiunta MASW+HVSr) la definizione del profilo verticale VS nelle porzioni più profonde, si è effettuata una misurazione di microtremore utile a definire il rapporto H/V lungo lo stendimento.

Nelle figure successive si riportano lo spettro d'ampiezza medio delle 3 componenti (NS, EW e verticale), le caratteristiche dei dati acquisiti e i valori HVSr per la misurazione eseguita.

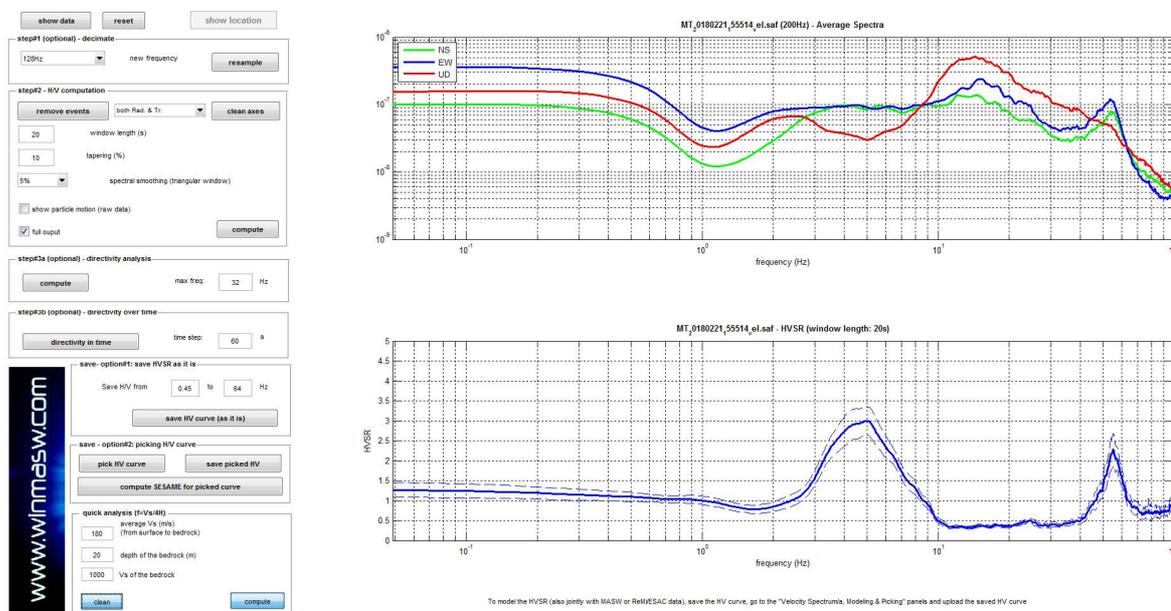


Figura 6. Spettri d'ampiezza medi delle 3 componenti (NS, EW e verticale) e valori di HVSr.

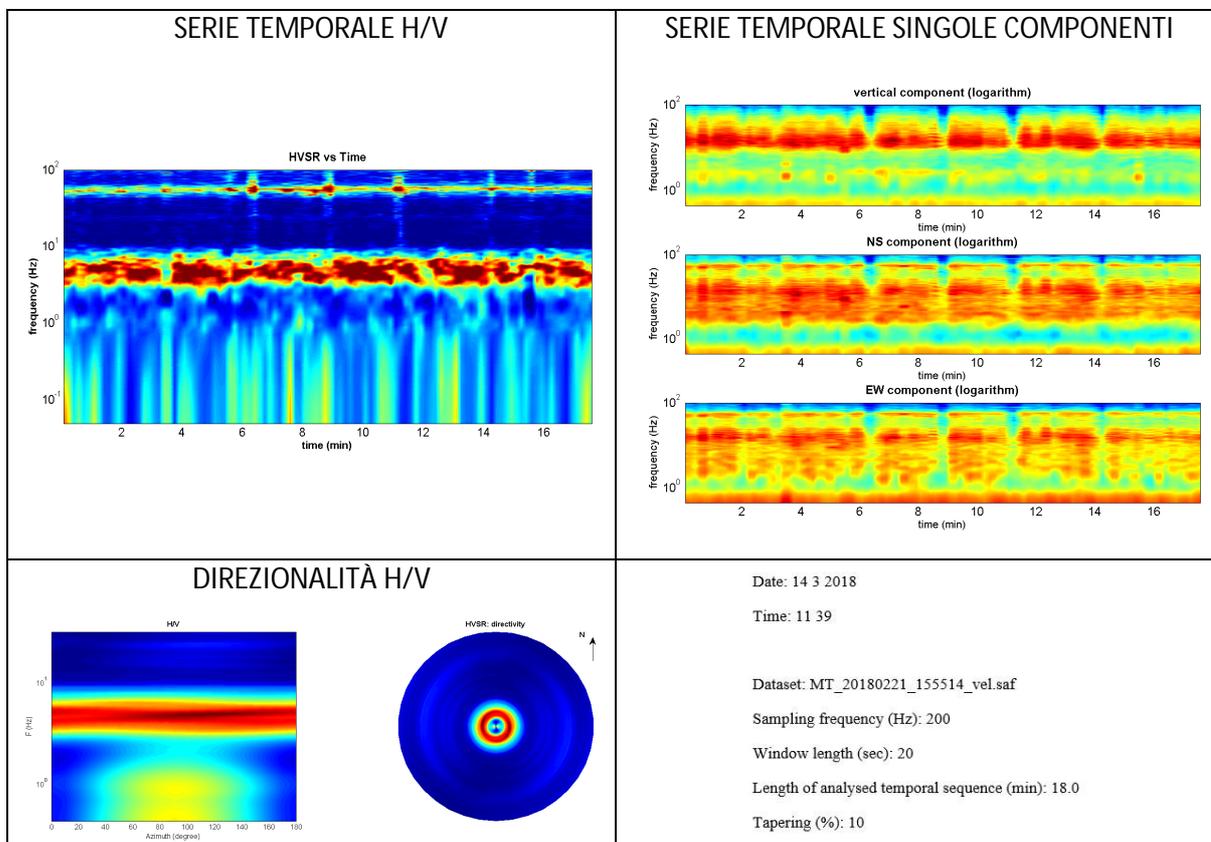
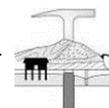


Figura 7. Caratteristiche dati acquisiti.



