

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA  
U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

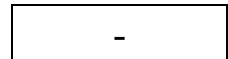
**VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA PESCARA  
RADDOPPIO FERROVIARIO  
TRATTA CHIETI – INTERPORTO D’ABRUZZO (LOTTO 3)**

**RELAZIONE INDAGINI GEOFISICHE  
MASW, GEOELETRICA E DOWN HOLE**

Progetto di fattibilità tecnica ed economica da sottoporre all'esame del CSLPP, ai sensi del DL 16 luglio 2020 n. 76, convertito con legge n. 120/2020: "Misure urgenti per la semplificazione e l'innovazione digitale"

Il Progettista Ingegnere  
Giuseppe SACCI  
ITALFERR - UD INFRASTRUTTURE NORD  
Dott. Ing. Francesco Sacchi  
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma  
n. 21677 Sep. A.

SCALA:



COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

I A 6 F 0 3 D 6 9 I G G E 0 0 0 5 0 0 1 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato	Data
A	Emissione definitiva	G. PULELLI <i>[Signature]</i>	Aprile -19	M. SCIARRA <i>[Signature]</i>	Aprile-19	T. PAOLETTI <i>[Signature]</i>	Aprile-19	F. MARCHESE <i>[Signature]</i>	Aprile - 19

ITALFERR S.P.A.  
Geologo Francesco MARCHESE -  
Resp. UD GEOLOGIA  
Ordine Geologi Lazio - 11412 ES

File: IA6F03D69IGGE0005001A

n. Elab.: 3-8

## INDICE

1.	INDICAZIONI GENERALI .....	4
2	AZIONE SISMICA .....	9
2.1	<i>Categorie di suolo di fondazione</i> .....	9
3.	MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (M.A.S.W.) .....	10
3.1	METODOLOGIA DI INDAGINE PER ONDE SUPERFICIALI .....	10
3.1.1	<i>Descrizione del metodo</i> .....	10
3.1.2	<i>Modalità di acquisizione</i> .....	12
3.1.3	<i>Elaborazione dati e stima della curva di dispersione</i> .....	12
4	INDAGINI DI SISMICA PASSIVA .....	15
4.1	<i>Metodologia HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)</i> .....	15
4.1.1	<i>Generalità</i> .....	15
4.1.2	<i>Basi teoriche</i> .....	15
4.1.3	<i>Attrezzature e modalità esecutive</i> .....	16
4.1.4	<i>Elaborazione dati</i> .....	17
5	PROSPEZIONE SISMICA IN FORO CON TECNICA DOWN-HOLE .....	19
5.1.	MODALITÀ OPERATIVE .....	19
5.1.1.	<i>Sorgente di energia</i> .....	19
5.1.2.	<i>Apparato di ricezione</i> .....	20
5.1.3.	<i>Operazioni di campagna</i> .....	20
5.2.	ELABORAZIONE DATI .....	25
6.	INDICAZIONI GENERALI SULLA ELASTICITÀ DEI MATERIALI .....	27
6.1.	<i>Generalità</i> .....	27
6.2.	<i>Principi sulla elasticità</i> .....	27
6.3.	<i>Parametri elastici</i> .....	28
7.	PROSPEZIONE ELETTRICA TOMOGRAFICA .....	30

7.1.	Generalità .....	30
7.2.	Operazioni di campagna .....	33
7.2.1	Sorgente di energia ed apparati di ricezione .....	33
7.2.2	Acquisizione dati .....	34
7.3.	Elaborazione dati .....	37
7.4.	Comportamento della resistività nei materiali litologici .....	38
8	CONCLUSIONI .....	39

# ITAFERR

**DIREZIONE TECNICA  
U.O. GEOLOGIA, GESTIONE TERRE E BONIFICHE**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**VELOCIZZAZIONE DELLA LINEA ROMA PESCARA  
RADDOPPIO FERROVIARIO  
TRATTA CHIETI – INTERPORTO D'ABRUZZO (LOTTO 3)**

**INDAGINI GEOFISICHE  
RELAZIONE TECNICA**

## 1. INDICAZIONI GENERALI

Su incarico della committenza ITAFERR SPA sono state eseguite indagini geofisiche per la caratterizzazione dei terreni su cui realizzare il raddoppio ferroviario.

Per lo studio del sito 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, si sono realizzati in questa fase geognostica:

n° 4 MASW

n° 4 HVSR prova di sismica passiva conosciuta anche come "Tecnica Nakamura";

n° 1 Down-hole tomografico

n° 1 sezioni elettrica tomografica.

Le n°4 sezioni MASW realizzate sono composte in linea generale da 24 ricevitori da 4.5 Hz spazati 2.5 metri per un totale di 57.5 metri cadauna, mediante i quali sono state effettuate misure sismiche attive. Al centro di ogni stendimento MASW sono stati realizzati n° 4 HVSR sismica passiva con tempo di acquisizione di 30 minuti cadauno.

L'indagine down-hole realizzata con una terna di geofoni, in modalità progressiva, è stata acquisita nel sondaggio **S4 Pz** da una profondità di -30m dal piano campagna fino a quota 0 (piano campagna), i dati sono stati elaborati con tecnica tomografica.

La sezione geoelettrica realizzata ERT1 con 192 stazioni, spaziatura interelettrodica di 2,5 m, lunghezza dello stendimento 477.50 m ed è stata acquisita con sequenza Wenner-Schlumberger.

Tutte le sezioni sono state oggetto di rilievo mediante GNSS (GPS) differenziale riportate sulla cartografia a disposizione.



In allegato alla seguente relazione sono riportati gli allegati grafici delle risultanze geofisiche secondo il seguente ordine:

MASW 1+HVSR251  
MASW 2+HVSR250  
MASW 3+HVSR042  
MASW 4+HVSR244

DOWN HOLE

PLANIMETRIA SEZIONE GEOELETTRICA  
SEZIONE GEOELETTRICA

### Immagini del sito e dell'attività di acquisizione dati



Particolare indagini geofisiche: MASW 1 e HVSR 251





Particolare indagini geofisiche: MASW 2 e HVSr 250



Particolare indagini geofisiche: MASW 3 e HVSr 042





Particolare indagini geofisiche: MASW 4 e HVSr 244



Particolare indagini geofisiche: down hole nel sondaggio S4 Pz





Particolare indagini geofisiche: geoelettrica ERT1

Particolare stazione fissa GNSS (Global Navigation Satellite System)

## 2 AZIONE SISMICA

### 2.1 Categorie di suolo di fondazione

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ .

I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità  $V_s$  per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2. I valori di  $V_s$  sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,H} \frac{h_i}{V_{s_i}}}$$

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

Ai fini della definizione della azione sismica di progetto si definiscono le seguenti categorie di profilo stratigrafico del suolo di fondazione (le profondità si riferiscono al piano di posa delle fondazioni):

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.

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 - Depositati 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 - Depositati 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.

### 3. 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.

#### 3.1 Metodologia di indagine per onde superficiali

##### 3.1.1 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 (VR).

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.

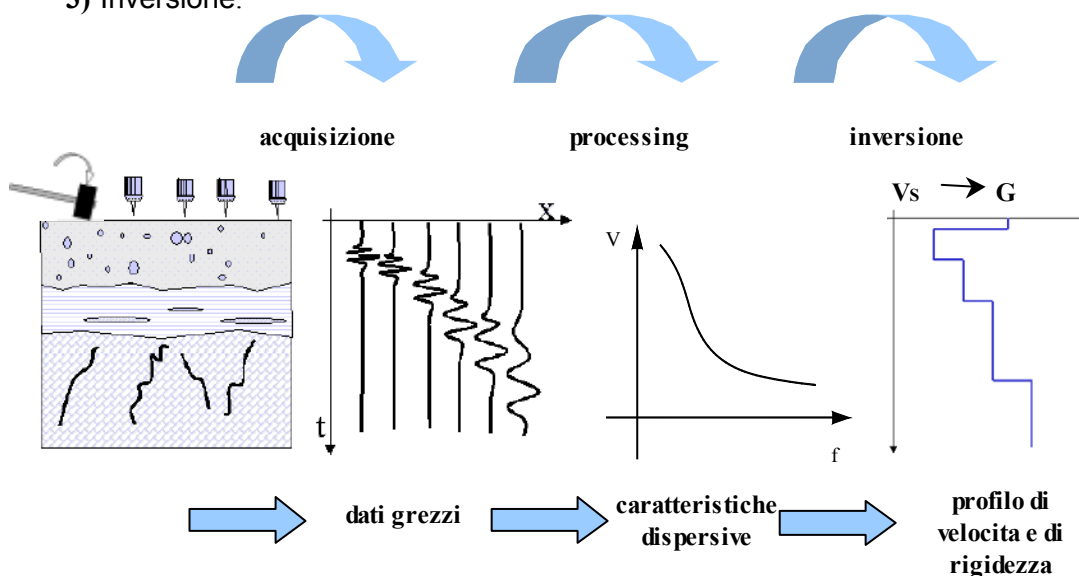
La curva di dispersione gioca un ruolo centrale nell'utilizzo delle onde di Rayleigh ai fini della caratterizzazione dei terreni; infatti, è funzione delle caratteristiche di rigidità del mezzo e, posto di riuscire a misurarla sperimentalmente, può essere utilizzata (come si vedrà più avanti) per un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

### 3.1.2 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 2-3 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.

### 3.1.3 Elaborazione dati e stima della curva di dispersione

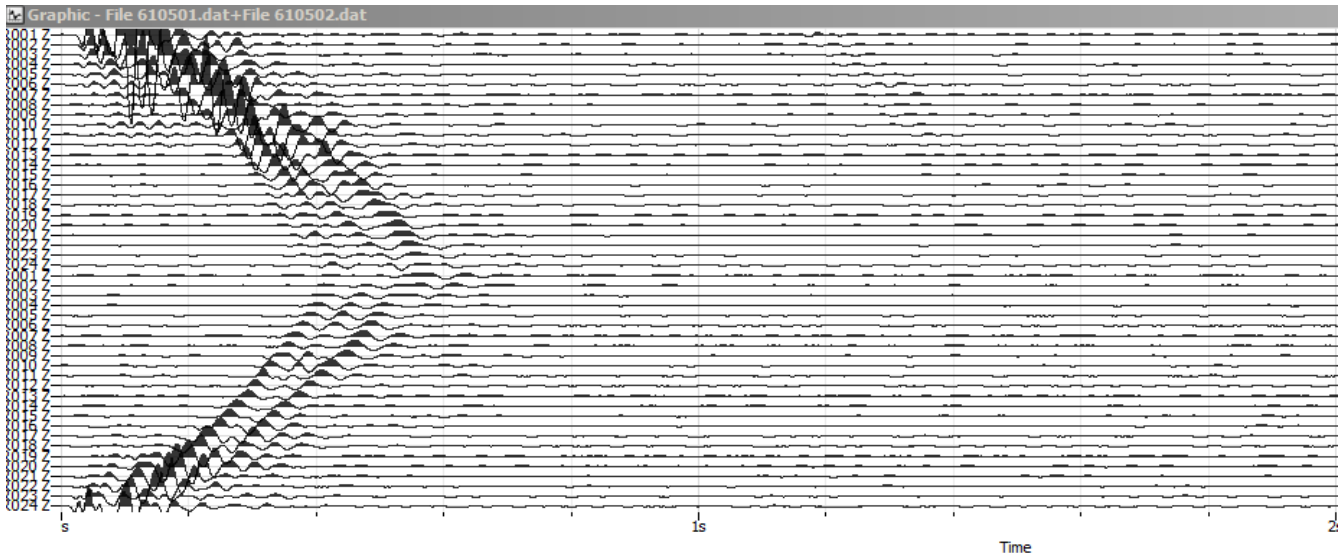
La fase di processing è quella che segue l'acquisizione dei dati grezzi e permette di stimare, a partire dai sismogrammi acquisiti, le caratteristiche dispersive del sito, ovvero la velocità di fase delle onde di Rayleigh in funzione della frequenza del segnale sismico (curva di dispersione sperimentale).

Il software utilizzato per l'elaborazione dei dati è stato **GEOPSY "GEOPhysical Signal database for noise arraY processing" (ISTerre Grenoble, France)<sup>TM</sup>**.

I dati vengono trasformati in dominio  $f_k$  (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 steep del processing dei dati acquisiti lungo i vari stendimenti; qui di seguito viene riportato inizialmente esempio di registrazione dagli estremi dello stendimento nella stringa in alto sono presenti i nomi dei due sismogrammi registrati (in questo caso 610501 e 610502. Lo spettro  $f_k$  e la curva di dispersione.

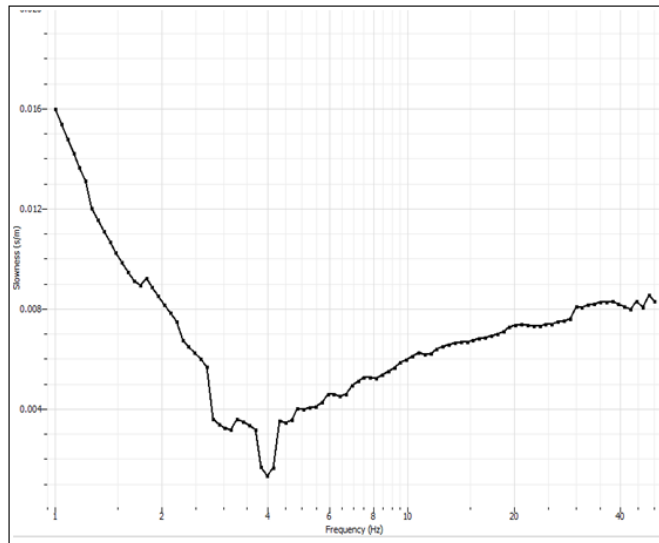
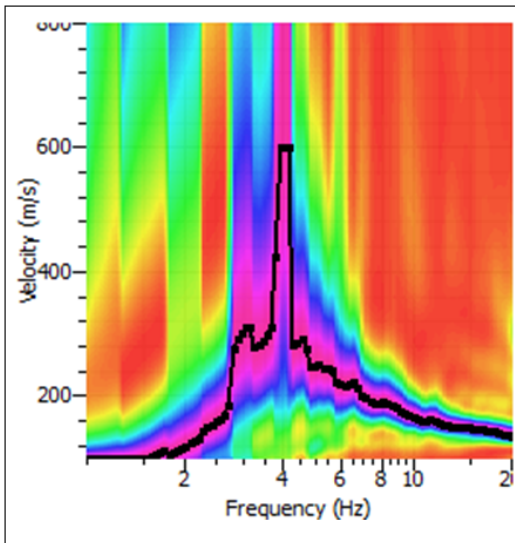




Qui di seguito per lo stessa registrazione è riportato il dettaglio dello spettro FK e la curva di dispersione

SPETTRO F-K

CURVA DI DISPERSIONE

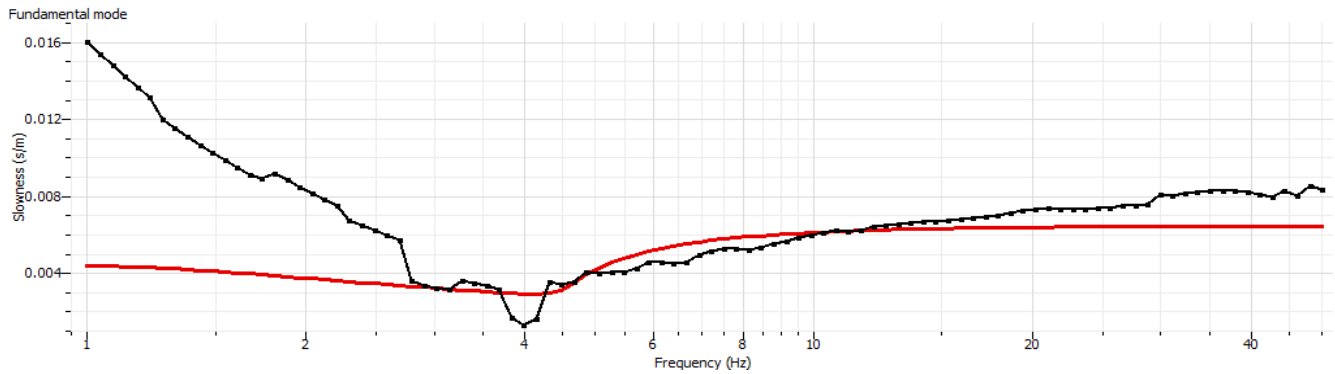


Un confronto tra varie curve di dispersione può denotare differenze tra le stesse che possono essere imputate a varie cause quali eventuali variazioni di quota dei geofoni o, in secondo luogo, a variazioni laterali, lungo lo stendimento, delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

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 fk 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.

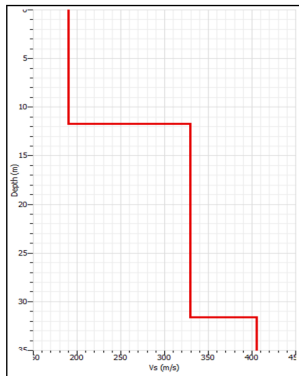
Dall'analisi della curva di dispersione ottenuta, si può poi risalire alla determinazione delle caratteristiche dei terreni investigati. Mediante l'interpolazione di un certo numero di curve che si avvicinano sempre più a quella ottenuta. Nel grafico sottostante è visibile solo la curva che si avvicina nel modo migliore a quella calcolata nel grafico FK.



Analogamente è possibile ottenere anche la curva di migliore convergenza dei singoli modelli della prova HVSR (illustrata nel capitolo successivo)

Il software calcola poi il miglior modello di velocità delle onde di taglio nella zona indagata vincolando ogni singolo modello alle due curve descritte precedentemente.

PROFILO VELOCITA' ONDE DI TAGLIO



CALCOLO VS30

SPESSORE	PROFONDITA'	Vs	SPESSORE/Vs
11.78	0	190	0.062
18.22	11.78	330	0.055212121
	30	405	
	30		
			0.117212121

**Vs<sub>30</sub> = 256**

Seismic classification of soils  
(R. D.M. 14/01/2008) **C**

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 (effettivamente una curva per l'indagine MASW e una curva per l'indagine HVSR) ricavata in sito, un modello stratigrafico finale.

A fianco del modello è riportato anche il calcolo dei valori di  $V_{s_{eq}}$  con la classificazione sismica del suolo secondo le normative vigenti

## 4 INDAGINI DI SISMICA PASSIVA

### 4.1 Metodologia HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)

#### 4.1.1 Generalità

La metodologia, chiamata anche tecnica di Nakamura (1989), è stata introdotta da Nogoshi e Igarashi (1971) sulla base degli studi di Kanai e Tanaka (1961).

Questa tecnica si basa essenzialmente sul rapporto spettrale H/V di rumore ambientale (seismic noise) e permette di valutare gli effetti locali di sito.

La tecnica proposta da Nakamura assume che i microtremori (il cosiddetto rumore di fondo registrabile in qualunque momento posizionando un sensore sismico sul terreno) consistano principalmente di un tipo di onde superficiali, le onde di Rayleigh, che si propagano in un singolo strato sovrapposto su semispazio e che la presenza di questo strato sia la causa dell'amplificazione al sito.

Per l'applicazione e l'interpretazione di questa tecnica è fondamentale una buona conoscenza dell'ingegneria sismologica combinata con un background di informazioni relative alle caratteristiche geologiche, geofisiche e geotecniche del sito.

Questa tecnica presenta il vantaggio di poter essere adoperata pressoché ovunque, purché siano garantite l'assenza di forti vibrazioni indotte da attività umane nelle vicinanze del punto di misura.

Il metodo è generalmente applicato per studi di microzonazione e per valutare la risposta sismica locale.

Questa tecnologia è stata oggetto del progetto di ricerca SESAME (**S**ite **E**ffect **S** assessment using **A**mbient **E**xcitations) ed a questo si rimanda per le linee guida della tecnica H/V spectral ratio (<http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/index.htm>).

La sismica passiva a stazione singola fornisce informazioni sui terreni di indagine relativamente alle frequenze naturali e di risonanza.

#### 4.1.2 Basi teoriche

Le basi teoriche dell'HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) in un sistema stratificato in cui i parametri variano solo con la profondità (1-D) è abbastanza semplice.

Si consideri un sistema in cui gli strati 1 e 2 si distinguono per le diverse densità ( $\rho_1$  e  $\rho_2$ ) e le diverse velocità delle onde sismiche ( $V_1$  e  $V_2$ ).

Un'onda che viaggia nel mezzo 1 viene parzialmente riflessa dall'orizzonte che separa i due strati, e questa una volta riflessa interferisce con quelle incidenti, sommandosi e raggiungendo le ampiezze massime (condizione di risonanza) quando la lunghezza dell'onda incidente ( $\lambda$ ) è 4 volte (o suoi multipli dispari) lo spessore  $h$  del primo strato.

In altre parole la frequenza fondamentale di risonanza ( $f_r$ ) dello strato 1 relativa alle onde P è pari a:

$$f_r = V_{p1}/(4h)$$

mentre quella relativa alle onde S è:

$$f_r = V_{s1}/(4h)$$

Teoricamente questo effetto è sommabile cosicché la curva HVSR mostra come massimi relativi le frequenze di risonanza dei vari strati.

Questo, insieme ad una stima della velocità, è in grado di fornire previsioni sullo spessore  $h$  degli strati.

Questa informazione è per lo più contenuta nella componente verticale del moto, ma la prassi di usare il rapporto degli spettri orizzontali e quello verticale, piuttosto che il solo spettro verticale, deriva dal fatto che il rapporto fornisce un'importante normalizzazione del segnale per a) il contenuto in frequenza, b) la risposta strumentale e c) l'ampiezza del segnale quando le registrazioni vengono effettuate in momenti con rumore di fondo più o meno alto.

La normalizzazione, che rende più semplice l'interpretazione del segnale, è alla base della popolarità del metodo.

Si rileva inoltre come i microtremori siano solo in parte costituiti da onde di volume, P o S, e in misura molto maggiore da onde superficiali, in particolare da onde di Rayleigh (Lachet e Bard, 1994).

Tuttavia ci si può ricondurre a risonanza delle onde di volume poiché le onde di superficie sono prodotte da interferenza costruttiva di queste ultime e poiché la velocità dell'onda di Rayleigh è molto prossima a quella delle onde S.

L'applicabilità pratica della semplice formula sopra riportata relativa alle onde S è stata già dimostrata in molti studi sia nell'ambito della prospezione geofisica sia nell'ambito ingegneristico.

Poiché la situazione illustrata è tipica delle coltri sedimentarie sovrastanti basamenti rocciosi, il metodo HVSR è parso immediatamente applicabile alla determinazione dello spessore delle coltri sedimentarie (lbs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

#### 4.1.3 Attrezzature e modalità esecutive

La misura prevede la registrazione, senza utilizzo di alcun strumento di energizzazione del terreno, del microtremore sismico ambientale nel dominio del tempo, sulle tre componenti dello spazio attraverso il posizionamento di adeguati strumenti sismometrici costituiti da sensori tridimensionali.

Per queste misure è sconsigliato l'impiego di accelerometri, non sufficientemente sensibili a frequenze inferiori a 1 Hz, né di accelerometri sismologici.

Essendo la stabilità una caratteristica fondamentale non sono impiegabili sismometri broadband con periodo naturale > 20 sec. in quanto richiedono lunghi tempi di stabilizzazione, come non sono raccomandabili sensori con frequenza naturale inferiore alla più bassa frequenza di interesse.

Indicativamente, la frequenza di sito è funzione diretta della vicinanza del bedrock dalla superficie topografica e della rigidità dei materiali.

Per l'installazione lo strumento di misura dovrà essere orientato secondo le direzioni geografiche (E e W) e dovrà essere dotato di bolla sferica per il posizionamento mentre l'accoppiamento con la superficie dovrà essere diretto o assicurato con piedini o puntazze in terreni morbidi.

Bisognerà altresì fare attenzione alla presenza di radici, sottoservizi, vicinanza edifici, vento ecc., in quanto creano disturbo nel segnale H/V inducendo una forte perturbazione a bassa frequenza.

Per uno studio di risposta di sito è consigliabile effettuare almeno tre misure per punto, possibilmente in tempi diversi durante la giornata, da cui derivare il valore di frequenza di risonanza.

