

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



LINEA SIRACUSA - RAGUSA - GELA

U.O. GEOLOGIA TECNICA, DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO

PROGETTO DEFINITIVO

METROFERROVIA DI RAGUSA.

LOTTO 1B

NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI

INDAGINI GEOFISICHE

SCALA:

-

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

RS3Y 1B D 69 IG GE0005 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	G. Pulelli <i>G. Pulelli</i>	Luglio 2021	S. Giugliano <i>S. Giugliano</i>	Luglio 2021	S. Vanfiori <i>S. Vanfiori</i>	Luglio 2021	M. COMEDINI Luglio 2021 Dott. Geol. Massimo Comedini Ordine dei Geologi del Lazio n° 2103 <i>Massimo Comedini</i>

File: RS3Y.1B.D.69.IG.GE0005.001.A

n. Elab.: X

Sommario

1	PREMESSA.....	3
2.	AZIONE SISMICA	4
2.1	CATEGORIE DI SUOLO DI FONDAZIONE	4
3.	MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (M.A.S.W.).....	6
	3.1 <i>Descrizione del metodo</i>	6
	3.2 <i>Modalità di acquisizione</i>	8
	3.3 <i>Elaborazione dati e stima della curva di dispersione</i>	9
4	INDAGINI DI SISMICA PASSIVA	13
4.1	METODOLOGIA HVSR (HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO).....	13
	4.1.1 <i>Generalità</i>	13
	4.1.2 <i>Basi teoriche</i>	13
	4.1.3 <i>Attrezzature e modalità esecutive</i>	15
	4.1.4 <i>Elaborazione dati</i>	15
5	CONCLUSIONI	19



PROGETTO DEFINITIVO
METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B
NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI

INDAGINI GEOFISICHE

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3Y	1B	D 69 IG	GE 0005 001	A	3 di 19

1 PREMESSA


Su incarico di ITALFERR S.P.A. sono state eseguite indagini geofisiche per la progettazione definitiva della Metroferrovia di Ragusa. In particolare, l'area soggetta ad indagini geofisiche è quella della Stazione di Cisternazzi/Ospedale. Per lo studio dei siti in esame con finalità di classificazione sismica si sono applicate le procedure di indagine più adeguate al fine della progettazione in oggetto.

Le indagini eseguite hanno riguardato:

- L'esecuzione di una prova MASW e di una prova di sismica passiva HVSR presso l'area della stazione di Cisternazzi/Ospedale, nell'intorno del sondaggio geognostico S1 eseguito nella presente fase progettuale;

La misura MASW è stata acquisita utilizzando 24 sensori geofonici a 4.5 Hz di frequenza propria, con array simmetrico ed interdistanze pari a 2.5 m e shot esterni di 5.00m e 7.5m.

Al centro dello stendimento MASW è stata realizzata una misura HVSR di sismica passiva con tempo di acquisizione di 30 minuti.

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

Si riportano di seguito le foto scattate sul sito e durante l'attività di acquisizione dati



Figura 1-1 – Esecuzione prove MASW 1 e HVSR149

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 $< 10^{-6}$) 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.

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

D - Depositi 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 Descrizione del metodo

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

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

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

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

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

Quindi, nel caso di mezzo eterogeneo, le onde superficiali non hanno una singola velocità, ma una velocità di fase che è funzione della frequenza: tale fenomeno, dipendente dalla distribuzione

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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.

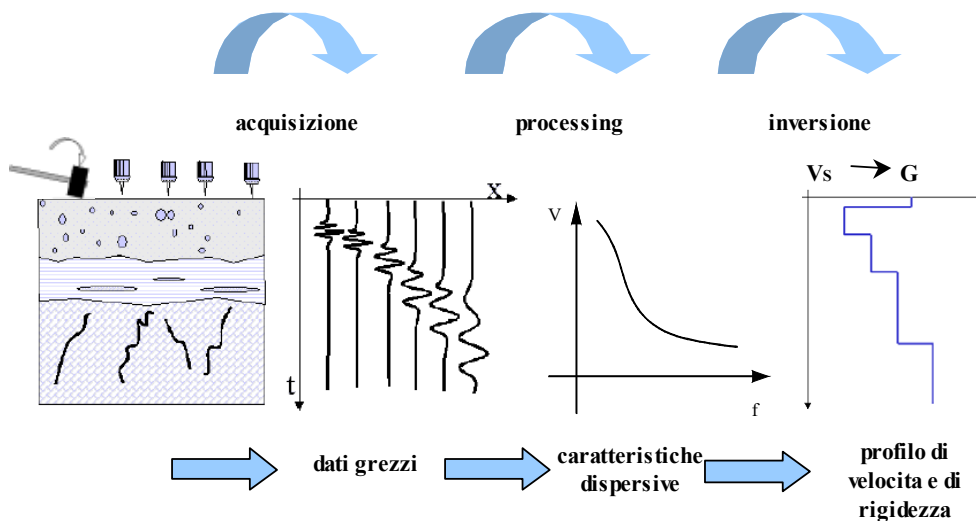


Figura 3.1 Fasi del metodo delle onde superficiali (SWM).

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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 rigidità 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.

3.2 Modalità di acquisizione

La 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.

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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 (12 Kg circa) 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.

3.3 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 **WINMASW Academy ver 9.0**.

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 step 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.

