

# STUDIO DI GEOLOGIA APPLICATA

Dott. Geol. Salvatore Lo Verme

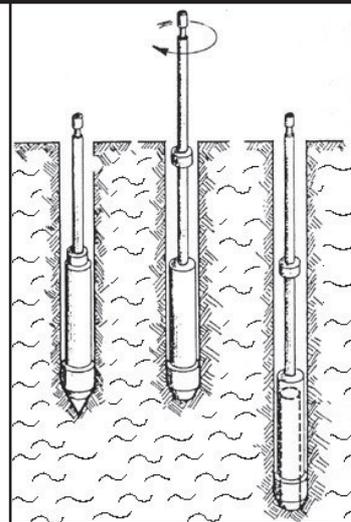
Corso Garibaldi N° 304

92029 RAVANUSA (AG)

Cell. 328.3885128

E.mail: [salvatore.loverme@gmail.com](mailto:salvatore.loverme@gmail.com)

URL: [www.geologoloverme.it](http://www.geologoloverme.it)



## RAPPORTO INDAGINI SISMICHE MASW

LAVORI DI COMPLETAMENTO DEL BLOCCO M DEL CIMITERO COMUNALE –  
SECONDO STRALCIO” E REALIZZAZIONE DI LOCULI NELLA ZONA COMPRESA TRA  
I BLOCCHI G-T-U E A RIDOSSO DEL MURO DI CINTA DEL CIMITERO. - CIG:

ZAC3828049 .

COMMITTENTE: COMUNE DI CANICATTÌ, CORSO UMBERTO I° - 92024 CANICATTÌ  
(AG) – P.IVA 00179660840

### ALLEGATI:

1. Documentazione fotografica;
2. Aerofotogrammetria con ubicazione indagine.

### IL GEOLOGO

## PREMESSA

Su incarico del comune di Canicattì, giusta Determina Dirigenziale n° 241 del 14/10/2022, è stata eseguita una campagna di indagini geofisiche a supporto del progetto dei lavori di completamento del blocco m del cimitero comunale – secondo stralcio” e realizzazione di loculi nella zona compresa tra i blocchi g-t-u e a ridosso del muro di cinta del cimitero

La finalità delle indagini di seguito descritte è stata quella di accertare le caratteristiche sismiche del sito al fine di desumere i valori di velocità delle onde S dei vari litotipi, utili a ricavare la categoria di suolo di fondazione e pertanto sono state eseguite due indagini sismiche di tipo masw. L’ubicazione delle indagini eseguite è riportata sull’aerofotogrammetria allegata.

## INDAGINI GEOFISICHE “metodo d’indagine MASW”

Il metodo MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva) è una tecnica di indagine non invasiva per la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs. Nel suo insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo con le norme tecniche per le costruzioni DM 17 gennaio 2018 (ex DM 14/01/2008 e sua circolare esplicativa 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni").

L’analisi dei dati ha consentito di definire i valori del profilo verticale VS ed ottenere una stima del Vs equivalente alla quota del piano di campagna.

Tale metodica si basa sulla misurazione e interpretazione di tre tipi di onde:

- onde superficiali
- onde di Rayleigh
- onde di Love

(nel dominio del tempo) in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo e la successiva analisi nel dominio della frequenza. Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J.1999) o in una combinazione di entrambi. Nel metodo attivo, come nel caso in esame, le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo con mazza battente, sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo passivo (REMI) lo stendimento dei sensori può essere sia lineare, sia circolare e si misura il rumore ambientale di fondo esistente.

## PRINCIPI DEL METODO DI PROVA

Come sopra detto questa metodologia consente di determinare il profilo di velocità delle onde di taglio verticali VS basandosi sulla misura delle onde superficiali. In particolare, quelle con bassi valori di lunghezze d’onda (alte frequenze) interessano gli strati superficiali, mentre quelle a maggior lunghezza d’onda (minore frequenza) interessano anche gli strati più profondi. Le onde di Rayleigh in un semispazio omogeneo sono non dispersive, mentre in presenza di un mezzo stratificato, l’avanzamento di un fronte

d'onda si deforma in rapporto alla velocità di propagazione (nel singolo strato) in funzione della frequenza, quindi differenti frequenze hanno velocità di propagazione diverse (comportamento dispersivo).