La strumentazione di acquisizione presenta le seguenti specifiche:

1. trasduttori tricomponenti (N-S, E-W, verticale) a bassa frequenza (< 1-2 Hz);
2. amplificatori;
3. digitalizzatore;
4. frequenza di campionamento: > 50 Hz;
5. convertitore A/D (analogico digitale) a 24 bit;
6. durata registrazione: >10 minuti;
7. collegamento al tempo GPS per la referenziazione temporale.

#### 4.1.4 Elaborazione dati

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software (**Geopsy**) in grado di consentire la determinazione delle frequenze di risonanza del sottosuolo mediante la tecnica dei rapporti spettrali secondo le linee guida del progetto europeo SESAME (Site EffectS assessment using Ambient Excitations, 2005).

Il processing dei dati verte sul rapporto spettrale tra il segnale del sensore verticale e quelli orizzontali operando su finestre di selezione del segnale che dovranno essere non meno di 10 per un segnale complessivo utile non inferiore a 200-400 secondi.

I principali passi del processing sono i seguenti:

1. FFT (incluso il tapering);
2. operatore di smoothing (Konno & Ohmachi);
3. merging dei componenti orizzontali;
4. H/V Spectral Ratio per ogni finestra utilizzata (>10);
5. media degli spettri H/V;
6. valutazione della deviazione standard.

Le risultanze dell'elaborazione sono presentate mediante graficazione dei rapporti spettrali H/V delle varie componenti indicando il massimo del rapporto HVSR nel valore di  $f_0$  – Frequenza/e di risonanza e la sua deviazione standard.

Il certificato finale della prova presenta:

(<http://www.geo.uib.no/seismo/REPORTS/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.doc>):

1. i criteri di attendibilità della misura;
2. i criteri di validità del picco di  $f_0$ ;
3. i valori di soglia delle condizioni di stabilità;
4. l'analisi dei criteri in particolare con verifica rispetto alla frequenza del sensore ed alla presenza di rumore di origine industriale;
5. l'interpretazione di  $f_0$  e dello spettro H/V nei termini di caratteristiche del sito.

Per gli scopi e finalità dell'indagine le misure HVSR offrono la possibilità di determinare la valutazione dell'omogeneità del sito rispetto alle frequenze di risonanza e spessori della coltre di copertura.

#### Frequenze

Per quanto riguarda la mappatura delle frequenze principali di risonanza, tale elaborazione permette di valutare il grado di omogeneità sulla risposta di sito relativamente alle frequenze dei materiali.

L'analisi di queste permette di definire il campo delle frequenze significative di risonanza da utilizzare direttamente nella progettazione degli edifici.

#### Spessori<sup>1</sup>

L'assunzione di base è che, per un modello di sottosuolo monodimensionale (stratificazione piana e parallela) costituito da sedimenti soffici sovrastanti il substrato, la frequenza di risonanza  $f_r$  dovuta alla propagazione di onde S incidenti perpendicolarmente la base del substrato è data dalla relazione:

$$f_r = \frac{V_s}{4Z}$$

dove Z è lo spessore dello strato di sedimenti e  $V_s$  dipende dalla velocità delle onde di taglio al suo interno.

<sup>1</sup> Ibs-von Seht M. and Wohlenberg J. (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bull. Seism. Soc. Am., 89 (1): 250-259.

Nakamura Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR Railway Tech. Res. Inst., 30: 25-33.

In base a tale relazione, quindi, a partire da valori misurati di  $f_r$  e  $V_s$  ricavati è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di  $V_s$  come profilo sismico fino al bedrock geofisico, allora si può far riferimento alla relazione di Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999).

Poiché l'andamento del log in  $V_s$  in terreni sedimentari è principalmente regolato dall'incremento del modulo di rigidità al crescere della pressione di confinamento e quindi della profondità, a partire dai valori di  $V_s$  per la porzione più superficiale del terreno, è possibile estrapolare l'andamento delle  $V_s$  a profondità più elevate tramite l'impiego di relazioni empiriche.

A questo scopo, Ibs-von Seht e Wohlenberg (1999) suggeriscono la seguente funzione:

$$V_s = V_0 (1 + Z)^a$$

dove  $V_0$  è la velocità al tetto dello strato ed  $a$  un fattore che dipende dalle caratteristiche del sedimento (granulometria, coesione ecc.).

Questa relazione, combinata con la precedente, consente infatti la stima dello spessore della coltre di sedimenti soffici:

$$Z = \left[ \frac{V_0(1-a)}{4f_r} + 1 \right]^{1/(1-a)} - 1$$

Nei casi più complessi è possibile invertire le curve HVSR creando una serie di modelli teorici da confrontare con quello sperimentale fino a considerare ottimale il modello teorico più prossimo alle curve sperimentali.

Per l'inversione delle curve si può far riferimento alle procedure descritte in Arai e Tokimatsu (2004)<sup>2</sup> usando il modo fondamentale delle onde di Rayleigh e Love.

Per ogni prova Masw è stata realizzata n° 1 misure di noise ambientale con tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) su stazione singola allo scopo di valutare la frequenza di sito.

Su ogni prova è possibile notare se mostrano una attendibilità<sup>3</sup> della misura della frequenza di risonanza (i primi tre check dei certificati sono validi) ed anche se i criteri di chiarezza per picco HVSR non sempre sono ben definiti; questo ad indicare che l'inversione della misura del rumore sismico porta ad un sistema geofisico multistrato e non ad una sola interfaccia come confermato dalle prove dirette in sito ((Criteri Sesame).

I grafici relativi alle singole stazioni di misura sono riportati al termine della relazione.

<sup>2</sup> Arai H. e Tokimatsu, 2004. S-Wave Velocità Profilino by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. Bull. Seismol. Soc. Am., 94, p. 53-63

<sup>3</sup> Per l'attendibilità si fa riferimento alle specifiche SESAME (2005)



## 5 PROSPEZIONE SISMICA IN FORO CON TECNICA DOWN-HOLE

### 5.1. Modalità operative

La tecnica down-hole prevede la misura dei tempi di propagazione delle onde di compressione (P) e di taglio (S) tra il punto di energizzazione in superficie (shot) ed il punto di ricezione mobile in profondità entro il foro di sondaggio.

#### 5.1.1. Sorgente di energia

Per effettuare tali operazioni è necessario utilizzare una sorgente di energia a polarizzazione verticale ed orizzontale: con la prima si generano onde di compressione P mentre con la seconda onde di taglio polarizzate Sh.

Nel caso in esame si è scelta una sorgente di energia che potesse garantire una buona risposta sismica in alta frequenza oltre a caratteristiche dinamiche ripetitive similari; il generatore usato e denominato "Hammer Blow" è rappresentato da un maglio di 8 Kg usato da un operatore; lasciato cadere con forza da circa 2 m su una piastra di acciaio per la generazione delle onde di compressione (P) ed orizzontalmente, colpendo un supporto solidale, per attrito radente al terreno, (trave in legno con sopra un autocarro) per quelle di taglio (S).



**Figura 1 Immagine degli apparati di energizzazione**

### 5.1.2. Apparato di ricezione

L'apparato di ricezione è costituito da due sonde disposte ad metro l'una dall'altra e sono entrambe provviste di un apposito meccanismo di ancoraggio alle pareti del foro durante la registrazione dell'impulso e di disancoraggio per essere mobilizzato lungo la verticale del sondaggio stesso. (vedasi foto figura 4, di una singola sonda).

Entrambe le sonde (sonda 3D) sono formate da un gruppo sensori composto da tre geofoni da 14 Hz smorzati del 70%, dei quali uno con l'asse funzionale verticale (V) e due orizzontali (H1 H2) fra loro ortogonali.

Oltre alla sonda calata entro il foro si utilizza in superficie un interruttore piezoelettrico applicato all'apparato energizzatore, il quale costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione ed alcuni geofoni di riferimento (tre nel nostro caso) posizionati nelle vicinanze della bocca del foro che rimangono fissi per tutte le misure effettuate nel sondaggio e che costituiscono il dispositivo di controllo del trigger affinché tutti gli impulsi sismici possano essere corretti con uno shift del tempo nella fase di preprocessing nel caso in cui si opti per una elaborazione di tipo progressivo tomografico.



Figura 2 - Sonda 3D

### 5.1.3. Operazioni di campagna

Dopo aver eseguito il collegamento al sismografo del cavo elettrico per i 6 canali delle due sonde 3D, dell'interruttore piezoelettrico solidale all'apparato di energizzazione e dei tre geofoni di riferimento si è effettuato il posizionamento della doppia sonda 3D a fondo foro e si sono realizzati alcuni shot di prova allo scopo di tarare i parametri di acquisizione dello strumento di registrazione dati.

Effettuata la taratura della strumentazione si è proceduto alla prospezione down-hole a partire da fondo foro.

Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in foro sono stati acquisiti utilizzando l'apparecchiatura EG&G Geometrics Geode con un passo di campionamento di 0.02 millisecc, tramite la quale, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono trasferiti e registrati su P.C.

Sui sismogrammi le tracce sono distinte secondo lo schema sottostante:

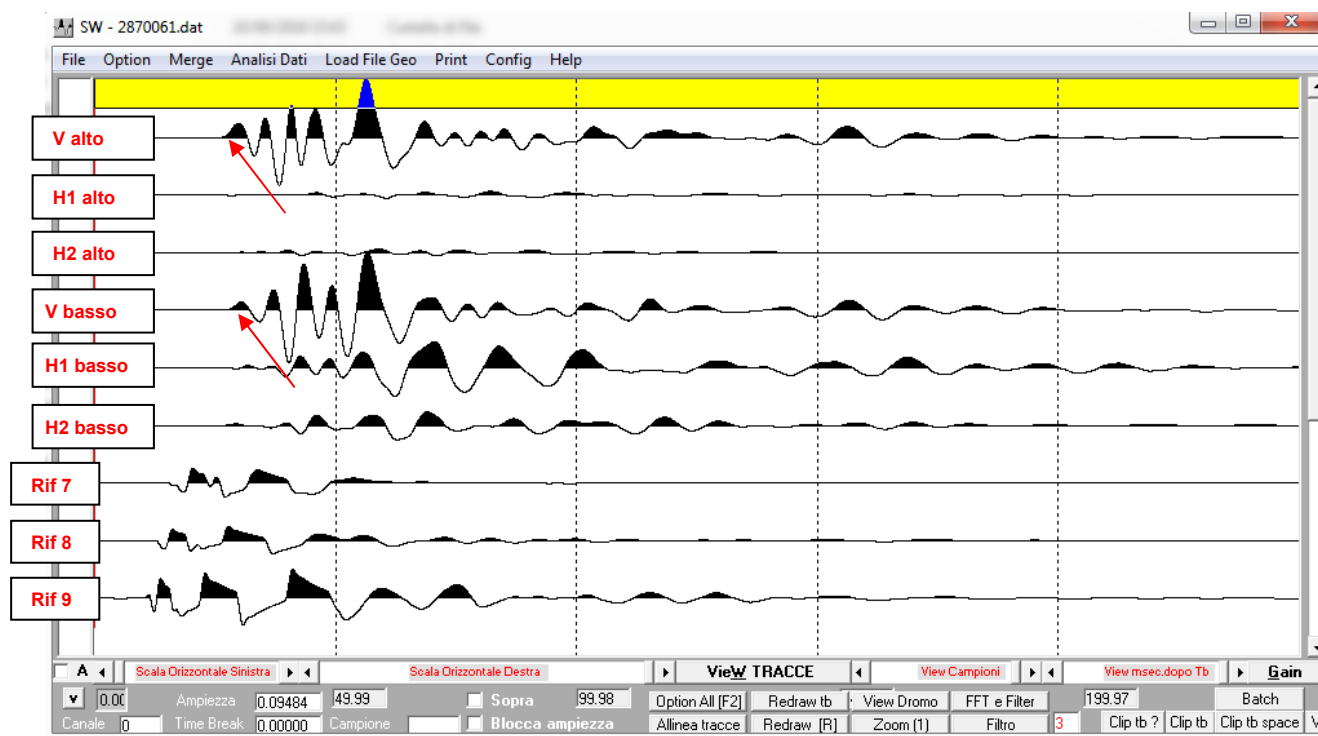
canale 1-segnale del geofono verticale	(V)
canale 2-segnale del geofono orizzontale	(H1)
canale 3-segnale del geofono orizzontale	(H2)
canale 4-segnale del geofono verticale	(V)
canale 5-segnale del geofono orizzontale	(H1)
canale 6-segnale del geofono orizzontale	(H2)
canale 7-segnale del geofono di riferimento posizionato sul punto di battuta	(Rif 1)
canale 8-segnale del geofono di riferimento posizionato a 1 metro dal punto di battuta	(Rif 2)
canale 9-segnale del geofono di riferimento posizionato in prossimità della bocca pozzo	(Rif 3)

un  
in  
di  
e



La fase di taratura della strumentazione consiste nella seguente procedura; si posiziona la doppia sonda 3D (differenziale) a fondo foro e viene dato un impulso per le onde di compressione (direzione alto-basso).

Un esempio di record è la registrazione riportata nell'immagine seguente: con la freccia rossa si indica il tempo di arrivo delle onde di compressione:

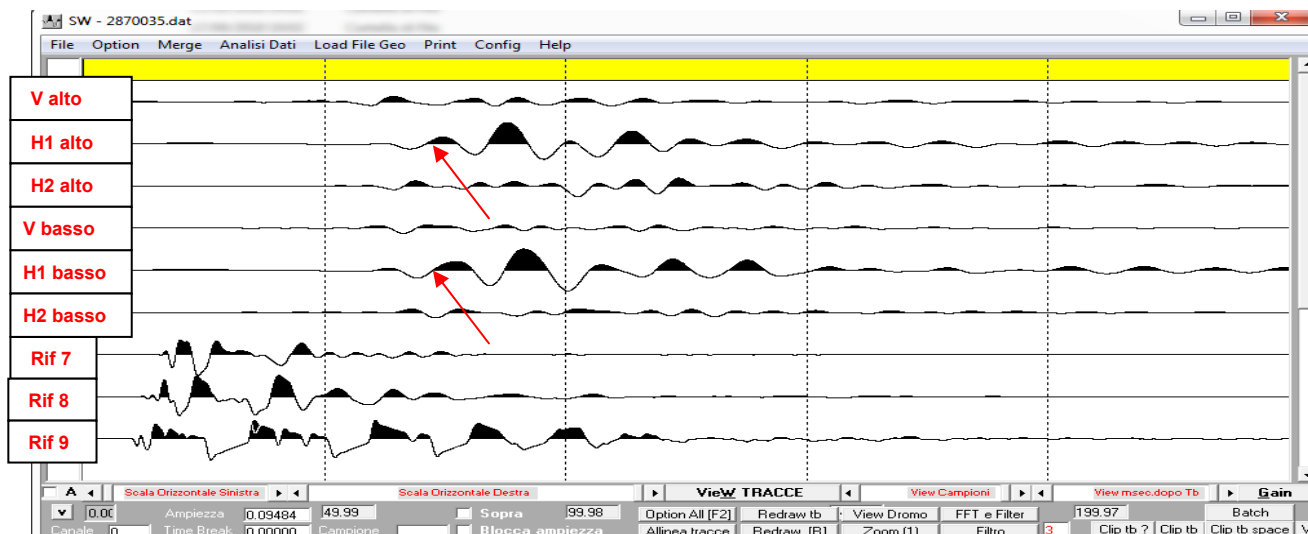


**Figura 3 - Esempio record Down Hole eseguito con sonda differenziale**

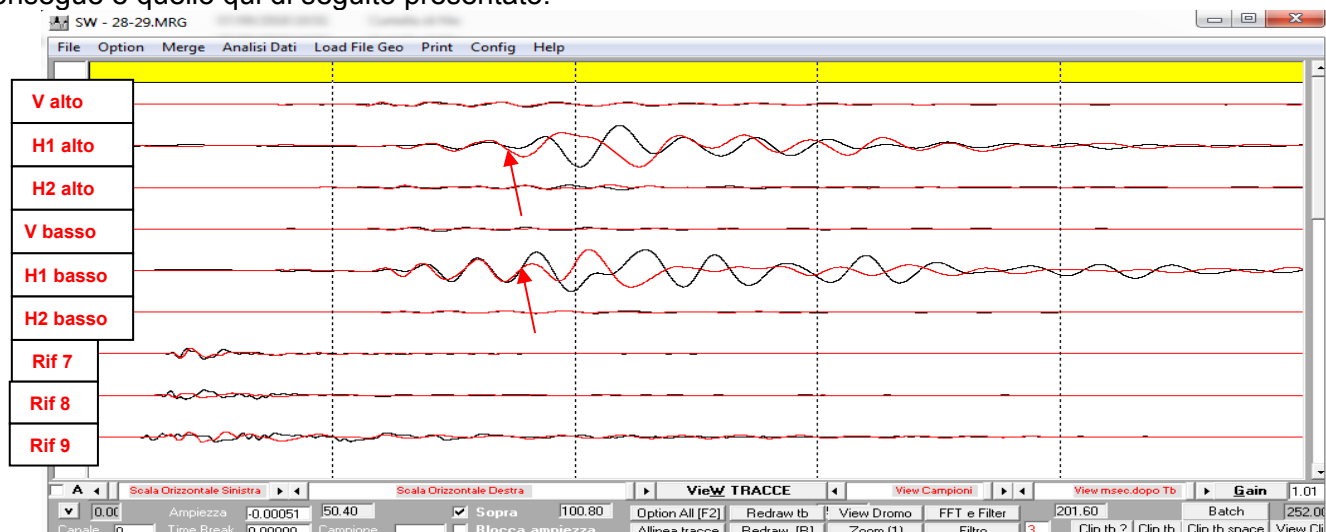
In tale registrazione risultano perfettamente definite le tracce della sonda differenziale nei canali V alto e V basso e i canali di riferimento Rif 7, Rif 8 e Rif 9 che sono realmente le tracce che risultano necessarie all'elaborazione per questo tipo di impulso.

Al fine della determinazione del tempo di arrivo dell'onda di taglio alle varie profondità si è provveduto alla registrazione di un impulso polarizzato sul piano orizzontale con la sonda posizionata a fondo foro, la registrazione relativa a tale impulso è riportata qui di seguito.

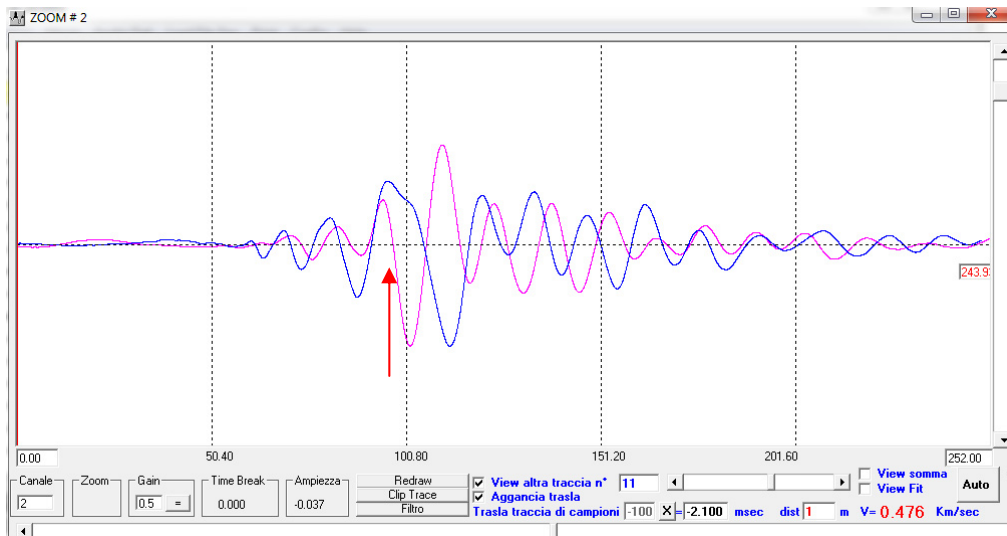
In tale registrazione risultano perfettamente definite le tracce H1 alto e H2 basso che sono i due geofoni orizzontali omologhi (stessa polarità e direzione) ma distanti un metro uno dall'altro e i geofoni di riferimento Rif 7, Rif 8 e Rif 9 in superficie. Per avere la certezza del tempo di arrivo dell'onda di taglio si è provveduto ad una energizzazione polarizzata sul piano orizzontale creando uno shot a polarità invertita.



Il sismogramma cumulato dei due record (in rosso ed in nero) a polarizzazione invertita che ne consegue è quello qui di seguito presentato.



In questo sismogramma risulta evidente che la traccia H1 rossa è invertita di fase rispetto a quella H1 blu come si rileva anche dal diagramma a farfalla di seguito dove le due tracce vengono visualizzate sovrapposte. E' presente un minimo shift in quanto su queste tracce originali non è stata ancora effettuata la correzione del trigger.

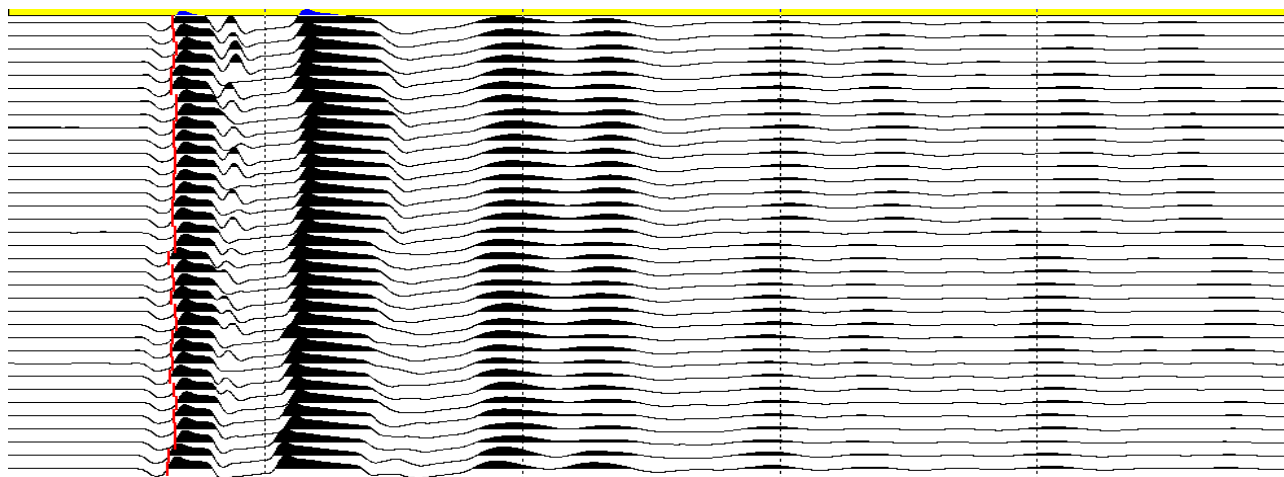


**Figura 4 - diagramma a farfalla per valutare l'inversione di polarità delle onde di taglio**

Verificata la validità dei segnali, procedura ripetuta a varie ordinate sul foro, si inizia la prospezione da fondo foro fino alla superficie topografica realizzando tre energizzazioni: una per le onde di compressione e due a polarizza invertita per le onde di taglio, per ogni step di misura metrica.

Al fine della fase di acquisizione vengono tutti i sismogrammi relativi ad ogni singolo canale (con il metodo progressivo) e procedere alle analisi primarie di correzione del trigger utilizzando i gather dei vari geofoni di riferimento posizionati in superficie.

Di seguito viene riportata l'immagine relativa al canale di riferimento Rif 5 ovvero quello relativo al geofono di riferimento posizionato ad un metro dallo shot.



**Figura 5 - Gather del canale di riferimento n° 5**

Bisogna notare che gli arrivi a questo canale fisso sul terreno (segnati in rosso) devono essere simili per tutte le energizzazioni.

Piccole differenze di tempo sono da imputare a differenze di partenza (trigger) del segnale per cui si deve poi procedere alle necessarie correzioni.

Analoga procedura si attua per le correzioni del tempo "0" relativo alle onde di taglio.

Applicate le correzioni di tempo "0" al sismogramma relativo a tutte le energizzazioni effettuate sul canale 1 V (relativo al geofono verticale) e si ottiene il sismogramma che viene utilizzato per effettuare le letture del primo arrivo.