I criteri SESAME definiscono la robustezza statistica della curva HVSR e degli eventuali picchi presenti. Il computo del picco a 5.0 Hz è riportato nel seguente box. Sono soddisfatti 5 criteri su 6, la frequenza è dunque classificabile come di risonanza.

Peak frequency (Hz): 5.0 (±0.7)	==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====
Peak HVSR value: 3.0 (±0.4)	#1. [exists f- in the range [f0/4, f0] AH/V(f-) < A0/2]: yes, at frequency 3.0Hz (OK)
	#2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] AH/V(f+) < A0/2]: yes, at frequency 7.5Hz (OK)
==== Criteria for a reliable H/V curve =====	#3. [A0 > 2]: 3.0 > 2 (OK)
#1. [f0 > 10/Lw]: 5.0 > 0.5 (OK)	#4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]: (OK)
#2. [nc > 200]: 10667 > 200 (OK)	#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 0.735 > 0.252 (NO)
#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0] (OK)	#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.353 < 1.58 (OK)

La modellazione dell’HV realizzato è stata eseguita applicando lo schema geologico dato dall’analisi delle onde di superficie (figura successiva), ottenendo una buona sovrapposizione.

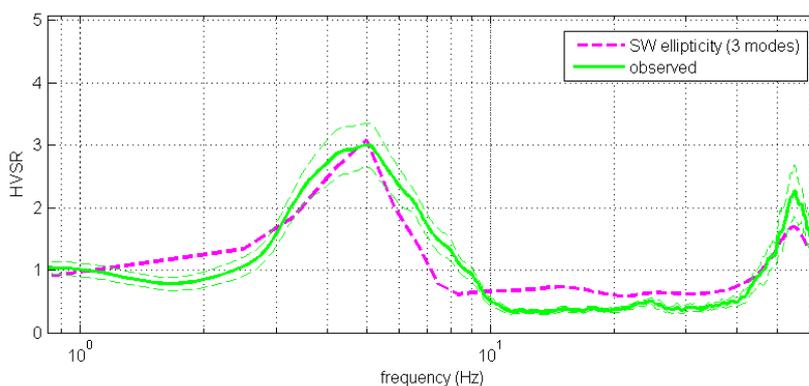


Figura 8. HVSR: in verde le misure effettuate, in magenta la curva HVSR modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009). Il modello è chiaramente lo stesso usato per l’analisi delle onde di superficie.

L’analisi congiunta dei dati ha restituito il modello finale di seguito riportato.

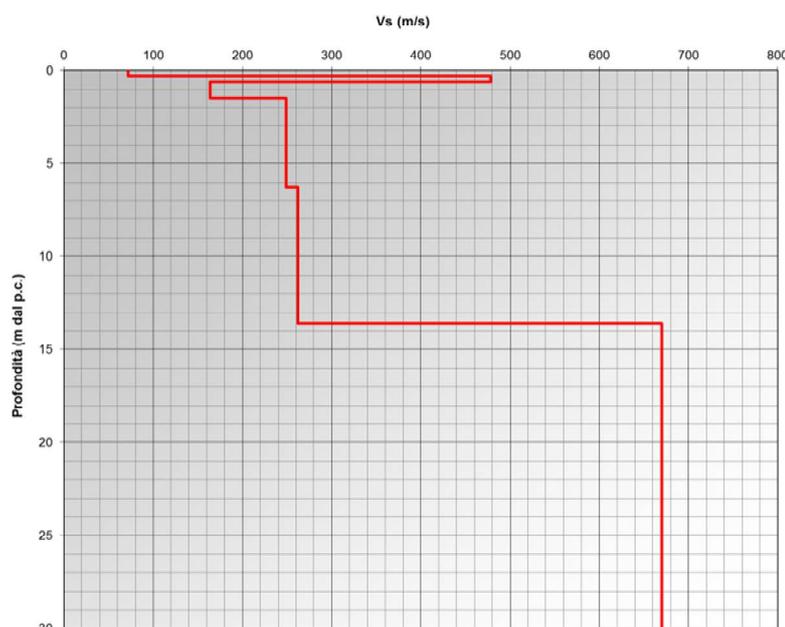
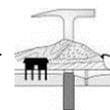


Figura 9. Profilo di velocità ottenuto dall’analisi congiunta.



<i>Spessore (m)</i>	<i>Vs (m/s)</i>
<i>0,3</i>	<i>72</i>
<i>0,3</i>	<i>478</i>
<i>0,9</i>	<i>164</i>
<i>4,8</i>	<i>249</i>
<i>7,3</i>	<i>262</i>
<i>Inf.</i>	<i>670</i>

Tabella 1. Modello di sottosuolo determinato mediante analisi congiunta.



D. ELABORAZIONE DATI MASW+HVSr “CASTIONE DÈ BARATTI”

È stato realizzato uno stendimento con lunghezza di 115 metri e spaziatura di 5 metri tra i 24 geofoni verticali. Per utilità e confronto si sono acquisiti i dati anche sulla metà della linea sismica (g1-g12) energizzando a 2.5 metri dal geofono1.



Figura 10. Stendimento sismico (a sinistra) e acquisizione HVSR (a destra).

Dai sismogrammi acquisiti nel dominio spazio-tempo si determinano mediante la trasformata di Fourier gli spettri nel dominio frequenza-ampiezza e successivamente attraverso il metodo denominato *phase shift* gli spettri nel dominio frequenza-velocità.