La velocità di propagazione delle onde di Rayleigh ( $V_r$ ) e delle onde i taglio ( $V_s$ ) sono dipendenti e sono legate dalla relazione (Richart et al. 1970):

$$V_r^6 - 8V_s^2 V_r^4 + (24 - 16\nu V_s^2/V_p^2) V_s^4 V_r^2 + (16V_s^6/V_p^6 - 1) V_s^6 = 0$$

Pertanto, la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh ( $V_r$ ) è leggermente inferiore alla velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ), ovvero secondo Achenbach (1999):

$$V_r = (0.862 + 1.14 \nu / (1 + \nu)) V_s$$

$$\nu = \text{modulo di poisson}$$

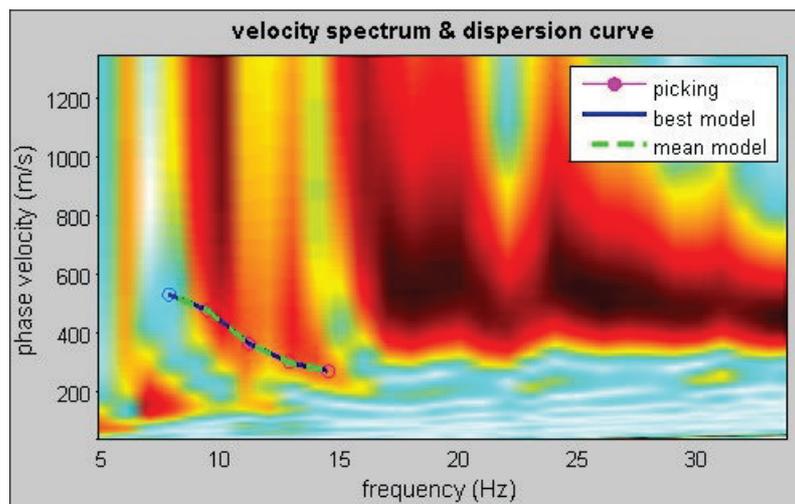
che significa che al variare di  $\nu$ , la  $V_r$  è inferiore rispetto alla  $V_s$  di un valore compreso tra 0.862 e 0.955 traducendosi nel fatto che misurando la  $V_r$  si ottiene la  $V_s$  con un errore di calcolo del tutto trascurabile potendosi così scrivere la relazione  $V_r = 0.91V_s \pm 0.046$ .

## ANALISI DEI DATI

L'analisi dei dati è suddivisa in due stadi: la determinazione della "curva di dispersione" (calcolo della velocità di fase) e l'inversione della curva per ottenere un modello 1D velocità/profondità.

## CURVA DI DISPERSIONE

La "Curva di dispersione" si ottiene da una analisi spettrale del sismogramma che trasforma il moto misurato, dal dominio "spazio-tempo" al dominio frequenza-numero d'onda" e parallelamente al dominio "velocità di fase-frequenza". Sul diagramma di fig. 1 bisogna ricostruire la curva di dispersione sperimentale interpretando l'andamento delle massime ampiezze del modo fondamentale delle onde di Rayleigh (Ivanov et al., 2001), discriminando le riflessioni indotte da orizzonti più rigidi, riflessioni multiple, onde d'aria e onde guidate (Baker, 1999) che possono provocare gravi errori interpretativi.



**Fig. 1**

## INVERSIONE DELLA CURVA DI DISPERSIONE

Successivamente al riconoscimento ed al tracciamento della curva di dispersione, si passa alla ricostruzione della curva di dispersione teorica attraverso la formulazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs. Il modello di inversione verrà vincolato attraverso l'inserimento di un range di possibili spessori, di velocità delle onde VS e di coefficienti di Poisson (n). L'ultima fase consiste nella modifica della curva teorica fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo. Il prodotto ottenuto sarà un diagramma che esprimerà valori delle velocità delle onde di taglio (S) associati a spessori e profondità di un mezzo stratificato reale. La profondità d'indagine è direttamente dipendente dalla minima frequenza riconoscibile nella curva di dispersione.

## STRUMENTAZIONE UTILIZZATA E GEOMETRIA DELLO STRUMENTO

Per eseguire la prova sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sismografo DOLANG modello DBS280 digitale, 24 canali, 24 bit ;
- 12 Trasduttori di velocità del moto del suolo a componente verticale con frequenza propria = 10 Hz (geofoni);
- Sistema di energizzazione costituito da massa battente di 8 kg dotata di starter piezoelettrico e piastra di battuta.

La configurazione spaziale in sito è equivalente ad un dispositivo geometrico punto di scoppio-geofoni "base distante in linea".

