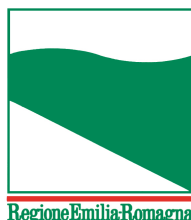




PROTEZIONE CIVILE
Presidenza del Consiglio dei Ministri
Dipartimento della Protezione Civile




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

MICROZONAZIONE SISMICA

Prove MASW

Regione Emilia-Romagna Comune di Solignano



Regione	Soggetto Realizzatore	Data
 Regione Emilia-Romagna	Dott. Geol. Fabio Francesco Picinotti Via Silvio Pellico, 4 43125 Parma (Pr)	Novembre 2018

A. METODOLOGIA MASW “Solignano Campo sportivo”

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.

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.

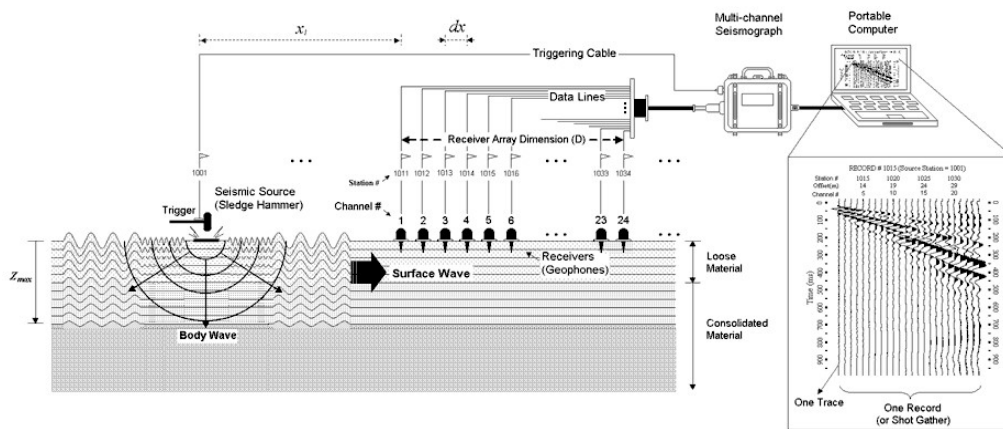
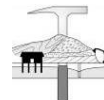


Figura 1. Metodo MASW attivo.

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 rigidezza 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.



È stata inoltre eseguita una misura di microtremori atta 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.

A.1. ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione dei dati, eseguita sul medesimo stendimento lineare della sismica a rifrazione, è stata eseguita con un tempo di acquisizione pari a 1 secondo, energizzando con una mazza battente di 8 kg in posizione esterna rispetto ai geofoni 1 e 24 con offset di 5 m.

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.



Figura 2. Acquisizione HVSR.

A.2. ELABORAZIONE

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.

Successivamente alla pulizia del dato si è proceduto alla modellazione diretta delle curve di dispersione. Lo spettro delle onde Rayleigh mostra il mondo fondamentale dominante fino a circa 15 Hz e frammenti dei modi superiori a frequenze maggiori.

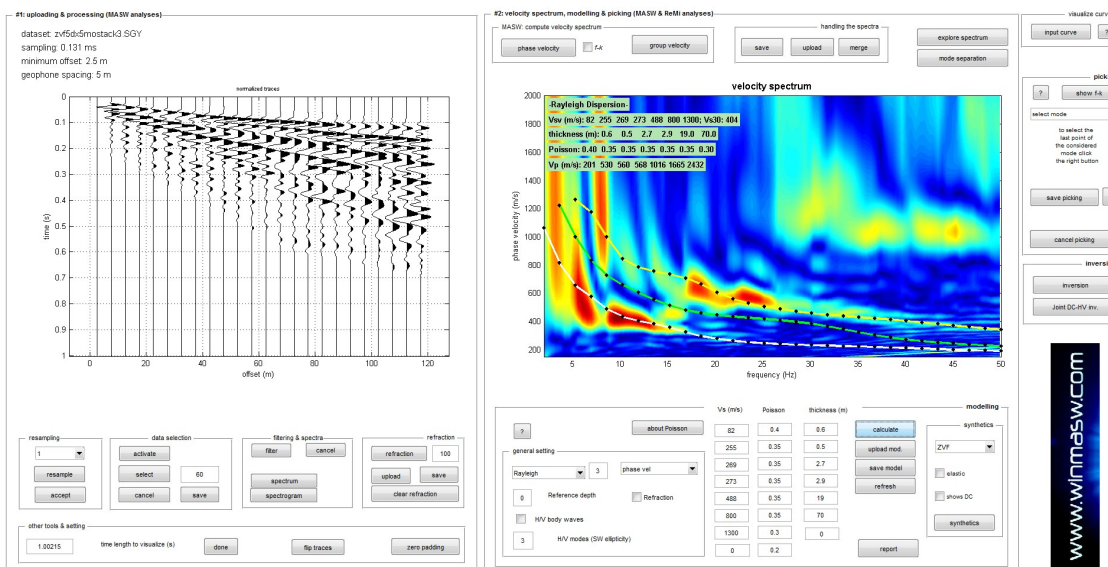
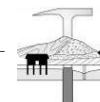


Figura 3. Spettro di velocità con sovrapposte le curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori per la componente verticale delle onde Rayleigh (ZVF).

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.