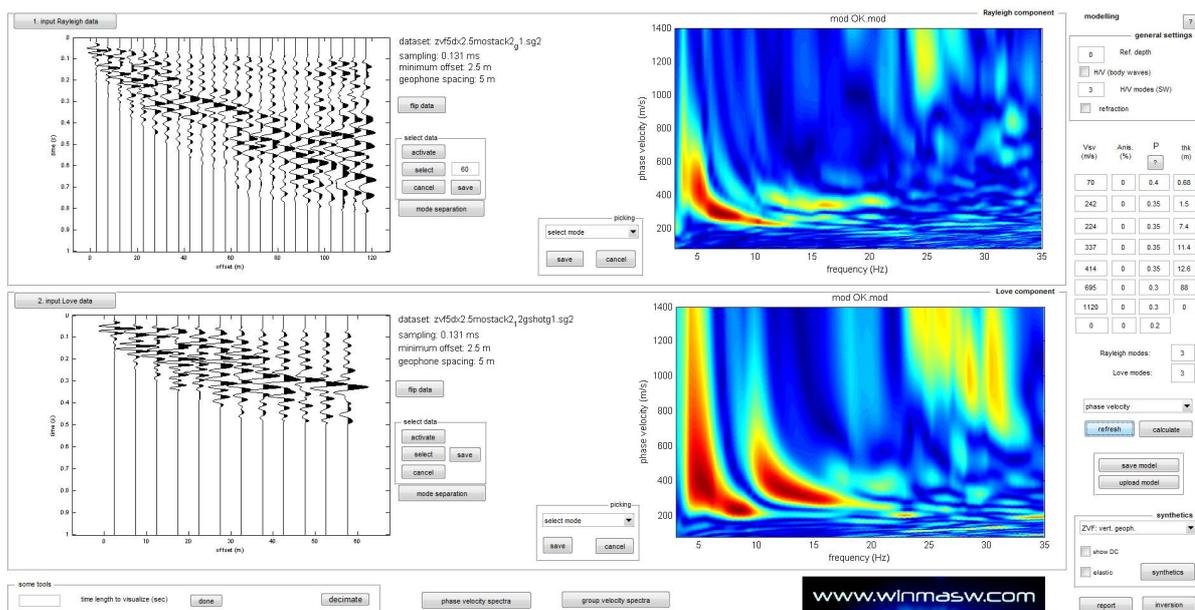
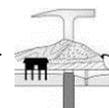


Figura 11. Acquisizione, per lo stendimento di 24 geofoni in alto e per quello a 12 geofoni (g1-g12) in basso, della componente verticale delle onde di Rayleigh (ZVF). Sulla sinistra le tracce sismiche acquisite (sismogramma), sulla destra gli spettri di velocità.

Successivamente alla pulizia del dato si è proceduto alla modellazione diretta delle curve di dispersione. Entrambi gli spettri presentano il modo fondamentale dominante tra le frequenze di 5 e 10 Hz e frammenti dei primi due modi superiori sopra i 10 Hz.

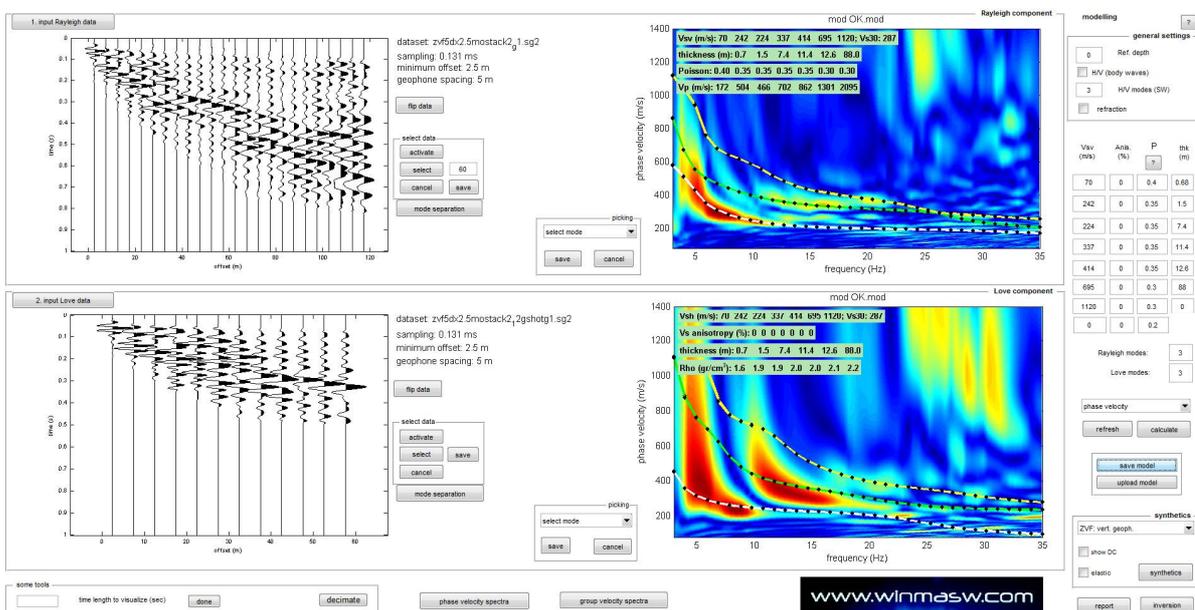
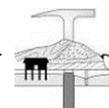


Figura 12. Spettri di velocità con sovrapposte le curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori per la componente verticale delle onde Rayleigh (ZVF) su stendimento rispettivamente a 24 (in alto) e 12 geofoni (in basso).

Allo scopo di definire il periodo di risonanza di sito e migliorare (tramite analisi congiunta MASW+HVSr) la definizione del profilo verticale VS nelle porzioni più profonde, si è effettuata una misurazione di microtremore utile a definire il rapporto H/V lungo lo stendimento.



Nelle figure successive si riportano lo spettro d'ampiezza medio delle 3 componenti (NS, EW e verticale), le caratteristiche dei dati acquisiti e i valori HVSR per la misurazione eseguita.

