

# COMUNE DI CELENZA VALFORTORE

Prov. FOGGIA

## OGGETTO

" COMPLETAMENTO LAVORI DI CONSOLIDAMENTO E MESSA IN SICUREZZA DEL VERSANTE A VALLE DI VIA FRATELLI BANDIERA."

## VISTI

Il Responsabile del Procedimento

## ELAB.

## INDAGINE GEOFISICA

## SCALA

Geol. Euplio CASULLO



## REDATTO IL

Febbraio 2013

## AGGIORNAMENTI

STUDIO GEOLOGICO Dott. Geologo Euplio CASULLO

Via N. Sauro, 71 - 71021 Accadia - FG - tel. 334/9194910 - 347/5404036 mail. casulloeuplio@libero.it

## INTRODUZIONE

In questo **ALLEGATO** si descrivono i risultati provenienti dalla **campagna di indagini geofisiche** commissionata da EDIL GEO di Giuseppe Ferrante, eseguita nel Comune di Celenza valfortore (FG) per i lavori di: "COMPLETAMENTO LAVORI DI CONSOLIDAMENTO E MESSA IN SICUREZZA DEL VERSANTE A VALLE DI VIA FRATELLI BANDIERA."

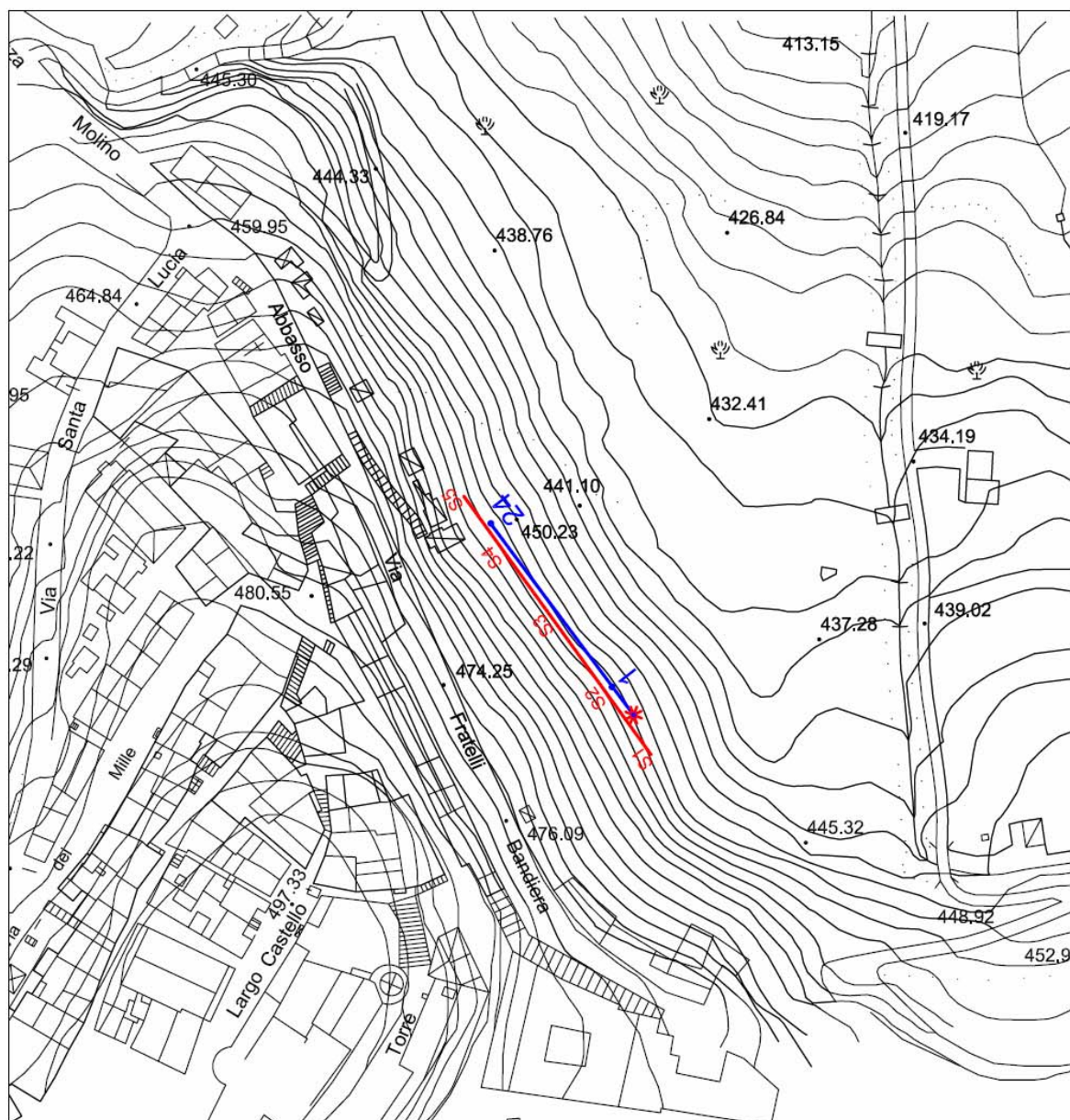
Nel dettaglio, la **campagna di indagini geofisiche** eseguite nell'area è consistita in:

- **N° 01 STESA SISMICA SUPERFICIALE PER ESECUZIONE PROVE SISMICHE CON METODOLOGIA DI INDAGINE A "RIFRAZIONE" ED ELABORAZIONE TOMOGRAFICA;**
- **N° 01 STESA SISMICA SUPERFICIALE PER ESECUZIONE PROVE SISMICHE CON METODOLOGIA DI INDAGINE "MASW".**

La corretta ubicazione delle indagini eseguite nell'area allo studio è riportata di seguito in **Figura 1**:

## UBICAZIONE INDAGINE SISMICA

## Comune di Celenza Valfortore (FG)



S1—S5 Traccia indagine sismica "**RIFRAZIONE**"

scala 1:1.000

1—24 Traccia indagine sismica "**MASW**"

\* Punto di energizzazione

Fig. 1: ubicazione delle indagini geofisiche eseguite nel Comune di Celenza valfortore (FG)

## ELABORAZIONE DELLA PROSPEZIONE GEOFISICA SUPERFICIALE CON METODOLOGIA D'INDAGINE "SISMICA A RIFRAZIONE"

L'**obiettivo della prospezione geofisica effettuata con metodologia di indagine SISMICA A RIFRAZIONE** è stato quello di investigare attraverso metodologie geofisiche specifiche il sottosuolo allo scopo di creare un profilo stratigrafico di riferimento per ciascuna prova effettuata.

### **STRUMENTAZIONE UTILIZZATA DURANTE LE INDAGINI:**

La strumentazione utilizzata nell'area è costituita da un sismografo multicanale **M.A.E. modello Sysmatrac**, avente le seguenti caratteristiche tecniche:

- *capacità di campionamento dei segnali tra 0,002 e 0,00005 sec;*
- *sistema di comunicazione e di trasmissione del "tempo zero" (time break);*
- *filtri High Pass e Band Reject;*
- *"Automatic Gain Control";*
- *convertitore A/D a 24 bit;*
- *24 geofoni verticali (P) con periodo proprio di 4.5 Hz;*
- *massa battente pesante di 10 Kg.*

### **PRINCIPI DI BASE (SISMICA A RIFRAZIONE)**

La metodologia **sismica a rifrazione** utilizza la stima delle **velocità di propagazione** delle onde sismiche nel sottosuolo che sono generate quando il terreno è sottoposto a sollecitazioni artificiali o naturali (sisma).

La determinazione delle velocità viene ricavata misurando i **tempi di primo arrivo** delle onde sismiche generate in diversi punti sulla superficie topografica, considerando i seguenti *principi di base*:

- *le onde sismiche si propagano con velocità diverse in mezzi con caratteristiche meccaniche diverse*
- *quando il raggio sismico attraversa una discontinuità di velocità (passa da una mezzo più lento ad uno più veloce, o viceversa) cambia direzione come descritto dalla **Legge di Snell**.*

Il metodo d'indagine sismica utilizzato nell'area è stato il **metodo delle intercette** (o metodo convenzionale) supportato da un'ulteriore elaborazione tramite metodo GRM (Palmer, 1980) e metodo tomografico **WET** (**Wavepath Eikonal Tomography**).

Operativamente, ciò che è stato eseguito in campagna è una disposizione lungo una retta di **trasduttori velocimetrici** (geofoni) lungo la sezione specifica che si desiderava investigare.

Quindi, in funzione della risoluzione e delle profondità ricercate, si sono adeguatamente disposti i punti di produzione dell'energia elastica.

Leggendo i tempi dei primi arrivi delle onde sismiche ai geofoni, si sono ricostruite le **dromocrone** che permettono di individuare le variazioni verticali di velocità e le velocità reali dei diversi sismostrati.

Secondo i tempi di primo arrivo delle onde longitudinali **P** e le distanze relative alla configurazione geometrica adottata (**interspazio geofonico** e **offset di scoppio**) è stato possibile, inoltre, dimensionare gli spessori dei sismo-strati attraversati dalla radiazione elastica e quindi ottenere una **dettagliata perizia sismica** della porzione di sottosuolo sottoposta ad indagine.

Per ciò che concerne la campagna di indagine del lavoro in oggetto, è stato sviluppato **n°1 stendimento sismico** con l'utilizzo di n° **24 geofoni** distanziati tra di loro, su linea retta, di 3.00 metri.