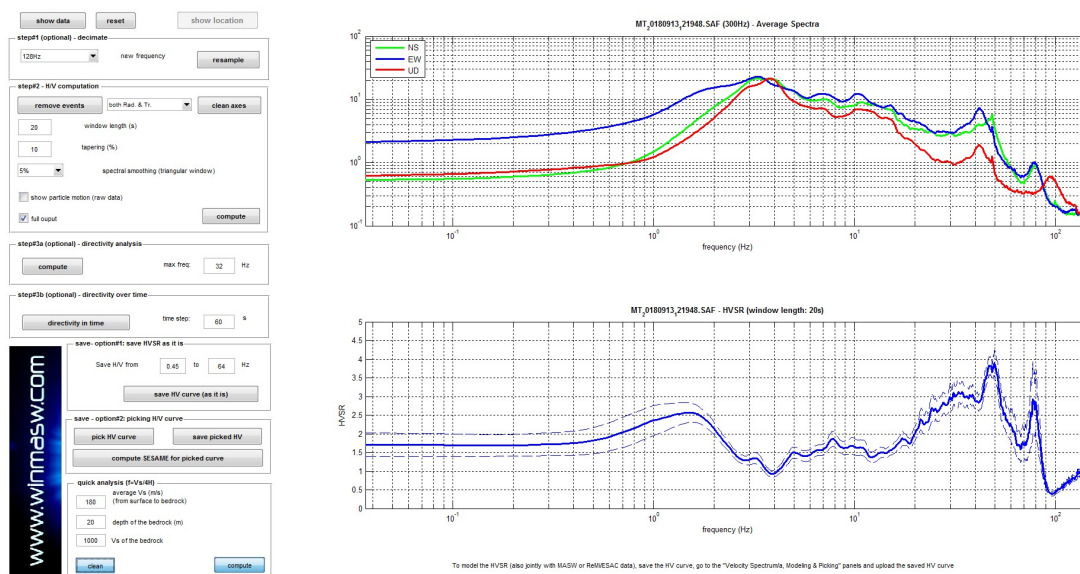


Figura 4. Spettri d'ampiezza medi delle 3 componenti (NS, EW e verticale) e valori di HVSR.

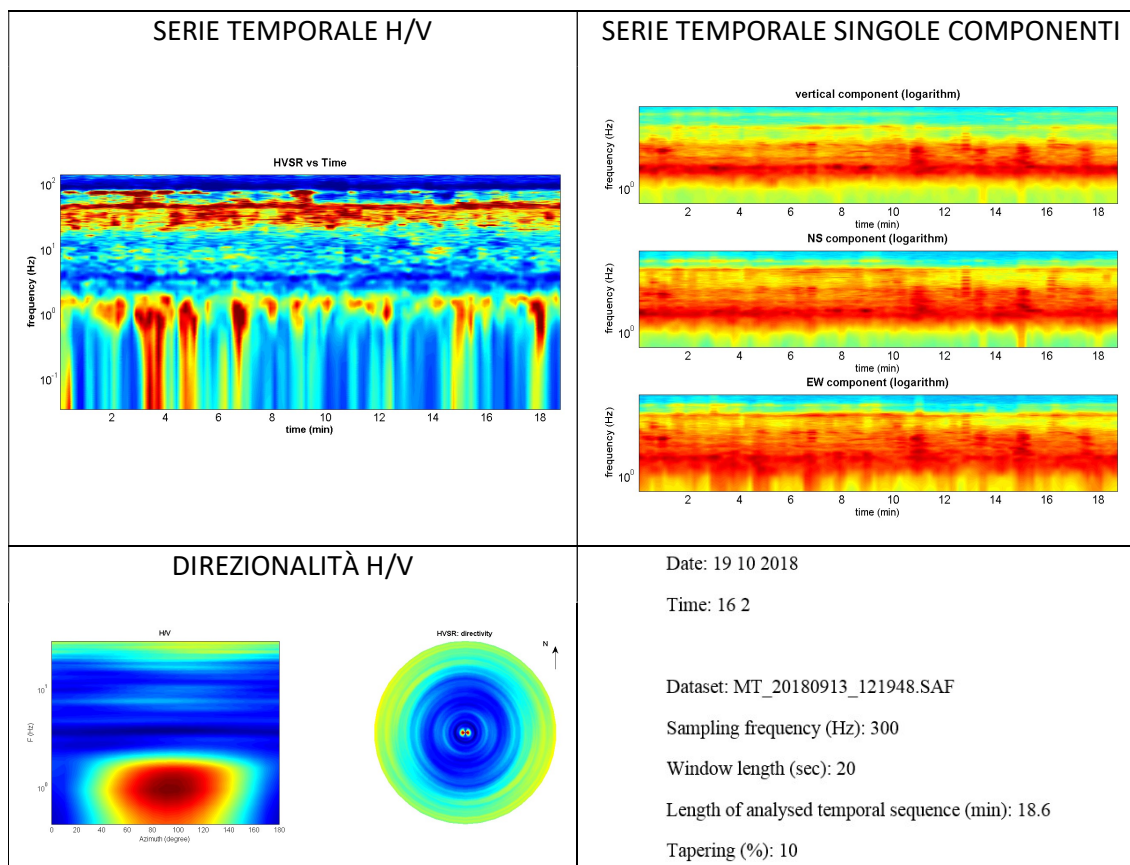
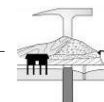


Figura 5. Caratteristiche dati acquisiti.

I criteri SESAME definiscono la robustezza statistica della curva HVSr e degli eventuali picchi presenti. Il computo del picco a 1,7 Hz è riportato nel seguente box; sono soddisfatti 4 criteri su 6 e non è dunque possibile escludere il verificarsi di fenomeni di amplificazione.