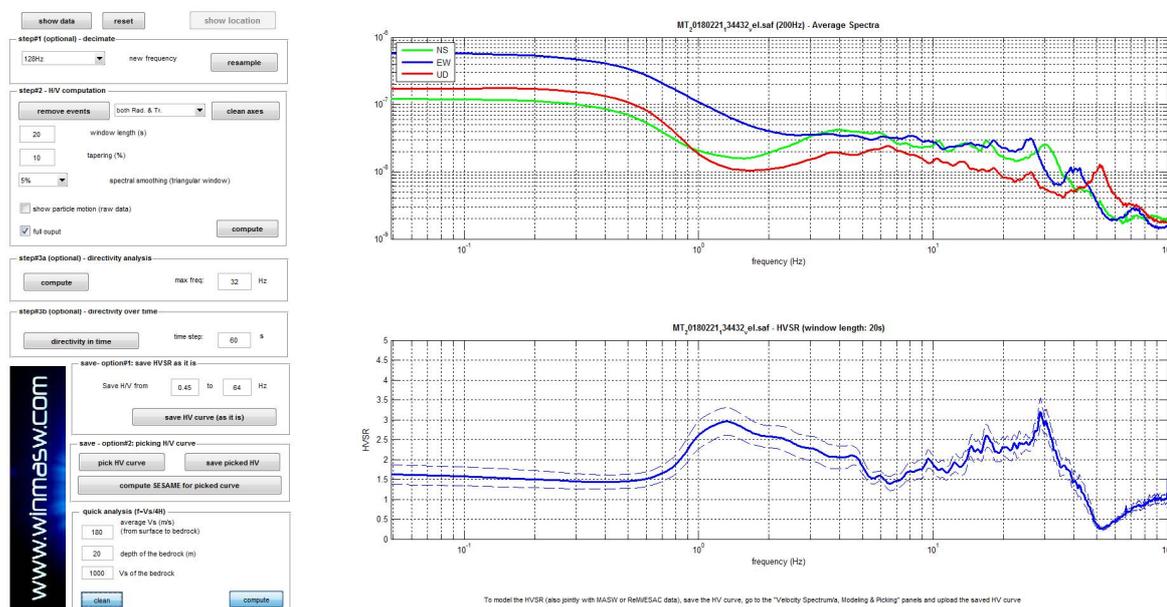


Figura 13. Spettri d'ampiezza medi delle 3 componenti (NS, EW e verticale) e valori di HVSR.

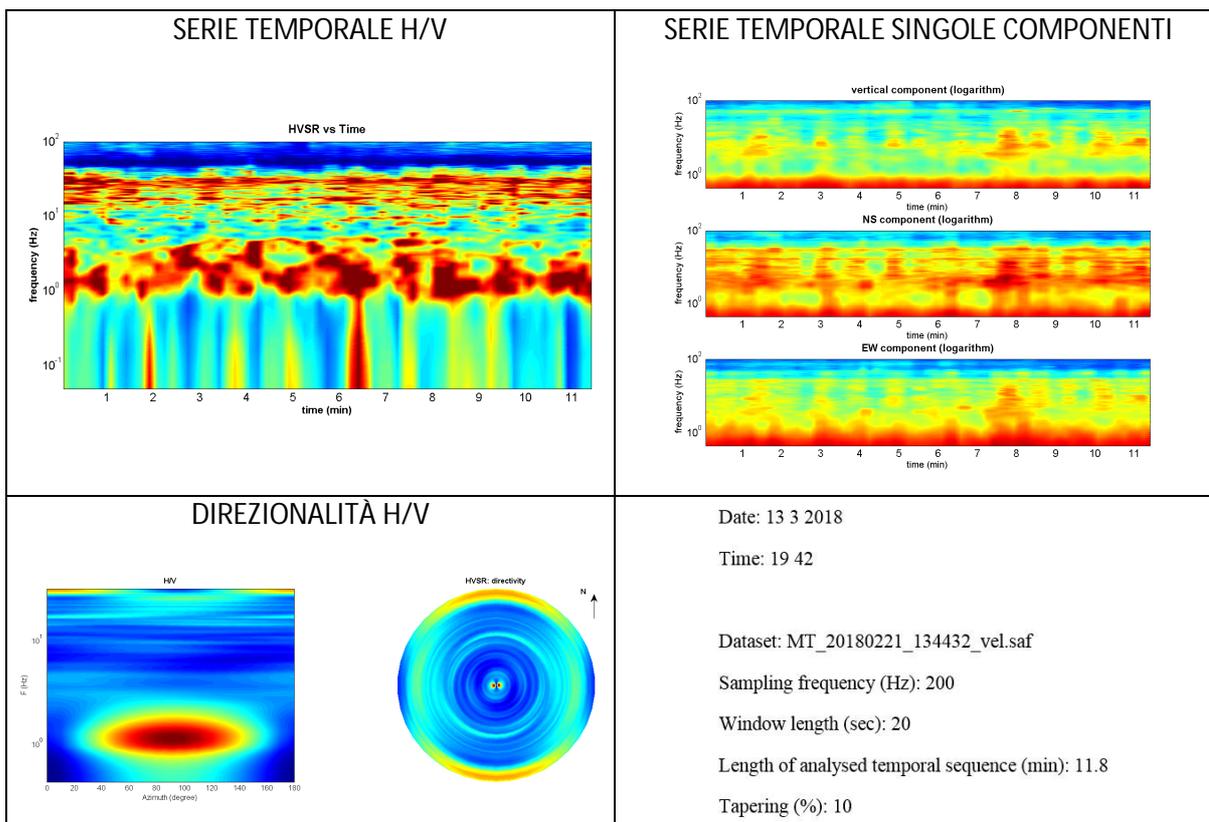
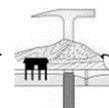


Figura 14. Caratteristiche dati acquisiti.



I criteri SESAME definiscono la robustezza statistica della curva HVSR e degli eventuali picchi presenti. Il computo del picco a 1.4 Hz è riportato nel seguente box. Sono soddisfatti 4 criteri su 6 e non è dunque possibile escludere fenomeni di amplificazione attorno a tale frequenza.

