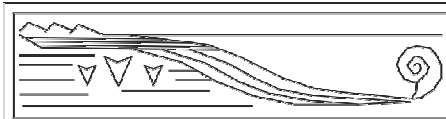


# **ALLEGATO 2**

## **Indagine sismica mediante Tecnica M.A.S.W.**



**STUDIO DI GEOLOGIA APPLICATA** Dott. Geologo Lorenzo Ciulli

Via Giovanni Amendola n. 56 - 57023 Cecina (LI)

cell. 339 4508988

e-mail: [cl.geologist@gmail.com](mailto:cl.geologist@gmail.com)

PEC: [ciulli.lorenzo@epap.sicurezzapostale.it](mailto:ciulli.lorenzo@epap.sicurezzapostale.it)

P.IVA: 01539230498

C.F.: CLLLN275E14C415M

**INDAGINE SISMICA SUPERFICIALE DEL TIPO  
MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES  
REALIZZATA ALL'INTERNO DELLO STADIO COMUNALE  
DI POMARANACE**

*PROVINCIA DI PISA*

*Relazione tecnica conclusiva*

**Committente:** Dott. Geol. Marco Cugini

---

**INDICE**

<b>1 - Premessa</b>	<b>pag. 1</b>
<b>2 - Generalità sul metodo MASW (Onde di Rayleigh)</b>	<b>pag. 1</b>
<b>3 - Attrezzature e metodologie impiegate</b>	<b>pag. 3</b>
<b>4 - Interpretazione dei dati</b>	<b>pag. 4</b>

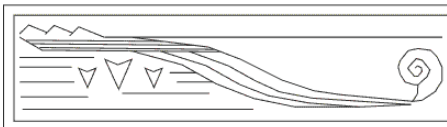
**ALLEGATO n. 1** – Report di calcolo.

---

Maggio 2020

**Il Geologo**  
**Dott. Geol. Lorenzo Ciulli**  
*Ordine dei Geologi della Toscana n. 1591*





## 1 - PREMESSA

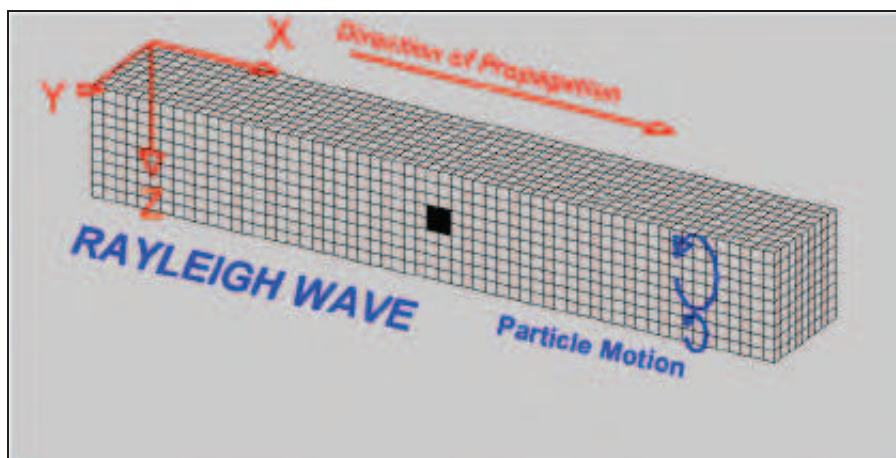
La presente relazione sintetizza ed illustra i risultati di un'indagine sismica effettuata, mediante il metodo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), all'interno dello Stadio Comunale di Pomarance (PI).

L'indagine MASW, effettuata nell'ambito del progetto di installazione del nuovo impianto di illuminazione, ha lo scopo di caratterizzare la velocità delle onde **Sh** dei terreni presenti, per determinare il parametro **V<sub>s30</sub>**, necessario al fine della classificazione dei suoli per la definizione dell'azione sismica di progetto, come richiesto dalle "Norme Tecniche per le costruzioni" (D.M. 17/01/2018). L'interpretazione dei dati acquisiti in campagna ha consentito di ricavare una sequenza sismo-stratigrafica relativamente all'area d'indagine, con suddivisione in strati sulla base dell'andamento delle velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali.

## 2 - GENERALITÀ SUL METODO MASW (ONDE DI RAYLEIGH)

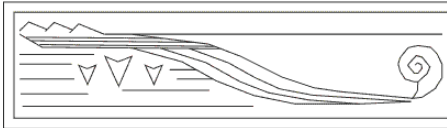
Le onde sismiche che si propagano in un mezzo si dividono, principalmente, in onde di corpo e onde di superficie. Fra queste ultime si hanno le onde di *Rayleigh*, le onde di *Love* e le onde di *Lamb*.

