



ALLEGATO 2

INDAGINE SISMICA MEDIANTE TECNICA M.A.S.W.

**INDAGINE SISMICA SUPERFICIALE DEL TIPO
MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES
REALIZZATA IN LOCALITÀ LA LANDUCCIA - LIBBIANO
NEL COMUNE DI POMARANCO**

PROVINCIA DI PISA

Relazione Indagine

INDICE

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

Giugno 2018



1 - PREMESSA

La presente relazione sintetizza ed illustra i risultati di un'indagine sismica effettuata, mediante il metodo MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), in località La "Landuccia" - Libbiano (Pisa). L'indagine MASW, effettuata nell'ambito del progetto di ampliamento di un fabbricato esistente ricadente in classe d'indagine 2 secondo quanto indicato dal D.P.G.R. n. 36R/2009, ha lo scopo di caratterizzare la velocità delle onde **Sh** dei terreni presenti, per determinare il parametro **V_{s30}**, 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.

E' stato possibile, per ottimizzare l'interpretazione, riferirsi ai dati geolitologici noti per la zona, derivanti dalle informazioni rintracciate in Letteratura e scaturiti direttamente dall'andamento della resistenza all'infissione misurata con la penetrometria super pesante realizzata all'interno della stessa proprietà.

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.

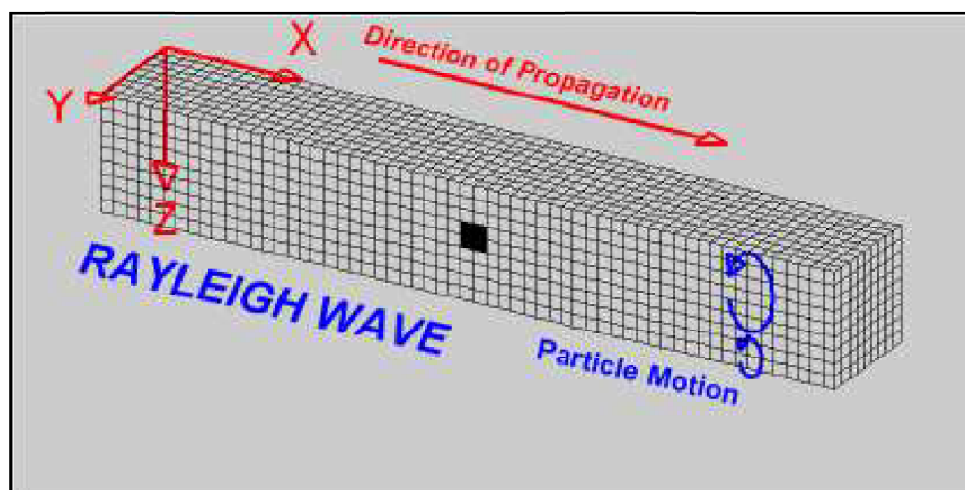
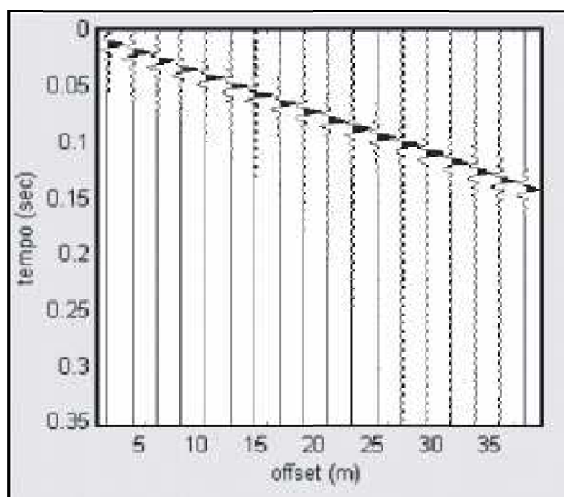


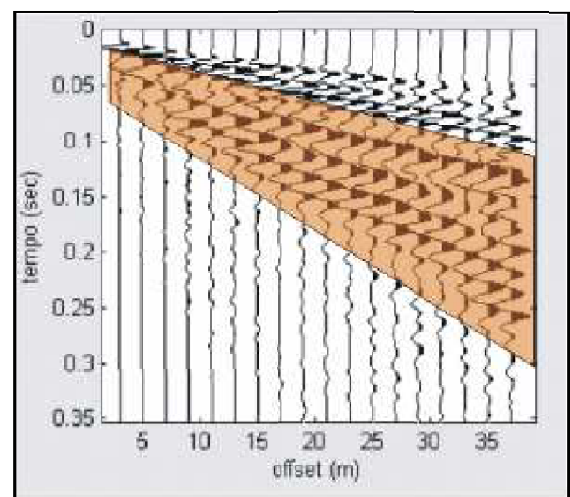
Fig. 1 - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.