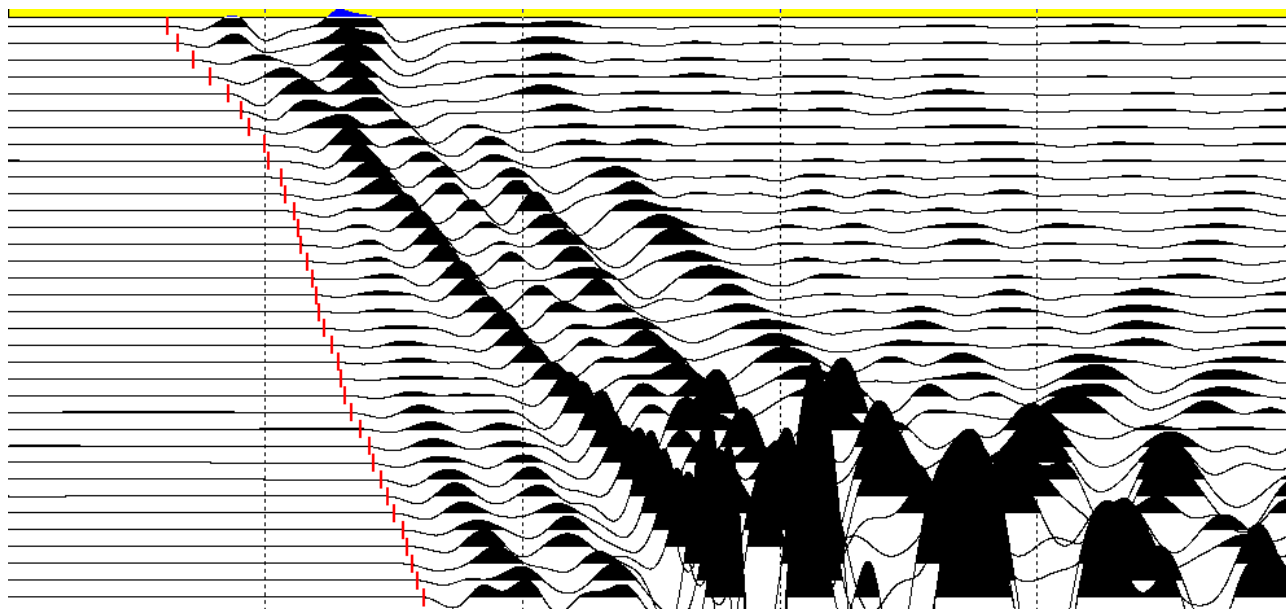


Figura 6 - Gather delle onde di compressione - canale 1 (V1)

Stessa procedura si applica al sismogramma relativo al canale H1 e H2 e su tali sismogrammi si realizzano le letture dei primi arrivi, l'immagine seguente fa riferimento al canale H1.

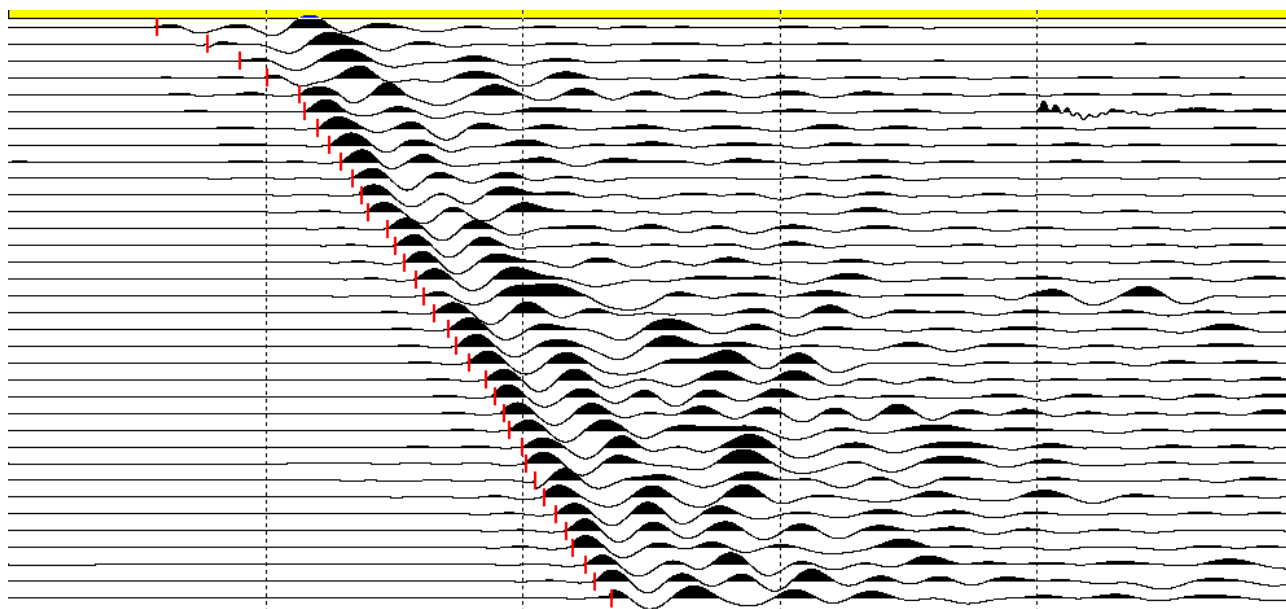


Figura 7 - Gather delle onde di taglio - canale 2 (H1)

## 5.2. Elaborazione dati

Il procedimento elaborativo dei dati down hole si è realizzato secondo due modalità:

1. progressiva tomografica;
2. differenziale.

### Elaborazione Progressiva tomografica

Questo consiste nell'interpretazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione P e di taglio S. Per l'analisi di questi dati vengono utilizzati programmi di utilità originali della Progeo.

Il procedimento di calcolo si sviluppa secondo i seguenti ulteriori step.

a) Definizione della geometria della ricerca

- coordinate del sensore in pozzo (2D o 3D),
- posizionamento punto di shot.

b) Input tempi di arrivo onde P e onde S

Realizzazione dei file dei dati relativi ai tempi di arrivo delle onde P ed S associate alle coordinate spaziali delle stazioni di misura.

c) Input modello di velocità

In base alle conoscenze stratigrafiche e sismiche vengono definiti degli intervalli a velocità costante lungo l'asse del foro in funzione dei quali viene realizzato il ray tracing (step n).

d) Ray tracing

Vengono create le traiettorie dei raggi sismici in base ai modelli di velocità definiti allo step m).

Per il calcolo si sono utilizzati i seguenti parametri:

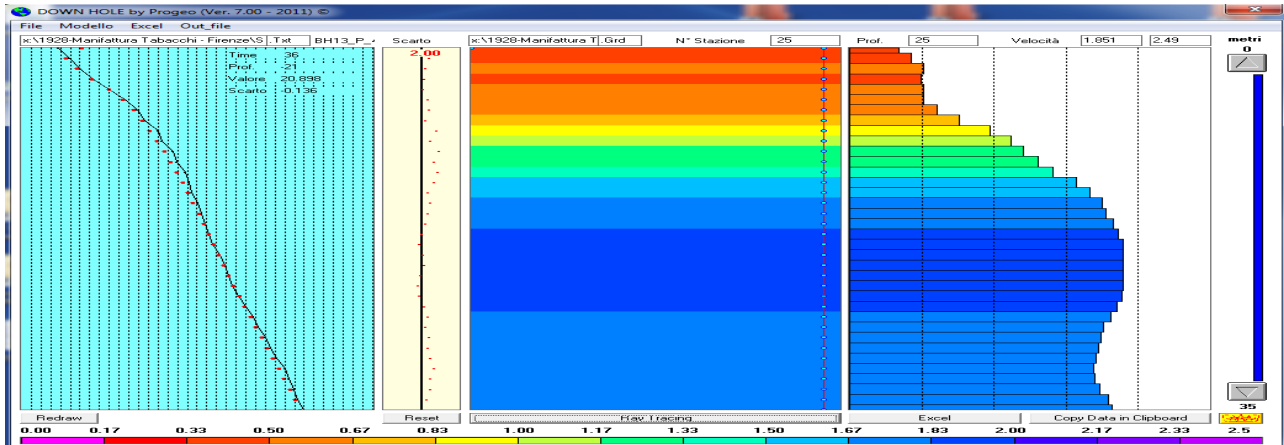
- anisotropia ellittica (massima velocità in senso verticale)
- tolleranza lineare (.05%)
- tolleranza angolare (1")
- numero di iterazioni (500)
- multi pathing (on)
- plane layer (on)

e) Definizione dei parametri di calcolo

Il programma utilizzato necessita, per il calcolo della sezione in profondità lungo la verticale del foro e in funzione dei valori di velocità, dei seguenti parametri di calcolo:

- definizione tipo di griglia (1 cella ogni m)
- tipo di anisotropia del mezzo investigato (verticale)
- numero di iterazioni (500)
- algoritmo di calcolo (S.I.R.T.)

L'algoritmo S.I.R.T. (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) crea un'immagine di velocità apprezzabile, sufficientemente stabile e che converge velocemente verso i valori sperimentali.



**Figura 8 - Immagine di uno step del processing del Down Hole Tomografico**

**f) Analisi delle risultanze**

Queste vengono inizialmente valutate dal punto di vista statistico attraverso gli scarti quadratici e le varianze dei tempi calcolati rispetto a quelli definiti in input. In base a tali valori possono essere modificati i parametri di calcolo per una migliore ottimizzazione. Si passa in seguito all'analisi delle velocità intergeofoniche relative alle onde P ed S dalla quale si ricava un modello di velocità più adeguato (a tale modello si farà riferimento in seguito come velocità intervallari). Il calcolo riprende perciò dallo step c) con l'input del nuovo modello di velocità e si procede fino a quando gli scarti e le varianze divengono minimi.

**g) Predisposizione tabelle e grafici dei dati**

I dati calcolati al punto e) vengono riportati in un foglio elettronico appositamente predisposto allo scopo di calcolare i moduli elastici relativi e graficizzare le risultanze.

**r) Conversione in immagini computerizzate**

La prospezione down hole con elaborazione tomografica si concretizza nella definizione di celle analitiche elementari; per ogni cella il valore della velocità tomografica rappresenta il valore medio risultante dei valori differenziali relativi a tutti i tragitti elementari dei raggi di investigazione che attraversano la cella considerata. La determinazione delle celle elementari che definiscono la rappresentazione tomografica deriva dalle variazioni dei parametri cinematici  $V_p$  e  $V_s$  in funzione del grado di consistenza differenziata del materiale.

## 6. INDICAZIONI GENERALI SULLA ELASTICITÀ DEI MATERIALI

### 6.1. Generalità

L'elasticità di un corpo dipende soprattutto da tre fattori: isotropia, omogeneità e continuità.

Per isotropia si intende uguaglianza delle proprietà vettoriali di un corpo in tutte le direzioni; per omogeneità si intende la distribuzione spaziale uniforme dei vari costituenti del materiale nella sua struttura interna; per continuità si intende l'assenza di interruzioni nei legami che uniscono tra loro i vari costituenti del materiale.

Da ciò si deduce che l'elasticità non può essere che una schematizzazione teorica perché nessun corpo reale può rispondere ai requisiti richiesti di isotropia, omogeneità e continuità.

Nei corpi reali ogni deformazione provoca nell'interno un assestamento strutturale che è irreversibile, per cui non ci può essere un recupero istantaneo e totale della deformazione al cessare della sollecitazione.

Tuttavia questa schematizzazione teorica può avere una sua validità reale se considerata entro certi limiti di intensità e durata dell'applicazione della sollecitazione.

Nel campo delle indagini sismiche con generazione di onde p ed s tutti i materiali rientrano nel campo delle deformazioni elastiche essendo sia l'intensità della forza applicata ed il tempo in cui questa agisce ridotta ad alcuni millisecondi.

Le onde sismiche si propagano nell'interno della terra con velocità, frequenza e ampiezza che dipendono dalle proprietà elastiche delle rocce.

### 6.2. Principi sulla elasticità

Vengono qui di seguito richiamati alcuni principi sulla elasticità per comprendere le relazioni che legano le velocità delle onde sismiche alle caratteristiche elastiche dei materiali.

Si definisce come *sforzo*  $S$  il rapporto tra la forza applicata ad una piccola superficie e l'area di tale superficie.

Se la forza viene applicata normalmente all'area lo sforzo è di *trazione* o di *compressione* se in direzione opposta.

Quando invece la forza è parallela all'area lo sforzo è *tangenziale* o di *taglio*.

Lo sforzo di compressione provoca un accorciamento del corpo, quello di trazione un allungamento e quello di taglio una deformazione angolare.

La *deformazione longitudinale* ( $\epsilon_l$ ) è il rapporto tra l'allungamento (o l'accorciamento) e la lunghezza originale del corpo.

L'angolo di cui ruota il corpo in seguito ad uno sforzo di taglio è la *deformazione tangenziale* ( $\epsilon_\theta$ ).

Per piccole deformazioni, lo sforzo longitudinale è proporzionale alla deformazione  $\epsilon_l$ , e la costante di proporzionalità è il *Modulo di Young* o di *Elasticità normale*.

Lo stesso dicasi per lo sforzo di taglio la cui deformazione tangenziale è proporzionale al *Modulo di Taglio* o di *Rigidità*.

Se lo sforzo viene applicato tridimensionalmente (lungo tutti tre gli assi cartesiani) applicando una pressione idrostatica uniforme si avranno componenti dello sforzo uguali e la deformazione sarà rappresentata da una variazione di volume indicata numericamente dal coefficiente di compressibilità o, inversamente, dal *Modulo di Compressibilità* o *Modulo di Volume*.

Da un punto di vista bidimensionale, uno sforzo di trazione o compressione, causa sia un allungamento o raccorciamento e contemporaneamente una contrazione o dilatazione; la costante che lega tali variazioni è il *coefficiente di Poisson*.



### 6.3. Parametri elastici

Per la caratterizzazione del sito e del terreno in esame, specialmente in termini di deformabilità dei materiali in associazione ai dati geotecnici ricavati dalle prove geomeccaniche, può essere opportuno fornire al Progettista altri parametri (oltre ai singoli valori di velocità sismica) contemporaneamente alla rilevazione delle velocità di propagazione delle onde sismiche ( $V_p$  e  $V_s$ ) nel sottosuolo.

Si tratta dei Moduli elastici dinamici del terreno i quali possono contribuire ad una migliore definizione dei carichi e delle spinte da parte del manufatto sul terreno di fondazione.

Attraverso la determinazione sia delle velocità delle onde di compressione sia delle velocità delle onde di taglio è possibile ricavare vari parametri (per ulteriori dettagli si veda, tra i più recenti, "The rock physics handbook – tools for seismic analysis in porous media" di G. Mavko, T. Mukerji e J. Dvorkin, Cambridge University Press, UK, pp. 1-329, 1998);

- Coefficiente di Poisson ( $\nu$ )
- Peso di volume ( $\gamma_{din}$ )
- Modulo di Elasticità dinamico ( $E_{din}$ )
- Modulo di Taglio dinamico ( $G_{din}$ )
- Modulo di Compressibilità dinamico ( $K_{din}$ )

Le formule utilizzate per il calcolo dei parametri elastici, in funzione di  $V_p$ ,  $V_s$  sono le seguenti:

Coefficiente di Poisson 
$$\nu = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

Peso di volume 
$$\gamma_{din} = 0.51 \cdot V_p^{0.19} \quad (\gamma_{din} \text{ in T/m}^3)$$

Densità geofisica 
$$\delta_{din} = \frac{\gamma}{g} \quad (g = 9.8 - \text{accelerazione di gravità m/sec})$$

Modulo di Elasticità 
$$E_{din} = V_p^2 \cdot \delta_{din} \cdot \frac{(1-\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (E_{din} \text{ in Kg/cm}^2)$$

Modulo di Taglio 
$$G_{din} = \delta_{din} \cdot V_s^2 \quad (G_{din} \text{ in Kg/cm}^2)$$

Modulo di Compressibilità 
$$K_{din} = \frac{E_{din}}{3 \cdot (1-2 \cdot \nu)} \quad (K_{din} \text{ in Kg/cm}^2)$$

Per gli scopi dell'indagine uno dei parametri più significativi per identificare le possibili deformazioni dell'ammasso può essere rappresentato dal Modulo di Taglio dinamico; il *Modulo di Taglio* o di *Rigidità*  $G_{din}$  definisce la *deformazione tangenziale* di un corpo, intesa come l'angolo di cui ruota il corpo stesso in seguito ad uno sforzo di taglio.

Anche il *coefficiente di Poisson* può ben identificare lo stato di consistenza e deformabilità del materiale d'ammasso; tale parametro può presentare un range di variazione compreso tra un massimo di 0.5 ed un minimo di 0.



Le indicazioni seguenti fanno riferimento a valori caratteristici del parametro sempre consci che il sistema geologico non è mai né isotropo né perfettamente elastico oltre ad essere multifase (solido, acqua e gas).

Valori di Poisson di 0.5 sono caratteristici di materiali che si deformano senza cambiamenti di volume (es. acqua), valori leggermente inferiori (0.47 - 0.498) sono tipici di argille o materiali molto saturi; valori inferiori sono indicativi di materiali da poco consolidati a sovraconsolidati; per le rocce si presentano range di variazioni molto ampi collegati in particolare sia al grado di fratturazione sia alla presenza di cavità, stratificazioni e litologie e comunque tra (0.46 e 0.20).

E' importante sottolineare che i moduli dinamici risultano comunque sempre più elevati di quelli statici forniti da prove di carico in situ in quanto gli impulsi sismici sono di breve durata e le sollecitazioni ad essi associate sono relativamente modeste e rientrano nel campo delle deformazioni istantanee.

## 7. PROSPEZIONE ELETTRICA TOMOGRAFICA

La sezione elettrotomografiche è stata realizzata utilizzando una spaziatura tra gli elettrodi variabile da 0.5 m a 0.6 m in modo da ricoprire, con un numero massimo di 96 elettrodi, l'intera lunghezza da investigare.

La profondità investigata risulta direttamente proporzionale alla lunghezza dello stendimento con un rapporto circa pari a 1/5-1/6. La geometria di investigazione in profondità delle sezioni elettriche tomografiche è assimilabile ad un trapezio rovesciato dove la massima profondità sarà nella parte centrale dello stendimento sino alla perdita di informazioni alle due estremità.

Nel caso in esame per uno stendimento di circa 57 metri a 96 elettrodi è stata raggiunta una profondità di indagine massima di circa 10-12 m.

### 7.1. Generalità

Il metodo geoelettrico si basa sulla misura tra due elettrodi (detti convenzionalmente MN) della differenza di potenziale  $\Delta V$  connessa alla distribuzione nel sottosuolo di una corrente elettrica  $I$  immessa in una diversa coppia di elettrodi, detti AB. Si dimostra che si ottiene un valore di resistività apparente:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I}$$

che è funzione, oltre che della posizione reciproca dei 4 elettrodi anzidetti (dipendenza contenuta nel parametro  $K$ , detto fattore geometrico), della distribuzione della resistività elettrica delle rocce nel sottosuolo interessato dalla propagazione della corrente  $I$ .

I dati così acquisiti devono essere "interpretati" per ottenere, dall'insieme dei valori di  $\rho_a$  (resistività apparente), un modello dell'effettiva distribuzione delle resistività elettriche reali nel sottosuolo indagato.

Da questa distribuzione, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, il modello geofisico viene trasformato in modello geolitologico.

La tomografia di resistività elettrica di superficie ha come obiettivo la costruzione di un modello elettrico bidimensionale o tridimensionale del sottosuolo effettuando delle misure di potenziale elettrico in seguito all'immissione di corrente elettrica nel sottosuolo.

Il principio fisico su cui si basano le misure di resistività elettrica è la legge di Ohm, che governa il flusso di corrente in un mezzo:

$$J = \sigma E$$

dove  $\sigma$  è la conducibilità elettrica [Siemens/m] del mezzo,  $E$  è l'intensità del campo elettrico applicato (V/m),  $J$  è la densità di corrente (A/m<sup>2</sup>).

Nelle indagini geoelettriche si è soliti esprimere anziché la conducibilità, la resistività  $\rho = 1/\sigma$  [ $\Omega\text{m}$ ]. Nella pratica ciò che viene misurato è la differenza di potenziale tra due punti della superficie (schema sottostante, figura 6).

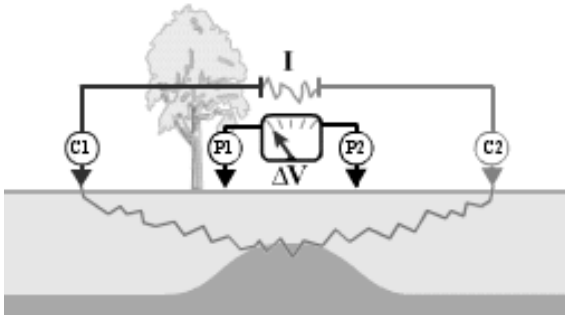


Figura 9 - Schema di base usato per le indagini elettriche: gli elettrodi C1 e C2 sono le sorgenti di corrente elettrica mentre P1 e P2 sono gli elettrodi di misura del potenziale

Nel caso di un semispazio omogeneo la differenza di potenziale misurata agli elettrodi P1 e P2 è pari a:

$$\Delta\Phi = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)$$

Le misure di campo sono condotte su mezzi non ideali e quindi eterogenei, la resistività inoltre varia in uno spazio tridimensionale per cui dalla corrente I e dalla differenza di potenziale si calcola un valore di resistività apparente:

$$\rho_a = k \frac{\Delta\Phi}{I}$$

dove:

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} + \frac{1}{r_{C2P2}} \right)}$$

è un fattore geometrico che dipende dalla configurazione degli elettrodi.

Gli strumenti di misura, i georesistivimetri, rilevano un valore di resistenza ( $R = \Delta\Phi/I$ ), per cui la resistività apparente si calcola come:

$$\rho_a = kR$$

Tale resistività è un valore appunto "apparente" che corrisponde cioè alla resistività che un semispazio omogeneo fornirebbe nella stessa configurazione elettrodica.

L'esecuzione di misure di resistività ottenute traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività.

Se invece si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine e si ottengono informazioni maggiori sulle variazioni verticali.

La strumentazione tipica delle tecniche di tomografia elettrica permette di effettuare le due operazioni in modo automatico, e di associare ad ogni linea di misura, una distribuzione bidimensionale di resistività apparente, detta pseudosezione.

Per effettuare le misure ERT si utilizzano un certo numero di elettrodi (48-96 nelle configurazioni più recenti) disposti lungo un profilo, con passo dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste.

Questi sono collegati con un cavo multipolare al georesistivimetro, che consiste in un'unità switching che può essere esterna o interna, comandata da un microprocessore.

Tale unità ha la funzione di selezionare, per ogni lettura, gli elettrodi attivi (di corrente e di tensione).

La sequenza delle misure, così come il tipo di array, l'intensità di corrente e la durata delle acquisizioni, sono parametri di input usualmente impostati dall'utente.

Il formato di uscita della strumentazione normalmente permette di ottenere per ogni misura, la corrente immessa, la differenza di potenziale, la configurazione elettrodica, la resistività apparente ed una stima statistica sulla qualità delle misure.

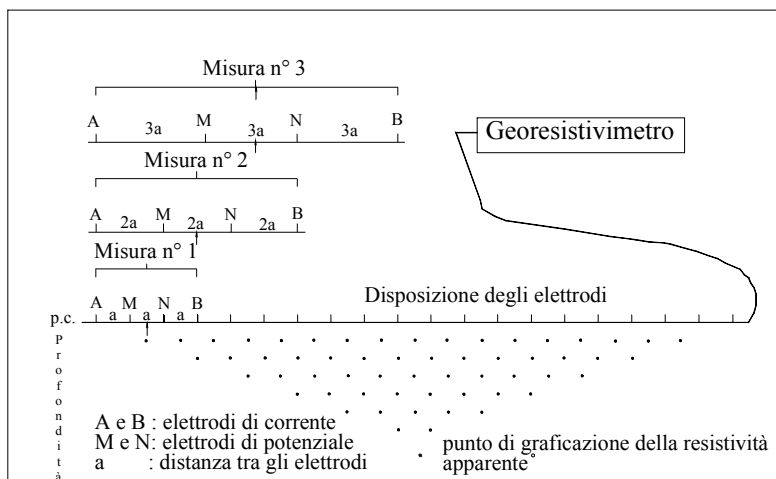


Figura 10 - Sistema di acquisizione dei dati utilizzando il dispositivo di WENNER

La metodologia di misura multielettrodo (messa a punto da Barker, 1981) permette di disporre sul terreno non 4 elettrodi per volta ma un numero superiore, generalmente disposti lungo un profilo, con passo dipendente dalla risoluzione e dalla profondità d'indagine richieste.

