

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA  
U.O. GEOLOGIA**

**PROGETTO PRELIMINARE**

**PROGETTO: AMMODERNAMENTO LINEA POTENZA - FOGGIA  
SOTTOPROGETTO 2: ELETTRIFICAZIONE, RETTIFICHE DI  
TRACCIATO,  
SOPPRESSIONE PL E ADEGUAMENTI IN GALLERIA.**

**INDAGINI GEOFISICHE**

COMMESSA	LOTTO	FASE	ENTE	TIPO DOC.	OPERA/DISCIPLINA	PROGR.	REV.
IAZU	00	R	69	IG	GE00005	001	A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	Pulelli		MANCINI		C. Milano		D. MARCHESE <b>ITALFERR S.p.A.</b> D. Geologo Francesco MARCHESE Resp. UO GEOLOGIA Ordine Geologi Lazio n. 179 ES
		<i>GP</i>		<i>MP</i>		<i>(M)</i>		

File: D05704DXXXXXXXXXXXXXA.doc

n. Elab.:

**LO.4.8**

## INDICE

1.	INDICAZIONI GENERALI	4
2.	MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (M.A.S.W.)	8
2.1.	METODOLOGIA DI INDAGINE PER ONDE SUPERFICIALI	8
2.1.1.	<i>Descrizione del metodo</i>	8
2.1.2.	<i>Modalità di acquisizione</i>	10
2.2.	ELABORAZIONE DATI E STIMA DELLA CURVA DI DISPERSIONE	11
2.3.	INTERPRETAZIONE GEOFISICA DEI DATI	14
2.4.	RISULTANZE PROVE M.A.S.W.	15

# ITALFERR S.p.A.

*ESECUZIONE DI INDAGINI GEOFISICHE*

*PER IL PROGETTO PRELIMINARE*

*DELLA ELETTRIFICAZIONE DELLA LINEA*

*POTENZA - FOGGIA*

**MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES**

**(MASW)**

## 1. INDICAZIONI GENERALI

Su incarico di Italferr S.p.A. nel mese di Dicembre 2012 sono state eseguite indagini geofisiche per la caratterizzazione sismica del suolo per il progetto di ammodernamento – elettrificazione della linea ferroviaria Potenza Foggia.

**Per lo studio dei siti in esame con finalità di classificazione sismica si sono applicate le procedure di indagine più adeguate per la progettazione in oggetto.**

Allo scopo di valutare gli elementi sopra indicati, in accordo con la Committenza, si sono perciò realizzati in questa fase geognostica una serie di array sismici (18) posizionati in corrispondenza dei principali passaggi a livello di tale linea, mediante i quali è stato possibile, attraverso una misura attiva (MASW), classificare il terreno di fondazione dell'eventuale nuova struttura secondo la normativa vigente.

Le progressive chilometriche in cui si sono realizzate le misure sismiche sono rispettivamente:

km 11+764

km 14+254

km 14+942

km 17+550

km 18+024

km 25+434

km 30+356

km 36+782

km 38+203

km 39+552

km 44+443

km 45+124

km 62+434

km 63+173

INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IAZU	00	R 69 IG	GE 00 05 001	A	5 di 16

km 66+372

km 73+295

km 103+883

km 104+736

## AZIONE SISMICA

### *Categorie di suolo di fondazione*

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale mediante specifiche analisi.

Per la definizione dell'azione sismica si può anche fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento (Tab. 3.2.II e 3.2.III).

**Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo**

Categoria	Descrizione
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
<b>E</b>	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Fatta salva la necessità della caratterizzazione geotecnica dei terreni nel volume significativo, ai fini della identificazione della categoria di sottosuolo la classificazione si effettua in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s30}$  di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità.

Per le fondazioni superficiali, tale profondità è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali.

Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera.

Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

La misura diretta della velocità di propagazione delle onde di taglio è fortemente raccomandata.

Nei casi in cui tale determinazione non sia disponibile, la classificazione può essere effettuata in base ai valori del numero equivalente di colpi della prova penetrometrica dinamica (Standard Penetration Test) SPT,30N nei terreni prevalentemente a grana grossa e della resistenza non drenata equivalente  $c_{u,30}$  nei terreni prevalentemente a grana fina.