Le onde di *Rayleigh*, in particolare, sono originate dall'interazione fra le onde di pressione e le onde di taglio verticali quando esista una superficie libera in un mezzo omogeneo e isotropo.



**Fig. 1 - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.**

Il moto delle particelle è di tipo ellittico retrogrado, il quale si inverte a una profondità di  $\lambda/2\pi$ . L'ampiezza dello spostamento decresce secondo una legge esponenziale. L'energia convertita in onde di *Rayleigh* è, in percentuale, molto maggiore rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde P e S. Inoltre l'ampiezza delle onde di superficie varia con la radice quadrata di  $r$ , e non con  $r$  come avviene per le onde di corpo. Le onde di *Rayleigh* presentano una velocità del 90% circa rispetto a quella delle onde di taglio. In presenza di un semispazio omogeneo, la velocità di tali onde non varia in funzione delle frequenze, non si ha dispersione, cioè la deformazione di un treno di onde dovuta alla variazione della velocità di propagazione in funzione delle frequenze. Questa deformazione si manifesta invece quando il terreno presenti



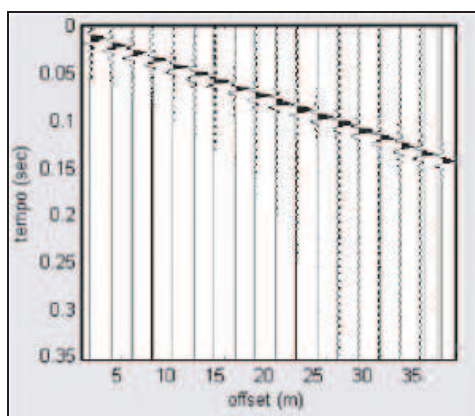
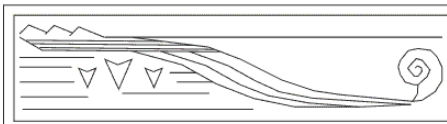
una stratificazione; la velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda viene influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino a una profondità dell'ordine di  $\lambda/2$  circa. Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale. Quindi una metodologia che utilizzi le onde superficiali è in grado di rilevare variazioni delle proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità. Nel caso che l'obiettivo sia di verificare le caratteristiche delle velocità delle onde S nel terreno, questo tipo di indagine è molto utile, in quanto la  $V_s$  è il fattore che governa le caratteristiche della dispersione. Inoltre il metodo non è limitato dalla presenza di inversioni di velocità, e presenta una buona risoluzione.

L'indagine secondo la tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) prevede l'energizzazione mediante sorgente attiva, con registrazione simultanea su 12 o più canali. Vengono utilizzati geofoni a componente verticale sensibili alle basse frequenze (un valore tipico sono 4,5Hz). La distanza dalla sorgente di energizzazione e il primo ricevitore condiziona  $\lambda_{max}$ , e quindi la profondità di indagine; anche la lunghezza dello stendimento geofonico è in relazione alla profondità di indagine, mentre la distanza intergeofonica condiziona lo spessore dello strato più sottile rilevabile. E' importante osservare che nel sismogramma possono comparire diversi tipi di onde: onde di corpo, onde superficiali non piane, onde riverberate dalla disomogeneità superficiali, oltre al rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane. Questo comporta una difficoltà aggiuntiva nella "lettura" dello spettro di velocità e quindi nella successiva individuazione della curva di dispersione. Le onde di corpo sono di solito riconoscibili; le onde superficiali riverberate (back scattered) possono risultare prevalenti in un sismogramma quando siano presenti discontinuità orizzontali. Le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente. Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno

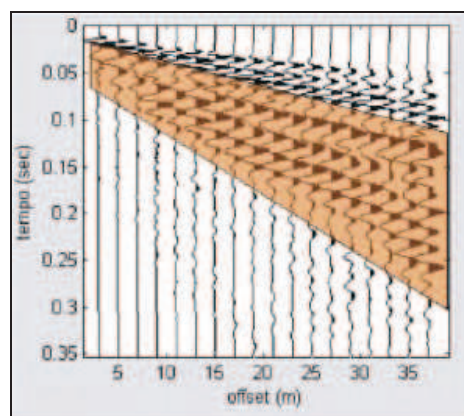
In sintesi l'indagine comporta:

- l'acquisizione delle onde superficiali (ground roll);
- la determinazione di uno spettro di velocità, con velocità di fase in funzione della frequenza;
- l'identificazione della curva di dispersione, cioè la determinazione dei punti che, sullo spettro di velocità, appartengono a un certo modo di propagazione dell'onda superficiale di *Rayleigh*;
- l'inversione della curva di dispersione, al fine di ottenere il profilo verticale delle  $V_s$ .