In particolare è stato utilizzato il seguente set-up:

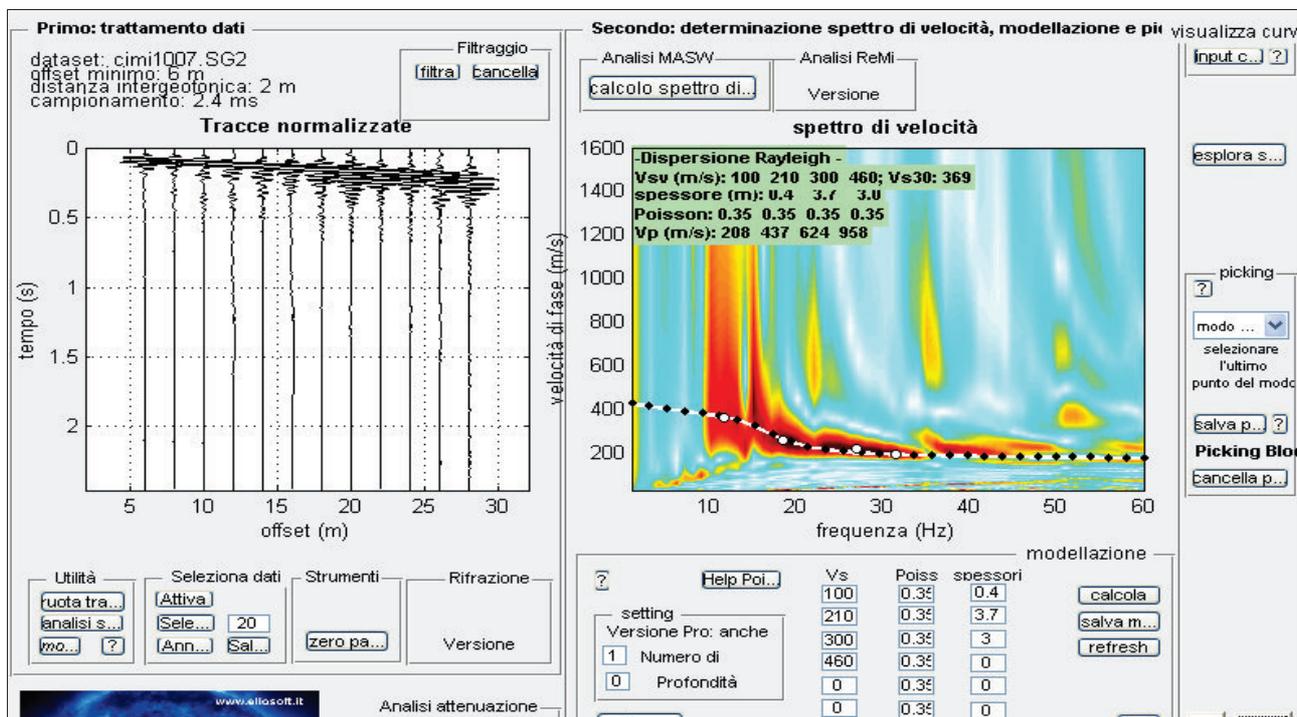
- 12 geofoni con interspazio (Gx) di 2 metri;
- n. 1 energizzazioni ad offset (Sx) -5 m;
- passo temporale di campionamento pari a 1,2 msec ;
- tempo di acquisizione 1,24 sec.

## ELABORAZIONE DATI

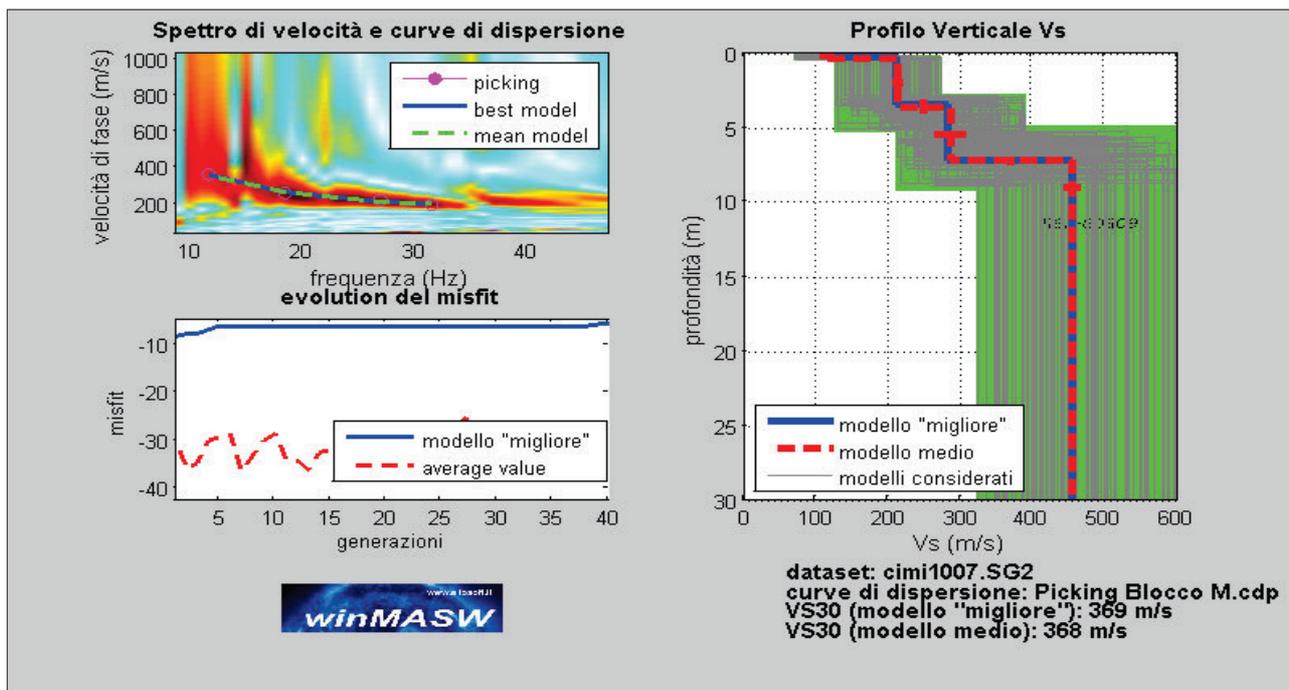
Per l'elaborazione della prova è stato utilizzato il software "WinMASW 4.1 Std" della EliaSoft. I dati MASW sono stati elaborati (determinazione spettro di velocità, identificazione curve di dispersione, inversione di queste ultime) per ricostruire il profilo verticale della velocità delle onde di taglio (VS).