Agli elettrodi viene alternativamente inviata la corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza preprogrammata ed automatica.

Si ottiene così una pseudosezione di resistività apparente che, con un algoritmo di inversione, viene convertita in resistività reale.

La distribuzione della resistività reale sulla sezione interpretativa copre solo una parte della sezione (di forma trapezoidale o triangolare, a seconda che si usi il dispositivo di acquisizione di Wenner o dipolo-dipolo), mentre le estremità della sezione (non essendo coperte dai percorsi delle linee elettriche) non forniscono informazioni utili.

Le configurazioni elettrodiche più utilizzate nelle indagini geofisiche di resistività sono sicuramente la Wenner, la Dipolo-Dipolo e la Wenner-Schlumberger.

Le configurazioni differiscono principalmente in relazione a potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale.

La configurazione Wenner presenta un'alta risoluzione verticale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni orizzontali, una buona profondità di investigazione, scarsa

copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale, essendo quest'ultima inversamente proporzionale a K.

La configurazione Dipolo-Dipolo, presenta invece una alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali (variazioni laterali di resistività, cavità ecc.), profondità di investigazione e ampiezza del segnale misurato minori rispetto al Wenner, ma con una maggiore copertura orizzontale.

Il dispositivo Wenner-Schlumberger rappresenta una soluzione ibrida ed è quello più utilizzato in geofisica ambientale poiché costituisce il giusto compromesso tra le caratteristiche sopra descritte.

Per ottenere, a partire dai valori di resistività apparente, la distribuzione nel sottosuolo delle resistività reali, è necessario risolvere un "problema inverso".

In molte applicazioni geofisiche, la soluzione del problema inverso consente di determinare i valori di quantità non misurabili direttamente, parametri incogniti, a partire da quantità misurabili, i dati sperimentali, attraverso l'assunzione di un modello, cioè di una legge fisica che li correla.

Tale modello è una rappresentazione matematica ed ideale di una porzione di sottosuolo; il modello è caratterizzato dai "parametri del modello" che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati.

Nel caso della tomografia elettrica, si vuole stimare la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo a partire da misure effettuate in superficie.

Il software utilizzato nell'inversione (ERTLAB64©) implementa un modello a celle (o blocchi), i cui parametri sono i valori di resistività delle singole celle in cui il sottosuolo è stato suddiviso; la soluzione agli elementi finiti o alle differenze finite fornisce i valori di resistività reale.

Dal modello geofisico, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, si elabora un modello geolitologico.

## **7.2. Operazioni di campagna**

La sequenza di misura ha previsto una configurazione Dipolo-Dipolo e mista Wenner e Schlumberger con tempo di acquisizione pari a 0.25 secondi e voltaggio massimo di 400 V con un dispositivo combinato di acquisizione dati (Wenner e Schlumberger) su 10 livelli.

Per ogni misura si è definita una ripetizione minima pari a 3 ed una massima pari a 5.

L'errore massimo è stato fissato pari al 1% (differenza tra le misure ripetute).

### **7.2.1 Sorgente di energia ed apparati di ricezione**

Agli elettrodi viene alternativamente inviata la corrente o misurata la differenza di potenziale, in una sequenza preprogrammata ed automatica.

Gli elettrodi sono costituiti da paletti in acciaio collegati tra loro da un cavo multiconduttore.

Nel caso specifico, lo strumento utilizzato consente il collegamento simultaneo di 4 cavi con 24 connettori in modo da consentire l'utilizzo simultaneo di un massimo di 96 conduttori indipendenti (nel caso in esame sono stati tutti utilizzati); sono state utilizzate prese esterne per l'attacco agli elettrodi disponibili in funzione del dettaglio e della profondità d'indagine.

## 7.2.2 Acquisizione dati

Per l'indagine in oggetto è stato utilizzato un georesistivimetro Syscal Pro (Iris Instruments, Orlèans Cedex, Francia) a 96 elettrodi, collegato a cavi multielettrodo a 24 uscite che possiede caratteristiche di tensione massima di 600 V e potenza di 175 W (con alimentazione da batteria esterna da 70 A/h).

Lo strumento di acquisizione dati è costituito da un georesistivimetro digitale con unità di controllo e gestione multielettrodo, in grado di eseguire via software la misura e la memorizzazione della resistenza di contatto degli elettrodi e la misura, la memorizzazione e l'azzeramento dei potenziali spontanei.



Figura 11 - Georesistivimetro IRIS Syscal Pro a 96 canali

La risoluzione di tali misure è di 30 nV, mentre la possibilità di memorizzazione di tutti i dati relativi all'acquisizione è di alcune migliaia di misure costituite ciascuna dai valori di resistività, differenza di potenziale (con verifica della qualità del dato tramite il calcolo della deviazione standard), intensità di corrente (con iniezione di corrente in quantità, periodo e sequenza opportune) e geometria degli elettrodi.

### Cenni sulle caratteristiche elettriche dei materiali

La resistività dei terreni è controllata principalmente dai seguenti fattori:

1. grado di saturazione dei pori;
2. porosità;
3. salinità del fluido presente nei pori;
4. temperatura;
5. presenza di sostanze organiche (idrocarburi, solventi, ecc.);
6. presenza di argilla.

La relazione empirica (proposta da Archie) è valida per suoli avente scarsa componente argillosa (sabbie, ghiaie):

$$\rho_s = \rho_f a \rho_n S^{-m}$$

dove:

- s resistività ( $\square \cdot m$ ) del suolo parzialmente saturo di fluido,
- f resistività ( $\square \cdot m$ ) del fluido presente nei pori,
- S frazione del volume di pori occupata dal fluido,
- m coefficiente di saturazione (solitamente assunto essere pari a 2),
- a costante empirica, detta di Winsaur (tipico per sabbia : 0.62),
- n coefficiente empirico, detto di "tortuosità" (tipico per sabbia :2.15),
- porosità del suolo.

La resistività del fluido  f è calcolabile qualora si conoscano le concentrazioni di ioni in soluzione (ad es. Cl-, SO4=, NO3-, ecc.) utilizzando la formula:

$$\square f = 0.0123 + 10 (3.562 - 0.955 \log_{10} C)$$

dove C è la somma delle concentrazioni (pesate da opportuni coefficienti ricavati sperimentalmente per ciascun ione) di tutti gli ioni presenti.

I fluidi altamente salini, come ad esempio il percolato che si forma nelle discariche di rifiuti solidi urbani, possono rendere terreni naturalmente resistivi (sabbie, ghiaie) in terreni a comportamento conduttivo.

I cationi adsorbiti sulla superficie delle particelle di argilla (e, in minor misura, di limo) offrono cammini addizionali per la corrente elettrica e quindi aumentano la conducibilità dei sedimenti.

Esistono relazioni semi-empiriche valide per il calcolo della resistività di sedimenti con componente argillosa non trascurabile, che non riporteremo in questo contesto.

Si ricordi soltanto nel seguito che terreni limoso-argillosi risultano sempre più conduttivi rispetto a quelli sabbiosi e ghiaiosi, ovviamente a parità di saturazione e a parità di fluido presente nei pori.

Tipicamente le resistività possono scendere, in corrispondenza delle zone più argillose, fino a valori inferiori a 15-20  $\square \cdot m$ , anche nel caso di terreno relativamente secco.

Per i materiali più lapidei le resistività tendono inevitabilmente ad incrementare raggiungendo valori anche di varie migliaia di Ohm ma nella maggior parte dei casi le rocce locali, costituite principalmente da marne con gessi e calcari, giungono attorno ad un massimo di 100-200 Ohm.

Nei casi in cui si rilevino valori più elevati si può essere in un contesto anomalo per la presenza di cavità per dissoluzione dei gessi dove si può giungere anche a valori superiori a 200-300 Ohm.

E' da considerare che la presenza di cavità rende infinita la resistività, ovviamente nel settore dove questa è presente, ma si deve considerare che la misura elettrica considera anche i materiali presenti tra la superficie e la cavità stessa per cui non si avranno mai valori infiniti ma più elevati del contesto in cui questa si trova.

Per questo motivo, per la ricerca di cavità, si devono valutare i parametri dell'ammasso in cui questa si localizza e considerare "anomali" i valori decisamente superiori alla media per valore ed anche perché il processing tende poi a confinare.

Il processing elettrico è un processo iterativo che può essere infinito ma che viene sospeso dal tecnico quando l'immagine tende ad essere sufficientemente definita per fornire una corretta e plausibile interpretazione.

Nella tabella seguente si riportano a semplice titolo indicativo i range di resistività elettrica di alcuni terreni e rocce.

Materiale	Resistività ( $\Omega.m$ )	Materiale	Resistività ( $\Omega.m$ )
Acqua dolce	10-100	Dolomie	500 - 10000
Acqua salata	0.2	Calccare, gesso	500 - 3500
Suolo di copertura	10 - 200	Gneiss e graniti sani	2000 - 10000
Argille	1-50	Gneiss e graniti alterati	100 - 1000
Argille sabbiose - silt	25 - 100	Marne	10-50
Sabbia, ghiaia in falda	200 - 400	Piroclastiti	50-600
Sabbie con argille	50 - 300	Rocce ignee	100 - 10000
Sabbia, ghiaia asciutta	800 - 5000	Arenarie	200 - 5000
Ghiaia e sabbia secca	1000 - 10000	Tufi	150 - 1000
Ghiaia e sabbia sature d'acqua dolce	50-500		
Ghiaia e sabbia sature d'acqua salata	2-10		

Tabella 1 - Valori caratteristici di resistività elettrica da Ulriksen (1982), Telford (1990), Reynolds (1997).



### 7.3. Elaborazione dati

L'aspetto elaborativo della tomografia elettrica consiste nell'inversione 2D dei profili elettrici di superficie ottenute tramite l'array di misure secondo la metodica usata (Wenner, dipolo-dipolo ecc.) definiti in funzione sia degli obiettivi della ricerca sia della "stabilità" del campo elettrico locale. L'elaborazione dei dati è stata sviluppata secondo due fasi successive a cui precede una fase di filtraggio dei dati per ridurre il "rumore" ambientale" (figure 10-13).

La prima fase è consistita nella ricostruzione di "pseudosezioni" di resistività tramite l'utilizzo di software di contouring (Surfer della Golden Software) e in un preliminare filtraggio delle misure con l'utilizzo del software Prosys II (specialmente nel caso disturbi alle misure per presenza di sottoservizi, solette in cemento armato, ecc. Nella seconda fase si è proceduto al calcolo dei valori di resistività vera tramite inversione bidimensionale e sviluppo di un adeguato modello di distribuzione della resistività del sottosuolo. Il software impiegati (ERTLAB e RES2DINV) utilizzano il metodo degli elementi finiti (FEM) in due dimensioni per modellare la risposta elettrica del sottosuolo ed applicano l'eventuale correzione topografica.

Dato in input la geometria della linea di acquisizione ed il file di dati relativo alle misure di resistività apparente il software definisce una maglia discreta di elementi trapezoidali per permettere la compensazione di qualsiasi tipo di dislivello tra le posizioni elettrodiche. La procedura di calcolo iterativo di inversione, dei parametri di resistività apparente in resistività reale, minimizza l'errore tra i dati di campo e quelli simulati mediante il FEM secondo la metodica proposta da Sasaki (1994) ed altri.

La convergenza dell'algoritmo è ottenuta con la stima automatica di un parametro di stabilizzazione (metodo dei coefficienti reciproci generalizzati) mentre la riduzione del "rumore di fondo" viene realizzata mediante regressione lineare iterativa valutando le varianze statistiche di ciascuna misura. La rappresentazione tomografica finale della sezione di resistività reale avviene sempre mediante software di contouring (Surfer) con il quale i valori dei parametri elettrici vengono espressi mediante contour line delle iso-resistive e falsi colori.

Le variazioni di resistività, per rendere confrontabili i risultati delle diverse sezioni, sono state rappresentate secondo una scala di colori uniforme per tutte le sezioni.

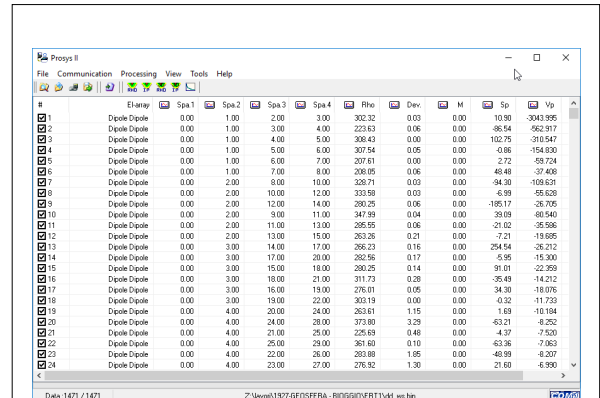


Figura 12 - Dati raw

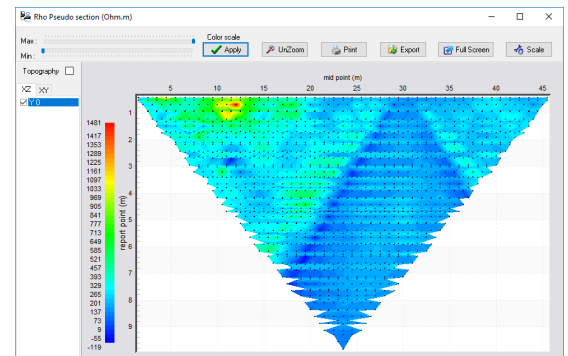


Figura 13 - Pseudo sezione prefiltering

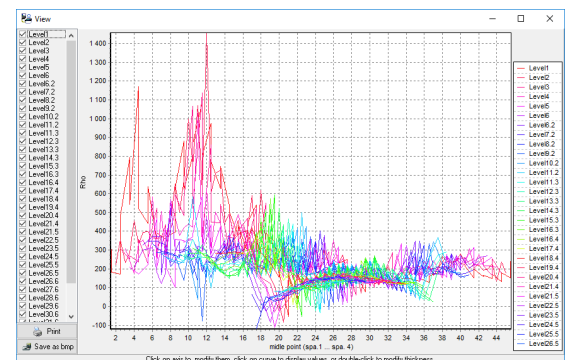


Figura 14 - Log dati prefiltering

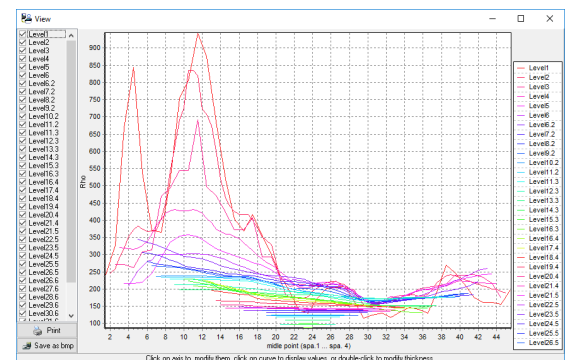


Figura 15 - Log dati dopo il filtraggio

#### 7.4. Comportamento della resistività nei materiali litologici

La resistività elettrica delle rocce è controllata essenzialmente dalla conduzione elettrica di tipo elettrolitico attraverso i pori, le fratture, le faglie e le zone di debolezza strutturale.

La conduzione elettrica nelle soluzioni elettrolitiche nelle formazioni rocciose avviene essenzialmente attraverso i pori interconnessi, lungo le superfici dei grani solidi, attraverso le fratture e le faglie; ovviamente l'apporto alla conduzione elettrica dei minerali silicati è praticamente trascurabile.

In generale per una roccia con una determinata porosità efficace, tanto maggiore è il contenuto di sali disciolti nell'acqua, tanto più elevata è la conducibilità e minore la resistività (è un rapporto inversamente proporzionale).

Gli elementi principali che governano la resistività elettrica dei mezzi rocciosi sono pertanto riassumibili in:

- 1) le condizioni di porosità, saturazione in acqua e contenuto salino;
- 2) l'incremento della temperatura abbassa la viscosità delle acque e aumenta la mobilità ionica, con il risultato che la resistività elettrica si abbassa;
- 3) formazioni calcaree con grani omogenei presentano numerosi spazi intergranulari vuoti e che, se saturi, danno bassi valori di resistività; viceversa formazioni calcaree con grani eterogenei presentano una porosità efficace ridotta e quindi bassi valori di resistività;
- 4) fenomeni di dissoluzione lungo le fratture nei calcari e nelle arenarie aumentano la porosità e abbassano la resistività elettrica; mentre la precipitazione di alcuni minerali occlude i pori e tende ad aumentare i valori di resistività;
- 5) una roccia granitoide consente il passaggio della corrente elettrica nelle microfratture e lungo l'interfaccia tra i grani minerali; la porosità è tipicamente molto bassa e pertanto i valori di resistività sono molto elevati mentre le formazioni di basalto presentano molte microcavità o pori tra di loro non interconnessi; pertanto in generale un basalto anche con elevata porosità può presentare elevati valori di resistività.

In generale i processi geologici riducono i valori di resistività della roccia, salvo alcune eccezioni. L'alterazione superficiale o idrotermale di rocce granitoidi diminuisce i valori di resistività; la fratturazione di rocce basaltiche diminuisce la resistività di diversi ordini di grandezza; fenomeni di microfratturazione, fratture e faglie attive, fenomeni di dissoluzione aumentano la permeabilità dei fluidi e pertanto abbassano la resistività.

La precipitazione di rocce carbonatiche e di silicati riduce invece la porosità e la permeabilità dei fluidi e pertanto aumenta la resistività.

Fenomeni di compattazione e cementazione e fenomeni metamorfici provocano solitamente effetti di aumento dei valori di resistività.

Infine l'intrusione salina provoca un aumento degli ioni in soluzione il che equivale ad una riduzione della resistività.

Il ruolo delle particelle di argilla è invece particolarmente importante, in quanto esse agiscono solitamente come un percorso di conduzione elettrica, dovuta a fenomeni definiti di doppio strato o di scambio di cationi, separata dalla normale conduzione di tipo elettrolitico.

La resistenza totale di questo percorso elettrico aggiuntivo è normalmente molto bassa; l'effetto di particelle di argilla disseminate sulla resistività complessiva delle rocce aumenta di importanza al diminuire della conducibilità idraulica attraverso i pori.

Le alterazioni di tipo idrotermale, specialmente nelle rocce silicee, trasformano in feldspati in caolinite, montmorillonite e altri minerali argillosi. Nelle rocce basiche, le trasformazioni in minerali quali clorite e serpentinite possono provocare variazioni della resistività elettrica.

In ragione delle diverse motivazioni sopra accennate, i rilievi elettrici non sono in grado di caratterizzare in modo univoco un determinato litotipo o distinguere tra differenti litotipi.

Viceversa, la caratterizzazione elettrica di ammassi rocciosi consente di ottenere informazioni di notevole affidabilità circa le condizioni idrogeologiche del sito, la presenza di zone argillificate e l'esistenza di faglie e zone di riempimento di materiale fluido o argilloso.

## 8 CONCLUSIONI

Per la progettazione definitiva della linea Roma Pescara si sono eseguite, in questa fase, indagini geofisiche per determinare fra l'altro il profilo di velocità delle onde di taglio.

Le indagini geofisiche sono costituite da: Indagini MASW e di misure HVSR indagini Down hole e indagini Geoelettriche tomografiche.

Le indagini geofisiche hanno consentito di determinare le frequenze di sito e la velocità delle onde di taglio per circa 30 metri dal piano campagna.

La caratterizzazione dei materiali in oggetto può quindi soddisfare i requisiti relativi alla entrata in vigore del nuovo decreto ministeriale.

I terreni interessati dalle strutture presentano valori di  $V_{s_{eq}}$  ricavabili al termine di ogni certificato di prova.

Si sono perciò classificati i terreni di fondazione secondo le categorie imposte dall'entrata in vigore della normativa sulle opere di ingegneria. I siti oggetto di indagine appartengono alle categorie C e B a seconda che i valori di  $V_{s_{eq}}$  siano inferiori a 360 m/sec o superiori a tale valore. I dettagli di ogni singola prova sono facilmente consultabili al termine di ogni certificato.

**PROGEO S.r.l.**  
Dott. Gabriele Pulelli



Hanno collaborato:  
Dott. Andrea Fabbri  
Dott. Stefano Tomidei  
Dott. Maurizio Furani



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**CLIENTE:** ITALFERR

**CODICE LAVORO:** 1861-14

**CODICE PROVA:** MASW 1 - HVSR 251

**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO

**DATA PROVA:** 23/01/2019

**LONGITUDINE:** 14.136490°

**LATITUDINE:** 42.353255°

**QUOTA (m.s.l.m.):** 45

**TERRENO DI MISURA:**

naturale, soffice

**ACCOPIAMENTO:**

solidale con piedini metallici

**ORIENTAMENTO:**

Nord

**CONDIZIONI METEO:**

Cloudy

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO AREA DI INDAGINE



Fig 1

# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

CLIENTE: ITALFERR

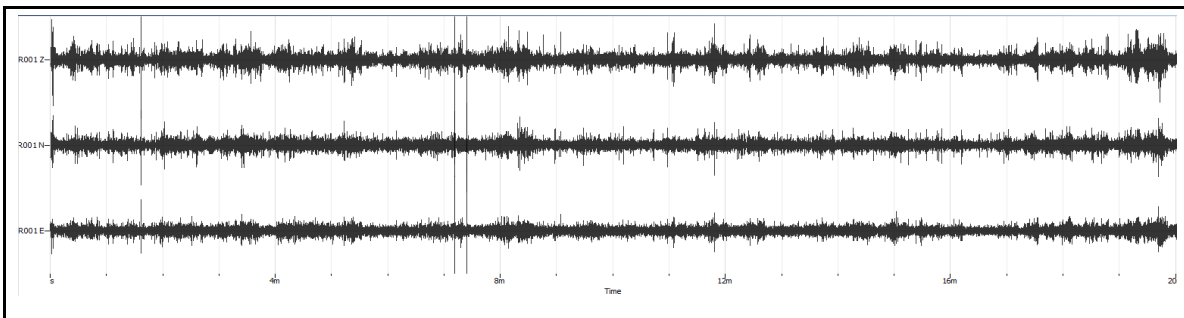
CODICE LAVORO: 1861-14

CODICE PROVA: MASW 1 - HVSR 251

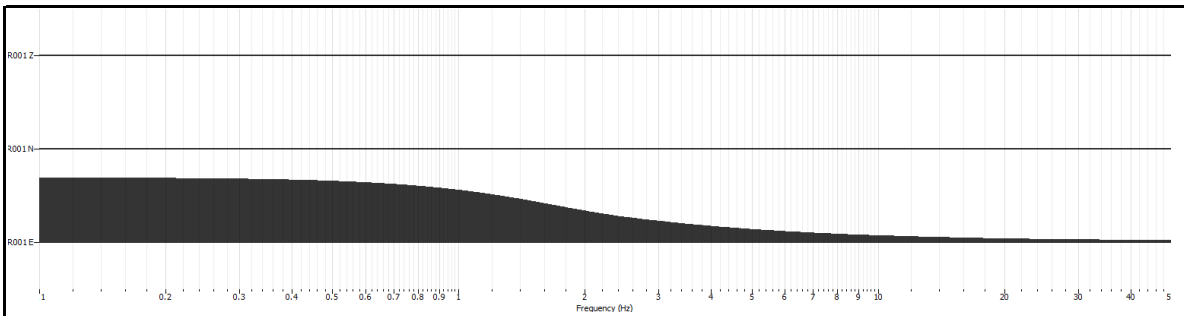
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	Sara SL 07
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	15:19:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Windows lenght (sec)	40
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costant	40
Taper	0.5%
Low Pass	15 Hz
N° of windows	20