Per sottosuoli appartenenti alle ulteriori categorie S1 ed S2 di seguito indicate (Tab. 3.2.III), è necessario predisporre specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche, particolarmente nei casi in cui la presenza di terreni suscettibili di liquefazione e/o di argille d'elevata sensibilità possa comportare fenomeni di collasso del terreno.

**Tabella 3.2.III – Categorie aggiuntive di sottosuolo.**

Categoria	Descrizione
S1	Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.

La velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,30}$  è definita dall'espressione:

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

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

Il sito verrà classificato sulla base del valore di  $V_{s,30}$ , se disponibile, altrimenti sulla base del valore di  $NSPT$ .

## 2. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (M.A.S.W.)

L'analisi della propagazione delle onde superficiali entro il sottosuolo con la metodologia M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves) per la determinazione della velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) è stata effettuata mediante l'utilizzo di uno stendimento sismico di superficie composti da 24 geofoni da 4.5 Hz interdistanti 2.5 m per una lunghezza complessiva di 57.5 m; l'elaborazione, mediante software d'inversione, della prova sismica ha fornito un log di  $V_s$  posizionato al centro della sezione il quale permette di individuare eventuali variazioni verticali dei valori cinematici corrispondenti a variazioni delle caratteristiche meccaniche dei terreni indagati.

### 2.1. METODOLOGIA DI INDAGINE PER ONDE SUPERFICIALI

#### 2.1.1. *Descrizione del metodo*

Considerando un semispazio elastico, omogeneo ed isotropo, si dimostra che la velocità di propagazione delle onde di Rayleigh è indipendente dalla frequenza e che il moto indotto dalla propagazione si smorza rapidamente con la profondità, sino ad estinguersi ad una profondità circa pari ad una lunghezza d'onda [RICHART *et al.*, 1970].

Ciò vuol dire che la profondità raggiunta dipende dalla lunghezza d'onda, e che, a diverse lunghezze d'onda corrisponde la stessa velocità di fase ( $V_R$ ).

In un mezzo verticalmente eterogeneo, costituito cioè da strati aventi proprietà meccaniche diverse, il comportamento delle onde superficiali è differente.

In particolare, la propagazione presenta un comportamento dispersivo (a frequenze diverse corrispondono diverse velocità di fase).

Ciò vuol dire che lunghezze d'onda diverse interessano strati diversi ai quali sono associati proprietà meccaniche differenziate: ogni lunghezza d'onda si propaga ad una velocità di fase che dipende dalle caratteristiche dello strato interessato dalla propagazione.

Quindi, nel caso di mezzo eterogeneo, le onde superficiali non hanno una singola velocità, ma una velocità di fase che è funzione della frequenza: tale fenomeno, dipendente dalla distribuzione spaziale delle proprietà sismiche del sottosuolo è noto come dispersione geometrica e la relazione che lega la frequenza alla velocità di fase prende il nome di curva di dispersione.

Alle alte frequenze, la velocità di fase coincide con la velocità delle onde di Rayleigh dello strato più superficiale, mentre, alle basse frequenze, l'effetto degli strati più profondi diventa importante, e la velocità di fase tende asintoticamente alla velocità dello strato più profondo come se questo fosse esteso infinitamente in profondità.