Peak frequency (Hz): 1.4 (±7.3)	==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====
Peak HVSR value: 3.0 (±0.3)	#1. [exists f- in the range [f0/4, f0] AH/V(f-) < A0/2]: yes, at frequency 0.6Hz (OK)
	#2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] AH/V(f+) < A0/2]: (NO)
==== Criteria for a reliable H/V curve =====	#3. [A0 > 2]: 3.0 > 2 (OK)
#1. [f0 > 10/Lw]: 1.4 > 0.5 (OK)	#4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]: (OK)
#2. [nc > 200]: 1888 > 200 (OK)	#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 7.263 > 0.137 (NO)
#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0] (OK)	#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.346 < 1.78 (OK)

La modellazione dell’HV realizzato è stata eseguita applicando lo schema geologico dato dall’analisi delle onde di superficie (figura successiva).

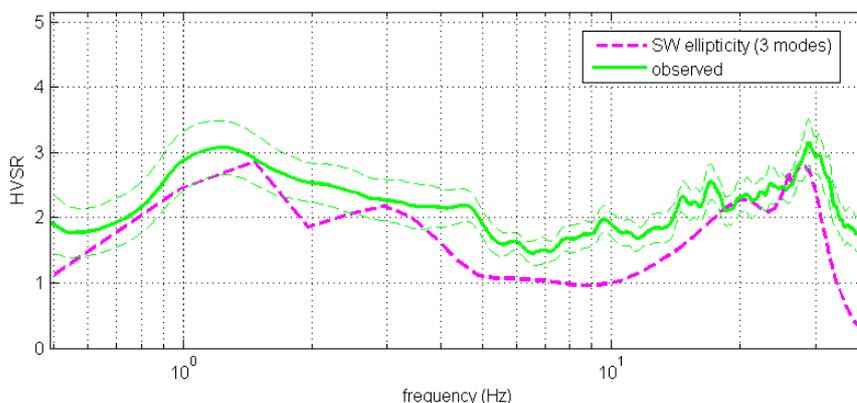


Figura 15. HVSR: in verde le misure effettuate, in magenta la curva HVSR modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009). Il modello è chiaramente lo stesso usato per l’analisi delle onde di superficie.

L’analisi congiunta dei dati ha restituito il modello finale di seguito riportato.

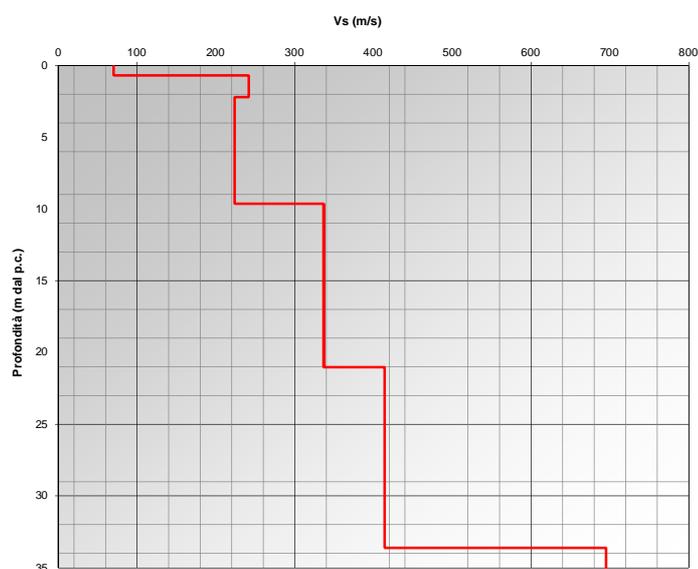
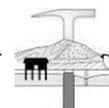


Figura 16. Profilo di velocità ottenuto dall’analisi congiunta.



<i>Spessore (m)</i>	<i>Vs (m/s)</i>
0,7	70
1,5	242
7,4	224
11,4	337
12,6	414
88,0	695
Inf.	1120

Tabella 2. Modello di sottosuolo determinato mediante analisi congiunta.



E. ELABORAZIONE DATI MASW+HVSr “LIDO VAL TERMINA”

È stato realizzato uno stendimento con lunghezza di 55 metri e spaziatura di 5 metri tra i 12 geofoni orizzontali e verticali.



Figura 17. Stendimento sismico (a sinistra) e acquisizione HVSr (a destra).

Dai sismogrammi acquisiti nel dominio spazio-tempo si determinano mediante la trasformata di Fourier gli spettri nel dominio frequenza-ampiezza e successivamente attraverso il metodo denominato *phase shift* gli spettri nel dominio frequenza-velocità.

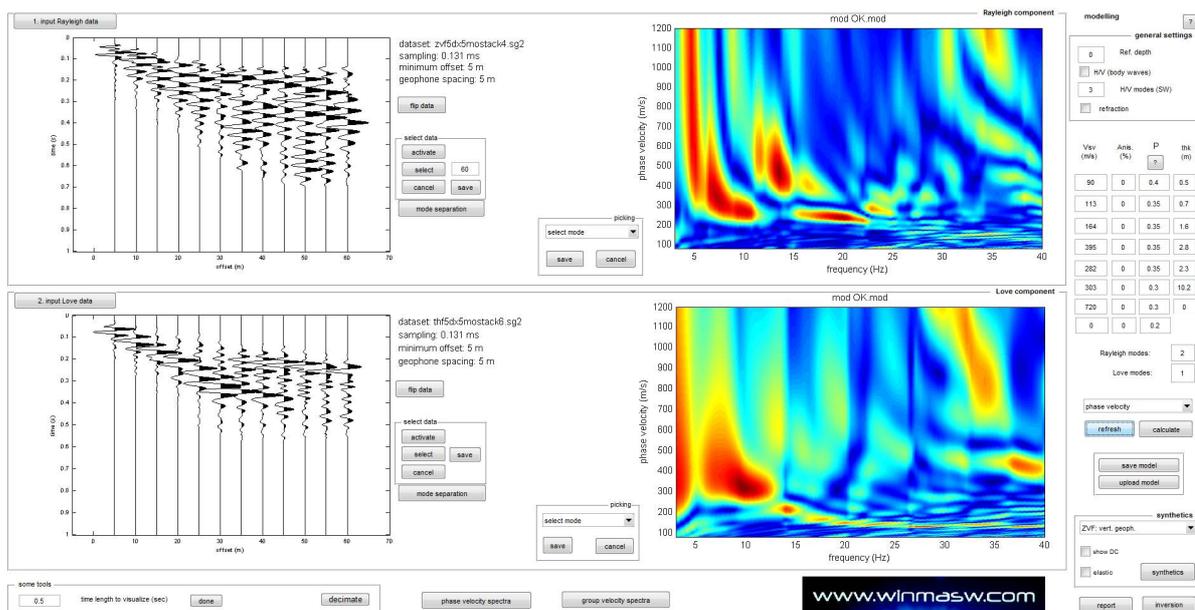
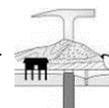