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 frequenza, non si ha dispersione, cioè la deformazione di un treno di onde dovuta alla variazione della velocità di propagazione in funzione delle frequenza. 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.



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.

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 λ_{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 Vs.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando come riferimento la curva di dispersione precedentemente ottenuta. Per ottenere il profilo verticale Vs 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.

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 spaziatati 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 a 3 m 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 giardino antistante il fabbricato in oggetto.

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 Vs 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 3m 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:

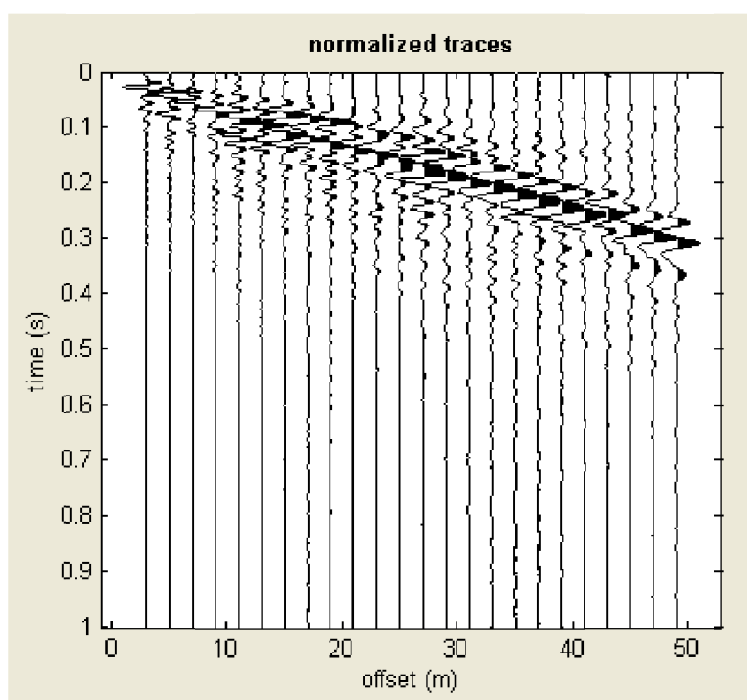


Figura 3 – Sismogramma (Common shot gather).

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.