Il terreno è stato energizzato mediante l'utilizzo di una mazza battente di massa 10.00 kg effettuando scoppi specifici ubicati in punti ben precisi lungo ciascuno stendimento stesso:

- *due scoppi simmetrici (**off-shots**) esterni allo stendimento ad una distanza di 1,00 metro dal geofono più vicino;*
- *uno scoppio (**mid-shot**) al centro dello stendimento stesso.*
- *due scoppi intermedi allo stendimento, il primo tra il 6° e il 7° geofono e il secondo tra il 18° e 19° geofono.*

La **distanza intergeofonica** è stata stabilita in 3,00 metri, mentre lo **scoppio di energizzazione** esterno è stato effettuato a 1,00 metro dal primo geofono.

I sismogrammi sono stati acquisiti con campionatura pari a 15.000 campioni al secondo.

Sono riportati le forme d'onda e i dati di picking che sono stati elaborati con il software “**Rayfract 3.24**” della **Intelligent Resources** (Copyright 1996-2010), relativi ai risultati dell'indagine sismica effettuata.

- **Indagine sismica "Celenza Valfortore"**

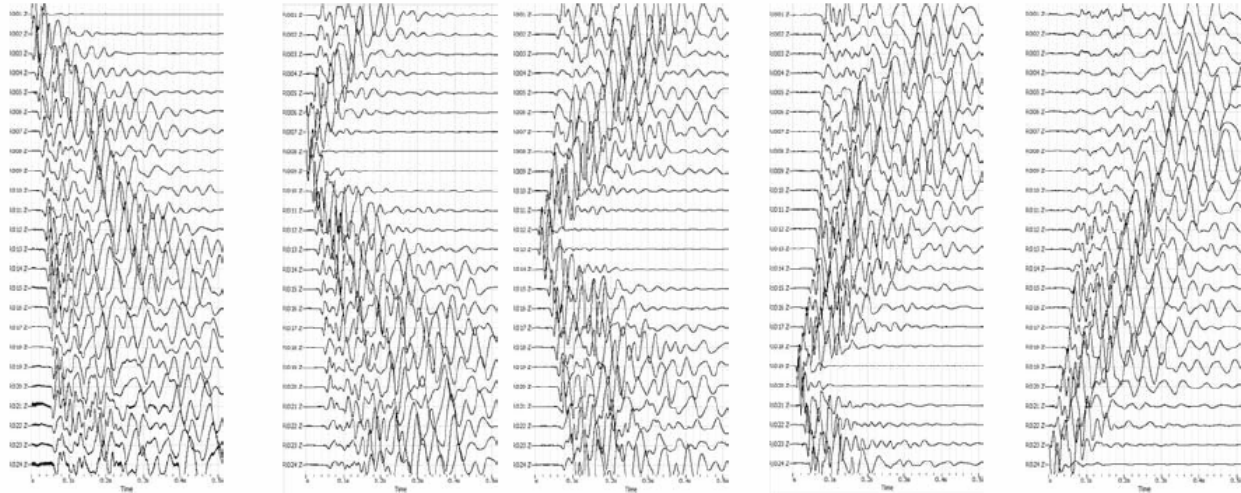


Fig. 2: sismogrammi degli Scoppi.