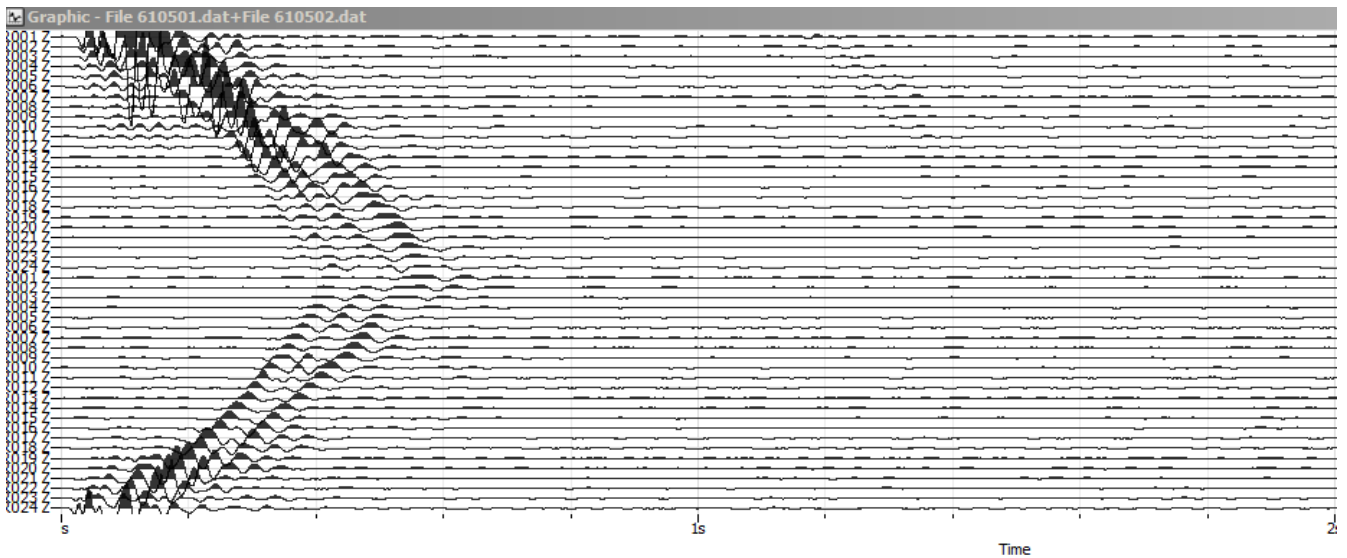


Figura 3.2 – Esempio di registrazione MASW

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

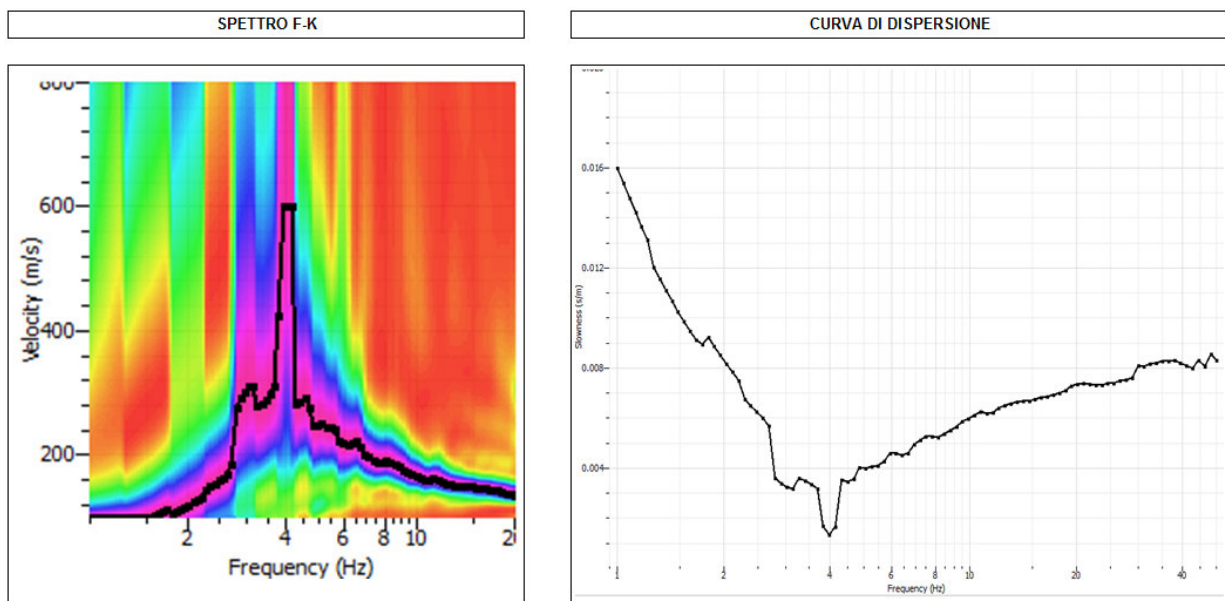


Figura 3.3 – Spettro FK e Curva di dispersione

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.