Figura 18. Acquisizione della componente verticale delle onde di Rayleigh (ZVF)_in alto e delle onde di Love (THF)_in basso. Sulla sinistra le tracce sismiche acquisite (sismogramma), sulla destra gli spettri di velocità.

Successivamente alla pulizia del dato si è proceduto alla modellazione diretta delle curve di dispersione. Lo spettro delle onde Rayleigh e quello delle onde di Love presentano entrambi un modo fondamentale dominante. Nello spettro della componente verticale Rayleigh sono visibili anche frammenti del primo modo superiore.

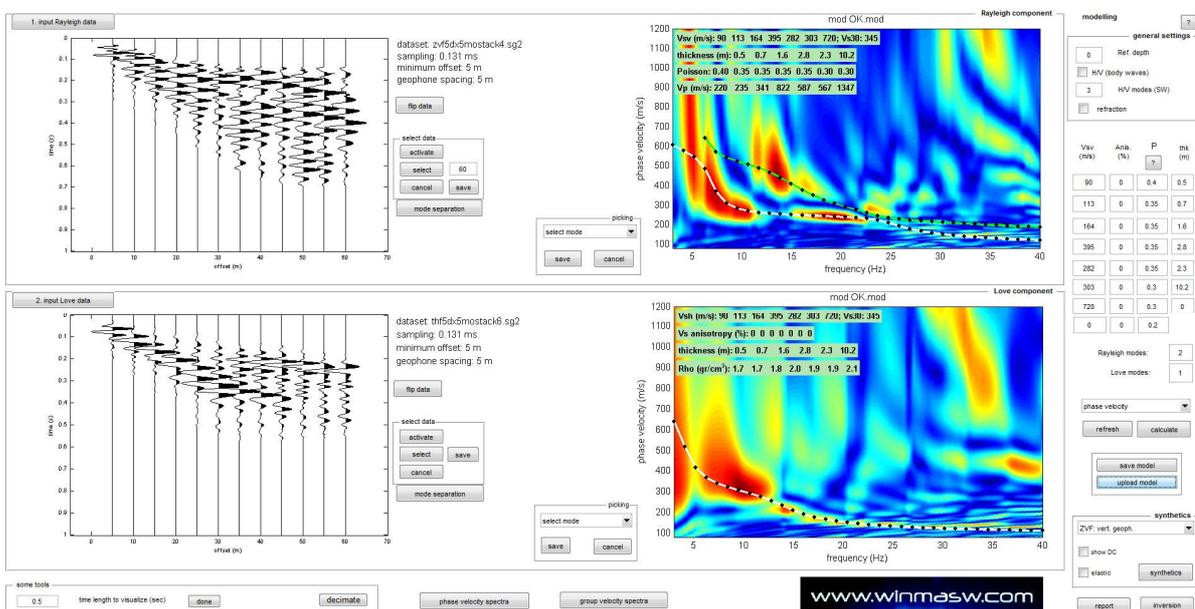
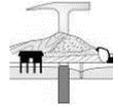


Figura 19. Spettri di velocità con sovrapposte le curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori per la componente verticale delle onde Rayleigh (ZVF) e per le onde di Love (THF).

Allo scopo di definire il periodo di risonanza di sito e migliorare (tramite analisi congiunta MASW+HVSr) la definizione del profilo verticale VS nelle porzioni più profonde, si è effettuata una misurazione di microtremore utile a definire il rapporto H/V lungo lo stendimento.



Nelle figure successive si riportano lo spettro d'ampiezza medio delle 3 componenti (NS, EW e verticale), le caratteristiche dei dati acquisiti e i valori HVSR per la misurazione eseguita.

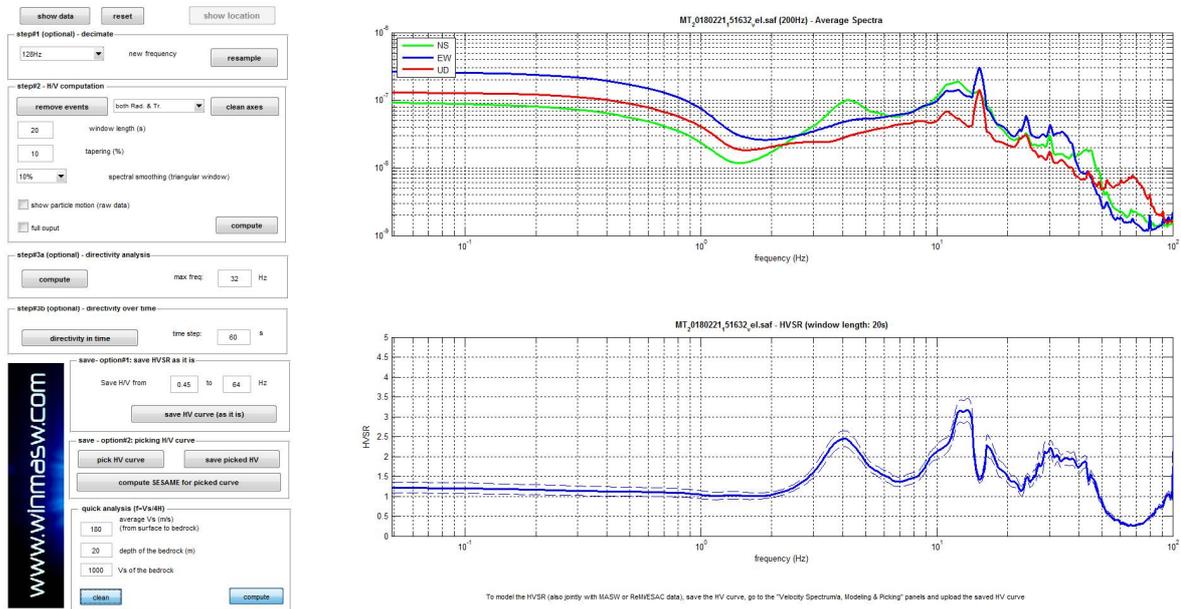


Figura 20. Spettri d'ampiezza medi delle 3 componenti (NS, EW e verticale) e valori di HVSR.