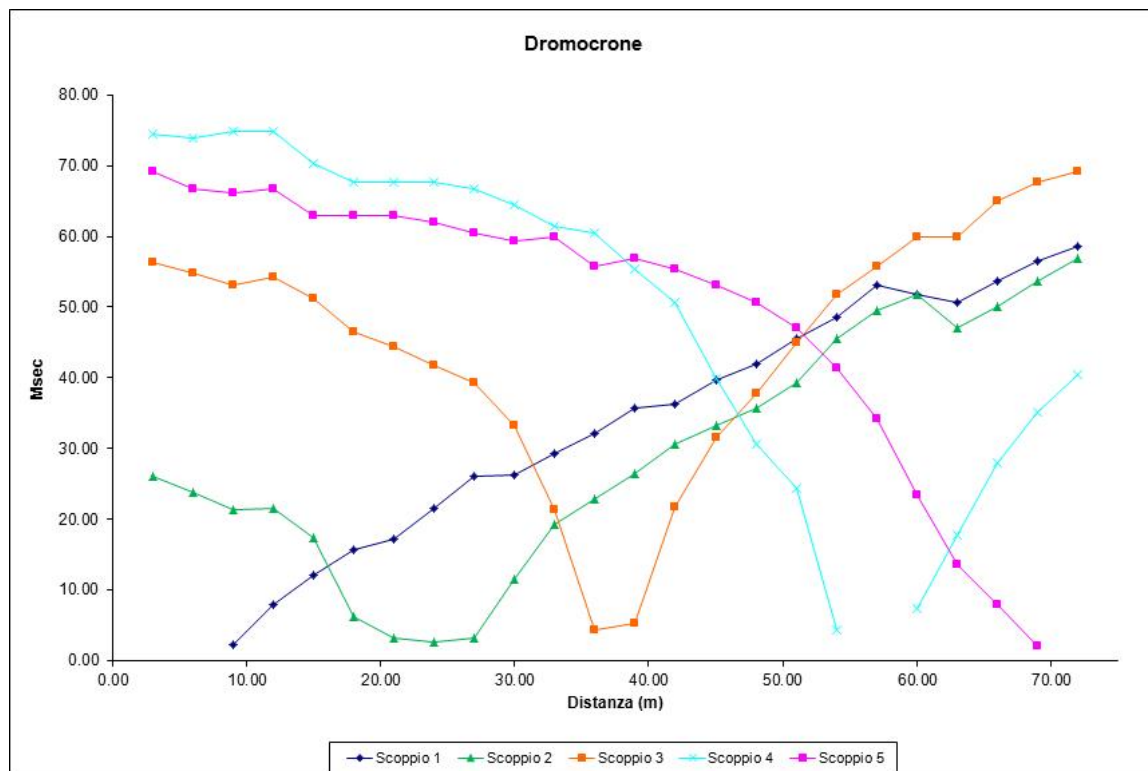
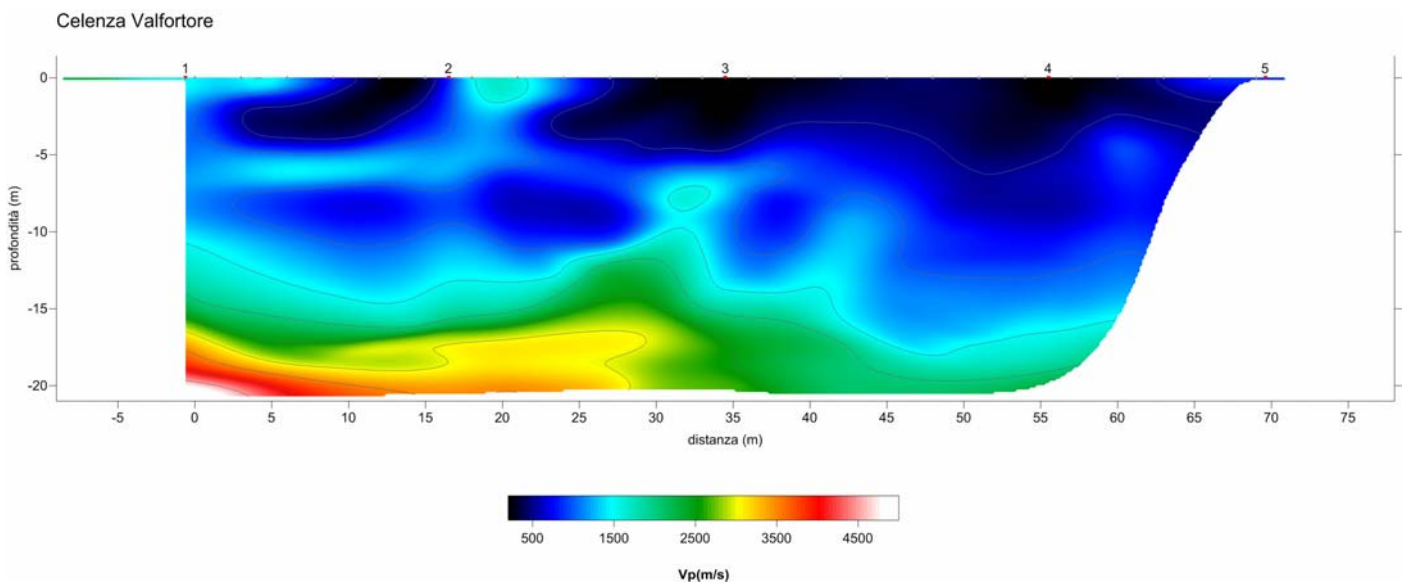


Fig. 3: Dromocrone - tabella dei primi arrivi.



Nella figura seguente viene riportata la tomografia sismica relativa al sito di indagine (Sito S1-S5), calcolata tramite software **Rayfract 3.24**.

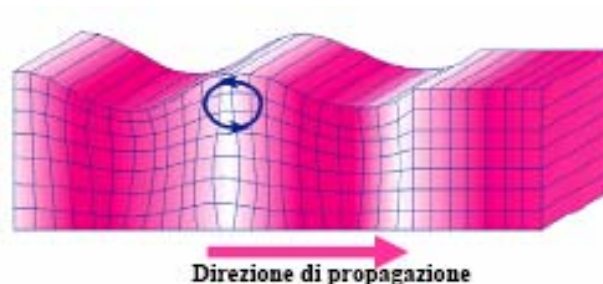
*Fig. 4: tomografia sismica stendimento.*



### **PRINCIPI DI BASE (SISMICA MASW)**

Le onde di Rayleigh sono polarizzate in un piano verticale (Fig. 2) e si generano in corrispondenza della superficie libera del mezzo quando viene sollecitato acusticamente. In questo tipo di onde le particelle descrivono un movimento di tipo ellittico la cui ampiezza decresce esponenzialmente con la distanza dalla superficie libera. L'asse maggiore delle ellissi è normale alla superficie libera del mezzo ed alla direzione di propagazione delle onde e le particelle compiono questo movimento ellittico in senso retrogrado rispetto alla direzione di propagazione delle onde che vengono generate.