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 1.7 (±6.8)

Peak HVSr value: 2.7 (±0.4)

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

#1. [f0 > 10/Lw]: 1.7 > 0.5 (OK)

#2. [nc > 200]: 3788 > 200 (OK)

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

==== 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]: (NO)

#2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] | AH/V(f+) < A0/2]: yes, at frequency 2.8Hz (OK)

#3. [A0 > 2]: 2.7 > 2 (OK)

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

#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 6.832 > 0.172 (NO)

#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.403 < 1.78 (OK)

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

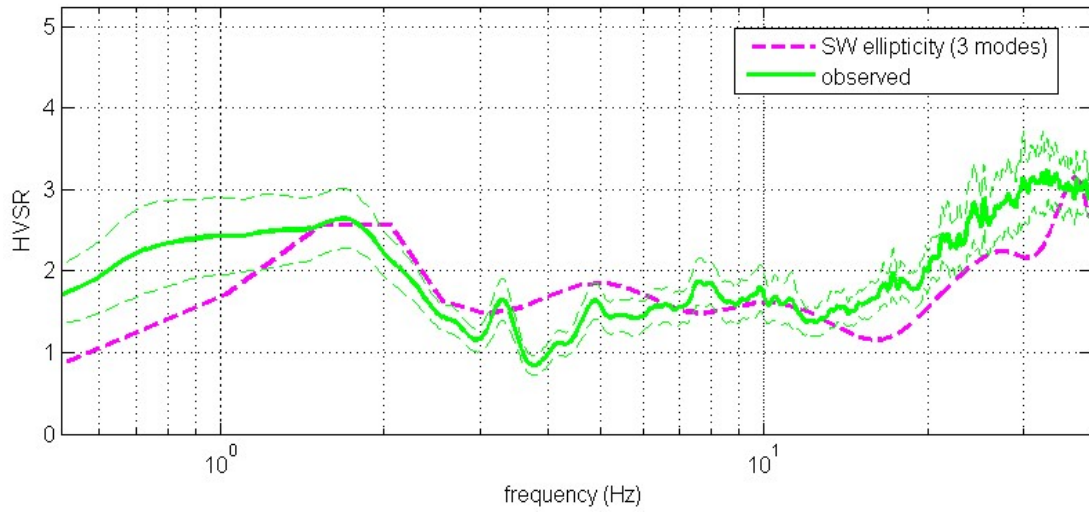
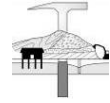


Figura 6. HVSr: in verde le misure effettuate, in magenta la curva HVSr modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009). Il modello è chiaramente lo stesso usato per l'analisi delle onde di superficie.

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



Figura 7. Profilo di velocità ottenuto dall'analisi congiunta.



Spessore (m)	Vs (m/s)
0,6	85
0,5	285
2,7	299
2,9	303
19,0	472
70,0	800
Inf.	1300

Tabella 1. Modello di sottosuolo determinato mediante analisi congiunta.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

h_i : spessore in metri dell' i -esimo strato;

$V_{S,i}$: 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/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse. 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.

Le indagini sismiche hanno permesso di ricavare una $V_{S,eq}$ al piano campagna pari a 373 m/s.

	Spessore (m)	da (m)	a (m)	Vs	H_i/V_{S_i}
Sismostrato 1	0,6	0	0,6	82	0,0073
Sismostrato 2	0,5	0,6	1,1	255	0,0020
Sismostrato 3	2,7	1,1	3,8	269	0,0100
Sismostrato 4	2,9	3,8	6,7	273	0,0106
Sismostrato 5	19,0	6,7	25,7	488	0,0389
Sismostrato 6	70,0	25,7	95,7	800	0,0875
Sismostrato 7	-	95,7	-	1300	

Tabella 2. Modello per calcolo $V_{S,eq}$.

Profondità calcolo $V_{S,eq}$ (m dal p.c.)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0,0	373
0,5	401
1,0	412
2,0	421
3,0	432
4,0	444
5,0	458

Tabella 3. Valori di $V_{S,eq}$ in funzione della profondità di calcolo.

A. METODOLOGIA MASW “Solignano vasca”

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.

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.

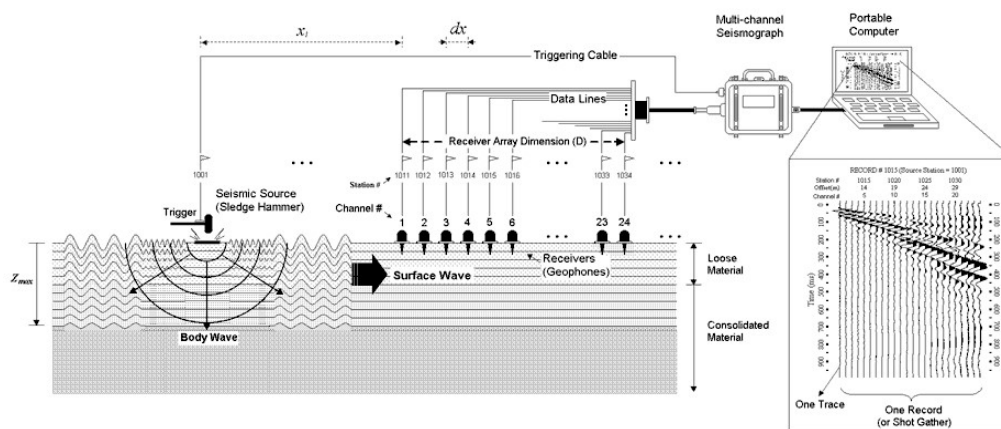
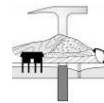


Figura 1. Metodo MASW attivo.

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.



È stata inoltre eseguita una misura di microtremori atta 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.

A.1. ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione dei dati, eseguita sul medesimo stendimento lineare della sismica a rifrazione, è stata eseguita con un tempo di acquisizione pari a 1 secondo, energizzando con una mazza battente di 8 kg in posizione esterna rispetto ai geofoni 1 e 24 con offset di 2,5 m.

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.



Figura 2. Acquisizione HVSR.

A.2. ELABORAZIONE

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.

Successivamente alla pulizia del dato si è proceduto alla modellazione diretta delle curve di dispersione. Lo spettro delle onde Rayleigh mostra il mondo fondamentale e frammenti dei modi superiori.