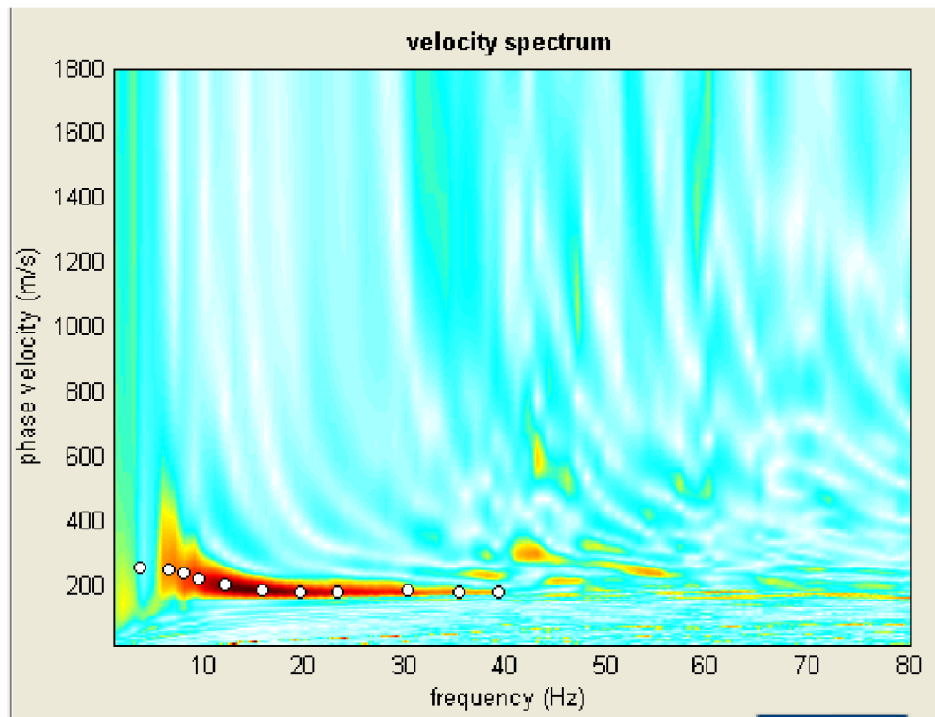


Figura 4 – Spettro delle velocità e picking per la determinazione della curva di dispersione.

Per dare uno spazio di ricerca significativo al processo di inversione ci si è basati anche sul contesto geo-litologico locale derivante, come già anticipato, dalle informazioni rintracciate in Letteratura e dai dati provenienti dalle indagini geognostiche pregresse realizzate nella zona, nonché dall'andamento della penetrometria dinamica superpesante eseguita nell'ambito del presente studio (DPSH1).

Il report con i dati salienti relativi al procedimento di elaborazione ed inversione per i due stendimenti è invece allegato alla presente relazione (Allegato n. 2).

Il risultato dell'inversione per i due stendimenti è il seguente:

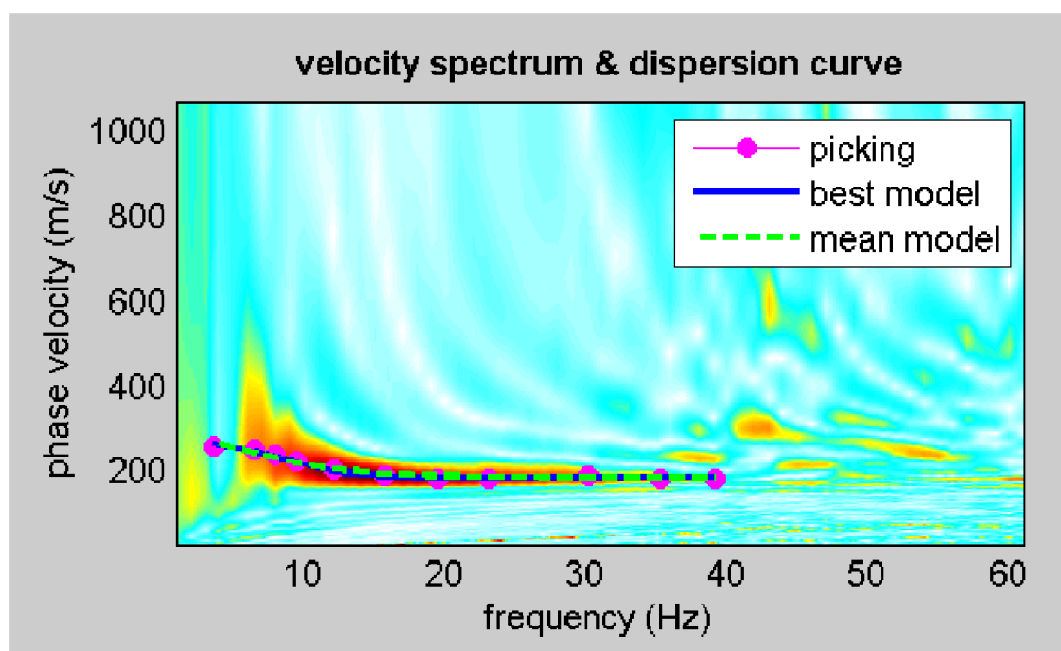


Figura 5 – Curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh.