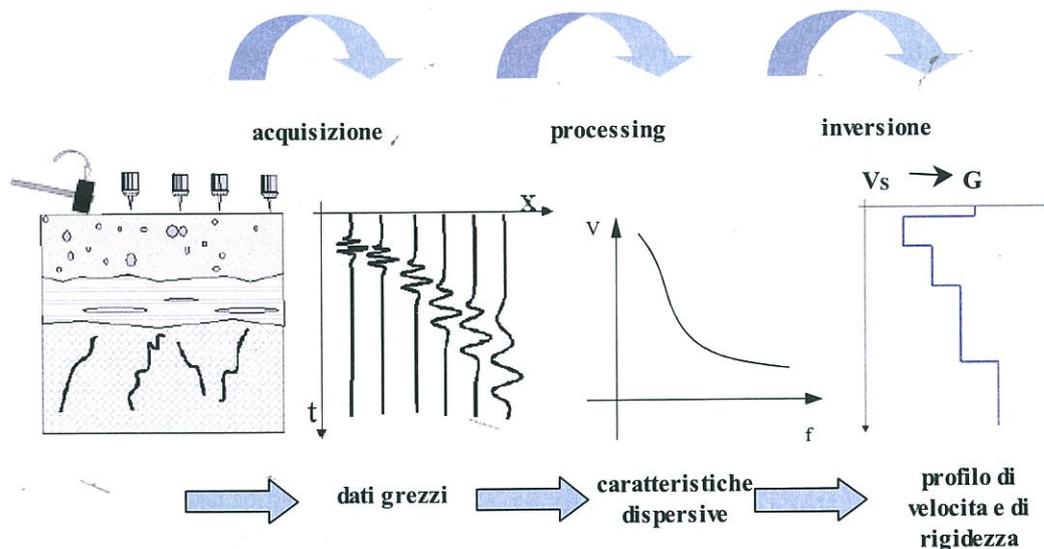
La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni; infatti, è funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo e, posto di riuscire a misurarla sperimentalmente, può essere utilizzata (come si vedrà più avanti) per un processo inverso avente come obiettivo la stima delle caratteristiche di rigidità stesse.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo, è un fenomeno multi-modale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda.

Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione, e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

Il processo di caratterizzazione basato sul metodo delle onde superficiali, schematizzato nella figura qui di seguito presentata, può essere suddiviso in tre fasi:

- 1) Acquisizione;
- 2) Processing;
- 3) Inversione.



Fasi del metodo delle onde superficiali (SWM).

I dati acquisiti, vengono sottoposti ad una fase di *processing* che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto ovvero, la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza.

Esistono diverse tecniche di *processing* per estrarre dai sismogrammi le caratteristiche dispersive del sito.

La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale in dominio  $fk$  (frequenza-numero d'onda) [STROBBIA, 2003].

La curva di dispersione ottenuta, viene successivamente utilizzata per un processo di inversione che fornisce come risultato finale il profilo verticale della velocità delle onde di taglio nel terreno e quindi una stima della rigidezza in funzione della profondità.

Quindi, le informazioni riguardanti la curva di dispersione sperimentale (associata a un mezzo le cui caratteristiche sono incognite) vengono sfruttate per affrontare il problema inverso della caratterizzazione: se le caratteristiche dispersive del sito possono essere valutate sperimentalmente, allora è possibile valutare le corrispondenti proprietà del terreno [STROBBIA, 2002].

La risoluzione del problema inverso, deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo, che viene di norma schematizzato come un mezzo visco-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati.

Come già sottolineato in precedenza, l'utilizzo di un modello monodimensionale è un'ipotesi che deve essere in linea di massima soddisfatta dal deposito di terreno per garantire la validità del risultato finale.

Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, ed eventualmente dalle informazioni note a priori riguardo la stratigrafia, il problema diretto viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello.

Il processo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione simulata).

Usualmente, algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati vengono utilizzati per automatizzare la procedura.

### **2.1.2. Modalità di acquisizione**

Le sezione realizzata è costituita da uno stendimento sismico di superficie composti da 24 geofoni da 4.5 Hz interdistanti 2.5 m per una lunghezza complessiva di 57.5 m.

Il sismografo utilizzato è un dispositivo modulare da 24 canali GEODE (Geometrics); l'intervallo di campionamento è stato selezionato a 0.5 millisecc e il tempo di registrazione è stato fissato in 8 secondi.

Il sistema di energizzazione utilizzato è stato un grosso martello strumentato lasciato cadere con forza al suolo. Sono state effettuate due serie di energizzazioni esterne allo stendimento sia dal lato del ricevitore 1 sia dal lato del ricevitore 24.

L'esecuzione di più registrazioni separate invece della tradizionale procedura di *stacking* dei dati in acquisizione consente, senza un sensibile incremento dei tempi di acquisizione, di effettuare una serie di controlli statistici sulla qualità dei dati. In particolare è possibile stimare l'incertezza sui punti della curva di dispersione e verificare che l'ipotesi di monodimensionalità sia rispettata dal sito.