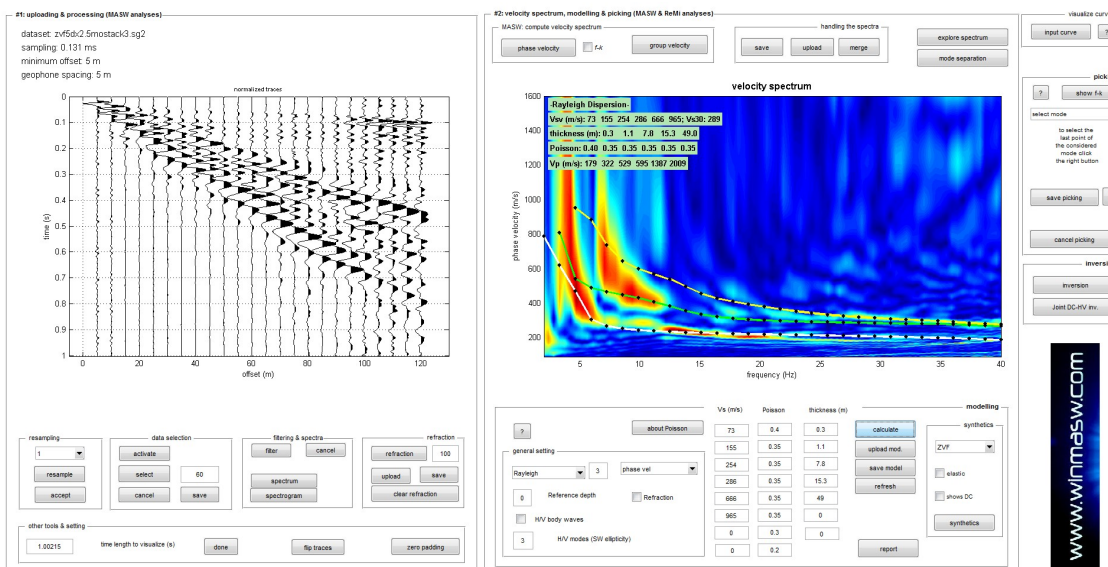
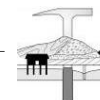


Figura 3. Spettro di velocità con sovrapposte le curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori per la componente verticale delle onde Rayleigh (ZVF).

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.

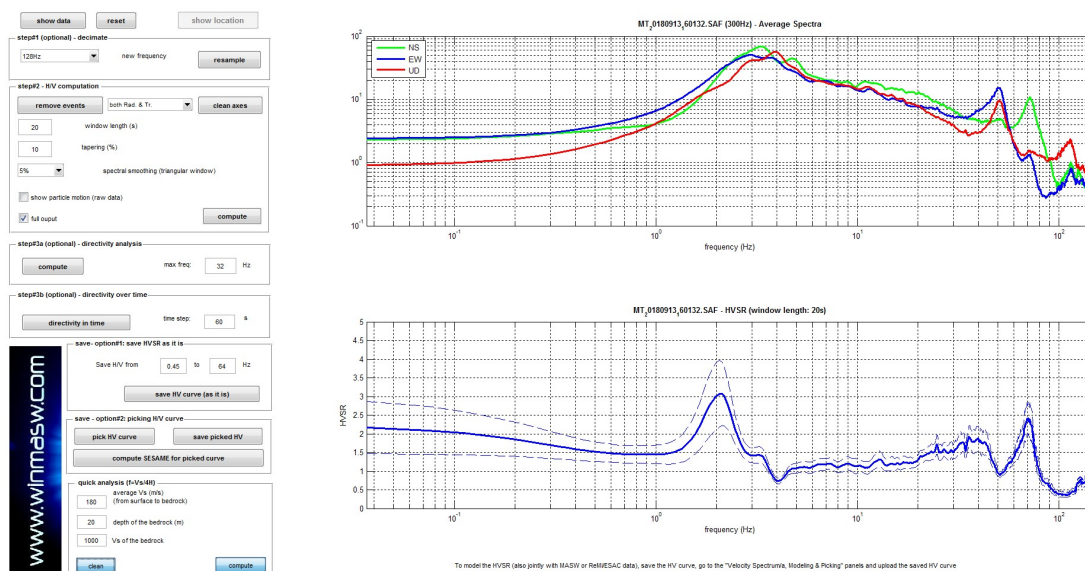


Figura 4. Spettri d'ampiezza medi delle 3 componenti (NS, EW e verticale) e valori di HVSR.

SERIE TEMPORALE H/V

SERIE TEMPORALE SINGOLE COMPONENTI

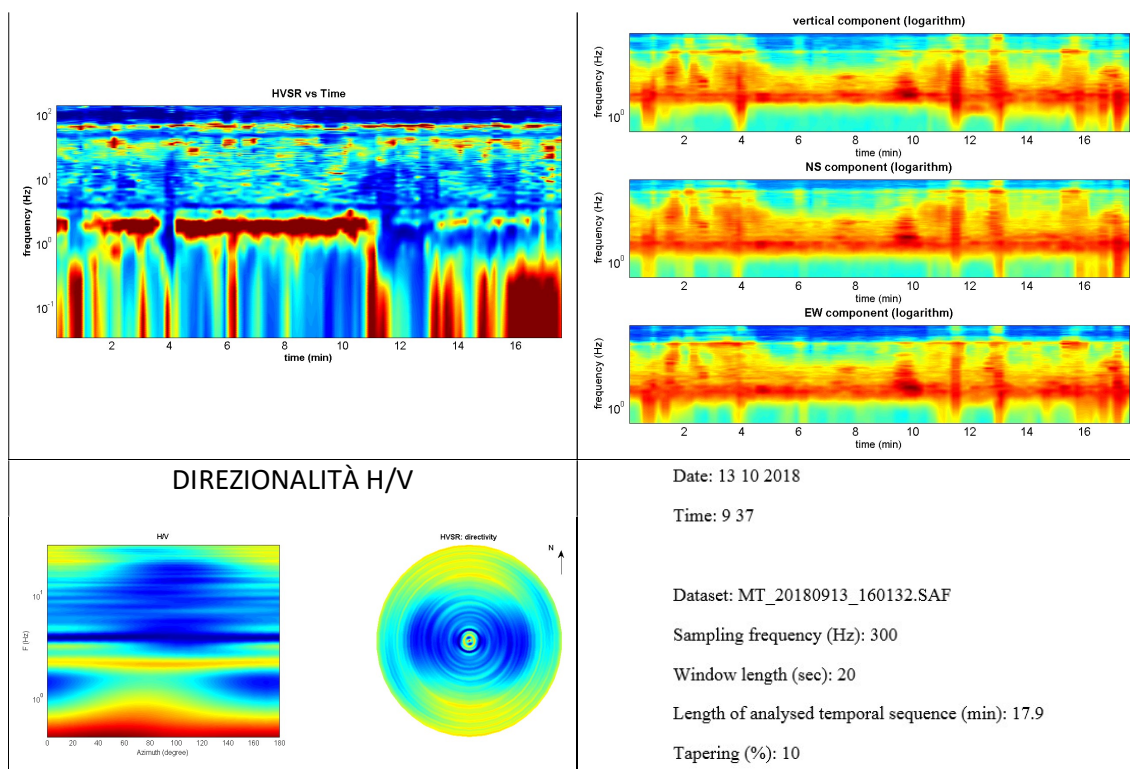
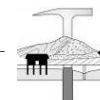