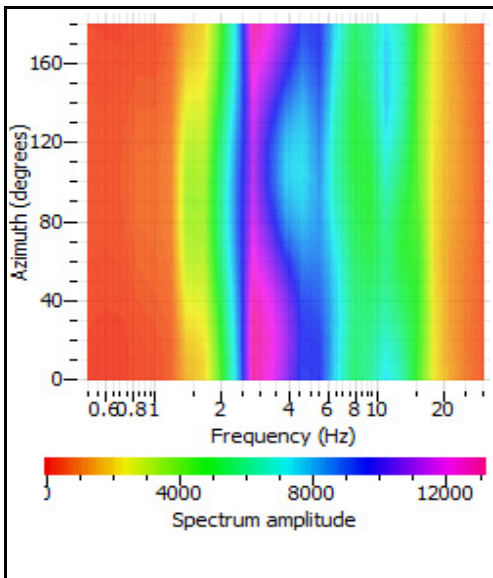
## RECORD (Time)



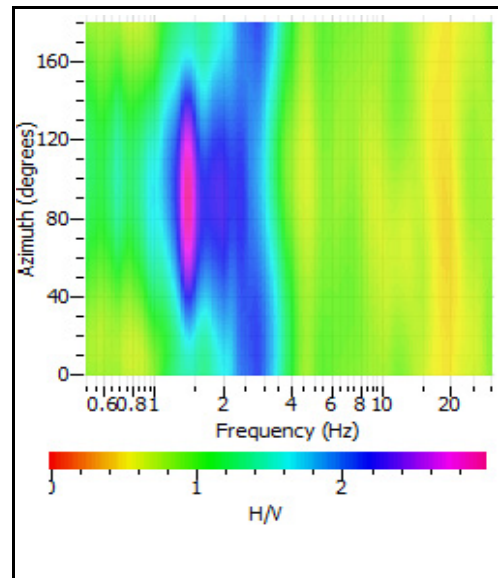
## RECORD (Frequency)



## HORIZONTAL SPECTRUM ROTATE



## HV ROTATE RESULTS



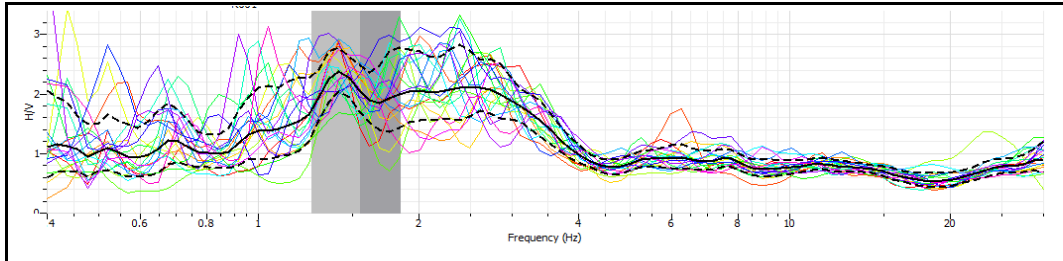


# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSr)

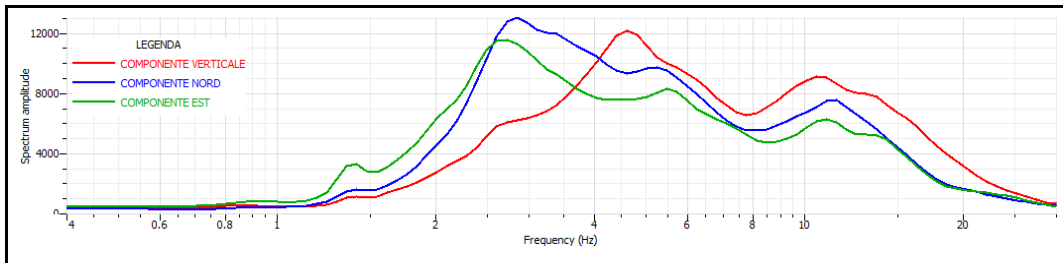
**CLIENTE** ITALFERR  
**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 1 - HVSr 251

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

Max HVSr 1.55 ± 0.29 Hz. A0 = 2.38



## SPETTRO SINGOLE COMPONENTI



### Criteri per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0	1.55		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	1.55 > 10/20	✓	
nc (f0) > 200	2201 > 200	✓	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of 0 times	✓	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

### Criteri per un picco H/V chiaro

[almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Exists f' in [f0/4, f0]   AH/V(f') < A0/2	0 Hz		✗
Exists f'' in [4f0, f0]   AH/V(f'') < A0/2	0 Hz		✗
A0 > 2	2.38 > 2	✓	
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-1.55 < 0.05	✓	
σf < ε(f0)	0.29999 < 0.155		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.55528 < 1.78	✓	

Lw	Window length
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f-	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f+	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

	Threshold value for σf and σA(f0)				
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

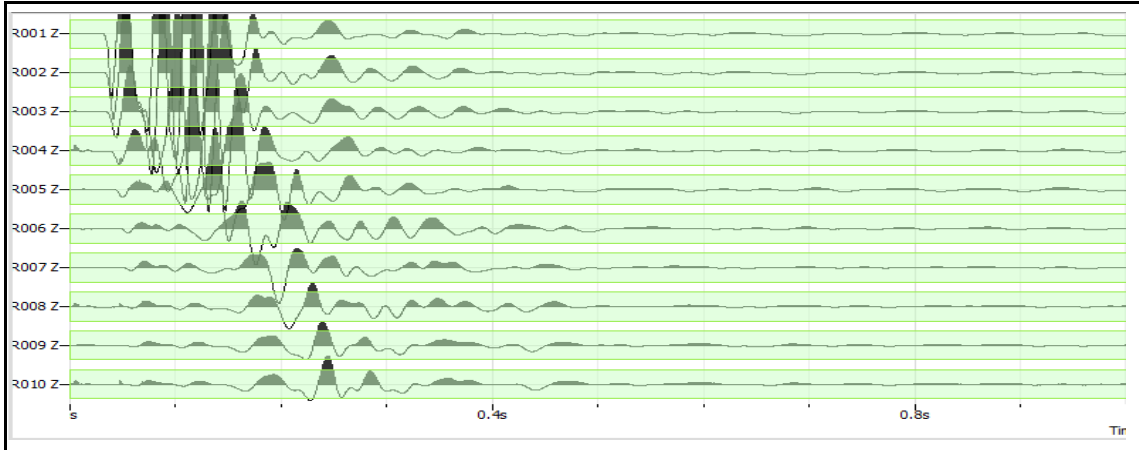
**CLIENTE** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 1 - HVSR 251

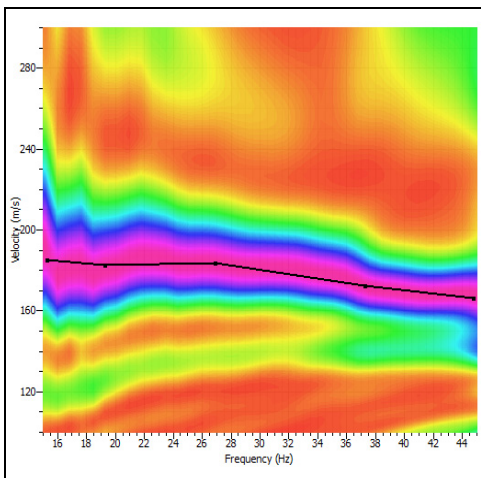
**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:** 23/01/2019  
**LONGITUDINE:** 14.136490°  
**LATITUDINE:** 42.353255°  
**QUOTA (m.s.l.m.):** 45  
**AZIMUT** 160

**STRUMENTAZIONE** Geometrics GEODE  
**N°CANALI** 10  
**SPACING** da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)** 3  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

## REGISTRAZIONE



## SPETTRO F-K



## CURVA DI DISPERSIONE

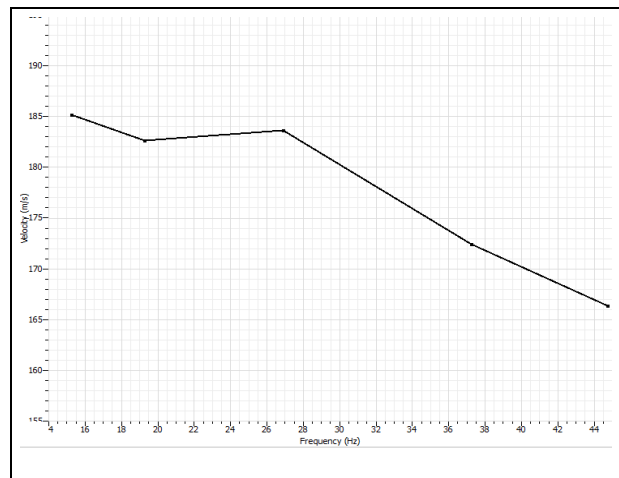


Fig 4

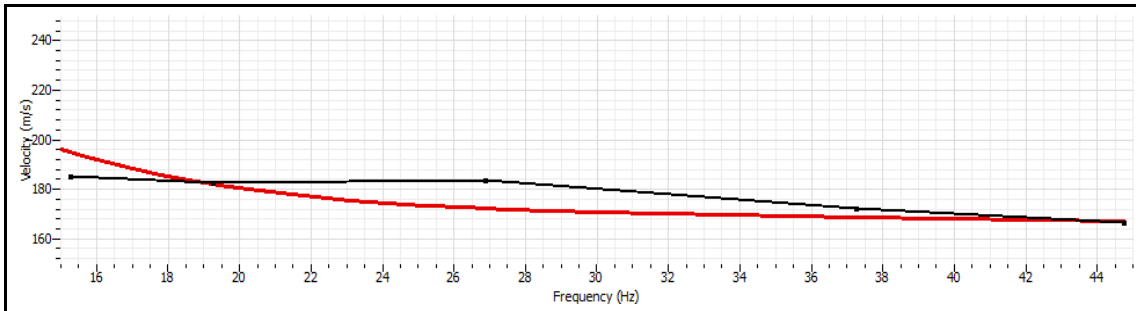
# ANALISI CONGIUNTA PROVA MASW - HVSR

**CLIENTE**            **ITALFERR**  
**CODICE LAVORO**    **1861-14**  
**CODICE PROVA**     **MASW 1 - HVSR 251**

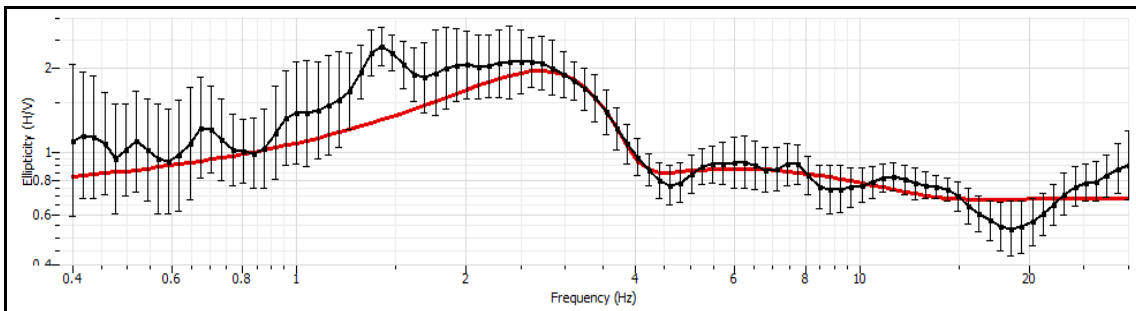
**LOCALITA':**            CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:**        23/01/2019  
**LONGITUDINE:**      14.136490°  
**LATITUDINE:**        42.353255°  
**QUOTA (m.s.l.m.):**    45  
**AZIMUT**                160

**APPARECCHIATURA MASW:** Geometrics GEODE  
**APPARECCHIATURA HVSR:** SARA SL 07  
**N°CANALI**                10  
**SPACING**                da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)**     3  
**SAMPLING (Sec)**        0.5

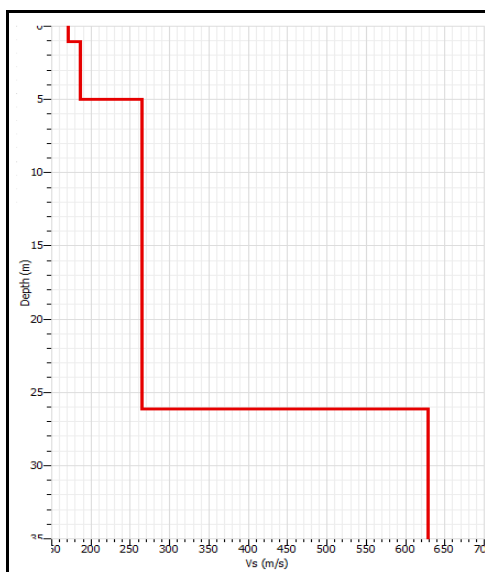
## CURVA DI DISPERSIONE PROVA MASW



## CURVA DI ELLIPTICITY PROVA HVSR



## PROFILO VELOCITA' ONDE DI TAGLIO



## CALCOLO VS30

SPESSORE	PROFONDITA'	Vs	SPESSORE/Vs
1	0	171	0.005847953
4	1	186	0.021505376
21.2	5	266	0.079699248
3.8	26.2	628	0.006050955
	35		0.113103533

Vs<sub>eq</sub> = 265

Seismic classification of soils  
(It. D.M. 17/01/2018) C

Fig 5



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**CLIENTE:** ITALFERR

**CODICE LAVORO:** 1861-14

**CODICE PROVA:** MASW 2 - HVSR 250

**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO

**DATA PROVA:** 23/01/2019

**LONGITUDINE:** 14.133376°

**LATITUDINE:** 42.347604°

**QUOTA (m.s.l.m.):** 45

**TERRENO DI MISURA:**

naturale, soffice

**ACCOPIAMENTO:**

solidale con piedini metallici

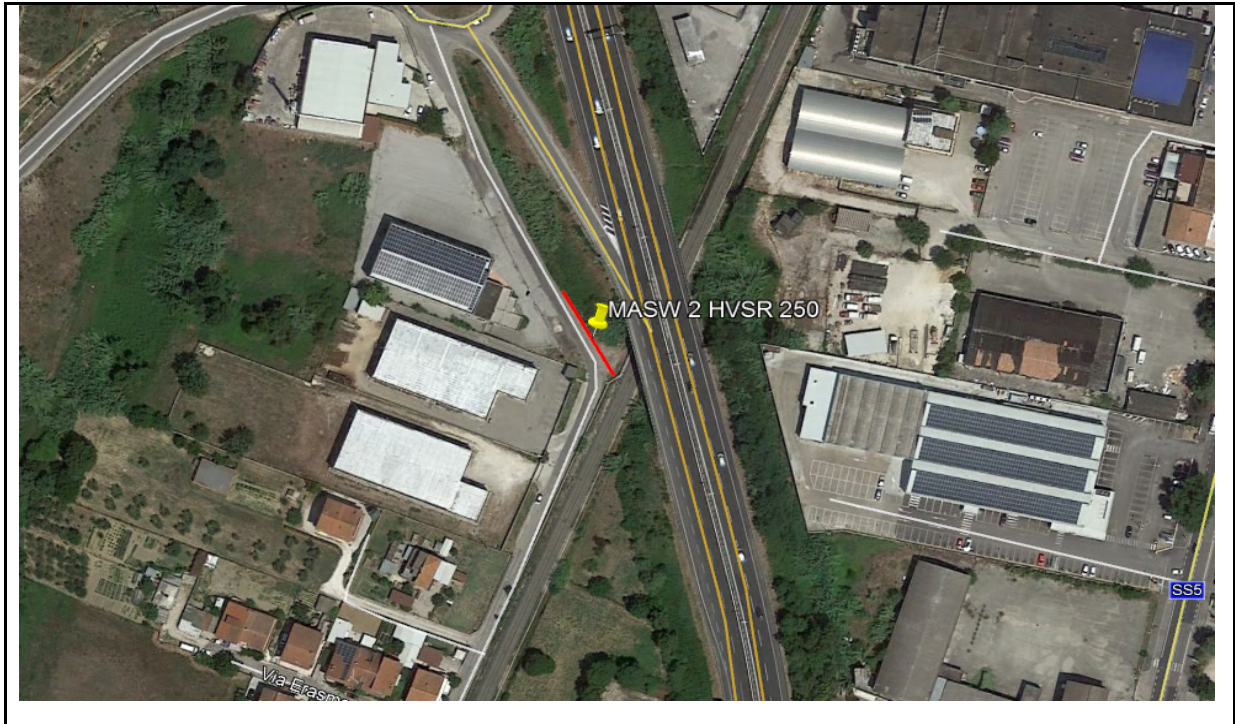
**ORIENTAMENTO:**

Nord

**CONDIZIONI METEO:**

Cloudy

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO AREA DI INDAGINE



Fig 6

# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

CLIENTE: ITALFERR

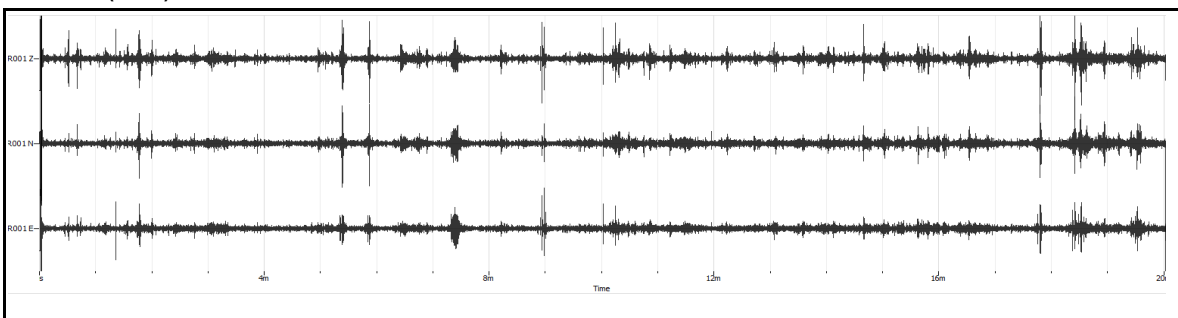
CODICE LAVORO: 1861-14

CODICE PROVA: MASW 2 - HVSR 250

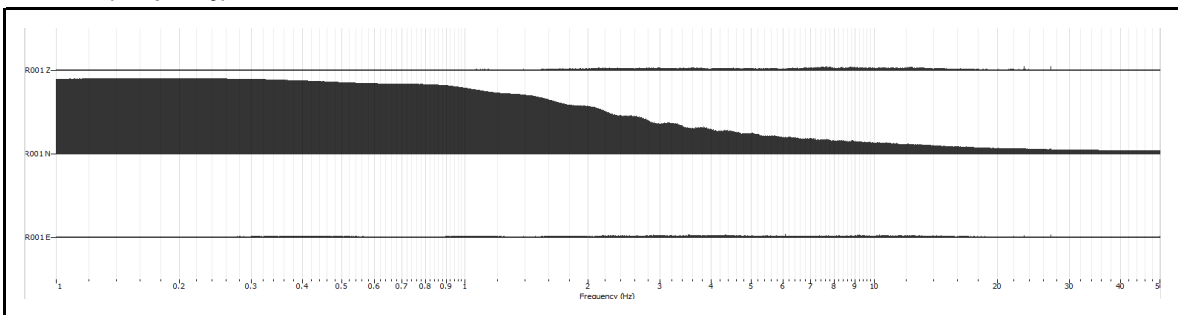
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	Sara SL 07
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	12:05:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Windows lenght (sec)	40
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costant	40
Taper	0.5%
Low Pass	15 Hz
N° of windows	13

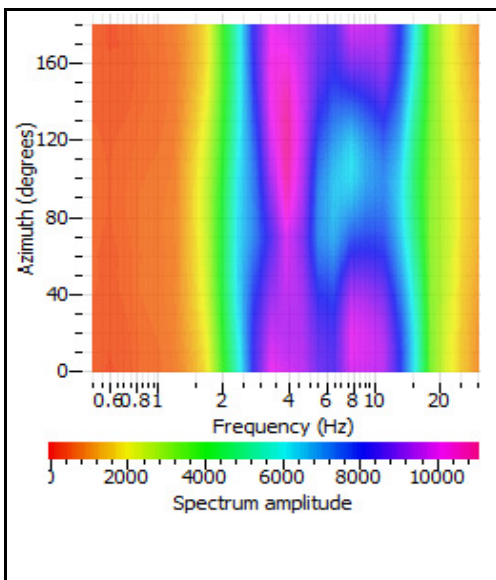
RECORD (Time)



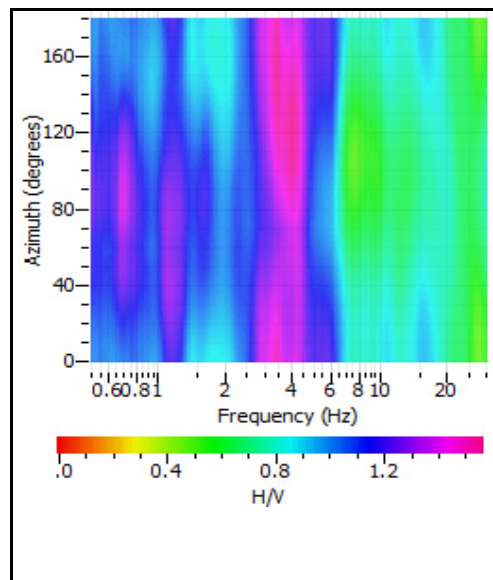
RECORD (Frequency)



HORIZONTAL SPECTRUM ROTATE



HV ROTATE RESULTS



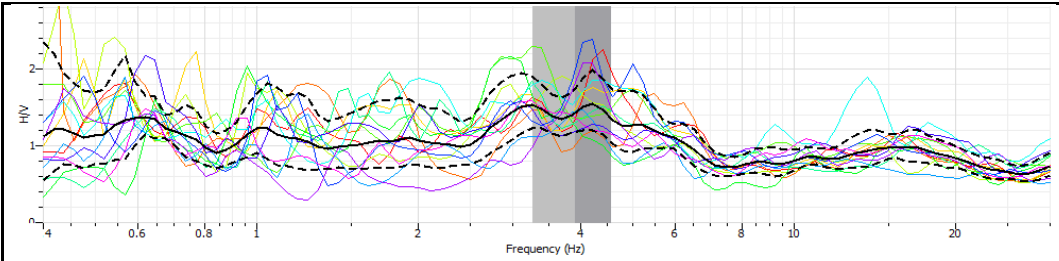


# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSr)

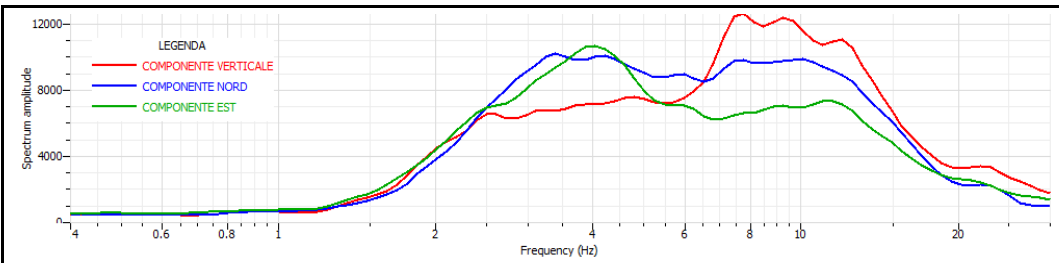
**CLIENTE** ITALFERR  
**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 2 - HVSr 250

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

**Max HVSr 3.92 ± 0.65 Hz. A0 = 1.54**



## SPETTRO SINGOLE COMPONENTI



### Criteri per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

<b>f0</b>	3.92		
<b>Lw</b>	20		
<b>nw</b>	71		
<b>f0 &gt; 10 / Lw</b>	3.92 > 10/20	✓	
<b>nc (f0) &gt; 200</b>	5566.4 > 200	✓	
<b>σA(f) &lt; 2 for 0.5 f0 &lt; f &lt; 2 f0 if f0 &gt; 0.5 Hz</b>	Exceeded 0 out of	✓	
<b>σA(f) &lt; 3 for 0.5 f0 &lt; f &lt; 2 f0 if f0 &lt; 0.5 Hz</b>	0 times		

### Criteri per un picco H/V chiaro

[almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

<b>Exists f' in [f0/4, f0]   AH/V(f') &lt; A0/2</b>	0 Hz		✗
<b>Exists f'' in [4f0, f0]   AH/V(f'') &lt; A0/2</b>	0 Hz		✗
<b>A0 &gt; 2</b>	1.54 > 2		✗
<b>fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%</b>	-3.92 < 0.05	✓	
<b>σf &lt; ε(f0)</b>	0.65476 < 0.196		✗
<b>σA(f0) &lt; θ(f0)</b>	0.392445 < 1.58	✓	