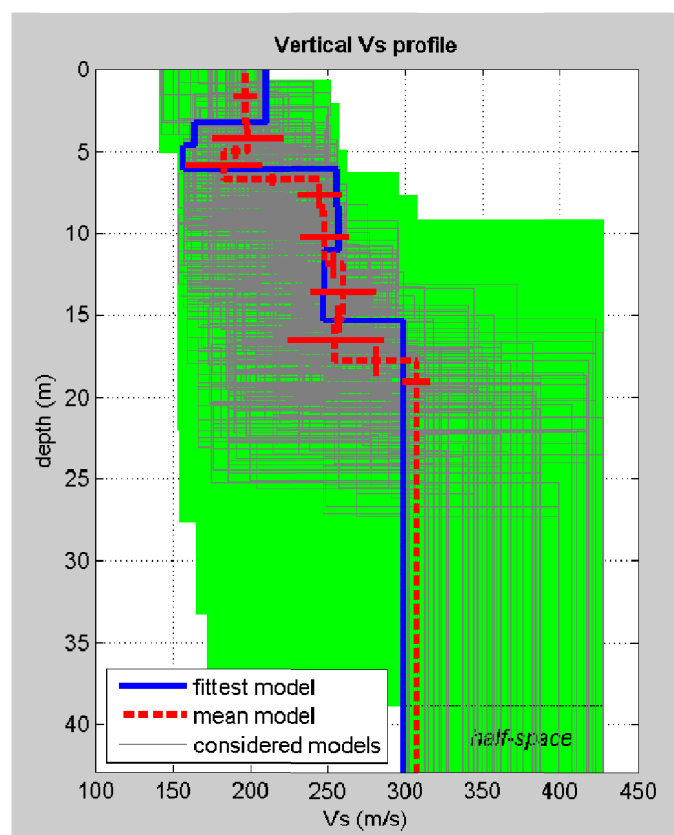


Figura 6 – Profilo verticale delle velocità delle onde S derivante dal processo di inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh.

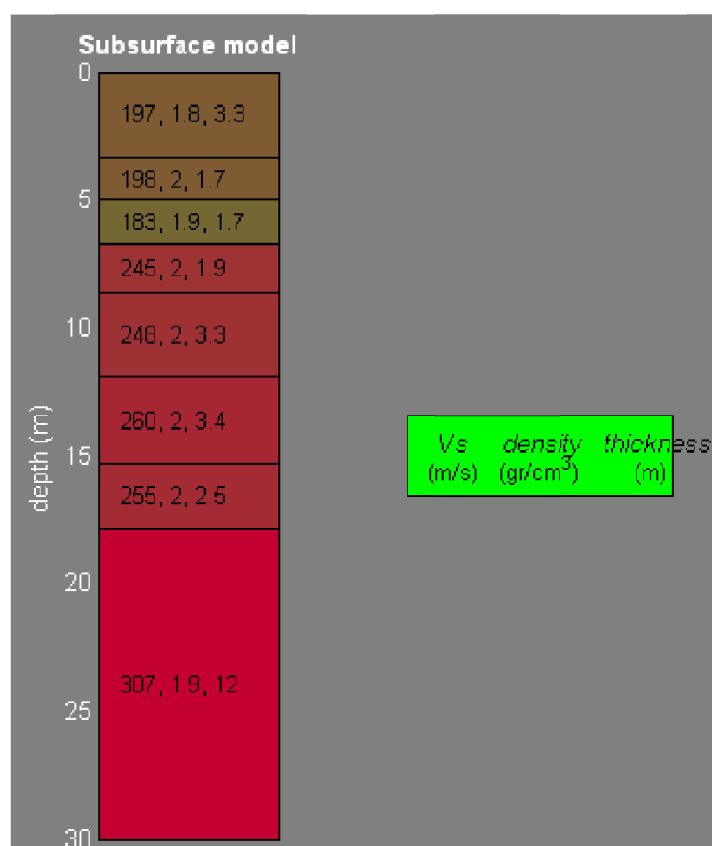


Figura 7 – Schema sismostratigrafico di dettaglio.

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: 252 m/sec
- VS30 del modello migliore: 254 m/sec

Vista l'assenza di un bedrock sismico entro i 30 metri di profondità dall'attuale piano campagna, considerando la media ponderata delle velocità, la **categoria sismica di suolo** di fondazione è la **C**.