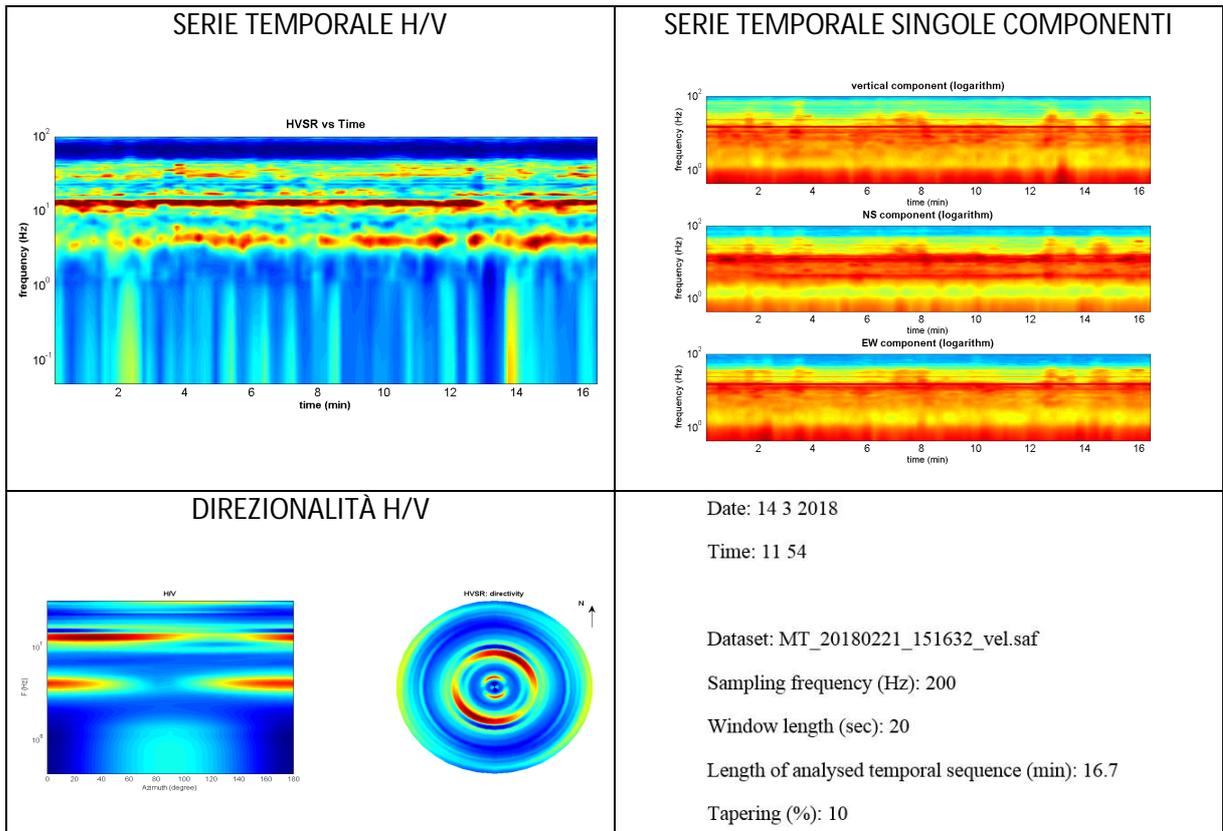


Figura 21. Caratteristiche dati acquisiti.



I criteri SESAME definiscono la robustezza statistica della curva HVSR e degli eventuali picchi presenti. Il computo del picco a 4.2 Hz è riportato nel seguente box. Sono soddisfatti 5 criteri su 6, la frequenza è dunque classificabile come di risonanza.

Peak frequency (Hz): 4.2 (± 1.3)

Peak HVSR value: 2.8 (± 0.3)

==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

#1. [exists f- in the range [f0/4, f0] | AH/V(f-) < A0/2]: yes, at frequency 2.9Hz (OK)

#2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] | AH/V(f+) < A0/2]: yes, at frequency 6.6Hz (OK)

==== Criteria for a reliable H/V curve =====

#3. [A0 > 2]: 2.8 > 2 (OK)

#1. [f0 > 10/Lw]: 4.2 > 0.5 (OK)

#4. [fpeak[Ah/v(f) \pm sigmaA(f)] = f0 \pm 5%]: (OK)

#2. [nc > 200]: 8222 > 200 (OK)

#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 1.260 > 0.208 (NO)

#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0] (OK)

#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.277 < 1.58 (OK)

La modellazione dell'HV realizzato è stata eseguita applicando lo schema geologico dato dall'analisi delle onde di superficie (figura successiva).