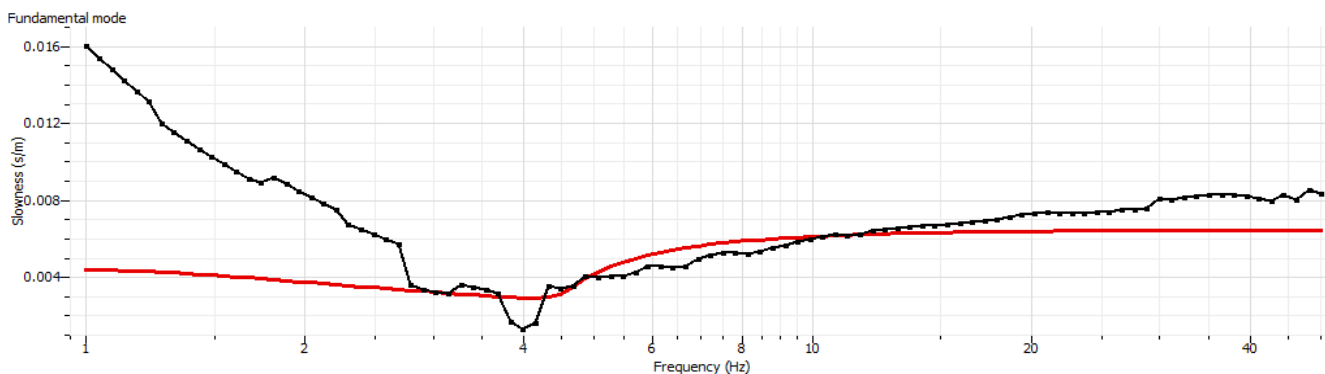


Figura 3.4 – Inversione numerica

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 Vs				
Layer	Profondità m	Spessori m	Vs m/sec	Deviazione m/sec
1	0.10	0.10	312	104
2	0.30	0.20	289	220
3	0.60	0.30	130	296
4	0.80	0.20	171	433
5	2.80	2.00	247	515
6	10.20	7.40	438	779
7	17.70	7.50	500	361
8	36.00	18.30	351	448
9	63.30	27.30	786	1003
10	124.50	61.20	639	1339
11	375.70	251.20	1011	1260
12			1376	1967

NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI
CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI
(D.M. 17/01/2018)

H_{bedrock}

0 m

V_{Seq}

376 m/sec

Categoria suolo

B

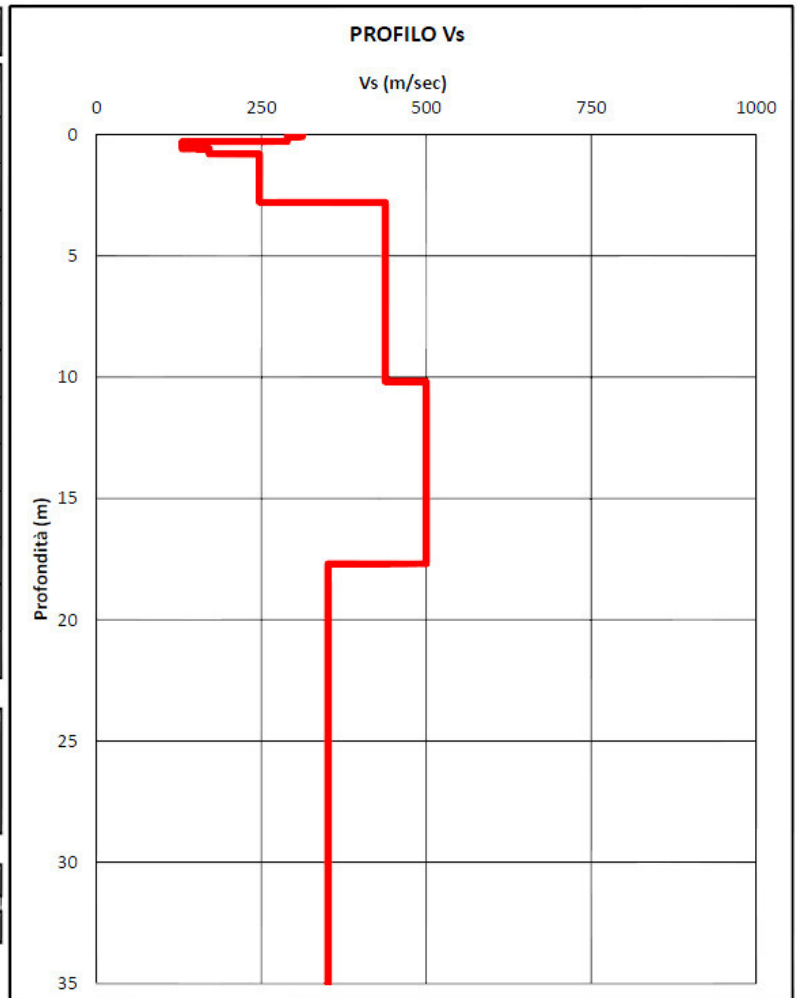



Figura 3.5 – Log Vs_{eq}

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 Vs_{eq} con la classificazione sismica del suolo secondo le normative vigenti.

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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 soffici 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 (ρ_1 e ρ_2) e le diverse velocità delle onde sismiche (V_1 e V_2).

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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 (λ) 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 (Ibs-Von Seht e Wohleberg, 1999).

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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).

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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.

Spessori¹

¹ 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.

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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.

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 rigidezza 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:

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

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

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)² 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 attendibilità³ 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.

² Arai H. e Tokimatsu, 2004. S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum. Bull. Seismol. Soc. Am., 94, p. 53-63

³ Per l'attendibilità si fa riferimento alle specifiche SESAME (2005)

	PROGETTO DEFINITIVO METROFERROVIA DI RAGUSA. LOTTO 1B NUOVA STAZIONE CISTERNAZZI					
	INDAGINI GEOFISICHE	COMMESSA RS3Y	LOTTO 1B	CODIFICA D 69 IG	DOCUMENTO GE 0005 001	REV. A

5 CONCLUSIONI

Per la caratterizzazione sismica dei suoli, in cui si dovranno realizzare le opere per la progettazione definitiva della Metroferrovia di Ragusa, sono state realizzate delle indagini geofisiche.