Lw	Window length
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of ε < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f-	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f+	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

	Threshold value for σf and σA(f0)				
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

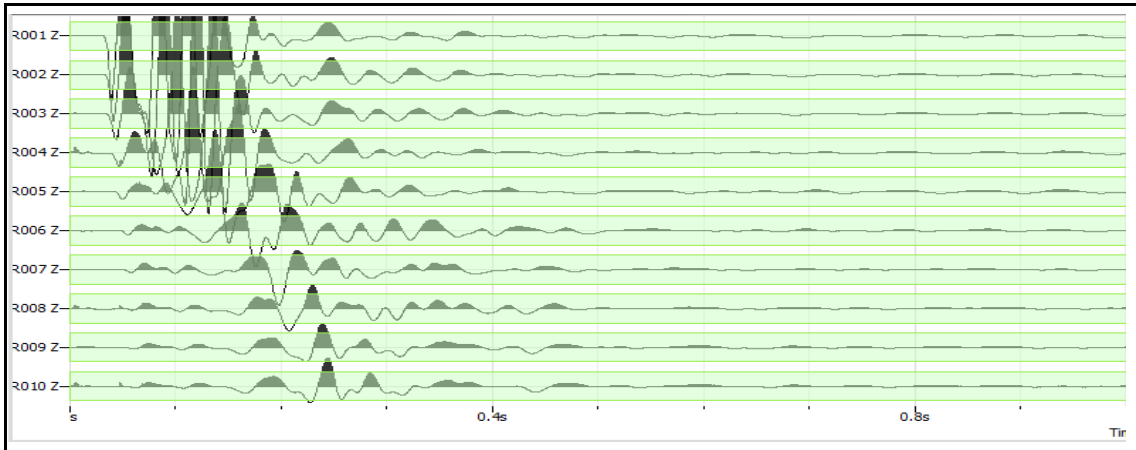
**CLIENTE** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 2 - HVSR 250

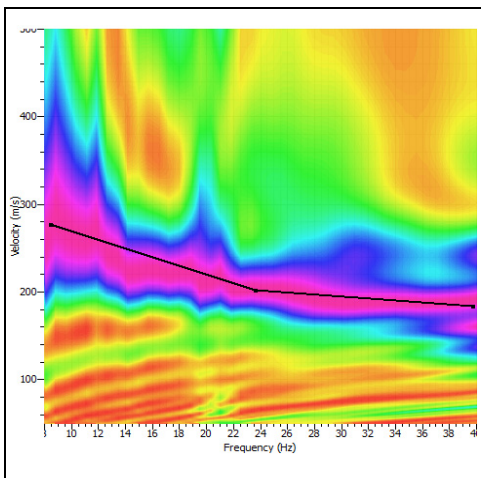
**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:** 23/01/2019  
**LONGITUDINE:** 14.133376°  
**LATITUDINE:** 42.347604°  
**QUOTA (m.s.l.m.):** 45  
**AZIMUT** 160

**STRUMENTAZIONE** Geometrics GEODE  
**N°CANALI** 10  
**SPACING** da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)** 3  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

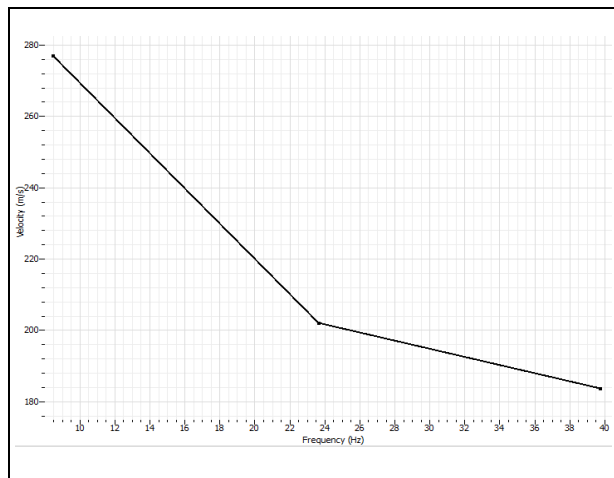
## REGISTRAZIONE



## SPETTRO F-K



## CURVA DI DISPERSIONE



**Fig 9**

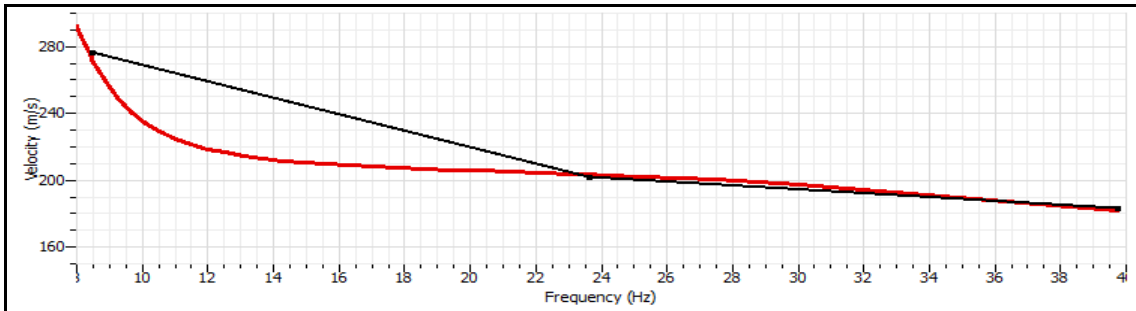
# ANALISI CONGIUNTA PROVA MASW - HVSR

**CLIENTE**            **ITALFERR**  
**CODICE LAVORO**    **1861-14**  
**CODICE PROVA**     **MASW 2 - HVSR 250**

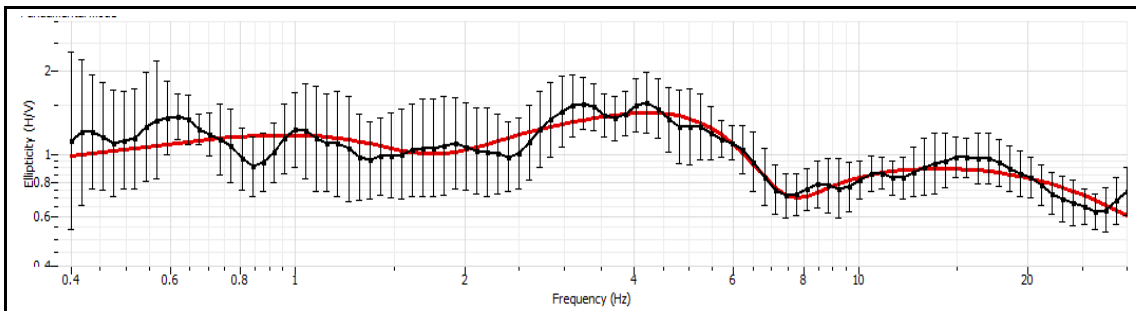
**LOCALITA':**            CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:**        23/01/2019  
**LONGITUDINE:**      14.133376°  
**LATITUDINE:**        42.347604°  
**QUOTA (m.s.l.m.):**    45  
**AZIMUT**                160

**APPARECCHIATURA MASW:** Geometrics GEODE  
**APPARECCHIATURA HVSR:** SARA SL 07  
**N°CANALI**                10  
**SPACING**                da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)**    3  
**SAMPLING (Sec)**        0.5

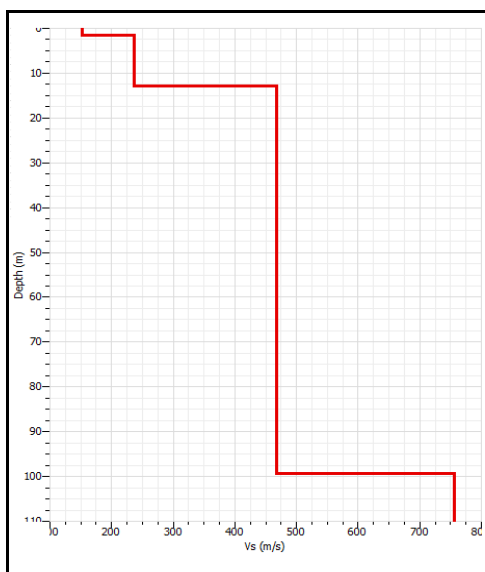
## CURVA DI DISPERSIONE PROVA MASW



## CURVA DI ELLIPTICITY PROVA HVSR



## PROFILO VELOCITA' ONDE DI TAGLIO



## CALCOLO VS30

SPESSORE	PROFONDITA'	Vs	SPESSORE/Vs
1.5	0	153	0.009803922
11.3	1.5	236	0.047881356
17.2	12.8	467	0.036830835
	99	756	
	110		
			0.094516113

$V_{seq} = 317$

Seismic classification of soils  
(It. D.M. 17/01/2018) C

Fig 10



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**CLIENTE:** ITALFERR

**CODICE LAVORO:** 1861-14

**CODICE PROVA:** MASW 3 - HVSR 042

**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO

**DATA PROVA:** 22/01/2019

**LONGITUDINE:** 14.125203°

**LATITUDINE:** 42.335585°

**QUOTA (m.s.l.m.):** 46

**TERRENO DI MISURA:**

naturale, soffice

**ACCOPIAMENTO:**

solidale con piedini metallici

**ORIENTAMENTO:**

Nord

**CONDIZIONI METEO:**

Cloudy

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO AREA DI INDAGINE



Fig 11

# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**CLIENTE:** ITALFERR

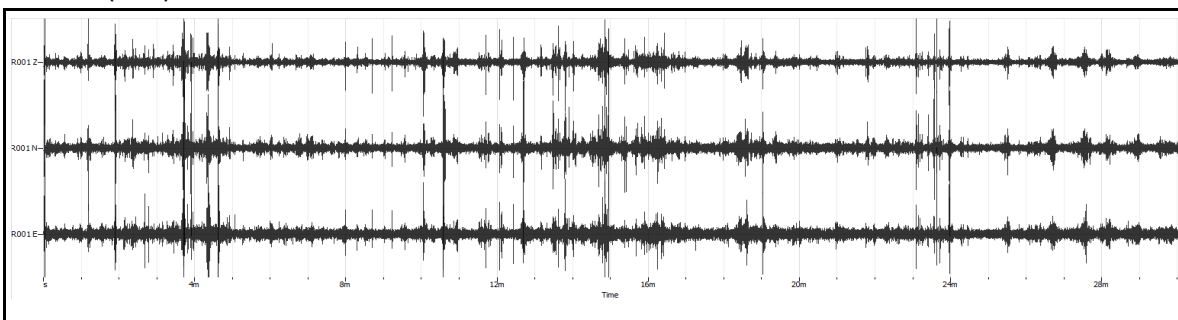
**CODICE LAVORO:** 1861-14

**CODICE PROVA:** MASW 3 - HVSR 042

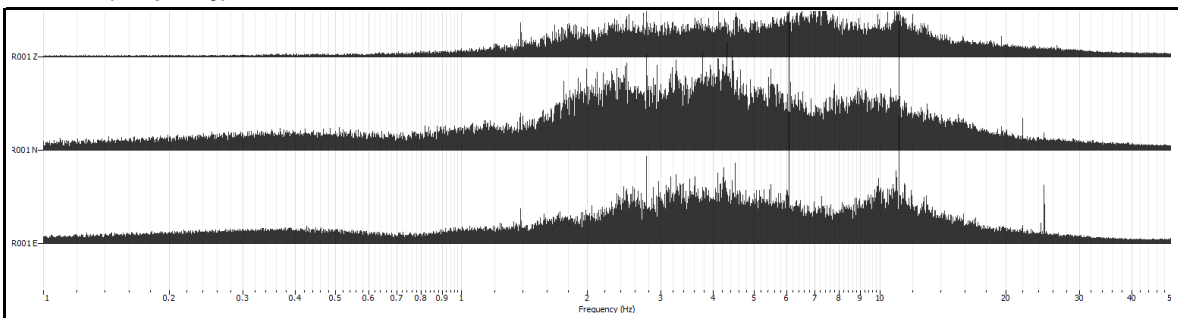
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	Sara SL 07
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	16:10:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Windows lenght (sec)	40
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costant	40
Taper	0.5%
Low Pass	15 Hz
N° of windows	38

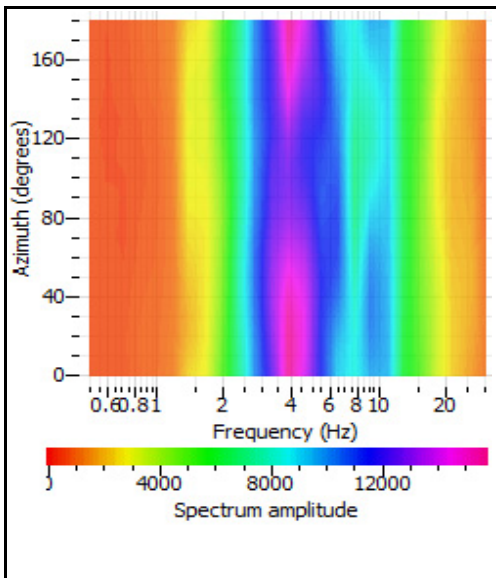
**RECORD (Time)**



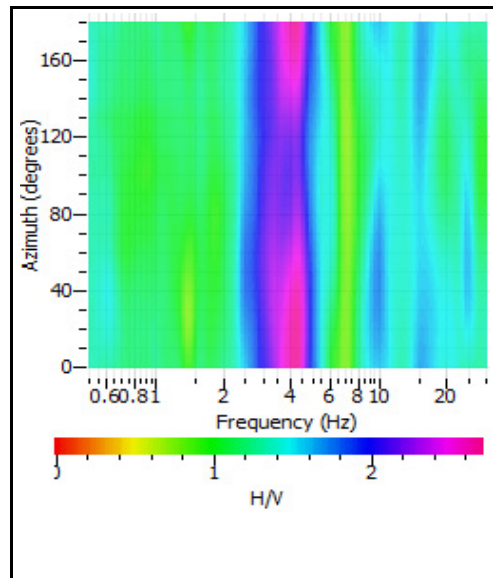
**RECORD (Frequency)**



**HORIZONTAL SPECTRUM ROTATE**



**HV ROTATE RESULTS**



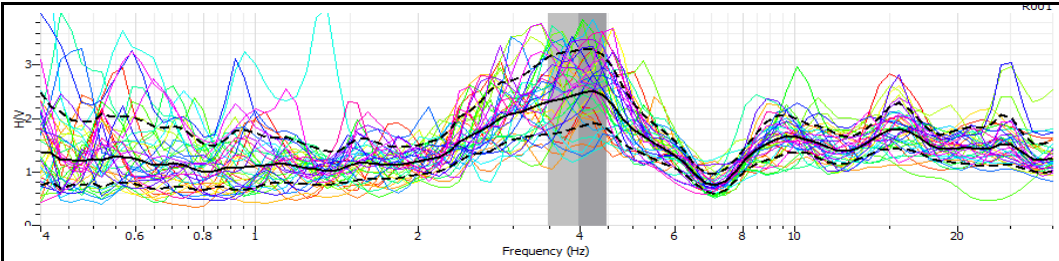


# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSr)

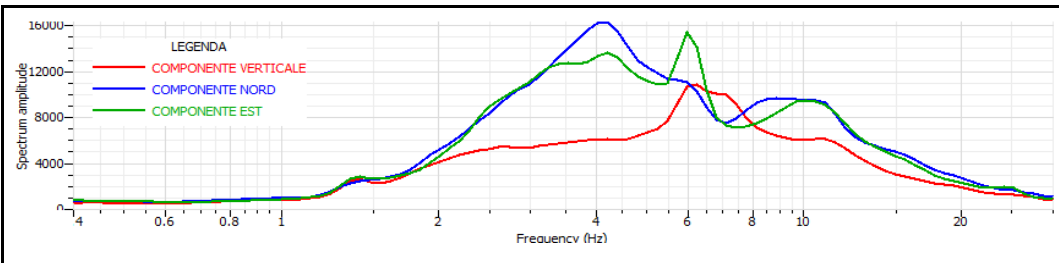
**CLIENTE** ITALFERR  
**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 3 - HVSr 042

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

**Max HVSr 3.98 ± 0.5 Hz. A0 = 2.51**



## SPETTRO SINGOLE COMPONENTI



### Criteri per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0	3.98		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	3.98 > 10/20	✓	
nc (f0) > 200	5651.6 > 200	✓	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 0 out of	✓	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz	0 times		

### Criteri per un picco H/V chiaro

[almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Exists f' in [f0/4, f0]   AH/V(f') < A0/2	0 Hz		✗
Exists f'' in [4f0, f0]   AH/V(f'') < A0/2	0 Hz		✗
A0 > 2	2.51 > 2	✓	
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-3.98 < 0.05	✓	
σf < ε(f0)	0.50099 < 0.199		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.681675 < 1.58	✓	

Lw	Window length
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f-	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f+	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

Freq. Range [Hz]	Threshold value for σf and σA(f0)				
	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

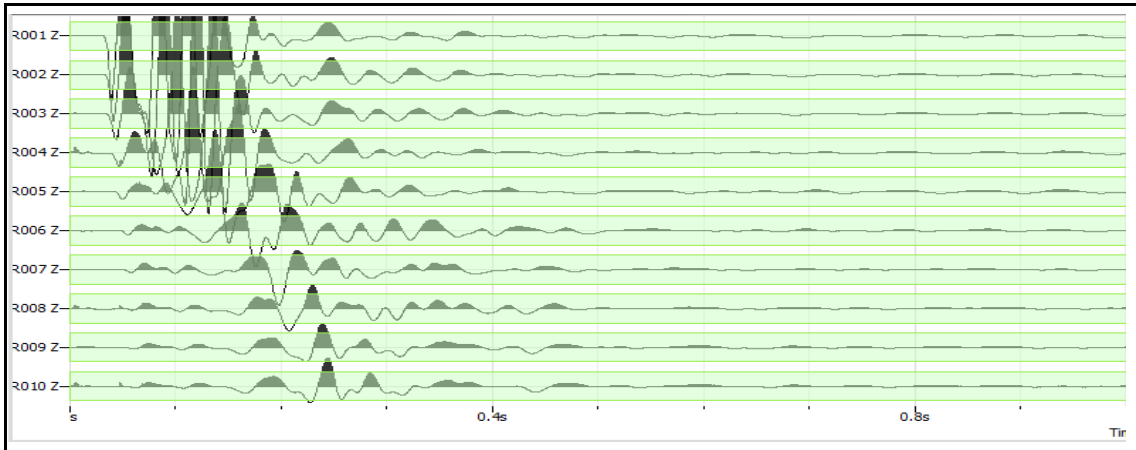
**CLIENTE** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 3 - HVSR 042

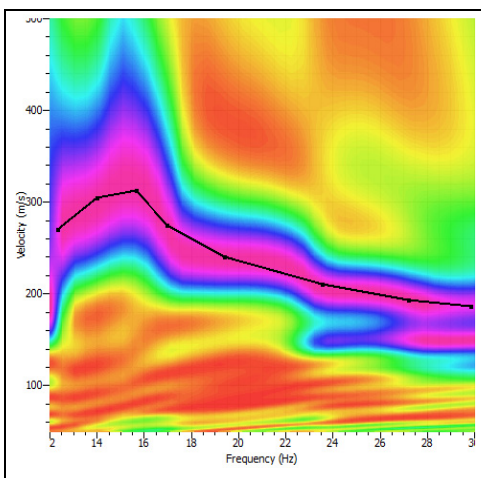
**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:** 22/01/2019  
**LONGITUDINE:** 14.125203°  
**LATITUDINE:** 42.335585°  
**QUOTA (m.s.l.m.):** 46  
**AZIMUT** 60

**STRUMENTAZIONE** Geometrics GEODE  
**N°CANALI** 10  
**SPACING** da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)** 3  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

## REGISTRAZIONE



## SPETTRO F-K



## CURVA DI DISPERSIONE

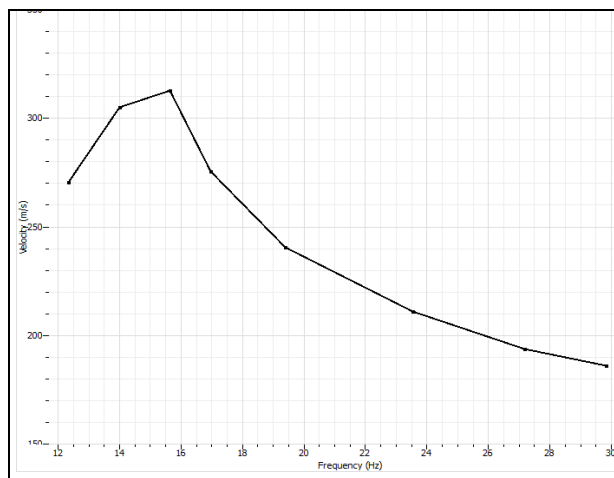


Fig 14

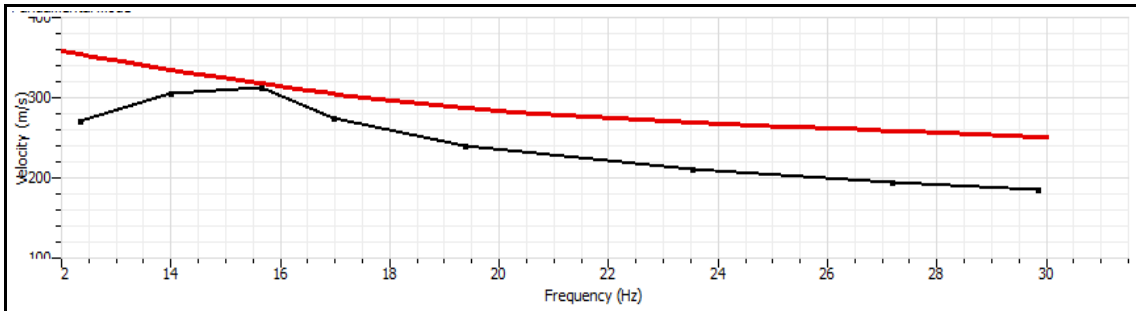
# ANALISI CONGIUNTA PROVA MASW - HVSR

**CLIENTE**            **ITALFERR**  
**CODICE LAVORO**    **1861-14**  
**CODICE PROVA**     **MASW 3 - HVSR 042**

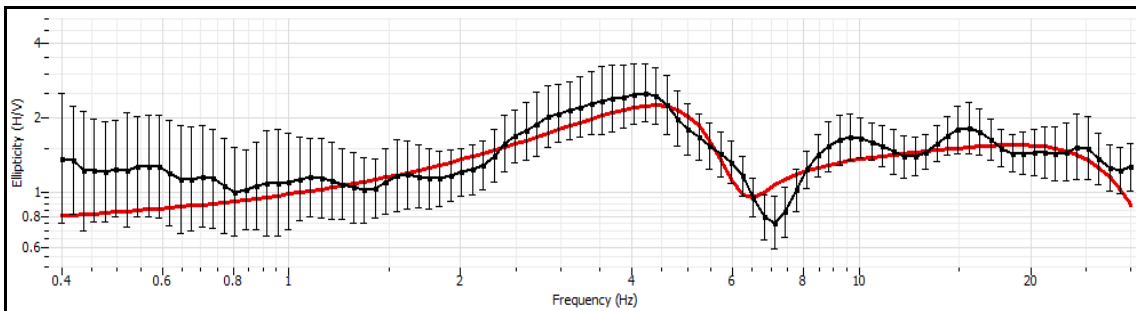
**LOCALITA':**            CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:**        22/01/2019  
**LONGITUDINE:**      14.125203°  
**LATITUDINE:**        42.335585°  
**QUOTA (m.s.l.m.):**    46  
**AZIMUT**                60

**APPARECCHIATURA MASW:** Geometrics GEODE  
**APPARECCHIATURA HVSR:** SARA SL 07  
**N°CANALI**                10  
**SPACING**                da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)**    3  
**SAMPLING (Sec)**        0.5