Le onde superficiali di Rayleigh, quando si propagano in un mezzo omogeneo, non presentano dispersione e la loro velocità è uguale a  $0.92V_s$ . In un mezzo disomogeneo, quale la Terra, la loro velocità varia in funzione della lunghezza d'onda tra i limiti 0 e  $0.92 V_s$ . La teoria della propagazione delle onde superficiali è ben conosciuta ed è descritta dettagliatamente da Ewing et al. (1957).

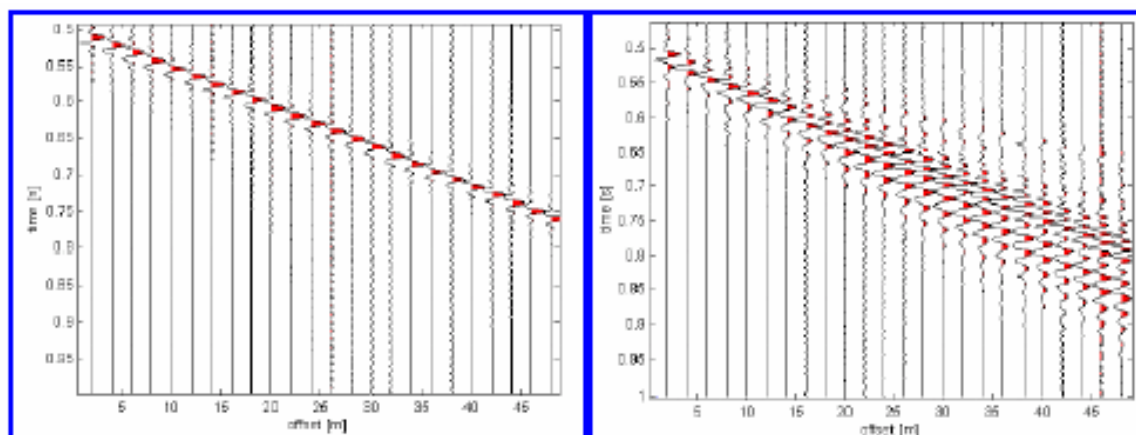


**Fig. 2 - Rappresentazione grafica della propagazione delle onde superficiali di Rayleigh caratterizzata dall'oscillazione polarizzata in un piano verticale e con movimento delle particelle retrogrado rispetto alla direzione di propagazione dell'onda.**

La determinazione della velocità delle onde di taglio  $V_s$  tramite le misure delle onde superficiali di Rayleigh risulta particolarmente indicata per suoli altamente attenuanti e ambienti rumorosi poiché la percentuale di energia convertita in onde di Rayleigh è di gran lunga predominante (67%) rispetto a quella coinvolta nella generazione e propagazione delle onde  $P$  (7%) ed  $S$  (26%). Inoltre l'ampiezza delle onde superficiali dipende da  $r$  e non da  $r$  come per le onde di volume.

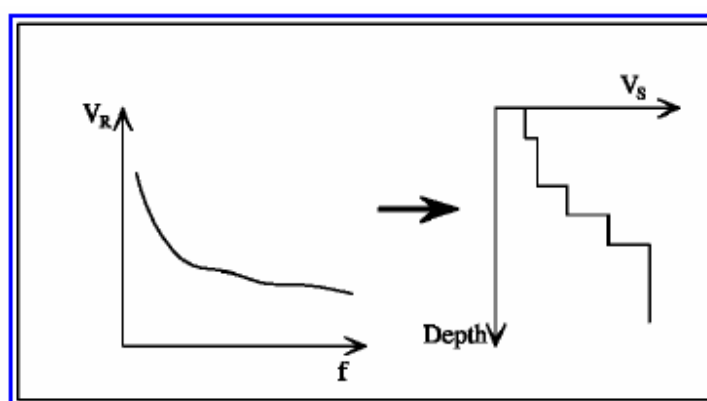
I metodi basati sull'analisi delle onde superficiali di Rayleigh forniscono una buona risoluzione e non sono limitati, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità. Inoltre la propagazione delle onde di Rayleigh, anche se influenzata dalla  $V_P$  e dalla densità, è funzione innanzitutto della  $V_s$ , parametro di fondamentale importanza per la caratterizzazione geotecnica di un sito secondo quanto previsto dalle recenti normative antisismiche (O.P.C.M. 3274/03; O.P.C.M. 3431/05; D.M. 14 gennaio 2008). Infatti, mentre la velocità delle onde  $P$  misurata in terreni saturi dipende in maniera sostanziale dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale, la velocità delle onde  $S$  è caratteristica delle vibrazioni trasmesse dal solo scheletro solido e, pertanto, a differenza delle onde  $P$ , risulta rappresentativa delle reali proprietà meccaniche del terreno. La proprietà fondamentale delle onde superficiali di Rayleigh, sulla quale si basa l'analisi per la determinazione delle  $V_s$ , è costituita dal fenomeno della dispersione che si manifesta in mezzi stratificati (Fig. 3).