Le indagini geofisiche di cui sopra sono le seguenti:

- n°1 prova MASW e n°1 prova di sismica passiva HVSR presso l'area della stazione di Cisternazzi/Ospedale, nell'intorno del sondaggio geognostico S1 eseguito nella presente fase progettuale;

La prova HVSR indica una frequenza di sito a rumore naturale di 18.133 Hz, indicativa di una interfaccia con un materiale rigido, presente nei primi metri dalla superficie.

I dati di questa prova sono poi stati utilizzati congiuntamente a quelli della prova MASW al fine di verificare e validare reciprocamente il valore dell'output che consiste, in estrema sintesi, in un log in velocità delle onde di taglio.

Analizzando il log di velocità delle onde di taglio ricavato dalla prova congiunta MASW/HVSR si può notare che si ha un aumento graduale della velocità (ad esclusione di livelletti leggermenti più veloci) delle onde di taglio a partire da 130 m/sec per le porzioni più superficiali fino a circa 500 m/sec che si riscontra a profondità di circa 7 metri fino a circa 18 metri dove troviamo una diminuzione della velocità ad onde di taglio fino a 351m/sec. Da questo punto in poi i gradienti di velocità fra i singoli sismostrati iniziano ad essere significativi con "gradini" di almeno 150-200 m/sec

Indicativamente non vi è il passaggio al bed rock sismico (800 m/sec) nel punto in cui si è realizzata la prova MASW/HVSR e che la **$V_{s_{eq}}$ è di 376 m/sec** con categoria del suolo di classe **B**

MAPPA INDAGINE CONGIUNTA MASW E HVSR

Committente: ITALFERR
CODICE LAVORO: 1982-02
CODICE PROVA: MASW1+HVSr 149

LOCALITA': RAGUSA
DATA PROVA: 21/10/2019
LONGITUDINE: 14.686147°
LATITUDINE: 36.903712°
QUOTA (m. s.l.m.): 588

STRUMENTAZIONE SARA SL 06
TERRENO DI MISURA: Naturale
ACCOPIAMENTO: Appoggiato al terreno
ORIENTAMENTO: Nord
CONDIZIONI METEO: Nuvoloso

FOTO AEREA (Google Earth)



FOTO AREA DI INDAGINE



RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSr)

Committente: ITALFERR

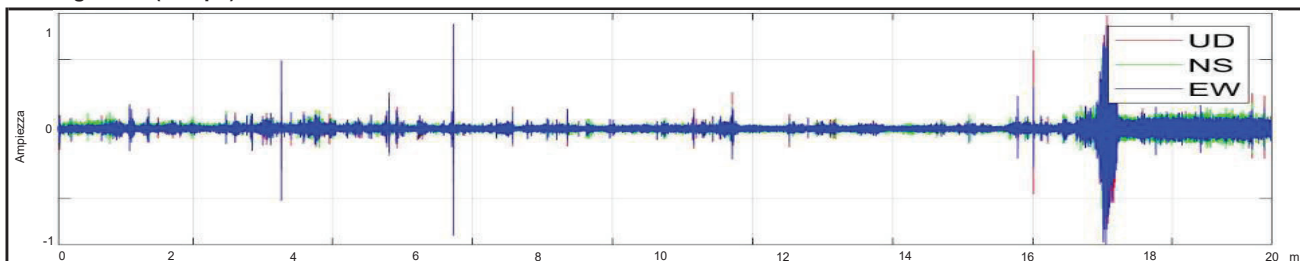
CODICE LAVORO: 1982-02
CODICE PROVA: MASW1+HVSr 149

LOCALITA': RAGUSA
DATA PROVA: 21/10/2019

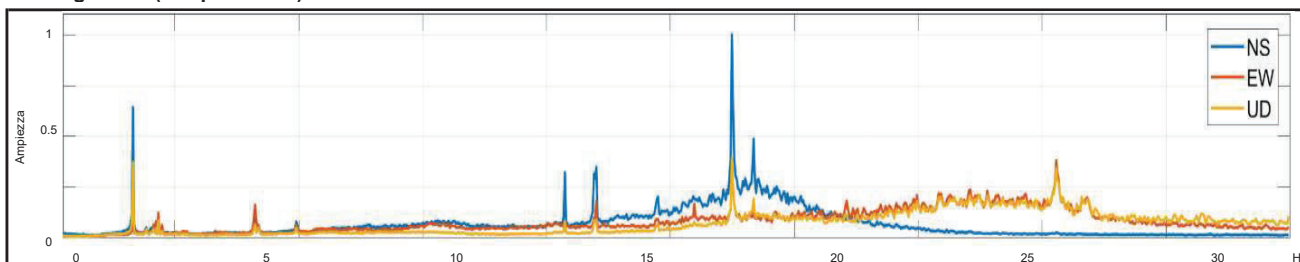
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	SARA SL 06
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	09:53:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Sampling frequency (Hz):	100
Window length (sec):	20
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]:	0.5Hz
Length of analysed dataset (min):	20.0
Tapering (%):	5
Smoothing (%):	15

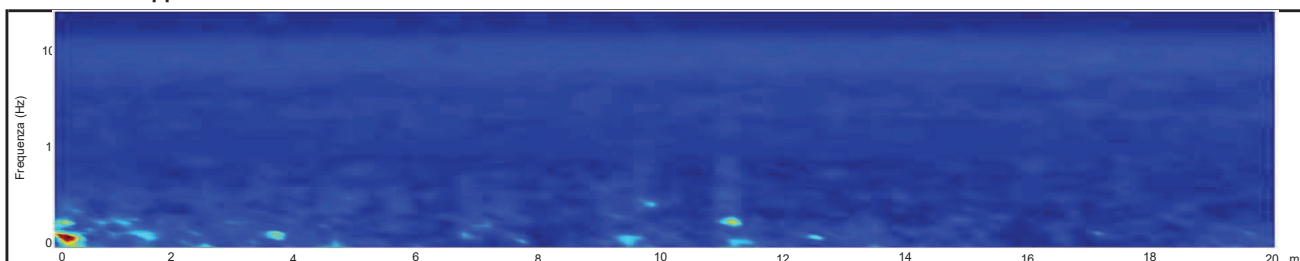
Sismogrammi (Tempo)