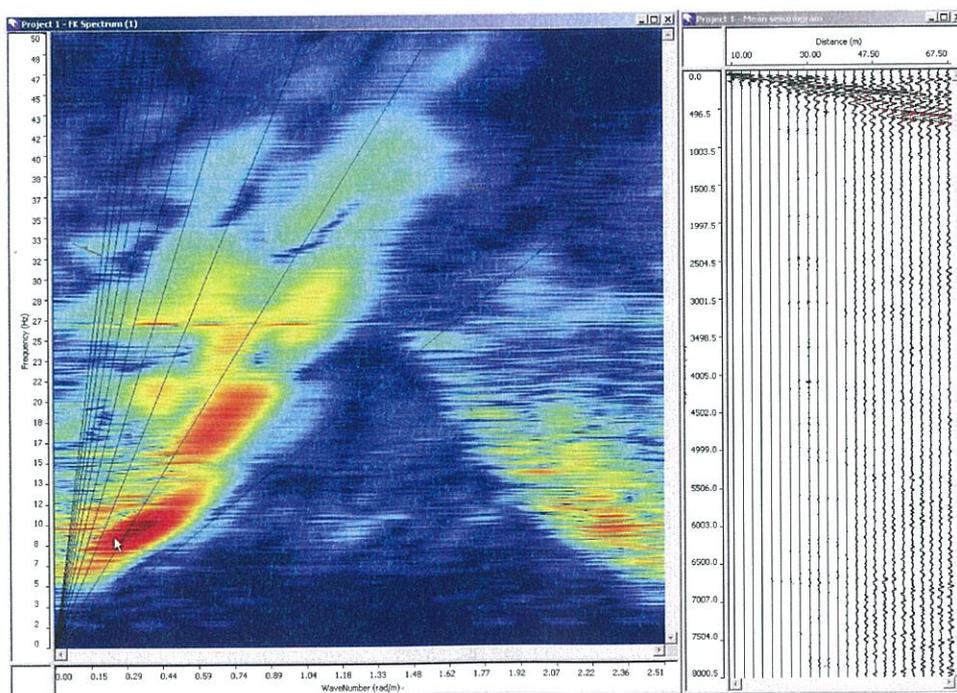
## 2.2. ELABORAZIONE DATI E STIMA DELLA CURVA DI DISPERSIONE

La fase di processing è quella che segue l'acquisizione dei dati grezzi e permette di stimare, a partire dai sismogrammi acquisiti, le caratteristiche dispersive del sito, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza del segnale sismico (curva di dispersione sperimentale).

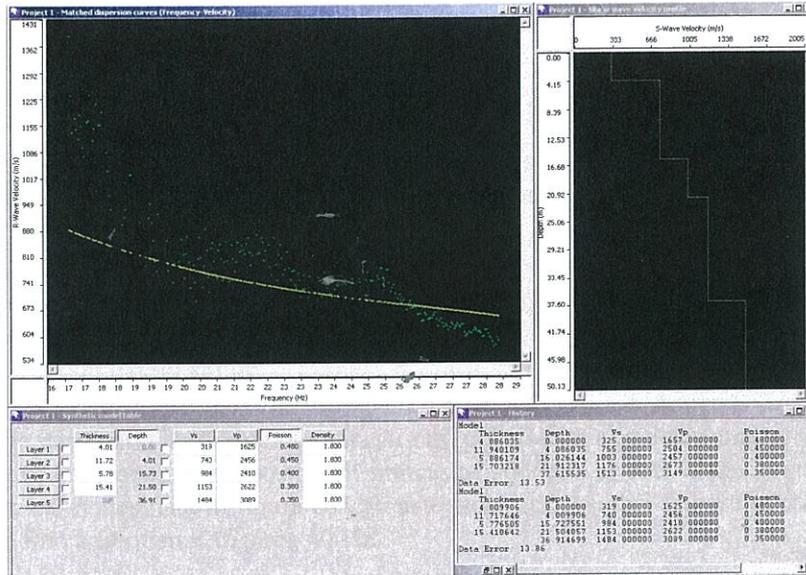
Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati grezzi è composto da una serie di codici scritti in Matlab™.