Figura 5. Caratteristiche dati acquisiti.

I criteri SESAME definiscono la robustezza statistica della curva HVSr e degli eventuali picchi presenti. Il computo del picco a 2,1 Hz è riportato nel seguente box; essendo soddisfatti 5 criteri su 6 la frequenza analizzata è da ritenersi di risonanza.

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 2.1 (±5.3)

Peak HVSr value: 3.1 (±0.9)

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

#1. [f0 > 10/Lw]: 2.1 > 0.5 (OK)

#2. [nc > 200]: 4504 > 200 (OK)

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

==== 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 1.3Hz (OK)

#2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] | AH/V(f+) < A0/2]: yes, at frequency 2.8Hz (OK)

#3. [A0 > 2]: 3.1 > 2 (OK)

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

#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 5.313 > 0.106 (NO)

#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.880 < 1.58 (OK)

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

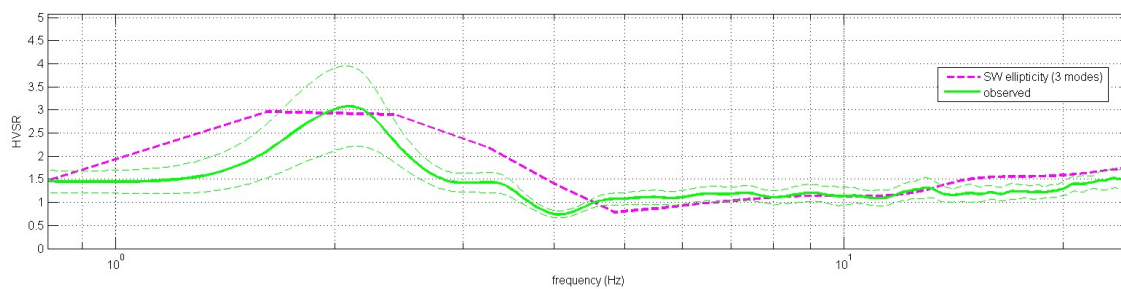
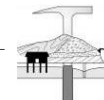


Figura 6. HVSR: in verde le misure effettuate, in magenta la curva HVSR modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009). Il modello è chiaramente lo stesso usato per l'analisi delle onde di superficie.

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

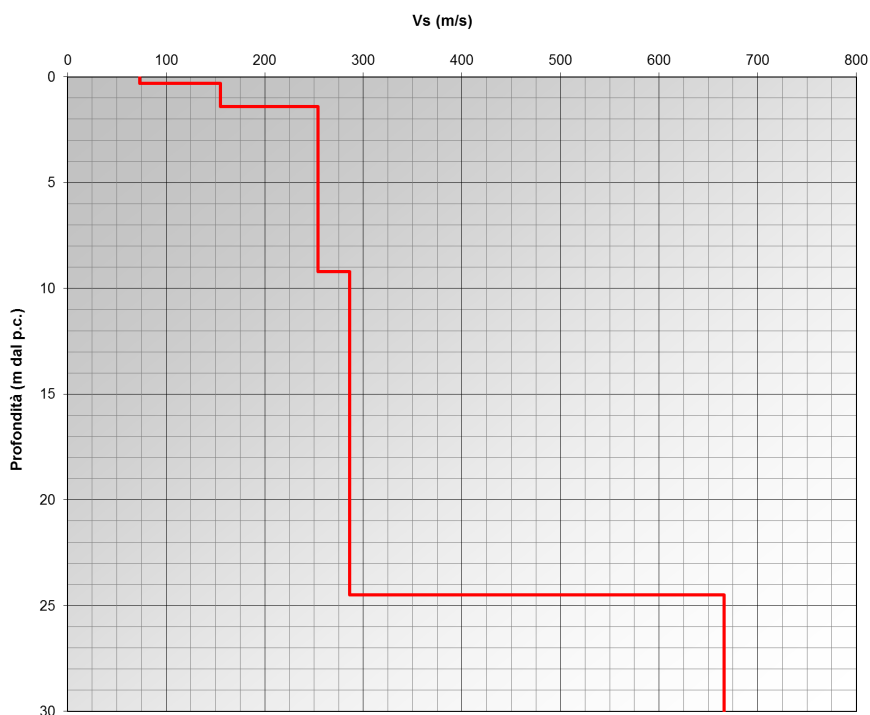


Figura 7. Profilo di velocità ottenuto dall'analisi congiunta.

Spessore (m)	Vs (m/s)
0,3	73
1,1	155
7,8	254
15,3	286
49,0	666
Inf.	965

Tabella 1. Modello di sottosuolo determinato mediante analisi congiunta.