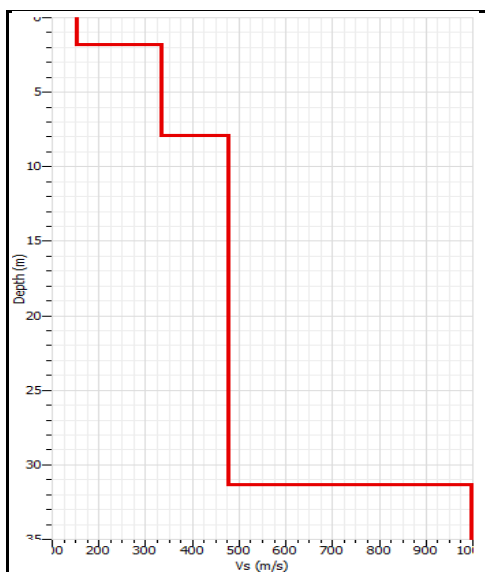
## CURVA DI DISPERSIONE PROVA MASW



## CURVA DI ELLIPTICITY PROVA HVSR



## PROFILO VELOCITA' ONDE DI TAGLIO



## CALCOLO VS30

SPESSORE	PROFONDITA'	Vs	SPESSORE/Vs
1.8	0	152	0.011842105
6.1	1.8	334	0.018263473
22.1	7.9	477	0.046331237
	31.3	997	
			0.076436815

$V_{seq} = 392$

Seismic classification of soils  
 (It. D.M. 17/01/2018)

**B**

Fig 15

# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**CLIENTE:** ITALFERR

**CODICE LAVORO:** 1861-14

**CODICE PROVA:** MASW 4 - HVSR 244

**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO

**DATA PROVA:** 11/10/2018

**LONGITUDINE:** 14.112013°

**LATITUDINE:** 42.331125°

**QUOTA (m.s.l.m.):** 41

**TERRENO DI MISURA:**

naturale, soffice

**ACCOPIAMENTO:**

solidale con piedini metallici

**ORIENTAMENTO:**

Nord

**CONDIZIONI METEO:**

Cloudy

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO AREA DI INDAGINE



Fig 16



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**CLIENTE:** ITALFERR

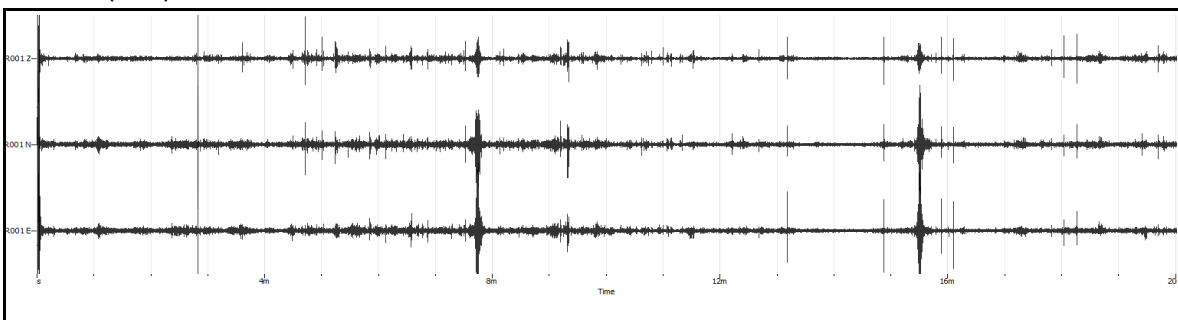
**CODICE LAVORO:** 1861-14

**CODICE PROVA:** MASW 4 - HVSR 244

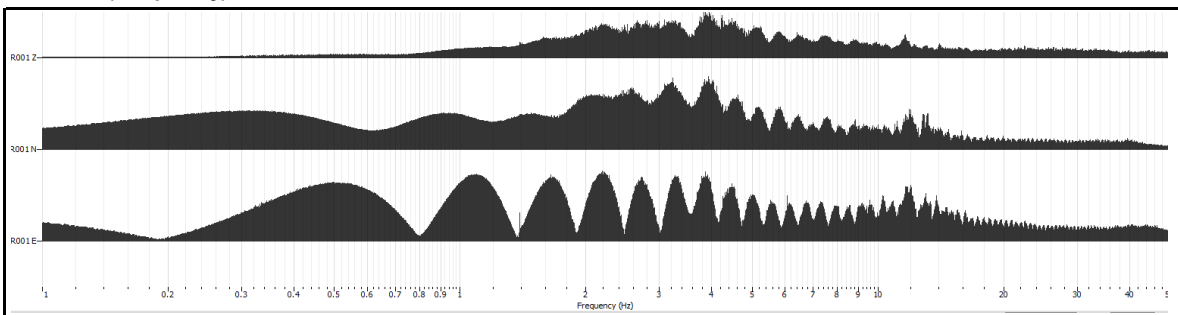
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	Sara SL 07
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	16:10:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Windows lenght (sec)	40
Overlap	5%
Smoothing windows	Konno & Ohmachi
Costant	40
Taper	0.5%
Low Pass	15 Hz
N° of windows	33

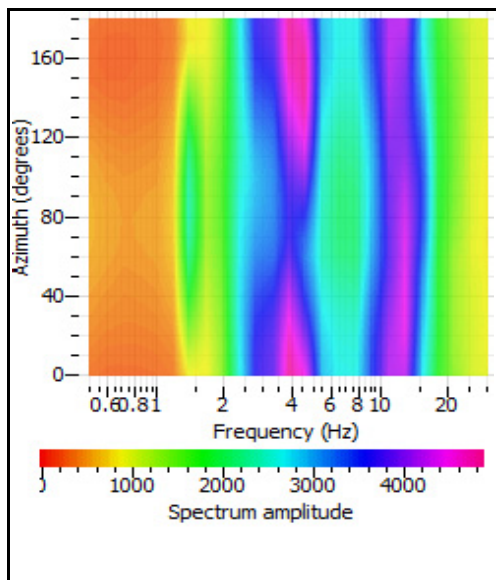
**RECORD (Time)**



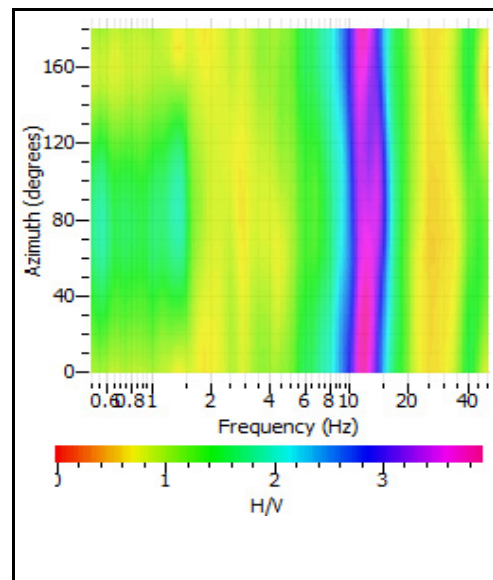
**RECORD (Frequency)**



**HORIZONTAL SPECTRUM ROTATE**



**HV ROTATE RESULTS**



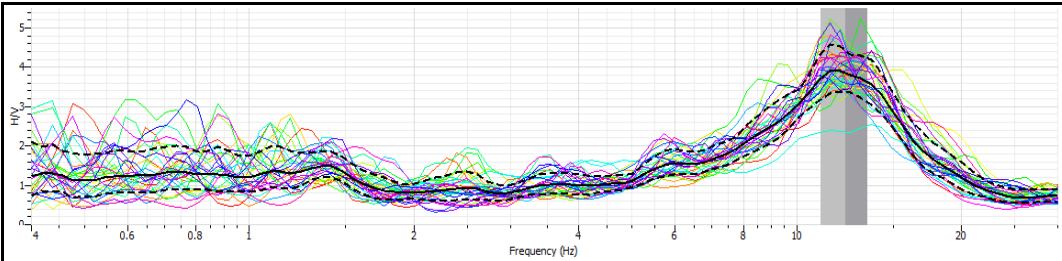


# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSr)

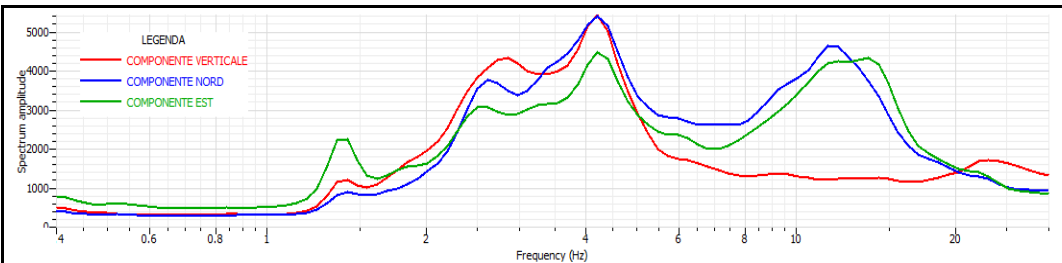
**CLIENTE** ITALFERR  
**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 4 - HVSr 244

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

**Max HVSr 12.3 ± 1.2 Hz. A0 = 3.91**



## SPETTRO SINGOLE COMPONENTI



### Criteri per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0	12.30		
Lw	20		
nw	71		
f0 > 10 / Lw	12.3 > 10/20	✓	
nc (f0) > 200	17466 > 200	✓	
σA(f) < 2 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 > 0.5 Hz	Exceeded 5 out of 0 times	✓	
σA(f) < 3 for 0.5 f0 < f < 2 f0 if f0 < 0.5 Hz			

### Criteri per un picco H/V chiaro

[almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

Exists f' in [f0/4, f0]   AH/V(f') < A0/2	0 Hz		✗
Exists f'' in [4f0, f0]   AH/V(f'') < A0/2	0 Hz		✗
A0 > 2	3.91 > 2	✓	
fpeak [AH/V(f) ± σA(f)] = f0 ± 5%	-12.3 < 0.05	✓	
σf < ε(f0)	1.2056 < 0.615		✗
σA(f0) < θ(f0)	0.567345 < 1.58	✓	

Lw	Window length
nW	Number of windows used in the analysis
nc = Lw nW f0	Number of significant cycles
f	Current frequency
f0	H/V peak frequency
σf	Standard deviation of H/V peak frequency
ε(f0)	Threshold value for the stability condition of σf < ε(f0)
A0	H/V peak amplitude at frequency f0
AH/V(f)	H/V curve amplitude at frequency f
f-	Frequency between f0/4 and f0 for which AH/V(f-) < A0/2
f+	Frequency between f0 and 4f0 for which AH/V(f+) < A0/2
σA(f)	Standard deviation of AH/V(f), σA(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
σlogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
θ(f0)	Threshold value for the stability condition σA(f) < θ(f0)

	Threshold value for σf and σA(f0)				
Freq. Range [Hz]	< 0.2	0.2 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 2.0	> 2.0
ε(f0) (Hz)	0.25 f0	0.20 f0	0.15 f0	0.10 f0	0.05 f0
θ(f0) for σA(f0)	3.00	2.50	2.00	1.78	1.58
Log θ(f0) for σlogH/V(f0)	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

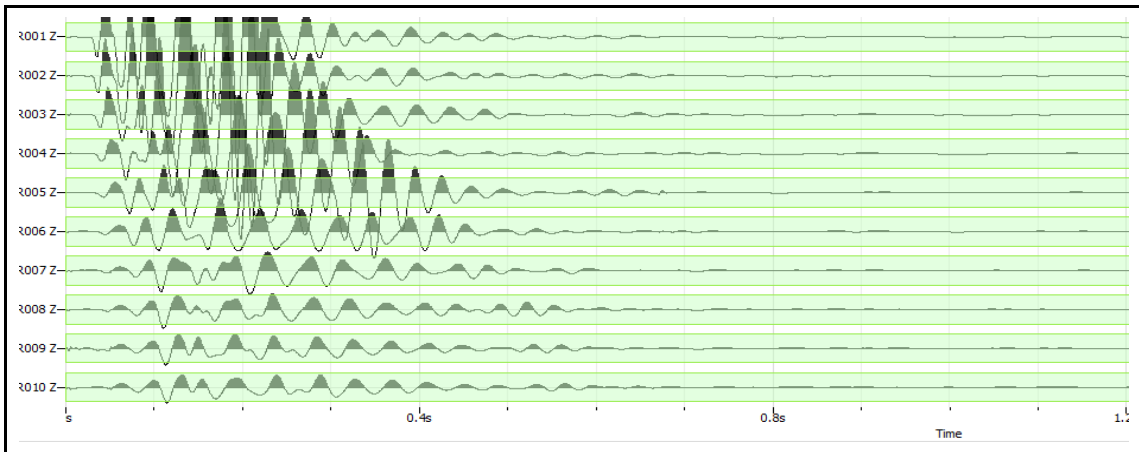
**CLIENTE** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 1861-14  
**CODICE PROVA** MASW 4 - HVSr 244

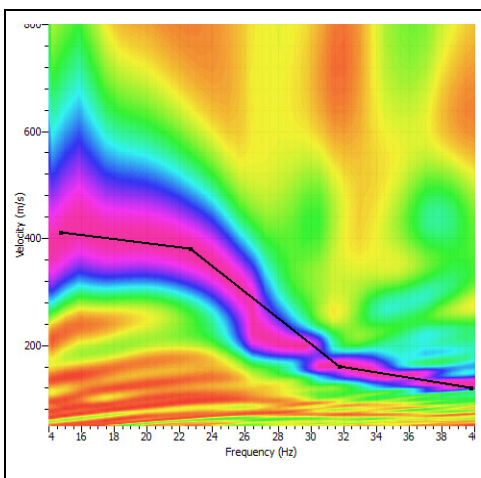
**LOCALITA':** CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:** 11/10/2018  
**LONGITUDINE:** 14.112013°  
**LATITUDINE:** 42.331125°  
**QUOTA (m.s.l.m.):** 41  
**AZIMUT** 100

**STRUMENTAZIONE** Geometrics GEODE  
**N°CANALI** 10  
**SPACING** da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)** 3  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

## REGISTRAZIONE



## SPETTRO F-K



## CURVA DI DISPERSIONE

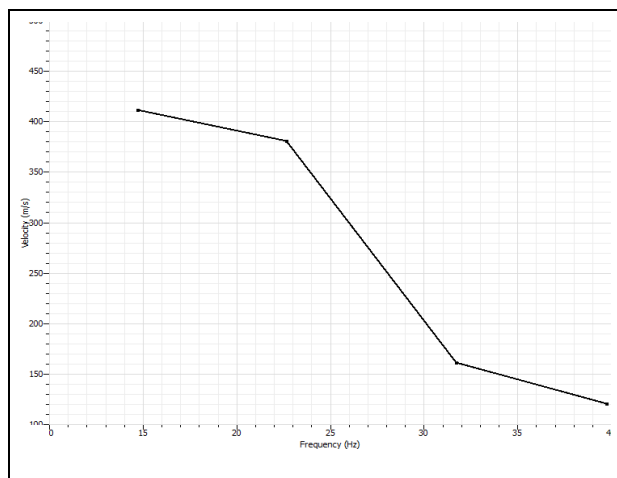


Fig 19

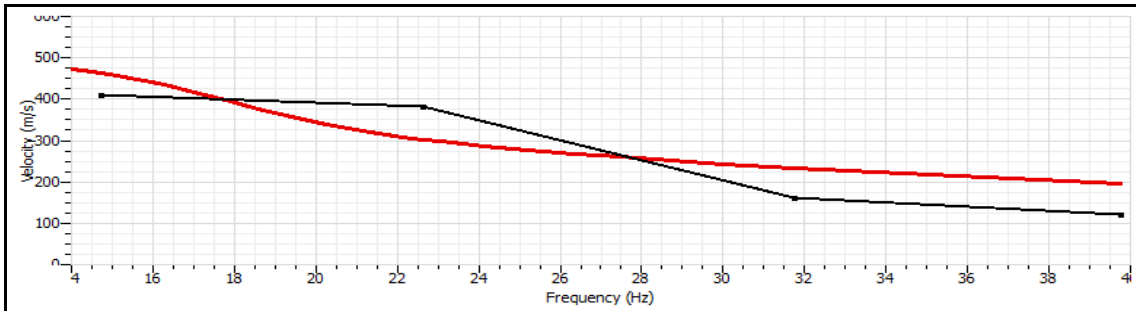
# ANALISI CONGIUNTA PROVA MASW - HVSR

**CLIENTE**            **ITALFERR**  
**CODICE LAVORO**   **1861-14**  
**CODICE PROVA**    **MASW 4 - HVSR 244**

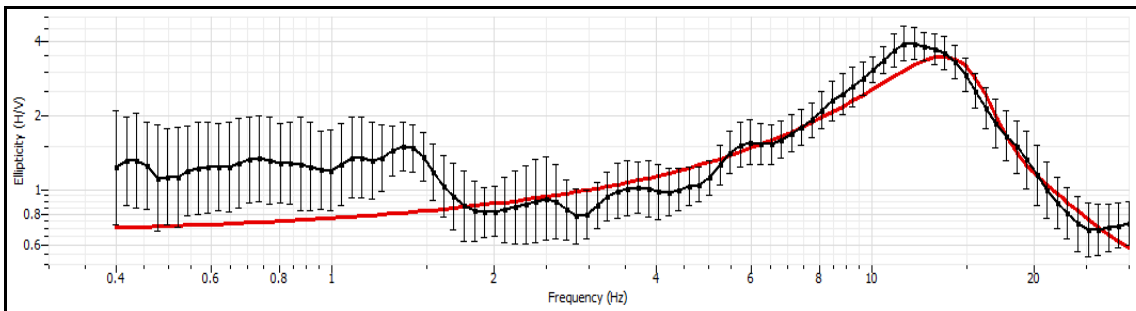
**LOCALITA':**            CHIETI SCALO - INTERPORTO  
**DATA PROVA:**        11/10/2018  
**LONGITUDINE:**      14.112013°  
**LATITUDINE:**        42.331125°  
**QUOTA (m.s.l.m.):**    41  
**AZIMUT**                100

**APPARECCHIATURA MASW:** Geometrics GEODE  
**APPARECCHIATURA HVSR:** SARA SL 07  
**N°CANALI**                10  
**SPACING**                da 1 a 5 m  
**RECORD TIME (Sec)**    3  
**SAMPLING (Sec)**        0.5

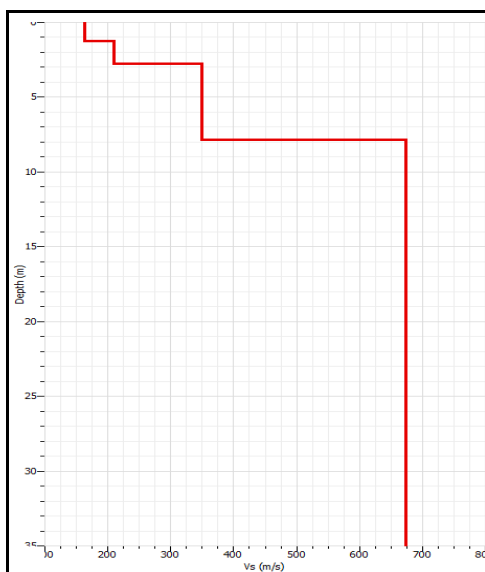
## CURVA DI DISPERSIONE PROVA MASW



## CURVA DI ELLIPTICITY PROVA HVSR



## PROFILO VELOCITA' ONDE DI TAGLIO



## CALCOLO VS30

SPESSORE	PROFONDITA'	Vs	SPESSORE/Vs
1.24	0	163	0.007607362
1.57	1.24	210	0.00747619
5.03	2.81	350	0.014371429
22.16	7.84	673	0.032927192
	30		0.062382173

$V_{seq} = 481$

Seismic classification of soils  
 (It. D.M. 17/01/2018)

**B**

Fig 20

**COMMITTENTE**  
**DOWN HOLE**  
 Località - Progetto  
 Data acquisizione

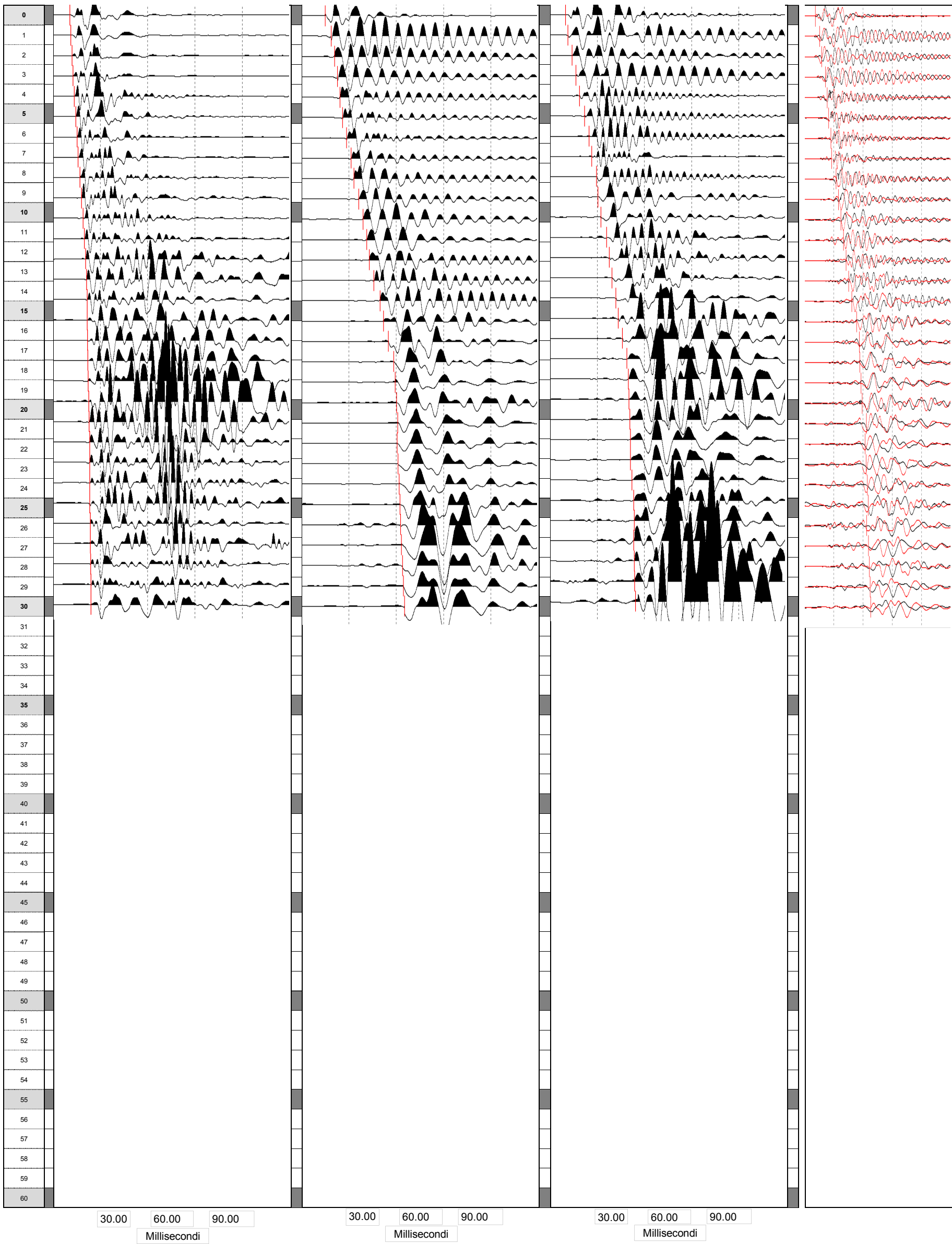
**ITALFERR**  
**S4 Pz**  
**CHIETI INTERPORTO**  
**23 GENNAIO 2018**

**SISMOGRAMMI**  
 Misura eseguita con sonda 3d costituita da due gruppi di sensori, con orientamento tridirezionale, a distanza di 1 m  
 Distanza bocca foro -shot = 2.2 m

Sulla medesima immagine sono riportati i sismogrammi relativi ai sensori verticali per le onde di compressione e orizzontali per le onde di taglio, posti ad una interdistanza di 1 m.