**Fig. 3 – Segnali sismici che evidenziano (in rosso) 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.**

Pertanto, analizzando la curva di dispersione, ossia la variazione della velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della lunghezza d'onda (o della frequenza, che è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda), è possibile determinare la variazione della velocità delle onde di taglio con la profondità tramite processo di inversione (Fig. 4).



**Fig. 4 – Velocità delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza (a sinistra) e profilo di velocità delle onde di taglio in funzione della profondità (a destra) ricavato tramite processo d'inversione.**

La velocità delle onde di Rayleigh ( $V_R$ ) è pari a circa il 90% delle onde di taglio ( $V_s$ ). Le tecniche di analisi delle onde di Rayleigh vengono realizzate con procedure operative meno onerose della comune

sismica a rifrazione e delle prove in foro e hanno un grado di incertezza nella determinazione delle  $V_s$  <15%. La modellazione del sottosuolo mediante l'impiego di comuni geofoni verticali a 4.5Hz e l'analisi delle onde superficiali di Rayleigh viene ottenuta con le seguenti metodologie: ReMi (Refraction Microtremor), FTAN (Frequency Time ANalysis), SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La tecnica ReMi consente di raggiungere profondità ragguardevoli fornendo un profilo verticale medio delle  $V_s$  relative al volume di sottosuolo sotteso dallo stendimento messo in opera. Questa tecnica viene estensivamente utilizzata negli Stati Uniti nell'ambito del NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) tanto che il software fornisce anche direttamente il valore di  $V_{s30}$  e la categoria della classificazione del suolo secondo la normativa americana. Il metodo FTAN per la determinazione delle  $V_{s30}$  ha bisogno di un solo ricevitore e permette la definizione di un profilo medio su distanze di decine-centinaia di metri. Inoltre il metodo fornisce valori di velocità delle onde di taglio in buon accordo con le misure in foro. Il metodo SASW viene generalmente impiegato per la determinazione delle  $V_s$  di strati superficiali (<30m) e per la determinazione delle proprietà elastiche di strade e avimentazioni (Stokoe & Nazarian, 1985) e, pertanto, sembra essere tra i metodi non invasivi quello più popolare tra gli ingegneri. La tecnica MASW, fondata sulla tecnica SASW, consente una dettagliatissima ricostruzione della distribuzione della velocità delle onde  $S$  nel sottosuolo.

### PROSPEZIONI SISMICHE MASW

L'analisi multicanale delle onde superficiali di Rayleigh MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una efficiente ed accreditata metodologia sismica per la determinazione delle velocità delle onde di taglio  $V_s$ . Tale metodo utilizza le onde superficiali di Rayleigh registrate da una serie di geofoni lungo uno stendimento rettilineo e collegati ad un comune sismografo multicanale. Le onde superficiali di Rayleigh, durante la loro propagazione vengono registrate lungo lo stendimento di geofoni e vengono successivamente analizzate attraverso complesse tecniche computazionali, simili alla tecnica SASW, basate su un approccio di riconoscimento di modelli multistrato di terreno. La metodologia per la realizzazione di una indagine sismica MASW prevede 4 passi fondamentali:

- 1. Ripetute acquisizioni multicanale dei segnali sismici (Fig. 5), generati da una sorgente energizzante artificiale (maglio battente su piastra in alluminio), lungo uno stendimento

rettilineo di sorgente-geofoni (Fig. 6) che viene spostato lungo la linea dello stendimento stesso dopo ogni acquisizione;

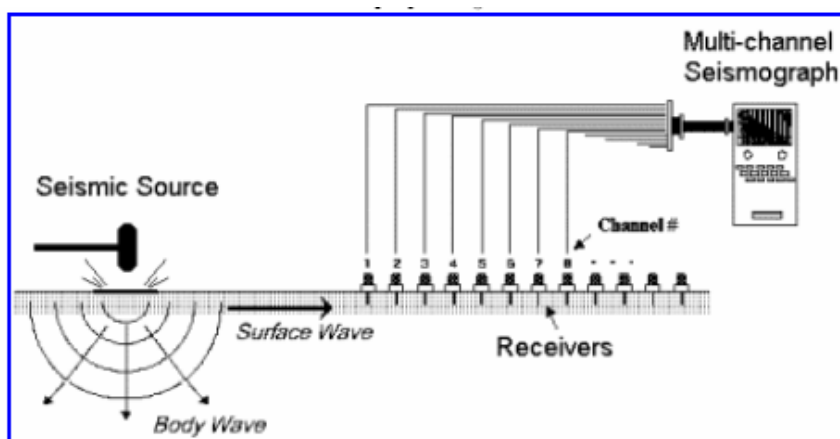


Fig. 5 – Schema di acquisizione dei segnali sismici con metodo MASW.