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

h_i : spessore in metri dell' i -esimo strato;

$V_{S,i}$: 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/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse. 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.

Le indagini sismiche hanno permesso di ricavare una $V_{S,30}$ al piano campagna pari a 289 m/s.

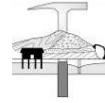
	Spessore (m)	da (m)	a (m)	V_s	H_i/V_{S_i}
Sismostrato 1	0,3	0	0,3	73	0,0041
Sismostrato 2	1,1	0,3	1,4	155	0,0071
Sismostrato 3	7,8	1,4	9,2	254	0,0307
Sismostrato 4	15,3	9,2	24,5	286	0,0535
Sismostrato 5	49,0	24,5	73,5	666	0,0736
Sismostrato 6	-	73,5	-	965	

Tabella 2. Modello per calcolo $V_{S,eq}$.

Profondità calcolo $V_{S,eq}$ (m dal p.c.)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0,0	289
0,5	303
1,0	311
2,0	322
3,0	331
4,0	340
5,0	350

Tabella 3. Valori di $V_{S,eq}$ in funzione della profondità di calcolo.

Per *bedrock* sismico alcuni autori intendono quel corpo geologico al cui interno la V_s è significativamente maggiore (almeno doppia) di quella dei terreni soprastanti e aumenta gradualmente con la profondità. I valori di $V_{S,30}$ (velocità equivalente delle onde S nei primi 30 metri di profondità) delle coperture variano generalmente tra 150 e 350 m/s; misure sperimentali indicano che in Appennino terreni caratterizzati da V_s circa uguale a 650÷700 m/s si comportano da *bedrock* sismico (BORDONI *et alii*,2007). In questa seconda interpretazione la $V_{S,eq}$ al piano campagna sarebbe pari a 257 m/s con una profondità del *bedrock* sismico pari a 24,5 metri.



Profondità calcolo $V_{s,eq}$ (m dal p.c.)	$V_{s,eq}$ (m/s)
0,0	257
0,5	267
1,0	271
2,0	275
3,0	276
4,0	277
5,0	278

Tabella 4. Valori di $V_{s,eq}$ in funzione della profondità di calcolo.

A. METODOLOGIA MASW “Bottione”

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.

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.

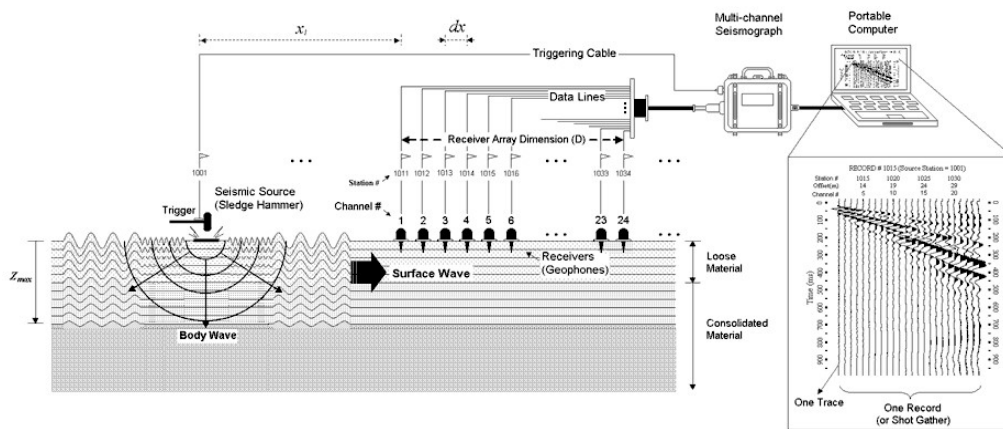


Figura 1. Metodo MASW attivo.

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.



È stata inoltre eseguita una misura di microtremiti atta 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.

A.1. ACQUISIZIONE DATI

L'acquisizione dei dati, eseguita sul medesimo stendimento lineare della sismica a rifrazione, è stata eseguita con un tempo di acquisizione pari a 1 secondo, energizzando con una mazza battente di 8 kg in posizione esterna rispetto al geofono 12 con offset pari a 5 m.

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.



Figura 2. Acquisizione HVSR.

A.2. ELABORAZIONE

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.

Successivamente alla pulizia del dato si è proceduto alla modellazione diretta delle curve di dispersione. Lo spettro delle onde Rayleigh mostra frammenti del mondo fondamentale e dei modi superiori.

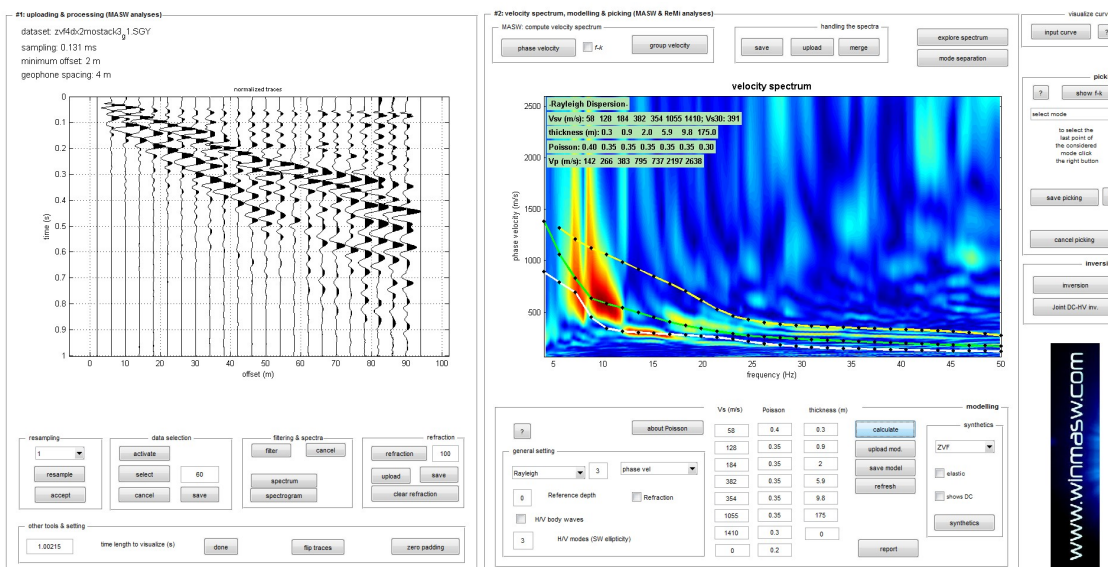
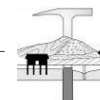