Profondità misura | SISMOGRAMMI ONDE DI COMPRESSIONE [Sensore geofonico] | SISMOGRAMMI ONDE DI TAGLIO [Energizzazione Positiva] | SISMOGRAMMI ONDE DI TAGLIO [Energizzazione negativa] | ONDE DI TAGLIO [En. Positiva-En. negativa] | STRATIGRAFIA





<b>COMMITTENTE</b>	<b>ITALFERR</b>
<b>DOWN HOLE</b>	<b>S4 Pz</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>CHIETI INTERPORTO</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>23 GENNAIO 2018</b>

<b>Metodologia Down Hole</b>
Differenziale
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro -shot = 2.2 m</b>



Falda 14.20 m

Profondità misura	Tempi		Vp Km/sec	Vs Km/sec	v	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²	STRATIGRAFIA	PARAMETRI INTERVALLARI MEDI						STIMA DEGLI ERRORI															
	Onde p msec	Onde s msec									Vp Km/sec	Vs Km/sec	v	γ T/m³	Edin Kg/cm²	Gdin Kg/cm²	Kdin Kg/cm²	Vp (km/sec)			Vs (km/sec)											
												min	media	max	ε	min	media	max	ε													
0	7.18	10.00	0.500	0.199	0.41	1.65	1875	667	3322	Da 0.00 a 0.95 Limo-sabb.-ghiaios.	0.50	0.20	0.41	1.65	1875.04	666.83	3322.19	0.50	0.50	0.50	0.000	0.20	0.20	0.20	0.001							
1	7.16	15.09	0.457	0.177	0.41	1.61	1450	514	2739	Da 0.95 a 6.30m Limo argilloso sabbioso	0.50	0.17	0.43	1.59	1377	481	3583	0.46	0.46	0.46	0.000	0.18	0.18	0.18	0.000							
2	8.30	18.74	0.415	0.155	0.42	1.55	1084	382	2216									0.41	0.41	0.41	0.000	0.15	0.16	0.16	0.002							
3	8.99	22.96	0.447	0.148	0.44	1.53	986	343	2671	1	0.50	0.17	0.43	1.59	1377	481	3583	0.45	0.45	0.45	0.000	0.14	0.15	0.16	0.009							
4	10.12	27.32	0.514	0.175	0.43	1.60	1431	499	3639									0.51	0.51	0.52	0.004	0.17	0.17	0.18	0.007							
5	11.03	31.47	0.669	0.199	0.45	1.65	1934	666	6649									0.67	0.67	0.67	0.002	0.19	0.20	0.20	0.005							
6	11.52	38.42	0.737	0.233	0.44	1.72	2746	950	8245	2	0.82	0.24	0.45	1.74	3077	1061	10616	0.73	0.74	0.74	0.002	0.23	0.23	0.24	0.009							
7	11.94	43.14	0.803	0.238	0.45	1.73	2902	1000	10023									0.80	0.80	0.80	0.000	0.24	0.24	0.24	0.003							
8	12.35	47.34	0.819	0.243	0.45	1.74	3042	1048	10484									0.82	0.82	0.82	0.004	0.24	0.24	0.24	0.001							
9	12.77	52.37	0.910	0.234	0.46	1.72	2801	956	13231	3	0.82	0.24	0.45	1.74	3077	1061	10616	0.91	0.91	0.91	0.003	0.21	0.23	0.25	0.019							
10	13.21	57.15	0.861	0.246	0.46	1.74	3136	1077	11746									0.86	0.86	0.86	0.003	0.24	0.25	0.25	0.002							
11	13.66	62.47	0.815	0.260	0.44	1.77	3512	1216	10340									0.81	0.82	0.82	0.004	0.24	0.26	0.29	0.024							
12	14.13	68.03	0.811	0.256	0.44	1.76	3398	1176	10242	4	1.04	0.23	0.47	1.71	2813	955	17827	0.81	0.81	0.82	0.004	0.24	0.26	0.29	0.030							
13	14.61	72.37	0.838	0.226	0.46	1.71	2590	887	11037									0.84	0.84	0.84	0.004	0.22	0.23	0.23	0.001							
14	15.10	75.92	0.967	0.202	0.48	1.66	2045	692	14895									0.96	0.97	0.97	0.003	0.18	0.20	0.21	0.017							
15	15.61	79.63	1.037	0.205	0.48	1.66	2105	711	17291	5	1.04	0.23	0.47	1.71	2813	955	17827	1.03	1.04	1.04	0.003	0.20	0.20	0.21	0.006							
16	16.19	83.12	1.063	0.219	0.48	1.69	2446	828	18411									1.06	1.06	1.06	0.001	0.22	0.22	0.22	0.003							
17	16.80	86.80	1.065	0.247	0.47	1.74	3183	1081	18719									1.06	1.07	1.07	0.004	0.24	0.25	0.25	0.005							
18	17.42	90.73	1.245	0.288	0.47	1.81	4507	1531	26610	Da 13.00 a 19.00 Limo argilloso	1.87	0.49	0.46	2.06	14740	5035	68258	1.24	1.25	1.25	0.001	0.27	0.29	0.30	0.016							
19	18.04	95.30	1.402	0.358	0.47	1.91	7345	2507	34999									1.40	1.40	1.41	0.004	0.35	0.36	0.36	0.003							
20	18.63	100.22	1.738	0.440	0.47	2.01	11644	3972	56770									1.73	1.74	1.75	0.011	0.42	0.44	0.47	0.023							
21	19.17	105.89	1.869	0.489	0.46	2.07	14729	5033	66923	Da 19.00 a 22.60 Ghiaia sabbiosa debolmente limosa	1.87	0.49	0.46	2.06	14740	5035	68258	1.84	1.87	1.91	0.036	0.47	0.49	0.52	0.022							
22	19.75	110.44	1.885	0.508	0.46	2.09	16056	5495	68332									1.88	1.88	1.89	0.003	0.50	0.51	0.51	0.006							
23	20.29	114.08	1.938	0.518	0.46	2.10	16794	5745	72728									1.93	1.94	1.94	0.003	0.52	0.52	0.52	0.002							
24	20.79	117.41	1.996	0.517	0.46	2.10	16704	5704	77576	Da 22.60 a 23.70 Argilla e Limo	1.93	0.51	0.46	2.10	16621	5677	76833	2.00	2.00	2.00	0.000	0.51	0.52	0.52	0.002							
25	21.29	119.82	1.999	0.516	0.46	2.10	16651	5686	77806									2.00	2.00	2.00	0.004	0.51	0.52	0.52	0.002							
26	21.80	122.04	2.008	0.513	0.47	2.09	16453	5615	78568									2.01	2.01	2.01	0.002	0.51	0.51	0.52	0.005							
27	22.36	124.21	2.032	0.510	0.47	2.09	16288	5554	80621	Da 23.70 a 28.05 Ghiaia sabbiosa a tratti limosa	1.93	0.51	0.46	2.10	16621	5677	76833	2.00	2.03	2.09	0.045	0.50	0.51	0.52	0.007							
28	22.93	126.39	2.020	0.518	0.46	2.10	16798	5734	79682									1.97	2.02	2.09	0.058	0.52	0.52	0.52	0.002							
29	23.49	128.42	1.954	0.513	0.46	2.09	16445	5620	73984									1.95	1.95	1.96	0.004	0.51	0.51	0.51	0.001							
30	24.01	130.46	1.905	0.497	0.46	2.08	15310	5231	69876	Da 28.05 a 30.00 Argilla limosa. Estremamente consistente.	1.93	0.51	0.46	2.10	16621	5677	76833	1.90	1.90	1.91	0.005	0.49	0.50	0.50	0.004							
31																																
32																																
33																																
34																																
35																																
36																																
37																																
38																																
39																																
40																																
41																																
42																																
43																																
44																																
45																																
46																																
47																																
48																																
49																																
50																																
51																																
52																																
53																																
54																																
55																																
56																																
57																																
58																																
59																																
60																																

<b>Tp</b> Tempi onde di compressi	millisecondi	<b>γ</b>	Peso di volume	T/m³
<b>Ts</b> Tempi onde di taglio	millisecondi	<b>Edin</b>	Modulo di Elasticità dinamico	Kg/cm
<b>Vp</b>	Velocità onde di compressi	<b>Gdin</b>	Modulo di Taglio dinamico	Kg/cm
<b>Vs</b>	Velocità onde di taglio	<b>Kdin</b>	Modulo di Compressibilità dinamico	Kg/cm
<b>v</b>	Coefficiente di Poisson	<b>■</b>	Campioni di laboratorio	

CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI (NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI - D.M. del 17 gennaio 2018)

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1, H} \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

$V_{s,eq} = 262$  m/sec  
 $G_{0,eq} = 1309$  Kg/cm²  
**CATEGORIA SUOLO = C**

**COMMITTENTE**  
**DOWN HOLE**  
**Località**  
**Data acquisizione**

**ITALFERR**  
**S4 Pz**  
**CHIETI INTERPORTO**  
**23 GENNAIO 2018**

**LOG DEI PARAMETRI ELASTICI**  
**Progressivo**  
**Distanza bocca foro -shot = 2.2 m**



**Stratigrafia sintetica**

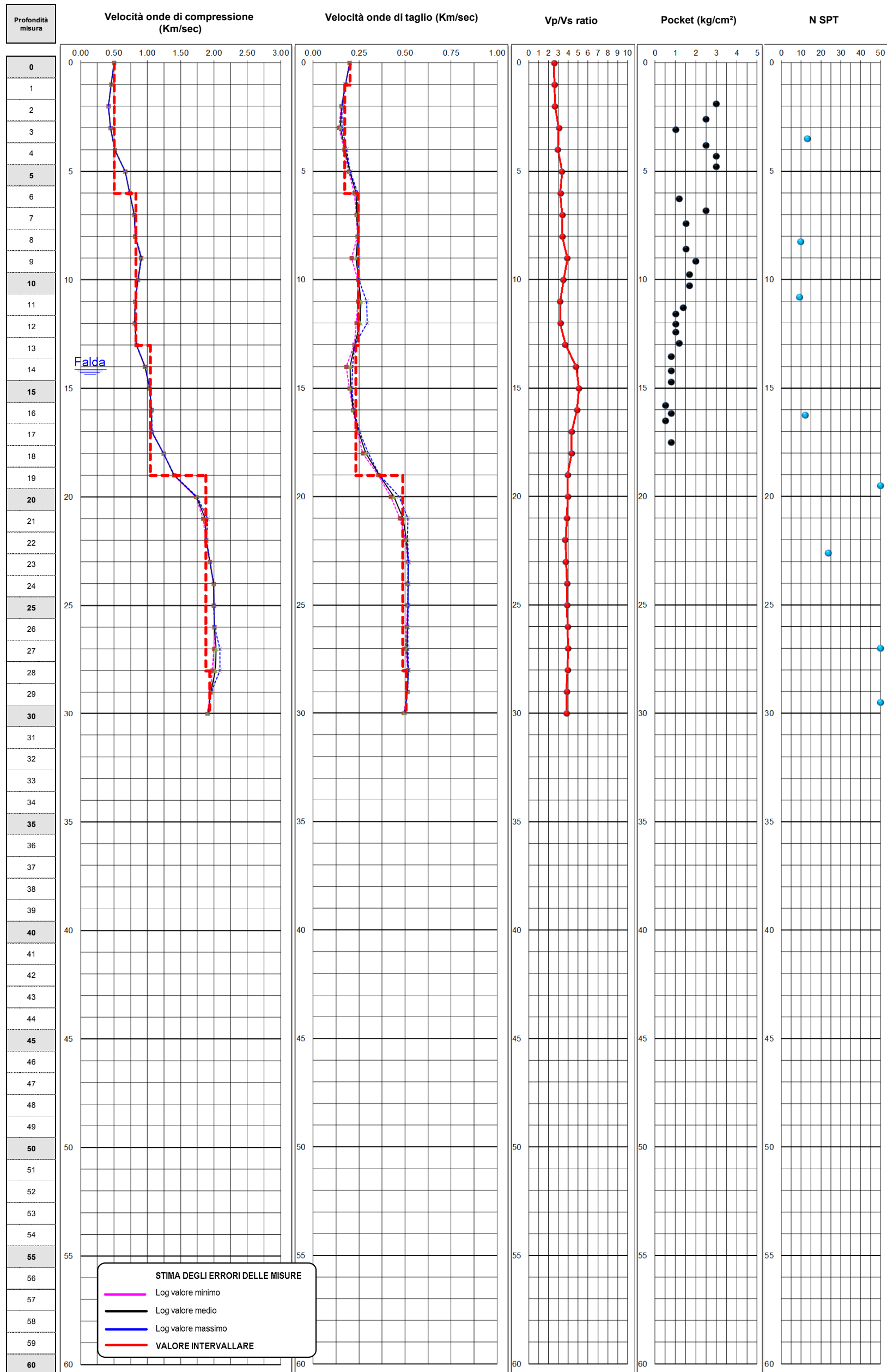


Fig. 23

<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>S4 Pz</b>
<b>CHIETI INTERPORTO</b>
<b>23 GENNAIO 2018</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro -shot = 2.2 m</b>

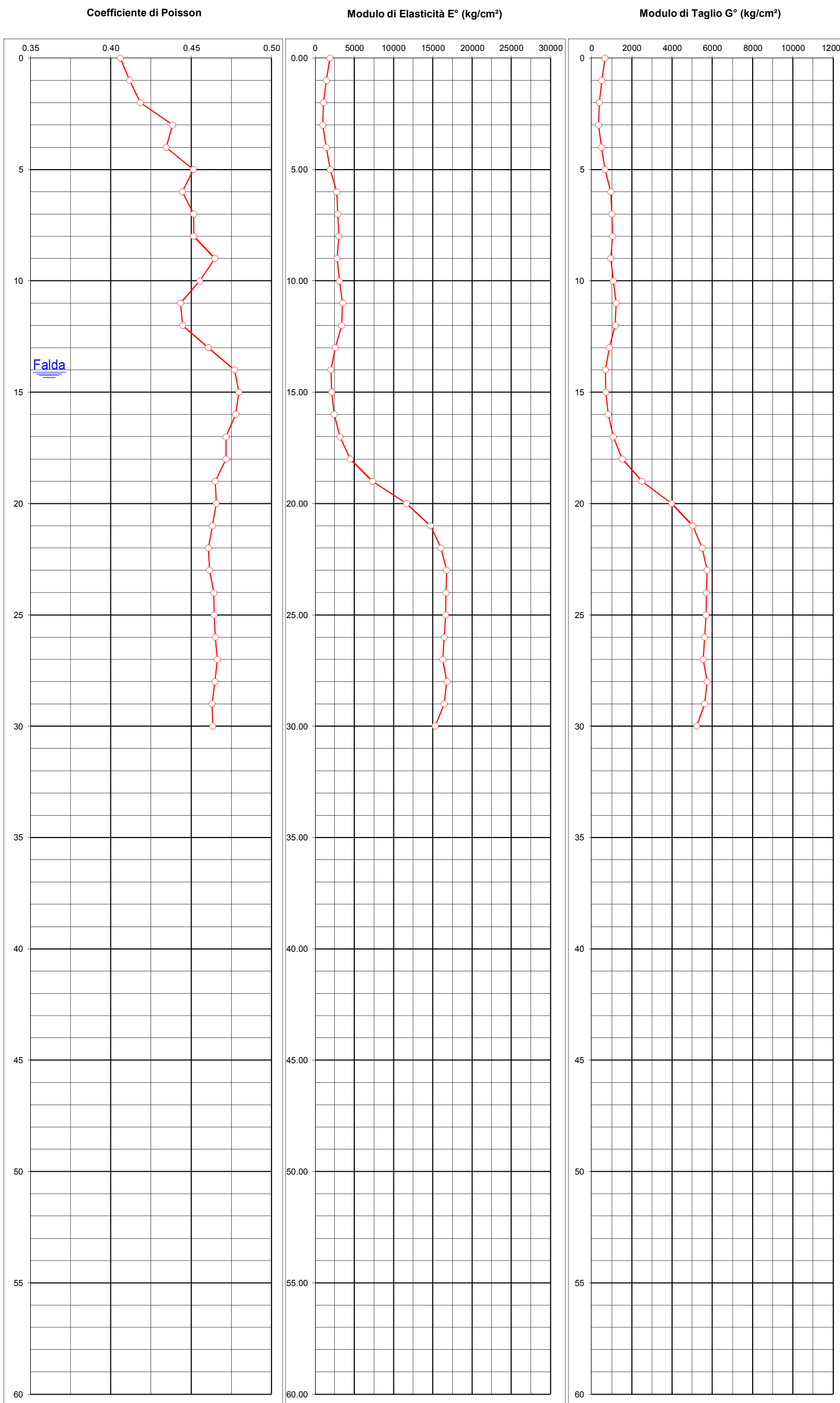


PROGEO s.r.l.  
Via Tevere 158  
47100 Forlì  
tel. 0543 72580  
fax 0543 721488  
mail proggeo@gmail.com  
www.proggeo.it

**Stratigrafia  
sintetica**

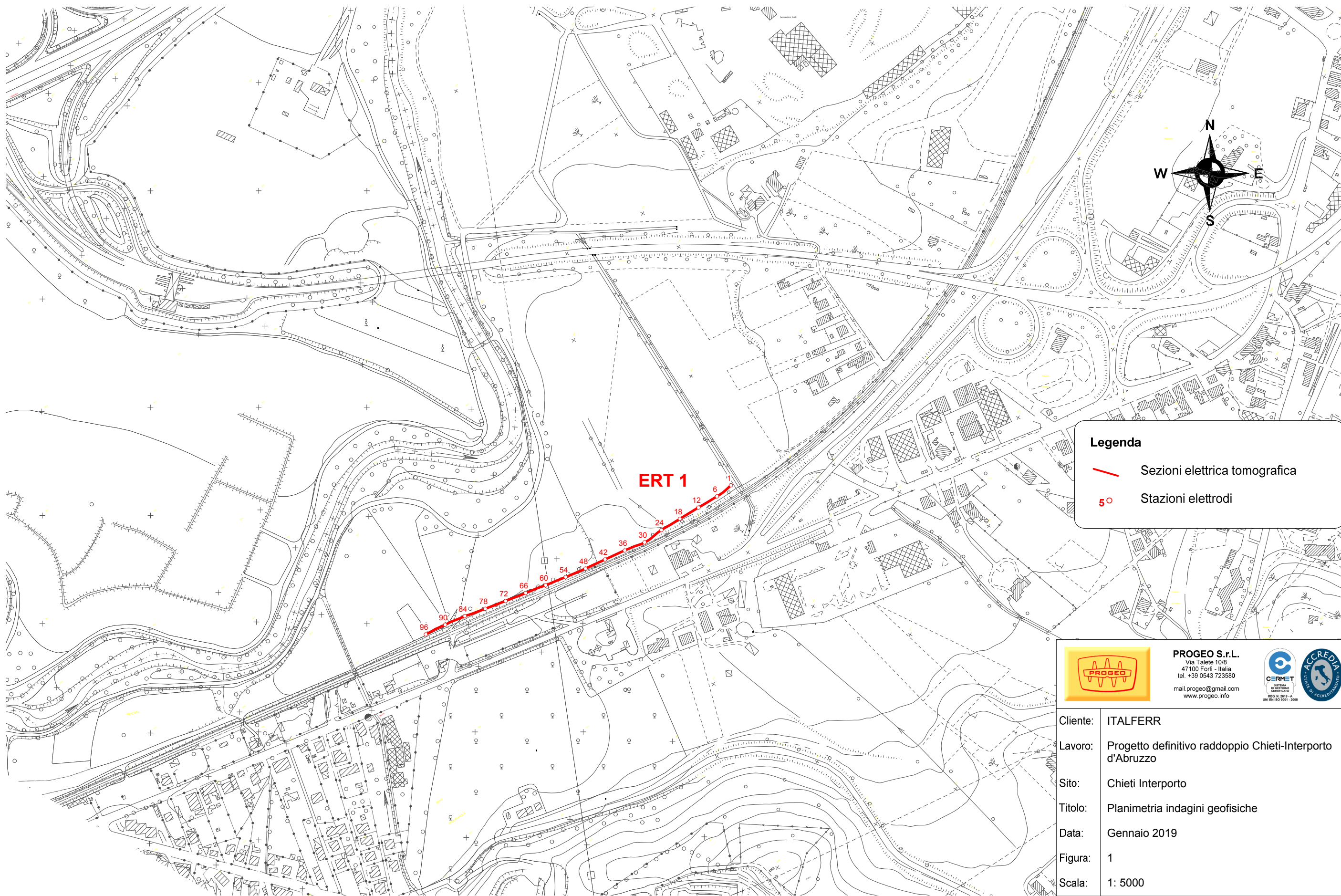
<b>Profondità misura</b>
------------------------------

0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60





Da 0.00 a 0.95 Limo- Da
0.95 a 6.30m Limo argilloso sabbioso
Da 6.30 a 13.00 Argille limose
Da 13.00 a 19.00 Limo argilloso
Da 19.00 a 22.60 Ghiaia sabbiosa debolmente limosa
Da 22.60 a 23.70 Argilla e Limo
Da 23.70 a 28.05 Ghiaia sabbiosa a tratti limosa
Da 28.05 a 30.00 Argilla limosa. Estremamente

Fig. 24



**Legenda**

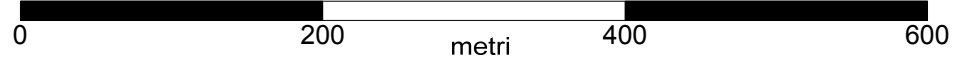
-  Sezioni elettrica tomografica
-  Stazioni elettrodi



**PROGEO S.r.L.**  
 Via Talette 10/S  
 47100 Forlì - Italia  
 tel. +39 0543 723580  
 mail: progeo@gmail.com  
 www.progeo.info




Cliente:	ITALFERR
Lavoro:	Progetto definitivo raddoppio Chieti-Interporto d'Abruzzo
Sito:	Chieti Interporto
Titolo:	Planimetria indagini geofisiche
Data:	Gennaio 2019
Figura:	1
Scala:	1: 5000





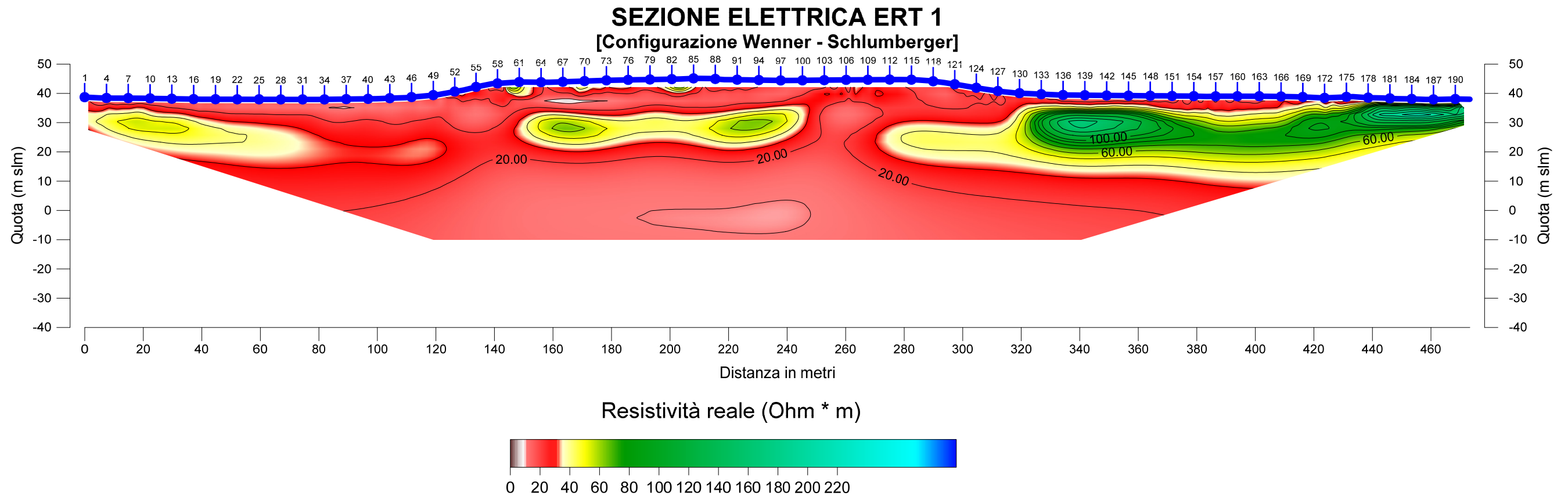


Fig. 26  
Scale 1 : 1500