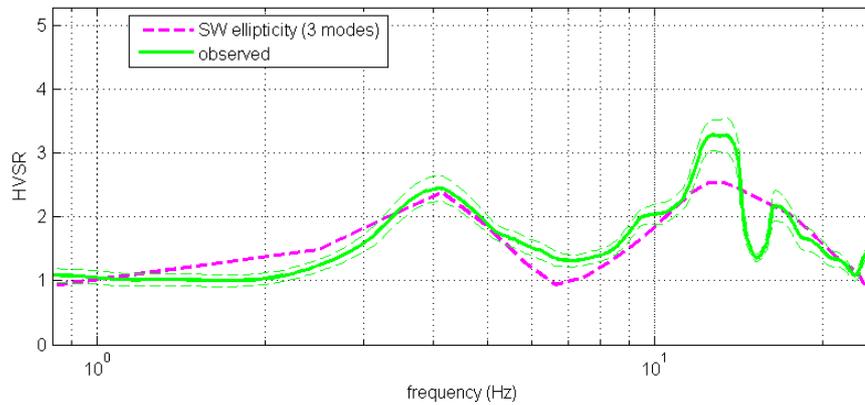


Figura 22. HVSR: in verde le misure effettuate, in magenta la curva HVSR modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedi & Albarello, 2009). Il modello è chiaramente lo stesso usato per l'analisi delle onde di superficie.

L'analisi congiunta dei dati ha restituito il modello finale di seguito riportato.

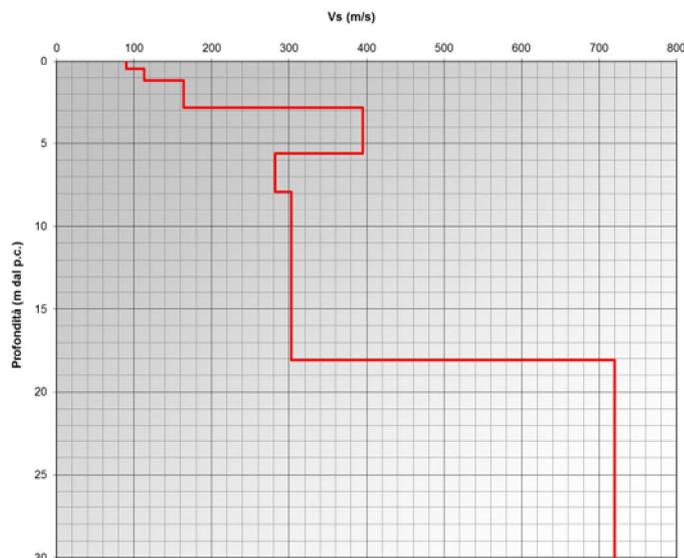
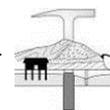


Figura 23. Profilo di velocità ottenuto dall'analisi congiunta.



<i>Spessore (m)</i>	<i>Vs (m/s)</i>
<i>0,5</i>	<i>90</i>
<i>0,7</i>	<i>113</i>
<i>1,6</i>	<i>164</i>
<i>2,8</i>	<i>395</i>
<i>2,3</i>	<i>282</i>
<i>10,2</i>	<i>303</i>
<i>Inf.</i>	<i>720</i>

Tabella 3. Modello di sottosuolo determinato mediante analisi congiunta.



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Dziewonski A., Bloch S., and Landisman M., 1969. *A technique for the analysis of transient seismic signals*. Bulletin of the Seismological Society of America, 59, No. 1, 427-444
- Levshin A.L., Pisarenko V., Pogrebinsky G., 1972 . *On a frequency-time analysis of oscillations*. Annales Geophys.; 28, 211-218.
- Aki K. and Richards P.G., 1980. *Quantitative Seismology, Theory and Methods*, Vol. 1-2, W.H. Freeman & Co., New York.
- Tokimatsu K., Tamura S., Kojima H., 1992. *Effects of Multiple Modes on Rayleigh Wave Dispersion Characteristics*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 118 (10), 1529-1543.
- Achenbach J.D., 1999. *Wave Propagation in Elastic Solids*, North-Holland, Amsterdam, Netherlands.
- Park C. B., Miller R. D. & Xia J., 1999. *Multichannel analysis of surface waves*, Geophysics, 64, 3; 800-808.
- Zywicki D.J., 1999. *Advanced Signal Processing Methods Applied to Engineering Analysis of Seismic Surface Waves*, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology.
- Herrmann R.B. 2003. *Computer Programs in Seismology*.
- O'Neill A., Dentith M., List R., 2003. *Full-waveform P-SV reflectivity inversion of surface waves for shallow engineering applications*, Exploration Geophysics, 34, 158-173.
- Arai H., Tokimatsu K., 2004, *S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum*, Bull. Seism. Soc. Am: 94, 53-63.
- Safari J., O'Neill A., Matsuoka T., Sanada Y. (2005). *Applications of Love Wave Dispersion for Improved Shear-wave Velocity Imaging*, Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 10, 135-150.
- Dal Moro G., Pipan M. & Gabrielli P., 2007. *Rayleigh Wave Dispersion Curve Inversion via Genetic Algorithms and Posterior Probability Density Evaluation*, J. Appl. Geophysics, 61, 39-55.
- Herak M., 2008. Model HVSR - *A Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise*, Computers & Geosciences, 34, 1514-1526.
- Lunedei E. and Albarello D.; 2009. *On the seismic noise wavefield in a weakly dissipative layered Earth*, Geophys. J. Int., 177, 1001-1014.
- Software *Microtremor* (<http://nato.gfz.hr/SW.zip>) di Albarello D. & Lunedei E. (vedi Lunedei E., Albarello D., 2009, *On the seismic noise wavefield in a weakly dissipative layered Earth*, *Geophys. J. Int.*, 177, 1001-1014).
- Dal Moro G., 2010. *Insights on Surface-Wave Dispersion Curves and HVSR: Joint Analysis via Pareto Optimality*, J. Appl. Geophysics, 72, 29-140.
- Dal Moro G. & Ferigo F., 2011. *Joint Analysis of Rayleigh - and Love-Wave Dispersion for Near-Surface Studies: Issues, Criteria and Improvements*, J. Appl. Geophysics, in stampa.
- Dal Moro G., 2011. *Some Aspects about Surface Wave and HVSR Analyses: an Short Overview and a Case Study*, BGTA (Bollettino Geofisica Teorica e Applicata), Vol. 52, in stampa.
- Luo Y., Xia J., Xu Y. & Zeng C., 2011, *Analysis of group-velocity dispersion of high-frequency Rayleigh waves for near-surface applications*. Journal of Applied Geophysics, 74, 157-165.