Figura 3. Spettro di velocità con sovrapposte le curve di dispersione del modo fondamentale e di quelli superiori per la componente verticale delle onde Rayleigh (ZVF).

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.

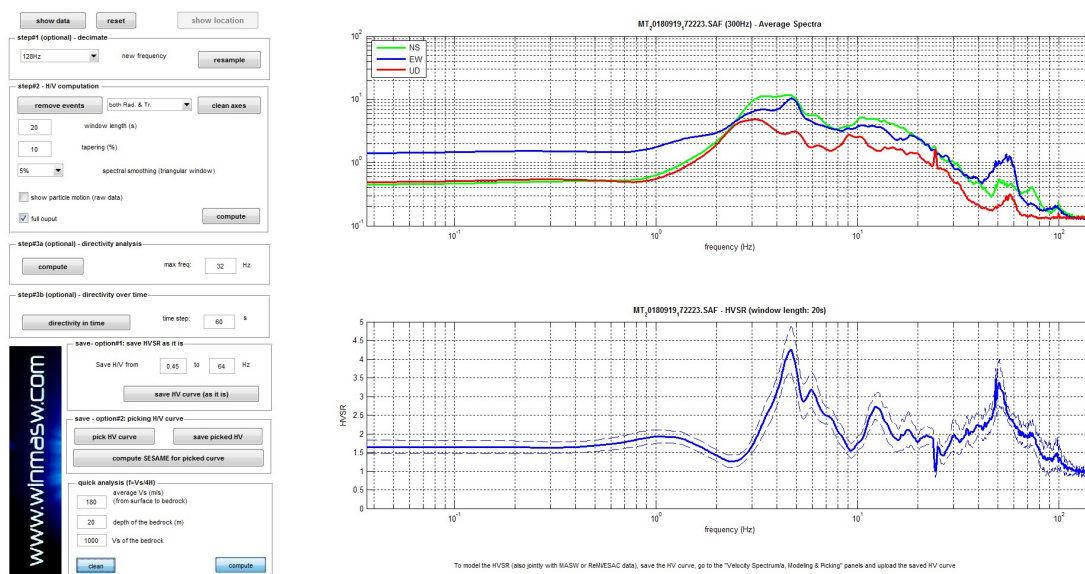


Figura 4. Spettri d'ampiezza medi delle 3 componenti (NS, EW e verticale) e valori di HVSR.

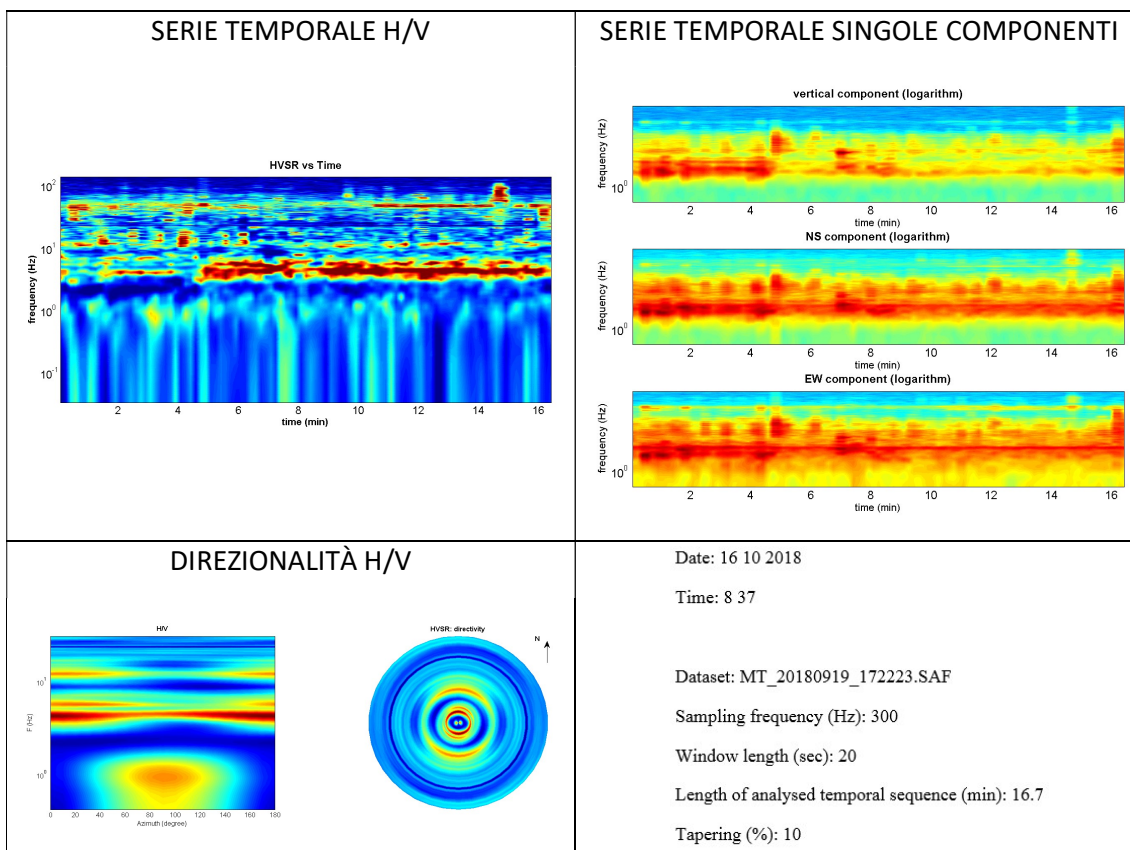
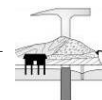


Figura 5. Caratteristiche dati acquisiti.