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando come riferimento la curva di dispersione precedentemente ottenuta. Per ottenere il profilo verticale  $V_s$  della curva di dispersione è necessaria l'assunzione di valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità. La procedura di inversione utilizzata dal software "Winmasw" è legata agli algoritmi genetici, il quale approccio consente di ottenere risultati più affidabili rispetto ai metodi di inversione basati sulla matrice Jacobiana. E' estremamente utile, per una interpolazione affidabile, poter disporre di dati di riferimento, sia per fornire uno spazio di ricerca iniziale al processo di inversione, sia per effettuare una "modellazione diretta" di ausilio a un corretto "picking" della curva di dispersione.



**Mezzo non stratificato**



**Mezzo stratificato = dispersione**

**Fig. 2 – Segnali sismici che evidenziano le onde superficiali di Rayleigh in un mezzo non stratificato (a sinistra) e in un mezzo stratificato (a destra). Risulta evidente il fenomeno della dispersione delle onde superficiali di Rayleigh in un mezzo stratificato.**

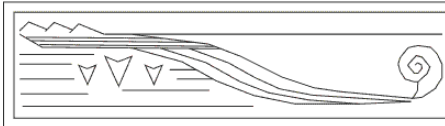
### 3 - ATTREZZATURE E METODOLOGIE IMPIEGATE

Per l'indagine è stata impiegata un'attrezzatura del tipo Ambrogeo "ECHO 12-24/2002 Sismic Unit" avente le seguenti caratteristiche:

- Channel: 24
- Sampler interval: 0,296msec
- A/D conversion: 16bit
- Input impedance: 1KOhm
- Gain: 10dB+100dB (passo 1dB)
- Saturation tension: +/-2,3V
- Saturation level: 100dB
- Distorsion: 0,01%
- Sampler: 25msec (191 punti)
  - 50msec (383 punti)
  - 100msec (756 punti)
  - 200msec (1530 punti)
  - 400msec (3060 punti)
  - 1000msec (7560 punti)
- Sampling: 130msec
- Filter low pass: 50/950Hz, step 1Hz
- Digital filter low pass: 1000-50
- Digital filter high pass: 0-250
- Frequency response: 7-950Hz, filter at 950Hz
- Dynamic range: 93dB
- Noise: 0,66µV RMS, gain = 55dB
- Crosstalk: 52dB, gain = 55dB
- Power: 12V

Il software di acquisizione dati è "ECHO 12-24" vers. 7.00. L'attrezzatura è composta da n. 2 cavi sismici a 12 takes out spazati a 5m, con connettori cannon, montati su rullo, geofoni "Geospace" a 4,5Hz, piastra di battuta in acciaio, mazza di battuta da 8Kg con interruttore starter e cavo trigger da 200m montato su rullo. Lo stendimento impiegato per il profilo MASW ha le seguenti caratteristiche:

- ✓ numero geofoni: 24
- ✓ distanza intergeofonica: 2,00m
- ✓ numero punti di energizzazione (shots): n. 3 energizzazioni a 5m (offset) e n. 3 energizzazioni a 10m dal geofono n. 1 della linea. Tutte le energizzazioni sono state prodotte utilizzando la mazza di battuta da 8Kg.
- ✓ tempo di acquisizione: 1sec.



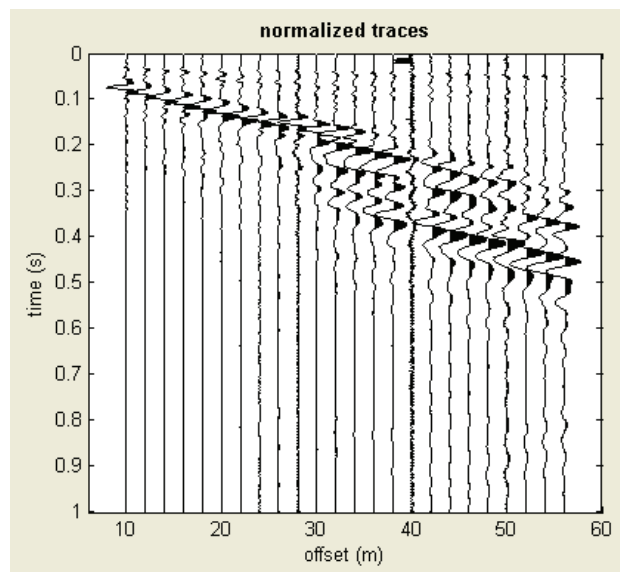
Il profilo morfologico lungo il quale è stato eseguito lo stendimento è pianeggiante, coincidente con il settore occidentale di Piazza del Popolo.