I dati vengono trasformati in dominio  $fk$  (frequenza-numero d'onda) tramite una doppia trasformata di Fourier e la curva di dispersione è ricavata con un algoritmo di ricerca dei massimi spettrali (ai quali è associata per l'appunto la propagazione delle onde di Rayleigh).

Qui di seguito si presenta un esempio dei vari step del processing dei dati acquisiti lungo i vari stendimenti; da destra verso sinistra sono riportati il sismogramma sintetico acquisito e lo spettro  $fk$  e la curva di dispersione.



**Esempio dei vari step del processing: sismogramma, spettro  $fk$ .**



**Esempio dei vari step del processing: curva di dispersione e modello (Software "SWAN").**

Un confronto tra varie curve di dispersione può denotare differenze tra le stesse che possono essere imputate a varie cause quali eventuali variazioni di quota dei geofoni o, in secondo luogo, a variazioni laterali, lungo lo stendimento, delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

Analizzando poi le curve di dispersione si possono altresì notare la presenza di diversi modi di vibrazione; l'energia cioè tende a propagarsi maggiormente sul modo fondamentale verso basse frequenze oppure secondo modi più elevati di vibrazione.

Lo spettro  $f_k$  può poi mettere in evidenza un intervallo di frequenze significativamente ampio; a seconda dei casi, è possibile una concentrazione di energia verso varie frequenze o, dall'altro lato, una propagazione di energia che presenta un livello simile.

Dall'analisi della curva di dispersione ottenuta, si può poi risalire alla determinazione delle caratteristiche dei terreni investigati; dall'esempio proposto nell'immagine suddetta si nota come la curva apparente, relativa ai massimi assoluti ed evidenziata in figura con gli asterischi neri, sembri seguire in modo regolare l'andamento del primo modo fino a frequenze di circa 40 Hz.

Tali tratti di curva indicano coerentemente una crescita della velocità delle onde di Rayleigh al diminuire della frequenza (e dunque all'aumentare della profondità).

In particolare, nell'esempio proposto, la frequenza di taglio dei modi superiori sembra indicare che, dopo uno strato di materiale relativamente lento fino a circa 15 m, vi sia una serie di strati a caratteristiche meccaniche maggiori che presentano velocità fino a 400 – 450 m/s (velocità Onde di Rayleigh).

Analizzando quindi le curve di dispersione, e soprattutto mediante la possibilità di distinguere facilmente i singoli modi all'interno della curva di dispersione stessa, permette di ottenere un modello di primo tentativo più affidabile e quindi avere un problema di inversione meglio condizionato.

### 2.3. INTERPRETAZIONE GEOFISICA DEI DATI

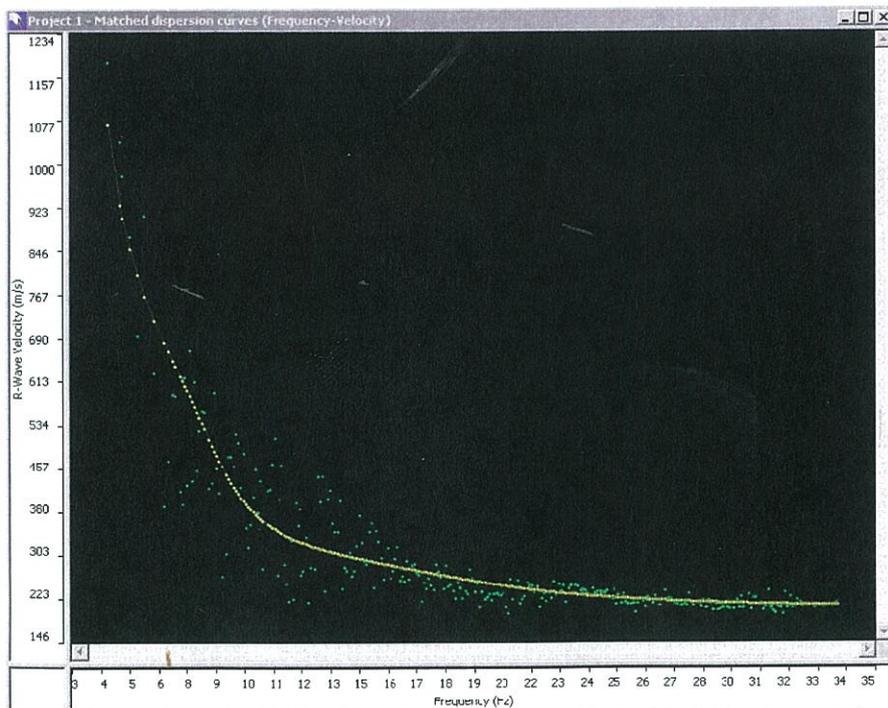
Come accennato in precedenza, l'inversione è l'ultima delle tre fasi che caratterizzano il metodo delle onde superficiali e consente di ottenere, a partire da un profilo di primo tentativo e da una curva di dispersione sperimentale ricavata in sito, un modello stratigrafico finale.