MASW BLOCCO M

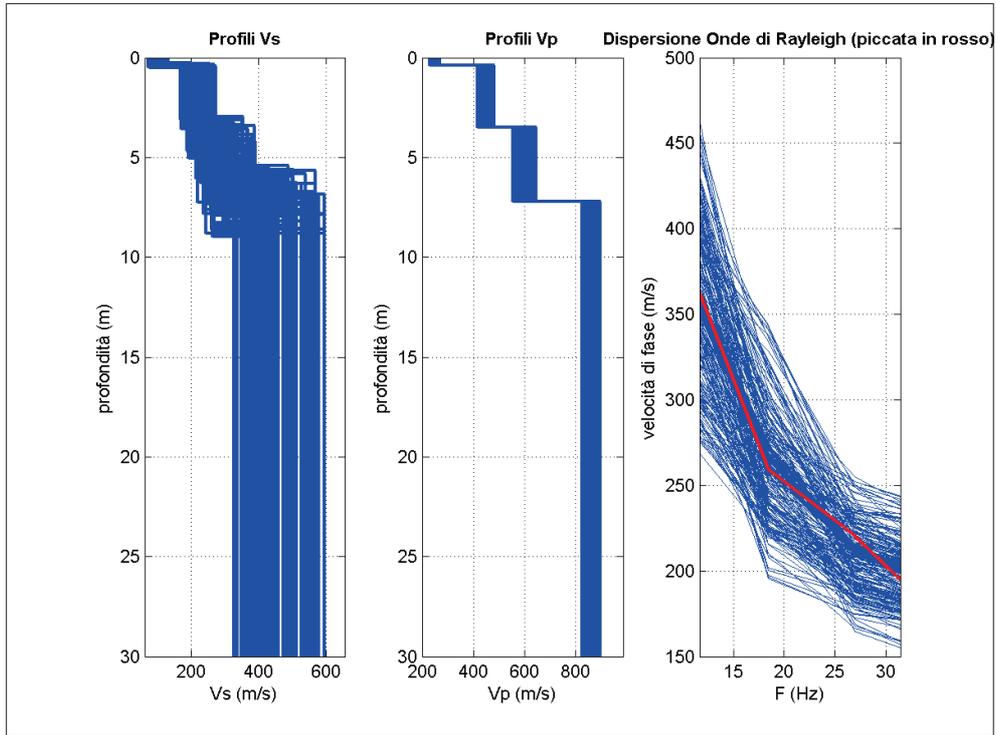
Sulla sinistra i dati di campagna e, sulla destra, lo spettro di velocità con la curva di dispersione identificata.