***Dettaglio della strumentazione impiegata per l'acquisizione dei dati.***

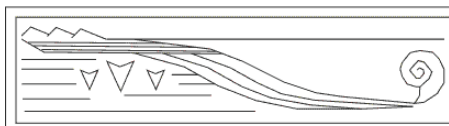
#### **4 - INTERPRETAZIONE DEI DATI**

Per l'interpretazione dei dati è stato impiegato il software winMASW Pro 4.1.1, il quale consente la determinazione di profili verticali della velocità delle onde di taglio  $V_s$  tramite l'inversione delle curve di dispersione ottenute, effettuata con algoritmi "genetici". Tale programma è in grado di operare sui records in formato .SGY prodotti dalla strumentazione Ambrogeo. Per l'elaborazione è stata utilizzata la curva di dispersione relativa allo shot posto all'offset di 6m dello stendimento geofonico. La rappresentazione del file dei dati acquisiti ("common-shot gather" – segnale per i vari geofoni nel tempo di acquisizione di 1000msec.) è la seguente:

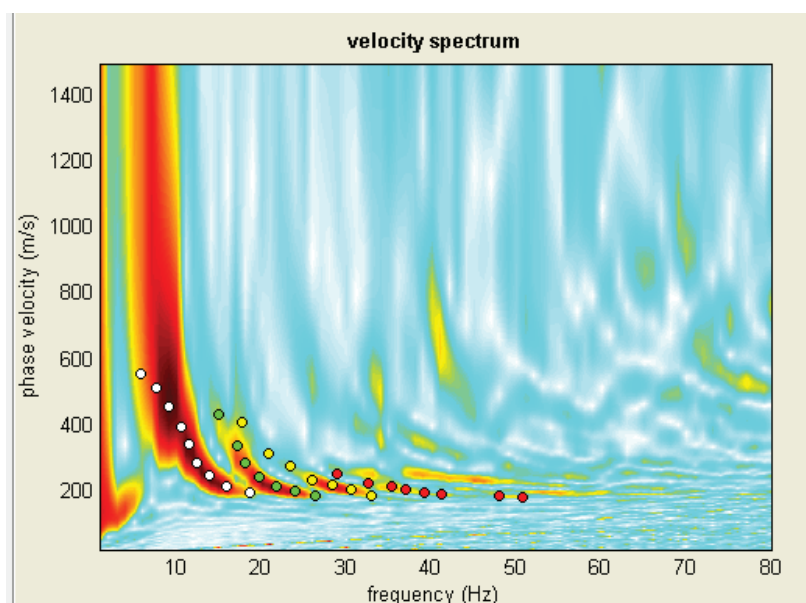


**Figura 3 – Sismogramma (Common shot gather).**



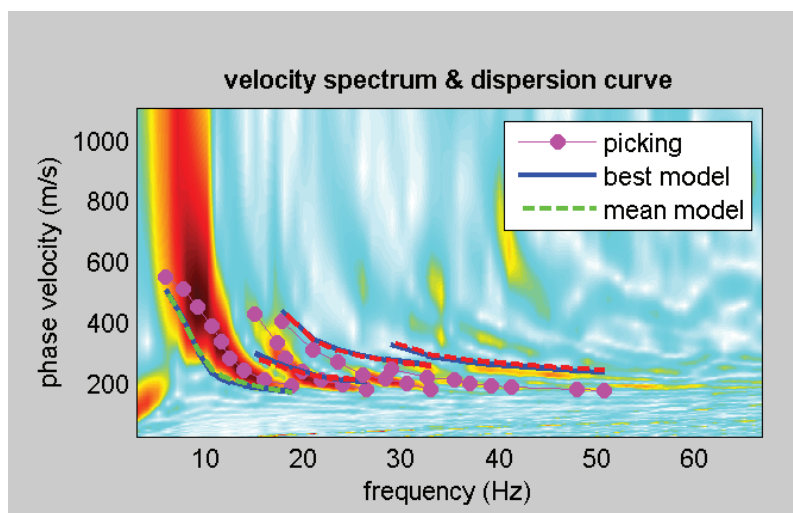


Quello che segue è lo spettro di velocità (velocità di fase in funzione della frequenza), con relativo picking della curva di dispersione delle onde di superficie, cioè la determinazione dei punti che si ritengono appartenere, in questo caso, al modo fondamentale di propagazione dell'onda superficiale di *Rayleigh*. In particolare, durante le operazioni di picking della curva di dispersione è stato selezionato il modo fondamentale di propagazione delle onde (fundamental mode) escludendo i successivi.