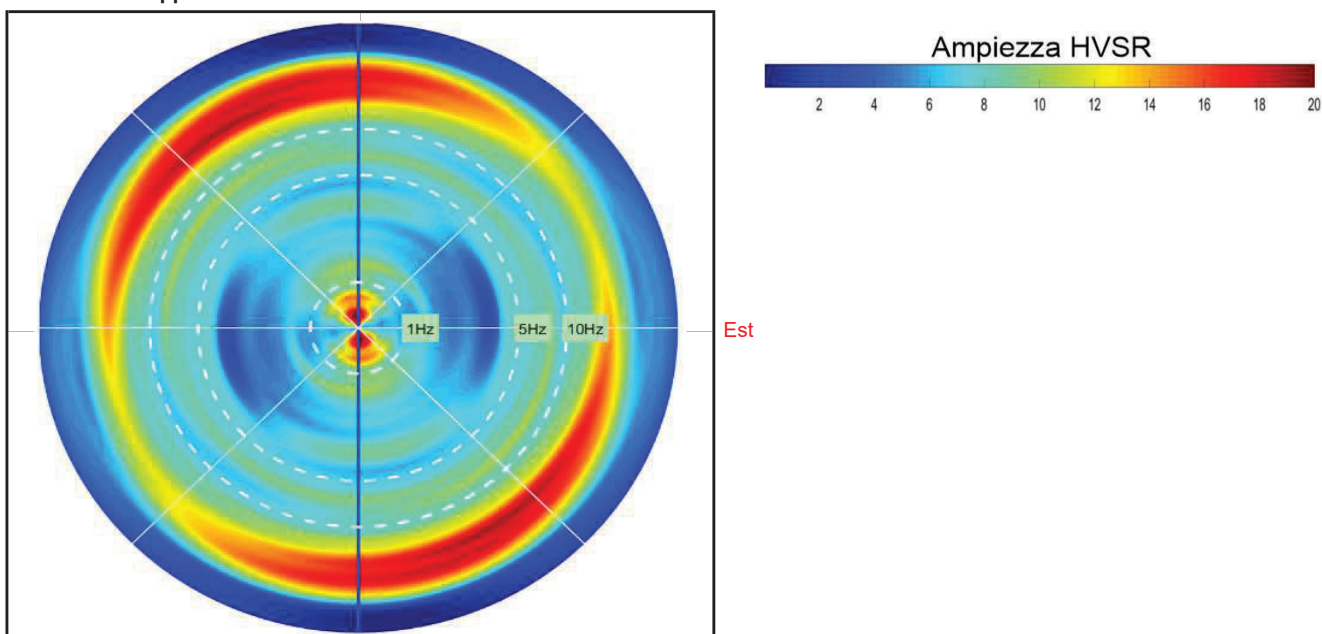
Sismogrammi (Frequenza Hz)



Persistenza rapporto HVSr



Direzionalità rapporto HVSr



RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

Committente:

ITALFERR

CODICE LAVORO
CODICE PROVA

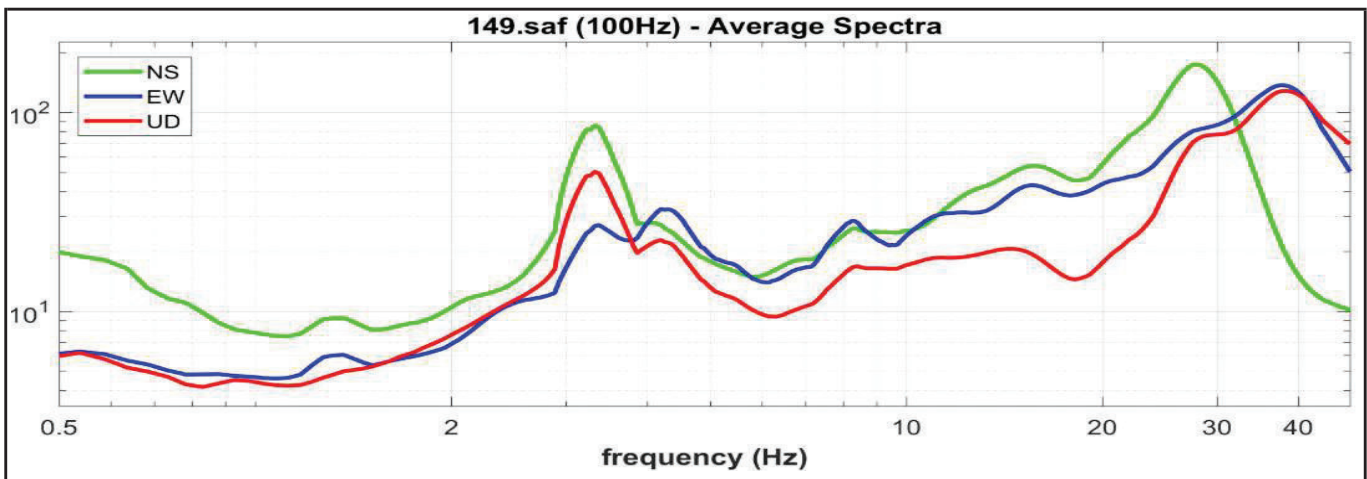
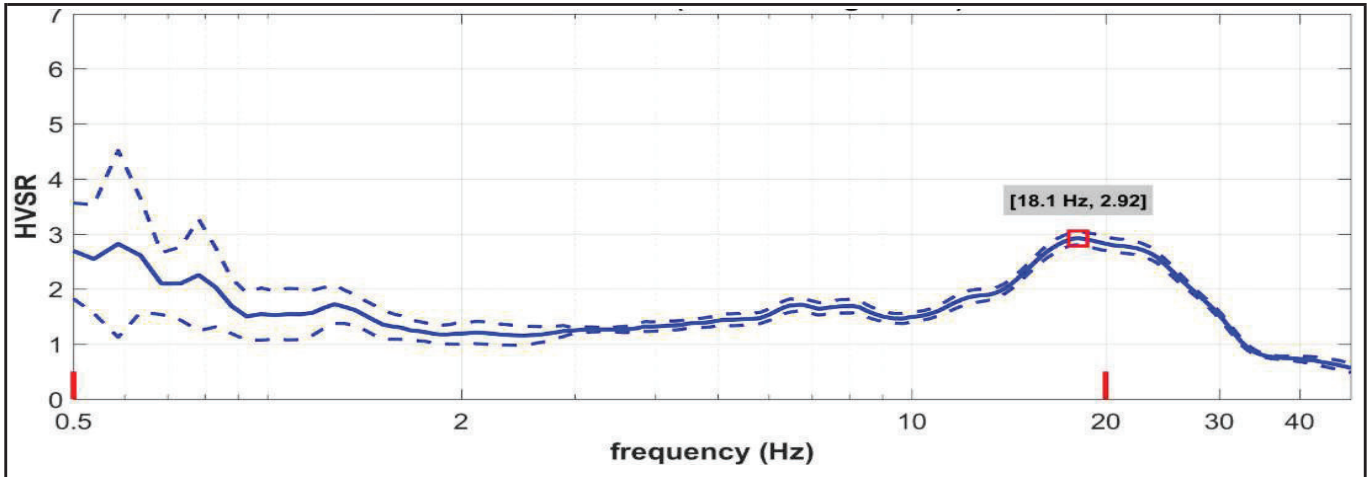
1982-02
MASW1+HVSR 149

LOCALITA':
DATA PROVA:

RAGUSA
21/10/2019

RAPPORTO SPETTRALE H/V

Max HVSR 18.133 ± 8.4 Hz. A0 = 2.9 ± 0.1



Criteri per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0 (Hz)	18.133
Lw (Sec)	20
nw	104
#1. [f0 > 10/Lw]: 18.133 > 0.5	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 38079 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0]	<input checked="" type="checkbox"/>

Criteri per un picco H/V chiaro

[almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

#1. [exists f- in the range [f0/4, f0] AH/V(f-) < A0/2]: yes, at frequency 4.6Hz	<input checked="" type="checkbox"/>	
#2. [nc > 200]: 38079 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>	
#3. [A0 > 2]: 2.9 > 2	<input checked="" type="checkbox"/>	
#4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]:		<input type="checkbox"/>
#5. [sigmaAf < epsilon(f0)]: 8.431 > 0.907		<input type="checkbox"/>
#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.230 < 1.58	<input checked="" type="checkbox"/>	

Lw	Window lenght
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 εA(f) < θ(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)