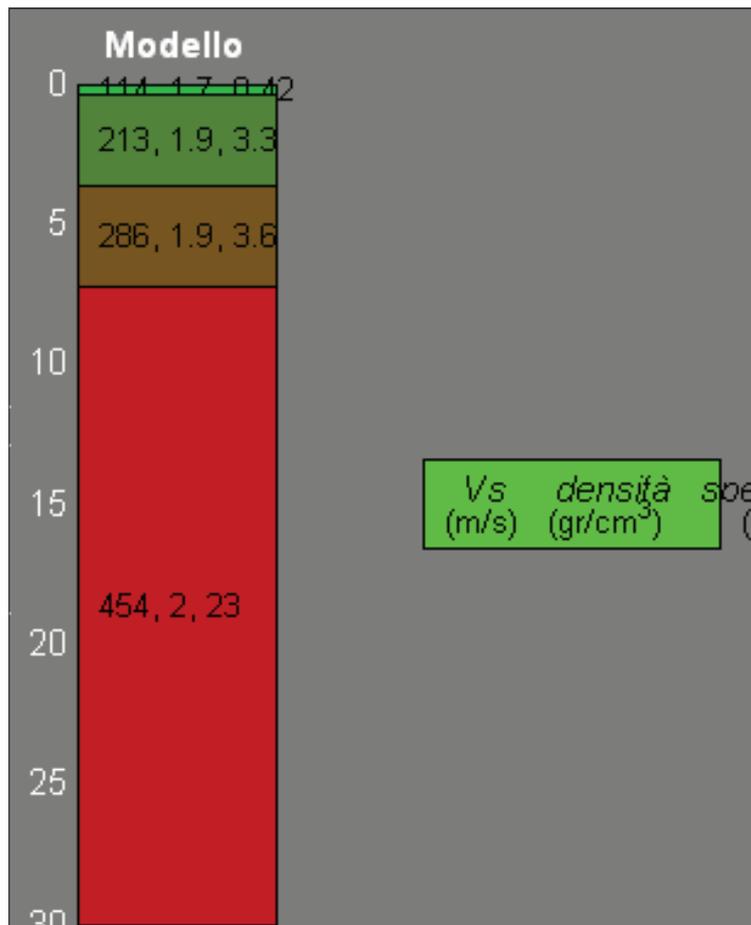
Risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi dei dati MASW. In alto a sinistra: spettro osservato, curve di dispersione piccate e curve del modello individuato dall'inversione. Sulla destra il profilo verticale VS identificato (vedi anche Tabella 1) (modello "migliore" e medio sono tipicamente assolutamente analoghi).



In basso a sinistra l'evolversi del modello al passare delle "generazioni" (l'algoritmo utilizzato per l'inversione delle curve di dispersione appartiene alla classe degli Algoritmi Genetici).



**COLONNA SISMOSTRATIGRAFICA**



**TABELLA 1**

Sismostrato (n°)	Profondità in metri dal p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/s)
1	0,4	0,4	114
2	3,7	3,3	213
3	7,3	3,6	286
4	30	semispazio	454

**CALCOLO MODULI ELASTICI**

Il software “WinMASW 4.1 Std” della [Eliosoft](#) permette di calcolare una serie di moduli elastici a partire dai valori  $V_p$ ,  $V_s$  e densità. Si ricorda che la  $V_p$  stimata da analisi MASW non è da considerare reale in quanto calcolata in base al valore del modulo di Poisson impostato manualmente prima del lancio dell’inversione. **L’unico modulo che possiamo considerare attendibile è il modulo di taglio**, mentre tutti gli altri moduli possono essere considerati solo se:

In fase di elaborazione vengono inserite le  $V_p$  ricavate da altri metodi d’indagine;

In fase di elaborazione viene inserito il valore del Modulo di Poisson ricavato da prove di laboratorio.

Modulo di Compressione	Modulo di Young	Modulo di Lamè	Modulo di Taglio
$\rho V_s^2 (k^2-4/3)$	$\rho V_s^2 (4-3k^2)/(1-k^2)$	$\rho V_s^2 (k^2-2)$	$\rho V_s^2$

**RIEPILOGO DATI**

**Modello medio**

$V_s$  (m/s): 114, 213, 286, 454

Spessori (m): 0.4, 3.3, 3.6

Tipo di analisi: onde di Rayleigh

**Stima approssimativa di  $V_p$ , densità e moduli elastici**

Stima  $V_p$  (m/s): 245, 440, 597, 859

Stima densità (gr/cm<sup>3</sup>): 1.72, 1.86, 1.93, 2.02

Stima modulo di Poisson: 0.36, 0.35, 0.35, 0.31

Stima modulo di taglio (MPa): 22, 84, 158, 416

Stima modulo di compressione (MPa): 73, 247, 477, 934

Stima modulo di Young (MPa): 61, 227, 426, 1086

Stima modulo di Lamè (MPa): 58, 191, 372, 657

**$V_s$  Equivalente = 368 m/s**

## CONCLUSIONI

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS e di conseguenza del parametro Vs Equivalente calcolato alla quota del piano di campagna restituendo un valore pari a **368 m/s**.