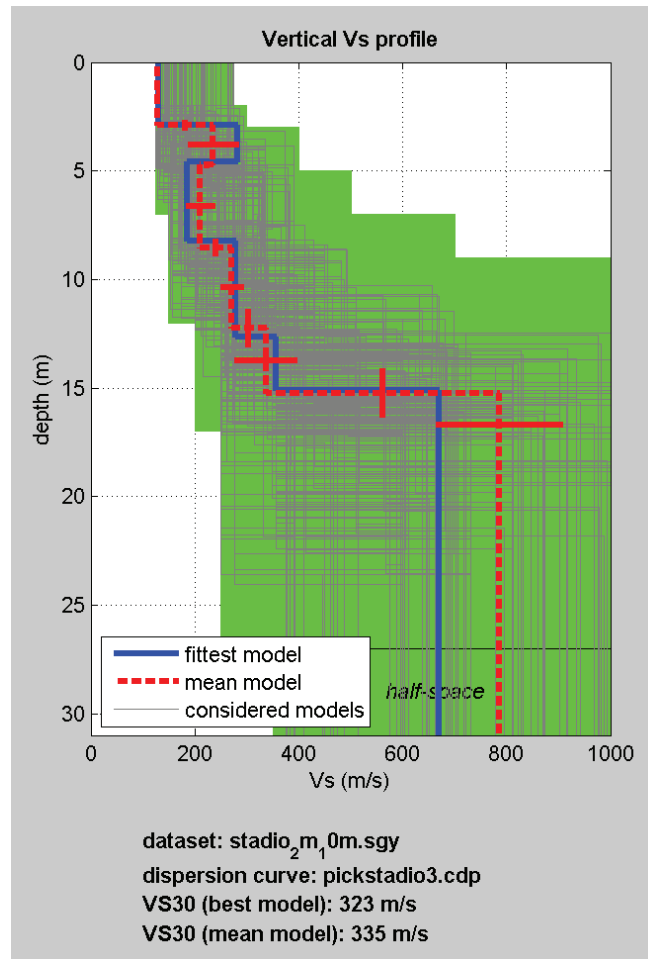
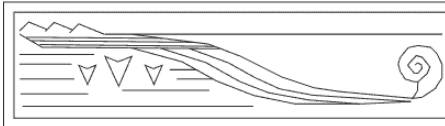


**Figura 4 – Spettro delle velocità e picking per la determinazione della curva di dispersione.**

Per dare uno spazio di ricerca significativo al processo di inversione ci si è basati anche sul contesto geo-litologico locale derivante dalle informazioni rintracciate in Letteratura e fornite dal Collega Dott. Cugini, curatore e responsabile dello studio geologico. Il report con i dati salienti relativi al procedimento di elaborazione ed inversione per lo stendimento è invece allegato alla presente relazione. Il risultato dell'inversione per lo stendimento è il seguente:



**Figura 5 – Curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh.**



**Figura 6 – Profilo verticale delle velocità delle onde S derivante dal processo di inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh.**

Nella determinazione della categoria sismica di suolo si è fatto riferimento alla seguente relazione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad [3.2.1]$$

con:

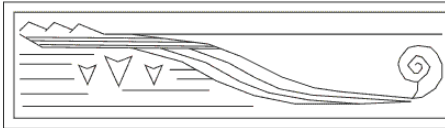
$h_i$  spessore dell'i-esimo strato;

$V_{S,i}$  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.





**STUDIO DI GEOLOGIA APPLICATA** Dott. Geologo Lorenzo Ciulli

Via Giovanni Amendola n. 56 - 57023 Cecina (LI)

cell. 339 4508988

[e-mail: cl.geologist@gmail.com](mailto:cl.geologist@gmail.com)

[PEC: ciulli.lorenzo@epap.sicurezzapostale.it](mailto:ciulli.lorenzo@epap.sicurezzapostale.it)

P.IVA: 01539230498

C.F.: CLLLNZ75E14C415M

Con i dati ottenuti, per la zona d'indagine (da piano campagna) si hanno le seguenti velocità delle onde di taglio:

- VS30 del modello medio: 335 m/sec
- VS30 del modello migliore: 323 m/sec

La **categoria sismica di suolo** è la **C**.

Cecina, 25 Maggio 2020

**Il Geologo**  
**Dott. Geol. Lorenzo Ciulli**  
*Ordine dei Geologi della Toscana n. 1591*