ALLEGATO n. 3

Report dell'indagine sismica di superficie di tipo MASW eseguita

SECTION n. 1

dataset: Casetta 3m.sgy

minimum offset (m): 3

geophone spacing (m): 2

sampling (ms): 0.131

Dispersion curve: pick3m.cdp

Number of individuals: 30

Number of generations: 41

Adopted search space (minimum Vs & thickness): 141 0.7040465 156 1.408093 155 1.408093 153 1.408093
154 1.408093 165 1.408093 172 1.408093 298.4703
Adopted search space (maximum Vs & thickness): 210 5.069134 252 5.632372 257 5.632372 256 5.632372
262 5.632372 295 5.632372 307 5.632372 428
Adopted Poisson values: 0.35 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45

SECTION n. 2

Rayleigh wave analysis

Optimizing Vs & Thickness - generation: 1; average & best misfits: -12.3156 -8.2967

Optimizing Vs & Thickness - generation: 2; average & best misfits: -12.5476 -7.22877

Optimizing Vs & Thickness - generation: 3; average & best misfits: -12.1816 -7.22877

Optimizing Vs & Thickness - generation: 9; average & best misfits: -10.0622 -2.74489

Optimizing Vs & Thickness - generation: 10; average & best misfits: -10.4714 -2.74489

Optimizing Vs & Thickness - generation: 11; average & best misfits: -9.5147 -2.7449

Model after the Vs & Thickness optimization (fixed Poisson values):

Vs (m/s): 210 164 157 256 257 248 247 298

Poisson: 0.35 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.3

Thickness (m): 3.2 1.4 1.4 2.3 2.6 2.4 2

Number of models considered to calculate the average model: 11

RESULTS winMASW Pro

#####

SECTION n. 3

MEAN MODEL

VS (m/s): 197 198 183 245 248 260 255 307

Standard deviations (m/s): 7 23 25 14 16 21 31 9

Thickness (m): 3.3 1.7 1.7 1.9 3.3 3.4 2.5

Standard deviations (m): 0.3 0.4 0.3 0.4 0.8 0.8 0.9

Approximate values for Vp, density & elastic moduli

Vp (m/s): 410 657 607 813 823 862 846 574

Density (gr/cm3): 1.84 1.95 1.93 2.00 2.01 2.02 2.01 1.92

Vp/Vs ratio: 2.08 3.32 3.32 3.32 3.32 3.32 3.32 1.87

Poisson: 0.35 0.45 0.45 0.45 0.45 0.45 0.30

Young modulus (MPa): 193 222 188 349 358 396 380 470

Sjear modulus (MPa):	71	77	65	120	123	136	131	181
Lamé (MPa):	166	690	583	1084	1112	1227	1179	271
Bulk modulus (MPa):	214	741	626	1164	1195	1318	1266	391

Fundamental mode

Mean model

f(Hz)	VR(m/s)
3.65777	269.0553
6.59049	244.1103

.....

35.3677	184.5718
39.2169	184.4602

SECTION n. 4

BEST MODEL

Vs (m/s):	210	164.1076	156.7673	256	257.1752	248.2034	247.3973	298.4703
thickness (m):	3.2379	1.4081	1.4308	2.2981	2.643	2.367	1.9589	

Approximate values for Vp, density & elastic moduli

Vp (m/s):	437	544	520	849	853	823	821	558
Density (gr/cm3):	1.85	1.91	1.90	2.01	2.02	2.01	2.01	1.91
Vp/Vs ratio:	2.08	3.32	3.31	3.32	3.32	3.32	3.32	1.87
Poisson:	0.35	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.30
Young modulus (MPa):	221	149	135	383	386	358	355	442
Shear modulus (MPa):	82	51	47	132	133	123	122	170
Lamé (MPa):	191	462	419	1188	1200	1112	1107	256
Bulk modulus (MPa):	245	496	450	1276	1289	1195	1189	369

dispersion curve (frequency - Rayleigh phase velocity)

Fundamental mode)

best model

F(Hz)	VR(m/s)
3.65777	264.3667
6.59049	244.788

.....

35.3677	186.2122
39.2169	187.0545

SECTION n. 5

VS5 (mean model): 197 m/s

VS5 (best model): 190 m/s

VS20 (mean model): 233 m/s

VS20 (best model): 234 m/s

VS30 (mean model): 254 m/s

VS30 (best model): 252 m/s

winMASW 4.2 Pro

Surface Wave Analysis

via MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves

www.eliosoft.it