I criteri SESAME definiscono la robustezza statistica della curva HVSr e degli eventuali picchi presenti. Il computo del picco a 4,7 Hz è riportato nel seguente box; essendo soddisfatti 5 criteri su 6 la frequenza analizzata è da ritenersi di risonanza.

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 4.7 (±4.3)

Peak HVSr value: 4.3 (±0.6)

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

- #1. $[f_0 > 10/Lw]$: $4.7 > 0.5$ (OK)
- #2. $[nc > 200]$: $9356 > 200$ (OK)
- #3. $[f_0 > 0.5\text{Hz}; \sigma_A(f) < 2 \text{ for } 0.5f_0 < f < 2f_0]$ (OK)

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

- #1. $[\text{exists } f^- \text{ in the range } [f_0/4, f_0] | AH/V(f^-) < A_0/2]$: yes, at frequency 3.3Hz (OK)
- #2. $[\text{exists } f^+ \text{ in the range } [f_0, 4f_0] | AH/V(f^+) < A_0/2]$: yes, at frequency 8.0Hz (OK)
- #3. $[A_0 > 2]$: $4.3 > 2$ (OK)
- #4. $[f_{\text{peak}}[Ah/v(f)] = f_0 \pm 5\%]$: (OK)
- #5. $[\sigma_{\text{maf}} < \epsilon(f_0)]$: $4.319 > 0.236$ (NO)
- #6. $[\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)]$: $0.628 < 1.58$ (OK)

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

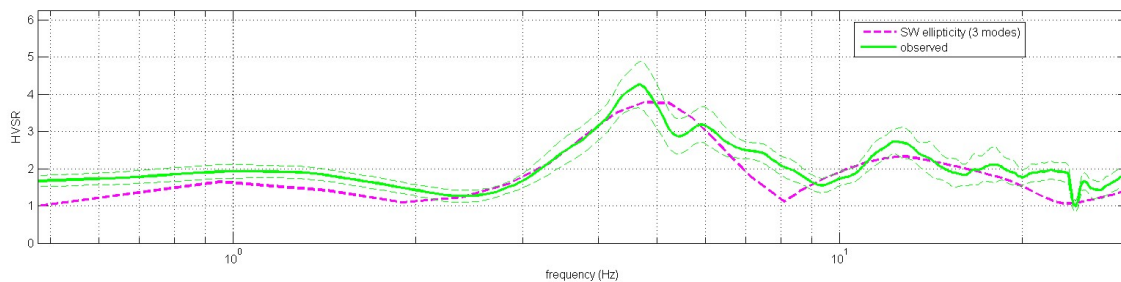
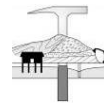


Figura 6. HVSR: in verde le misure effettuate, in magenta la curva HVSR modellata tramite ellitticità delle onde di superficie (Lunedei & Albarello, 2009). Il modello è chiaramente lo stesso usato per l'analisi delle onde di superficie.

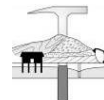
L'analisi congiunta dei dati ha restituito il modello finale di seguito riportato.



Figura 7. Profilo di velocità ottenuto dall'analisi congiunta.

Spessore (m)	Vs (m/s)
0,3	58
0,9	128
2,0	184
5,9	382
9,8	354
Inf.	1055

Tabella 1. Modello di sottosuolo determinato mediante analisi congiunta.



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

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

dove:

h_i : spessore in metri dell' i -esimo strato;

$V_{S,i}$: 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/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di imposta delle stesse. 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.

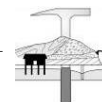
Le indagini sismiche hanno permesso di ricavare una $V_{S,eq}$ al piano campagna pari a 285 m/s ipotizzando una profondità del substrato di 18,9 m.

	Spessore (m)	da (m)	a (m)	V_s	H_i/V_{S_i}
Sismostrato 1	0,3	0,0	0,3	58	0,0052
Sismostrato 2	0,9	0,3	1,2	128	0,0070
Sismostrato 3	2,0	1,2	3,2	184	0,0109
Sismostrato 4	5,9	3,2	9,1	382	0,0154
Sismostrato 5	9,8	9,1	18,9	354	0,0277
Sismostrato 6	-	18,9	-	1055	

Tabella 2. Modello per calcolo $V_{S,eq}$.

Profondità calcolo $V_{S,eq}$ (m dal p.c.)	$V_{S,eq}$ (m/s)
0,0	285
0,5	309
1,0	322
2,0	340
3,0	360
4,0	363
5,0	362

Tabella 3. Valori di $V_{S,eq}$ in funzione della profondità di calcolo.



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Rowdewahl S., 2003. *Manual for the software RAYFRAC*T, Intelligent Resources Inc.
- Schuster, G. T., Quintus-Bosz A., 1999. *Wavepath eikonal travelt ime inversion: Theory*. *Geophysics* v. 58, 1314-1323.
- Lecomte I., Gjøystdal H., Dahle A., Pedersen O. C., 2000. *Improving modelling and inversion in refraction seismics with a first-order Eikonal solver*. *Geophysical Prospecting*, Vol. 48 Issue 3.
- 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.

RIFERIMENTI NORMATIVI

- D.M. 14 Gennaio 2008. *Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- CIRCOLARE 2 Febbraio 2009 n. 617 C.S.LL.PP. *Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*.
- D.M. 17 Gennaio 2018 *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*.