Criterio soddisfatto
 Criterio non soddisfatto

In accordo con SESAME Guidelines 2005

MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

Committente: ITALFERR

CODICE LAVORO 1982-02
CODICE PROVA MASW1+HVSr 149

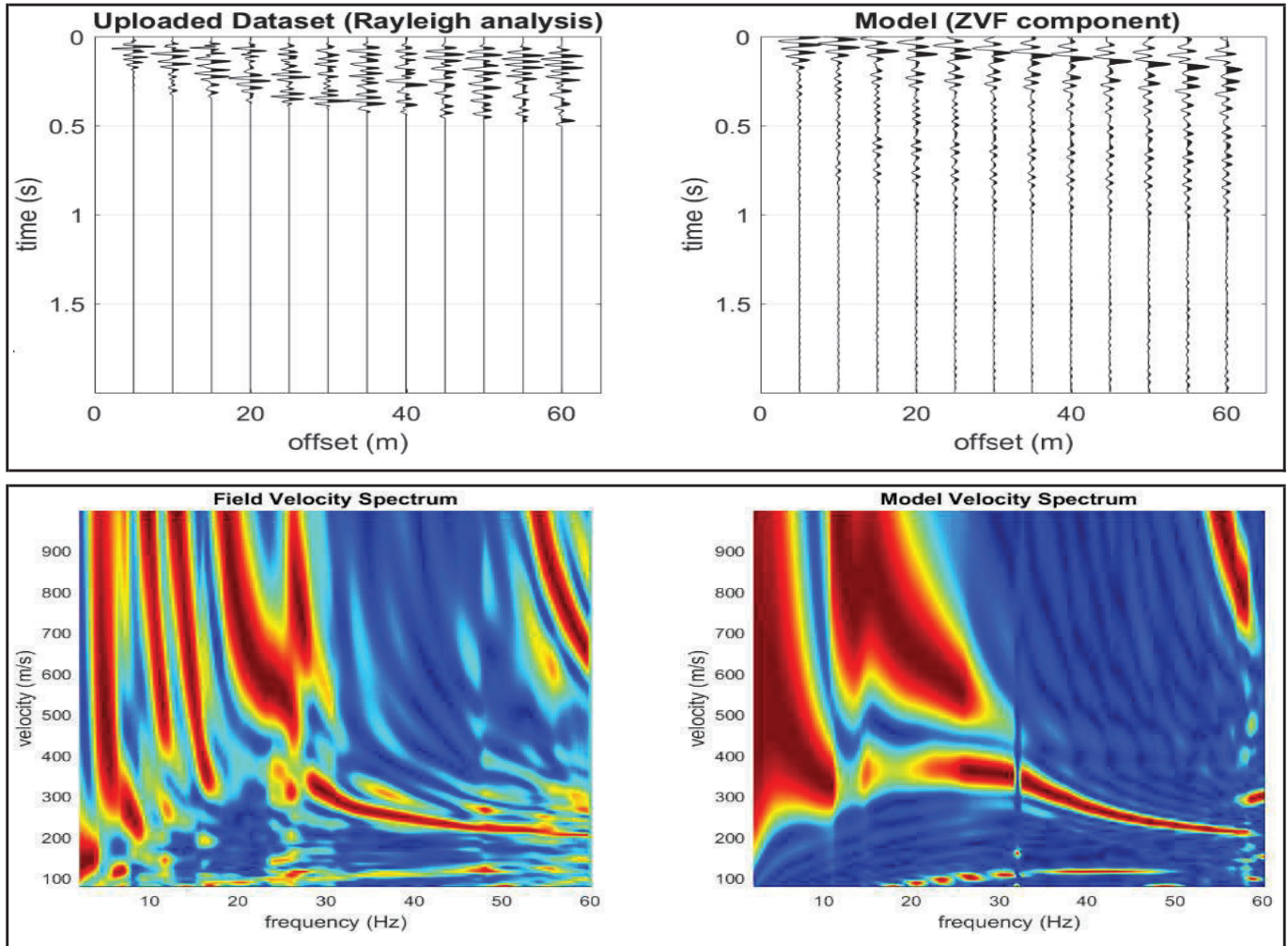
LOCALITA': RAGUSA
DATA PROVA: 21/10/2019

STRUMENTAZIONE Geometrics GEODE
N°CANALI 12+12
SPACING 5 m

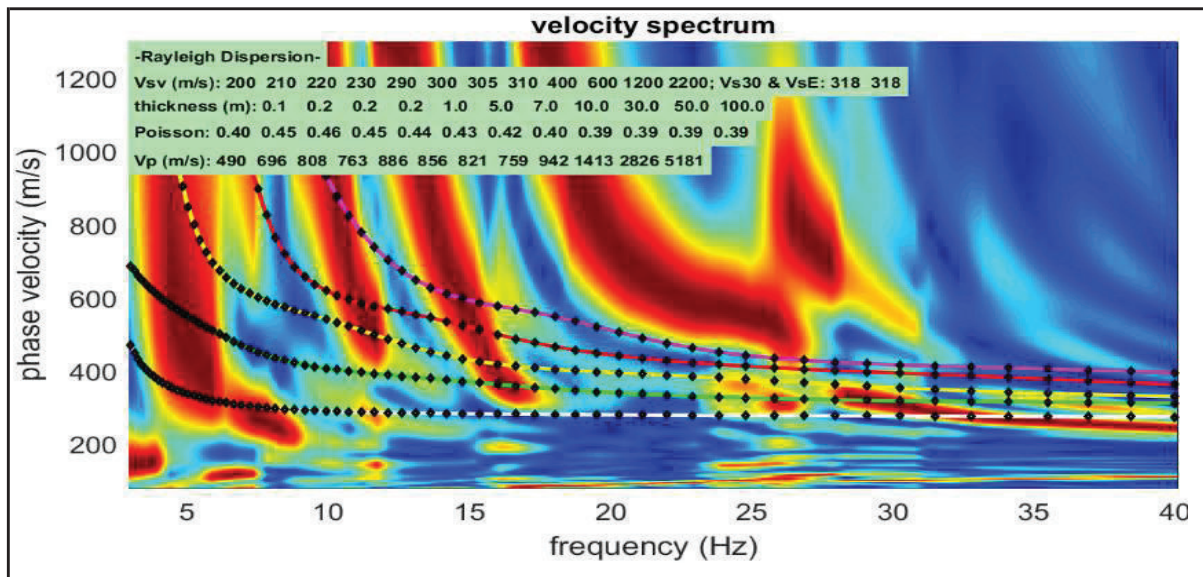
RECORD TIME (Sec) 3
SAMPLING (Sec) 0.5

MISURA ESEGUITA CON Acquisizione onde di Rayleigh
ACQUISIZIONE DI: Acquisizione onde di Love

Utilizzo di geofoni verticali da 4.5 Hz
 Utilizzo di geofoni orizzontali da 4.5 Hz