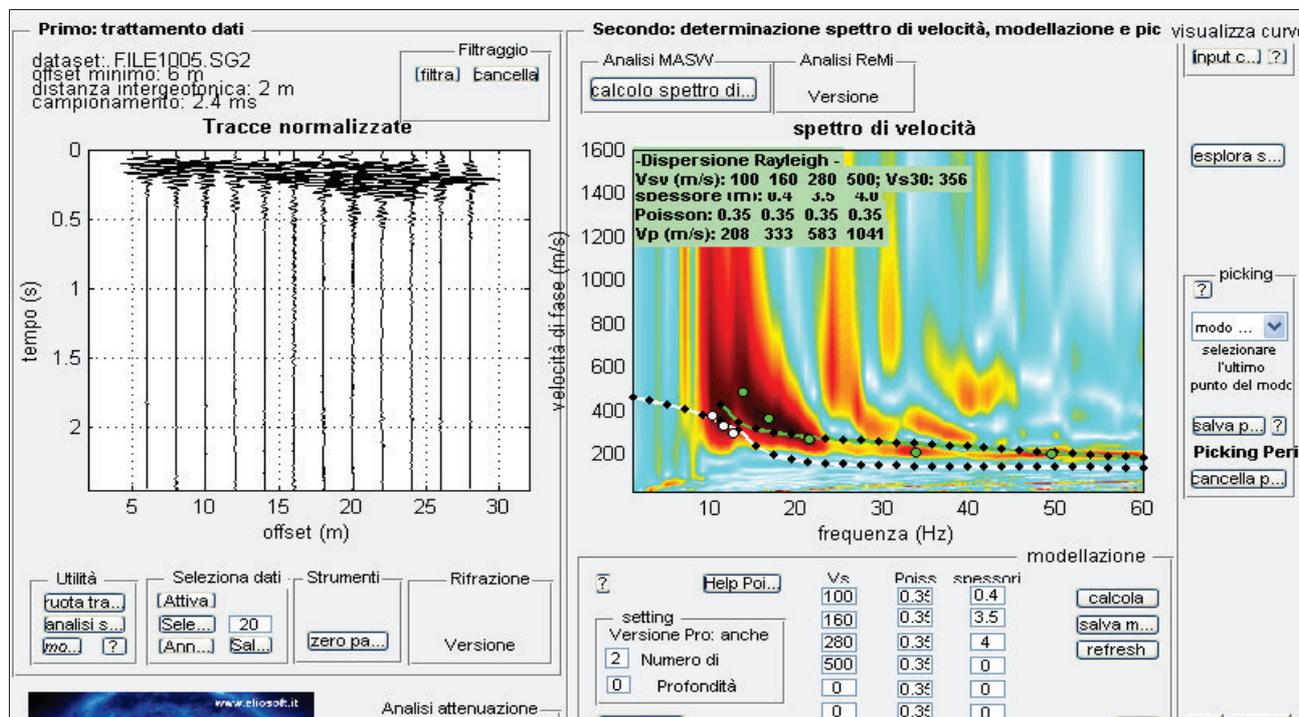
Pertanto in accordo con le norme tecniche per le costruzioni (DM 17/01/2018) il sito in esame rientra nella categoria **B** - Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