L'inversione è stata effettuata mediante l'algoritmo Damped Least Squares, con inversione automatica del primo modo e discretizzazione fitta di profondità.

Il modello viene successivamente semplificato diminuendo la parametrizzazione e quindi riducendo il numero di strati.

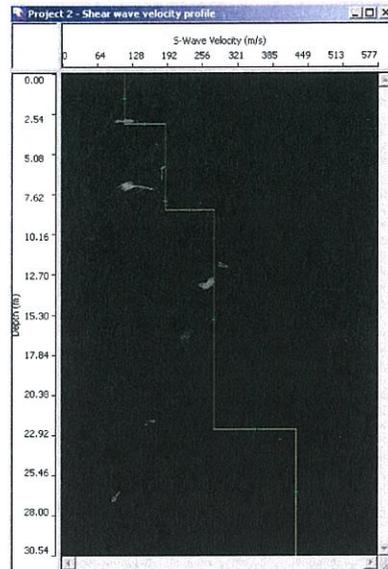
Le profondità vengono corrette infine secondo la modalità *trial and error*.

A titolo di esempio viene riportato qui di seguito il confronto tra la curva di dispersione sperimentale e quella del modello calcolato per una sezione reale.



Fitting della curva di dispersione tra modello finale e dati sperimentali.

I risultati ottenuti dal processo di inversione riportano poi per ogni stendimento acquisito, il profilo di velocità delle onde S in funzione della profondità; un esempio di profili è riportato qui di seguito.



Esempio di profilo di velocità  $V_s$  in funzione della profondità

#### 2.4. RISULTANZE PROVE M.A.S.W.

L'analisi delle prove M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves), mediante la stima della propagazione delle onde superficiali entro il sottosuolo rilevata tramite l'utilizzo di stendimenti sismici di superficie composti da 24 geofoni da 4.5 Hz interdistanti 2.5 m per una lunghezza complessiva di 57.5 m, ha consentito di investigare l'ammasso fino ad una profondità massima di 40 m a partire dal piano campagna.

L'elaborazione della prova ha fornito un log sismico posizionato al centro della sezione.

#### **È stata eseguita n° 18 linee sismiche M.A.S.W.**

Le risultanze delle prova M.A.S.W. sono riportate nei log al termine della presente relazione e ai quali si rimanda per una lettura dettagliata dei diversi valori dei profili di velocità delle  $V_s$ .

Sul certificato stesso è poi espresso il valore di  $V_{s30}$  tali valori sono riassunti nella tabella sottostante

INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IAZU	00	R 69 IG	GE 00 05 001	A	16 di 16

PROGRESSIVE	V <sub>S30</sub>	TIPO SUOLO
km 11+764	541	B
km 14+254	724	B
km 14+942	751	B
km 17+550	359	C
km 18+024	388	B
km 25+434	478	B
km 30+356	431	B
km 36+782	456	B
km 38+203	313	C
km 39+552	377	B
km 44+443	295	C
km 45+124	551	B
km 62+434	357	C
km 63+173	487	B
km 66+372	439	B
km 73+295	460	B
km 103+883	405	B
km 104+736	561	B

PROGEO S.r.l.

Dott. Gabriele Pulelli