VELOCITY SPECTRUM - MODELLING & PICKING



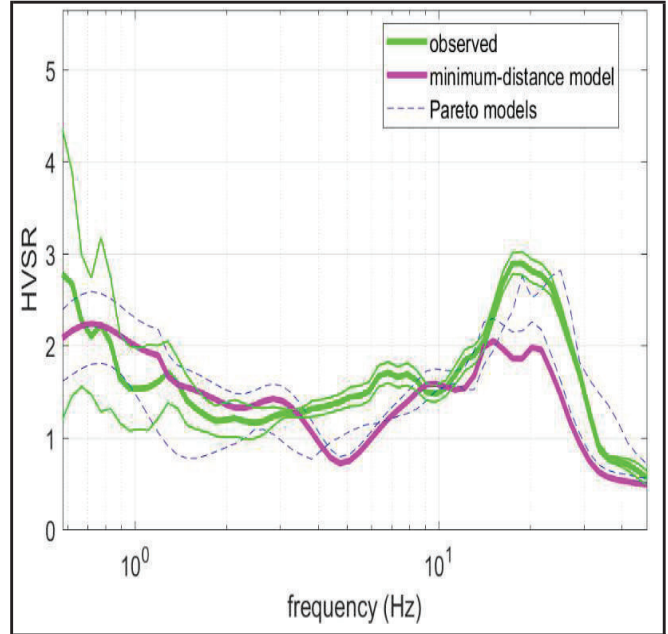
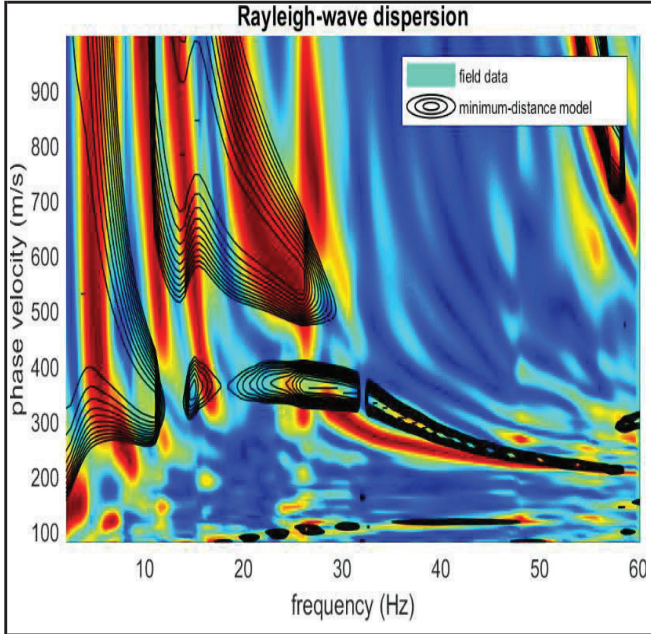
ANALISI CONGIUNTA INDAGINE MASW & HVSR

Committente: **ITALFERR**

CODICE LAVORO: 1982-02
 CODICE PROVA: MASW1+HVSR 149

LOCALITA': RAGUSA
 DATA PROVA: 21/10/2019

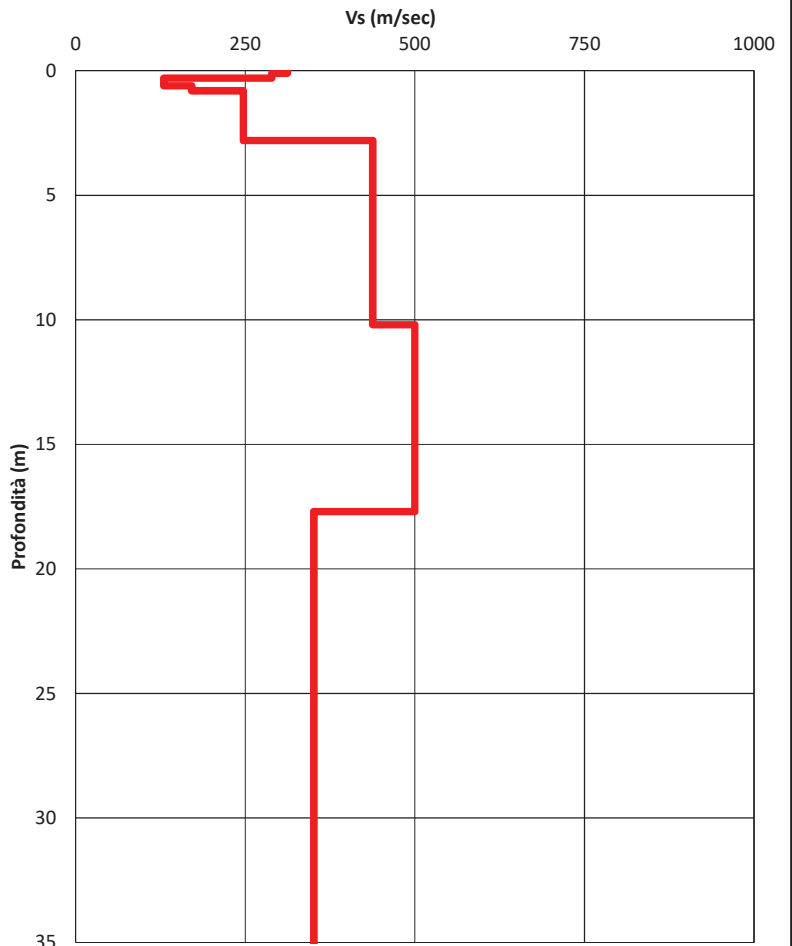
ELABORAZIONE CONGIUNTA DATI MASW & HVSR



Profilo Vs

Layer	Profondità m	Spessori m	Vs m/sec	Deviazione m/sec
1	0.10	0.10	312	104
2	0.30	0.20	289	220
3	0.60	0.30	130	296
4	0.80	0.20	171	433
5	2.80	2.00	247	515
6	10.20	7.40	438	779
7	17.70	7.50	500	361
8	36.00	18.30	351	448
9	63.30	27.30	786	1003
10	124.50	61.20	639	1339
11	375.70	251.20	1011	1260
12			1376	1967

PROFILO Vs



**NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI
 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI
 (D.M. 17/01/2018)**

H_{bedrock}

0

m

V_{Seq}

376

m/sec

Categoria suolo

B