- 2. Estrazione del modo fondamentale dalle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh (una curva per ogni acquisizione);

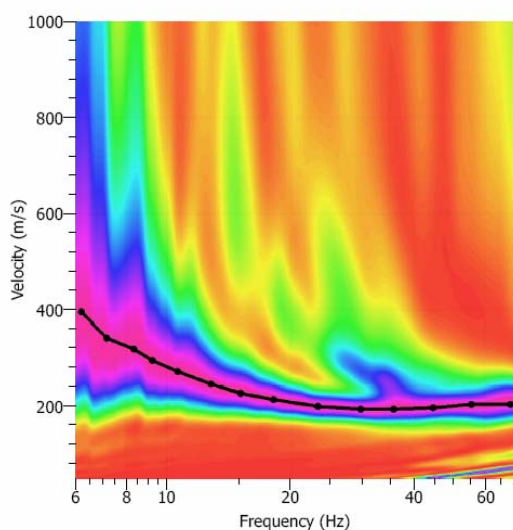


Fig. 6 – Estrapolazione della curva di dispersione.

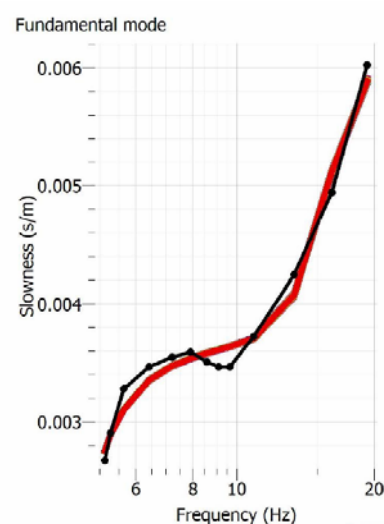
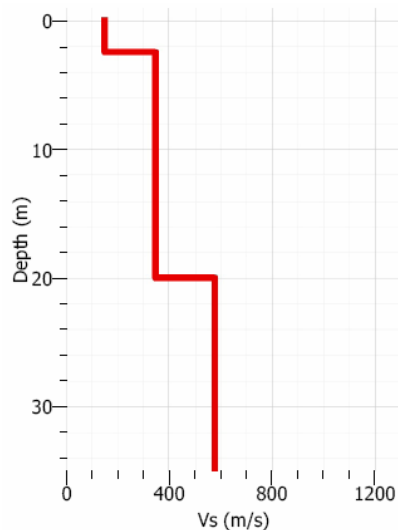


Fig. 7 – Estrapolazione della modo fondamentale

- 3. Inversione delle curve di dispersione per ottenere profili verticali 1D delle  $V_s$  (Fig. 8) (un profilo verticale per ogni curva di dispersione, posizionato nel punto medio di ogni stendimento geofonico);



**Fig.8 – Profilo 1D  $V_s$ .**

### INDAGINE MASW ESEGUITA

Al fine di caratterizzare sismicamente il suolo in area progettuale, è stata eseguita una prospezione sismica MASW sul sito ove è stata eseguita la prova sismica a rifrazione, con stendimento geofonico di 52.00m (considerando anche la sorgente energizzante e la traslazione su se stesso dell'intero stendimento di 3 stazioni geofoniche). La sorgente sismica è costituita da una mazza battente ( peso di 10kg che batte su una piastra circolare in alluminio). Come trigger/starter è stato utilizzato un geofono verticale Geospace a 14Hz, posto in prossimità della piastra posizionata alla distanza di 6,00 m. dal primo geofono.

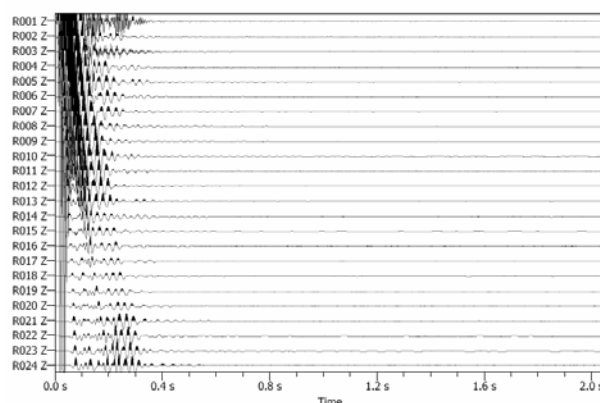
Le oscillazioni del suolo sono state rilevate da 24 geofoni verticali (Geospace – 4.5Hz) posizionati lungo il profilo di indagine con offset di 2.00m. La lunghezza complessiva dello stendimento è stata sufficiente a determinare la sismostratigrafia dei terreni di sedime fino alla profondità di circa 35m dal

p.c.. I segnali sismici acquisiti sono stati successivamente elaborati con apposito programma (Geopsy - Dinver) per la determinazione della sismostratigrafia del sottosuolo.