## **DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MASW**

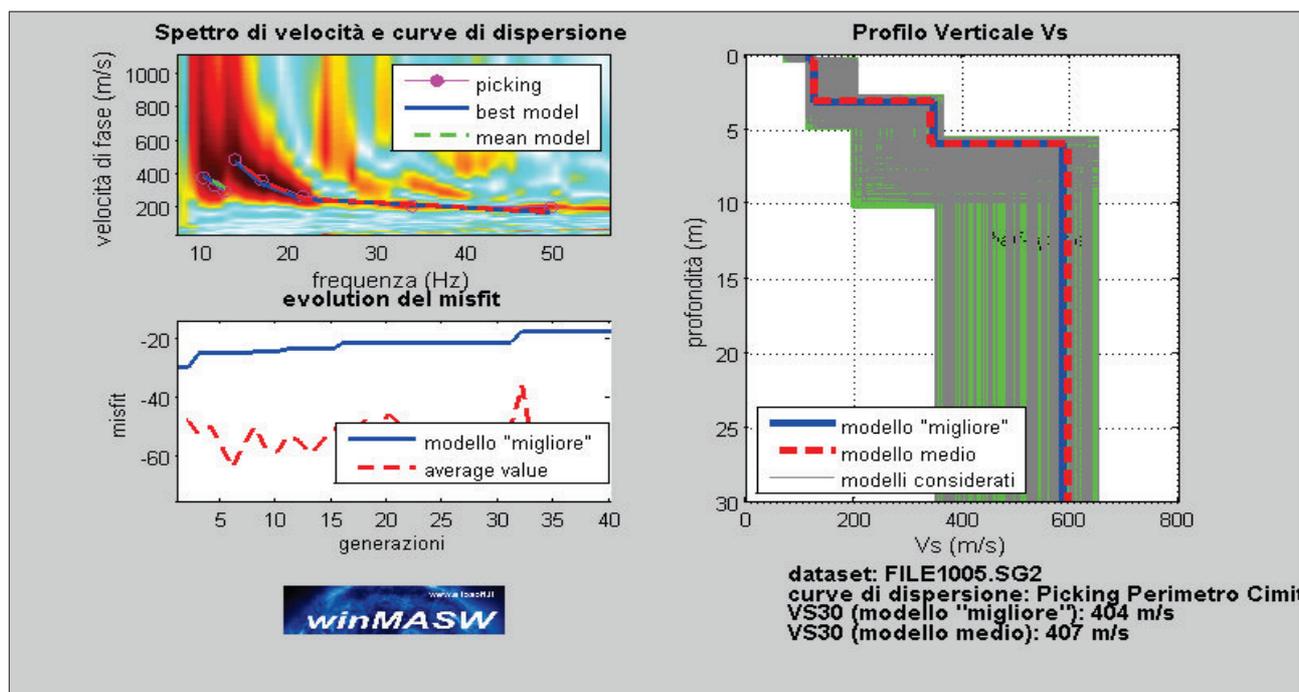


MASW A RIDOSSO DEL MURO DI CINTA DEL CIMITERO

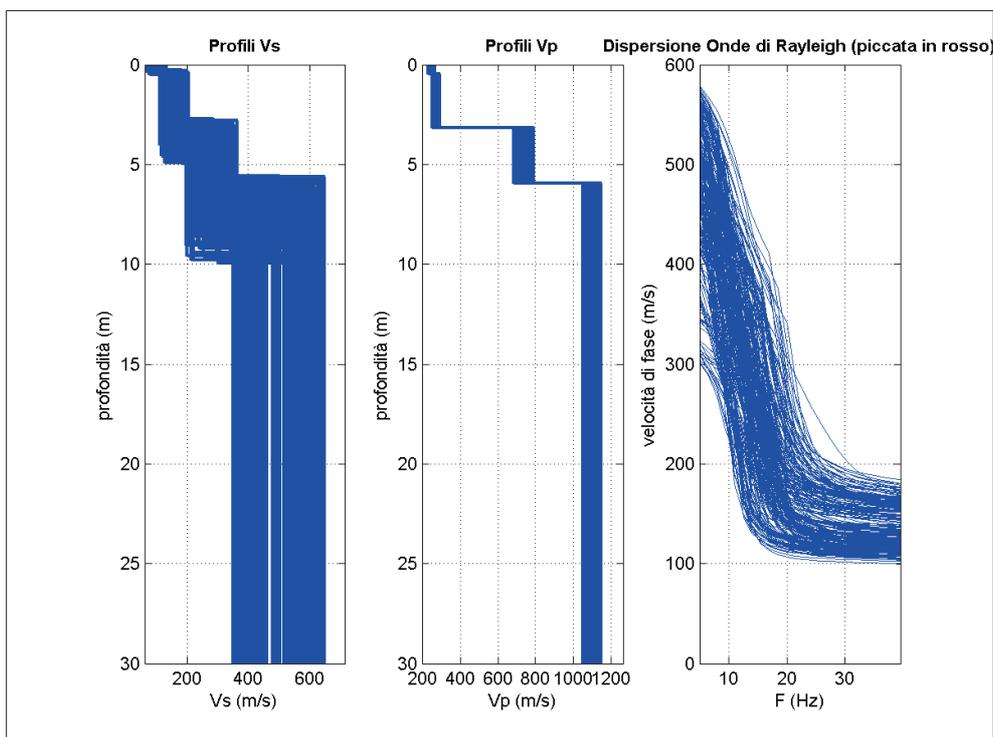
Sulla sinistra i dati di campagna e, sulla destra, lo spettro di velocità con la curva di dispersione identificata.