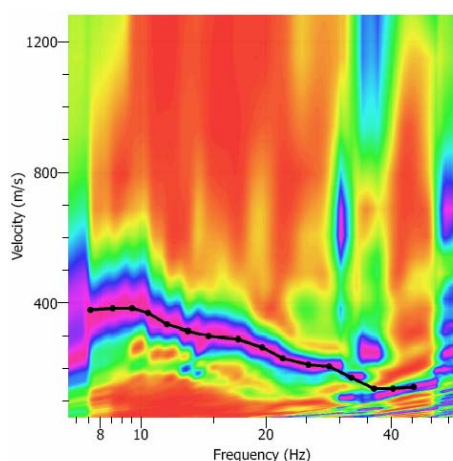
Le acquisizioni dei segnali, di lunghezza temporale  $T=2.048s$ , sono state effettuate con passo di campionamento  $dt=0.5ms$ . La frequenza di campionamento è data da:  $f_{\text{campionamento}}=1/dt=2000Hz$ . La frequenza massima dei segnali, ovvero la frequenza di Nyquist, è data da:  $f_{\text{Nyquist}}=1/2dt=1000Hz$ . La frequenza minima dei segnali è data da:  $f_{\text{min}}=1/T=0.488Hz$ .

L'elaborazione dei dati e l'inversione delle curve di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh sono state effettuate con il programma “GEOPSY – DINVER vers. 2.0.5” che ha permesso di eseguire l'intero processo di elaborazione di una profilo sismico 1D delle  $V_s - V_p$ .

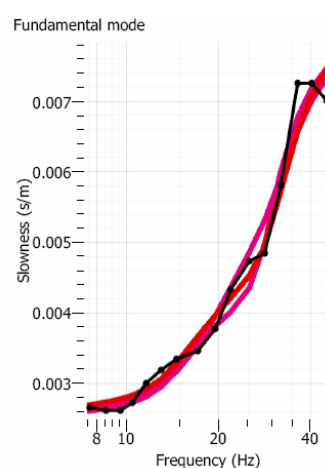
Gli elaborati relativi alla prova MASW effettuata sono di seguito riportati.



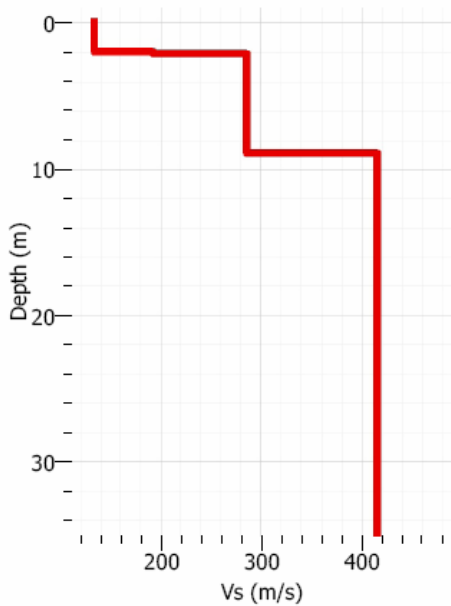
**Fig. 1 – Segnale sismico acquisito.**



**Fig. 2 – Estrapolazione della curva di dispersione.**



**Fig. 3 – Estrapolazione della modo fondamentale.**



**Fig.4 – Profilo 1D Vs.**

#### - INTERPRETAZIONE ED ANALISI DEI DATI

L'indagine sismica MASW, considerando la sismostratigrafia fino alla profondità di 30,00m, ha fornito risultati sotto riportati:

<i>Sismostrato</i>	<i>Spessore sismostrato (m)</i>	<b>Vs (m/s)</b>
S1	2,00	127
S2	7,00	281
S3	21,00	435

Tali valori collocano i terreni oggetto d'indagine in categoria **C** del D.M. 14 gennaio 2008. Questa categoria è stata ricavata, come da normativa, dalla relazione:

$$V_{s30} = \frac{30m}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano lo spessore in metri e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $6 \cdot 10^{-4} < \gamma$ ) dello strato  $i$ -esimo per un totale di  $N$  strati presenti nei primi 30 metri di profondità.

Il valore  $V_{s30}$  è pari a **337,33** m/s.



**“Categoria di suolo di fondazione C = Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti** con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$  compresi tra 180m/s e 360m/s (ovvero  $15 < N_{SPT,30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{u30} < 250$  kPa nei terreni a grana fine)”.

## CONCLUSIONI

Le indagini geofisiche eseguite hanno consentito di caratterizzare simicamente il sito, inoltre ci hanno permesso di ricostruire localmente le condizioni litostratigrafiche.

Dalla ricostruzione tomografica si può notare che vi è una stratificazione irregolare con approfondimento dello strato di base verso nord (scoppio 4 - 5), inoltre le caratteristiche fisiche dei litotipi ( $V_p$ - $V_s$ ) migliorano gradualmente con l'aumentare della profondità.

Nel sito è presente uno spessore di terreni (riporto) variabile tra 10,00-15,00 metri caratterizzati da basse velocità  $V_s$ , con stratificazione irregolare riconducibile ad una struttura sub-orizzontale, sovrapposto ad un terreno più competente meccanicamente che può rappresentare la formazione di base.