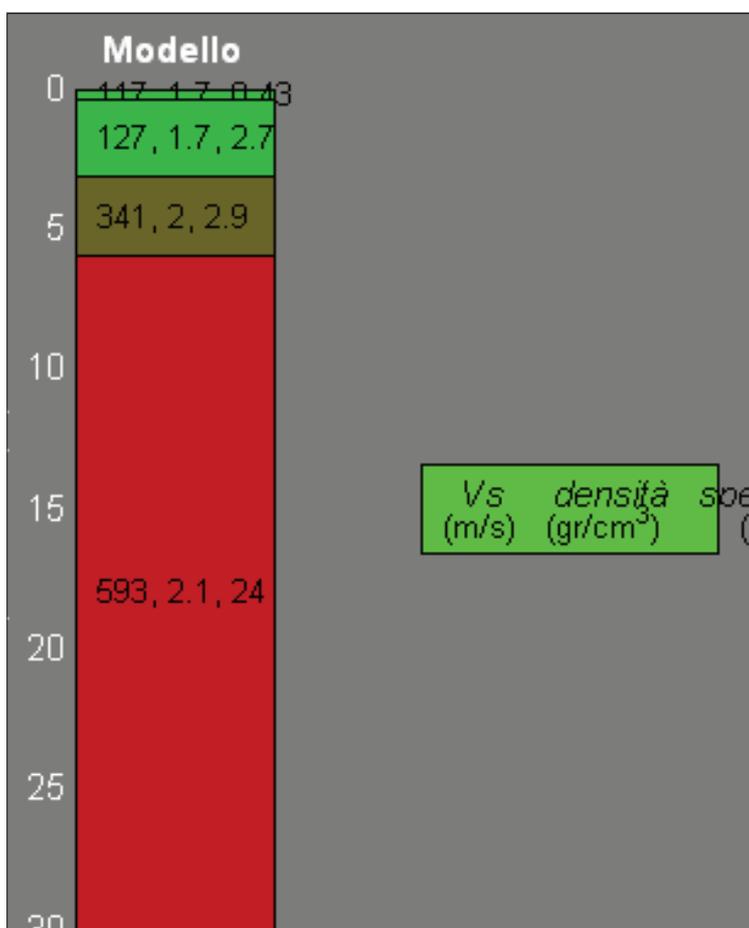
Risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi dei dati MASW. In alto a sinistra: spettro osservato, curve di dispersione piccate e curve del modello individuato dall'inversione. Sulla destra il profilo verticale VS identificato (vedi anche Tabella 1) (modello "migliore" e medio sono tipicamente assolutamente analoghi).



In basso a sinistra l'evolversi del modello al passare delle "generazioni" (l'algoritmo utilizzato per l'inversione delle curve di dispersione appartiene alla classe degli Algoritmi Genetici).



**COLONNA SISMOSTRATIGRAFICA**



**TABELLA 1**

Sismostrato (n°)	Profondità in metri dal p.c. (m)	Spessore (m)	Velocità onde S (m/s)
1	0,4	0,4	117
2	3,1	2,7	127
3	6	2,9	341
4	30	semispazio	593

**CALCOLO MODULI ELASTICI**

Il software “WinMASW 4.1 Std” della [Eliosoft](#) permette di calcolare una serie di moduli elastici a partire dai valori  $V_p$ ,  $V_s$  e densità. Si ricorda che la  $V_p$  stimata da analisi MASW non è da considerare reale in quanto calcolata in base al valore del modulo di Poisson impostato manualmente prima del lancio dell’inversione. **L’unico modulo che possiamo considerare attendibile è il modulo di taglio**, mentre tutti gli altri moduli possono essere considerati solo se:

In fase di elaborazione vengono inserite le  $V_p$  ricavate da altri metodi d’indagine;

In fase di elaborazione viene inserito il valore del Modulo di Poisson ricavato da prove di laboratorio.

<b>Modulo di Compressione</b> $\rho V_s^2 (k^2-4/3)$	<b>Modulo di Young</b> $\rho V_s^2 (4-3k^2)/(1-k^2)$	<b>Modulo di Lamè</b> $\rho V_s^2 (k^2-2)$	<b>Modulo di Taglio</b> $\rho V_s^2$
---	---	---	---

**RIEPILOGO DATI**

**Modello medio**

$V_s$  (m/s): 117, 127, 341, 593

Spessori (m): 0.4, 2.7, 2.9

Tipo di analisi: onde di Rayleigh

**Stima approssimativa di  $V_p$ , densità e moduli elastici**

Stima  $V_P$  (m/s): 246, 273, 721, 1091

Stima densità (gr/cm<sup>3</sup>): 1.72, 1.74, 1.97, 2.07

Stima modulo di Poisson: 0.35, 0.36, 0.36, 0.29

Stima modulo di taglio (MPa): 23, 28, 230, 730

Stima modulo di compressione (MPa): 73, 92, 720, 1497

Stima modulo di Young (MPa): 64, 76, 623, 1883

Stima modulo di Lamè (MPa): 57, 74, 567, 1010

**$V_s$  Equivalente = 407 m/s**

## CONCLUSIONI

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS e di conseguenza del parametro Vs Equivalente calcolato alla quota del piano di campagna restituendo un valore pari a **407 m/s**.

Pertanto in accordo con le norme tecniche per le costruzioni (DM 17/01/2018) il sito in esame rientra nella categoria **B** - *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.*

## **DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA MASW**



### Appendice

Dalla normativa (modifiche del D.M. 14/01/2008 Norme Tecniche per le Costruzioni, emanate con D.M. Infrastrutture del 17/01/2018, pubblicato su Gazzetta Ufficiale Supplemento ordinario n° 42 del 20/02/2018):

*A - 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.*

## Rapporto indagini geofisiche Masw

**B** - 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.

**C** - 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.

**D** - 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.

**E** - 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.

### AEROFOTOGRAMMETRIA CON UBICAZIONE INDAGINE MASW



MASW

MASW