

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIREZIONE TECNICA**

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

**PROGETTO FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA**

**POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA**

**RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228 - ALBACINA**

**INDAGINI GEOFISICHE**

SCALA:

-

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

IR0E 00 R 69 IG GE0005 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	EMISSIONE ESECUTIVA	Progeo	Ottobre 2021	F.lli. Carli	Ottobre 2021	C. Urcioli	Ottobre 2021	M. Comedini Ottobre/2021
		Pulelli						

File: IR0E00R69IGGE0005001A

n. Elab.: xxxx

## INDICE

1. INDICAZIONI GENERALI .....	3
2. NORMATIVA SISMICA.....	6
2.1 CATEGORIE DI SUOLO DI FONDAZIONE .....	6
3. INDICAZIONI GENERALI SULLA ELASTICITÀ DEI MATERIALI .....	7
3.1. GENERALITÀ .....	7
3.2. PRINCIPI SULLA ELASTICITÀ.....	7
3.3. PARAMETRI ELASTICI .....	8
4. PROSPEZIONE SISMICA IN FORO CON TECNICA DOWN-HOLE .....	10
4.1. MODALITÀ OPERATIVE .....	10
4.1.1. Sorgente di energia.....	10
4.1.2. Apparato di ricezione .....	11
4.1.3. Operazioni di campagna.....	11
4.2. ELABORAZIONE DATI .....	16
5. MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACE WAVES (M.A.S.W.) .....	18
5.1. APPLICAZIONI .....	18
5.2. PROCEDURE GENERALI .....	19
6. INDAGINI DI SISMICA PASSIVA .....	23
6.1. GENERALITÀ .....	23
6.2. ATTREZZATURE E MODALITÀ ESECUTIVE .....	29
6.3. ELABORAZIONE DATI .....	29
7. CONCLUSIONI .....	33

# **ITAFERR S.P.A.**

## ***DIREZIONE TECNICA***

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

### ***PROGETTO FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA***

### ***POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE ORTE-FALCONARA RADDOPPIO DELLA TRATTA PM228-ALBACINA***

### ***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 si sviluppa il progetto di raddoppio della linea ferroviaria Orte – Falconara, tratta **PM228 – Albacina**

Allo scopo sono state realizzate le seguenti indagini geofisiche:

- n° 2 Down Hole;
- n° 3 MASW;
- n° 3 HVSR;

Le indagini geofisiche realizzate sono di tipo Down Hole, MASW e HVSR sono state eseguite nel tratto PM228 di Albacina.

L'ubicazione delle varie indagini eseguite è riportata nella Corografia allegata (All.1) in coda alla relazione.

Le prove **Down Hole** in foro di sondaggio sono state anch'esse acquisite sia ad onde di compressione (P) che di taglio (S) con energizzazioni ad ogni metro di profondità. In coda alla relazione sono riportate le schede relative all'analisi Down Hole con relativa elaborazione e risultanze.

N°	Nome Sondaggio	Profondità (m)
1	FA2	30
2	FA4	30
	TOTALE	<b>60</b>

In coda alla relazione sono riportati gli Allegati grafici relativi (da pag.2 – a pag.9 degli allegati)

Le misure **MASW** di sismica attiva relativa alle onde di superficie sono state realizzata posizionando 24 ricevitori da 4.5 Hz spazati 2.5 metri per un totale di 57.5 metri cadauno, mediante i quali sono state effettuate misure sismiche attive.

Al centro di ogni stendimento MASW è stata realizzata una prova **HVSR** di sismica passiva con tempo di acquisizione di 20 minuti cadauno.

I dati acquisiti con le due tipologie d'indagine sono stati elaborati congiuntamente e riportate in allegato con relativa ubicazione, elaborazione e risultanze.

N°	Nome MASW	n° HVSR
1	1	227
2	2	228
3	3	229

In coda alla relazione sono riportati gli Allegati grafici relativi alle ubicazioni di tutte le indagini eseguite e risultanze delle stesse (da pag.10 – a pag.24 degli allegati).

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



*Particolare MASW 2 + HVSR228*



*Particolare MASW 3 - HVSR229*

## 2. NORMATIVA SISMICA

La caratterizzazione dei materiali in oggetto, vista l'elaborazione su tutta la profondità delle onde di taglio S, può quindi soddisfare anche i requisiti relativi all'entrata in vigore della normativa antisismica (**Decreto 17 gennaio 2108 – Aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni**) come classificazione dei terreni locali. Nel particolare, l'oggetto della norma qui di seguito riportata, disciplina la progettazione e la costruzione di opere d'arte soggette ad azioni sismiche, nonché la valutazione della sicurezza e gli interventi di adeguamento su opere esistenti soggette al medesimo tipo di azioni sismiche. Al § 3.2.2 "Categorie di suolo di fondazione" si fa espresso riferimento ad indagini sismiche allo scopo di classificare il suolo di fondazione sulla base del valore di  $V_{s_{eq}}$  o  $V_{s_{30}}$  cioè del valore medio della velocità delle onde di taglio equivalente fino a 30 metri di profondità o comunque fino alla profondità significativa.

### 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  $\gamma < 10^{-6}$ ) 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. INDICAZIONI GENERALI SULLA ELASTICITÀ DEI MATERIALI

#### 3.1. 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.

#### 3.2. 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* ( $\epsilon_i$ ) 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* ( $\epsilon_\alpha$ ).

Per piccole deformazioni, lo sforzo longitudinale è proporzionale alla deformazione  $\epsilon_i$ , 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 accorciamento e contemporaneamente una contrazione o dilatazione; la costante che lega tali variazioni è il *coefficiente di Poisson*.

### 3.3. 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:

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

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

$$\text{Peso di volume secco (Keçeli 2009-2012)}^1 \quad \gamma_{din} = 0.44 \cdot V_s^{0.15} \cdot \frac{\text{m}}{\text{sec}} \quad (\gamma_{din} \text{ in t/m}^3)$$

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

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

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

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

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.

<sup>1</sup> Ali Keçeli, Soil parameters which can be determined with seismic velocities. Jeofisik, 2012, 16, 17-29

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.

## 4. PROSPEZIONE SISMICA IN FORO CON TECNICA DOWN-HOLE

### 4.1. 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.

#### 4.1.1. 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 simili; 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).



Fig. 4.1 - Immagine delle geometrie e schema di acquisizione dati utilizzati (immagine di repertorio)

#### 4.1.2. Apparato di ricezione

L'apparato di ricezione è costituito da due sonde disposte ad un 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 in figura 4, di una singola sonda).

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



Fig. 4.2 - Sonda 3D

#### 4.1.3. 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.

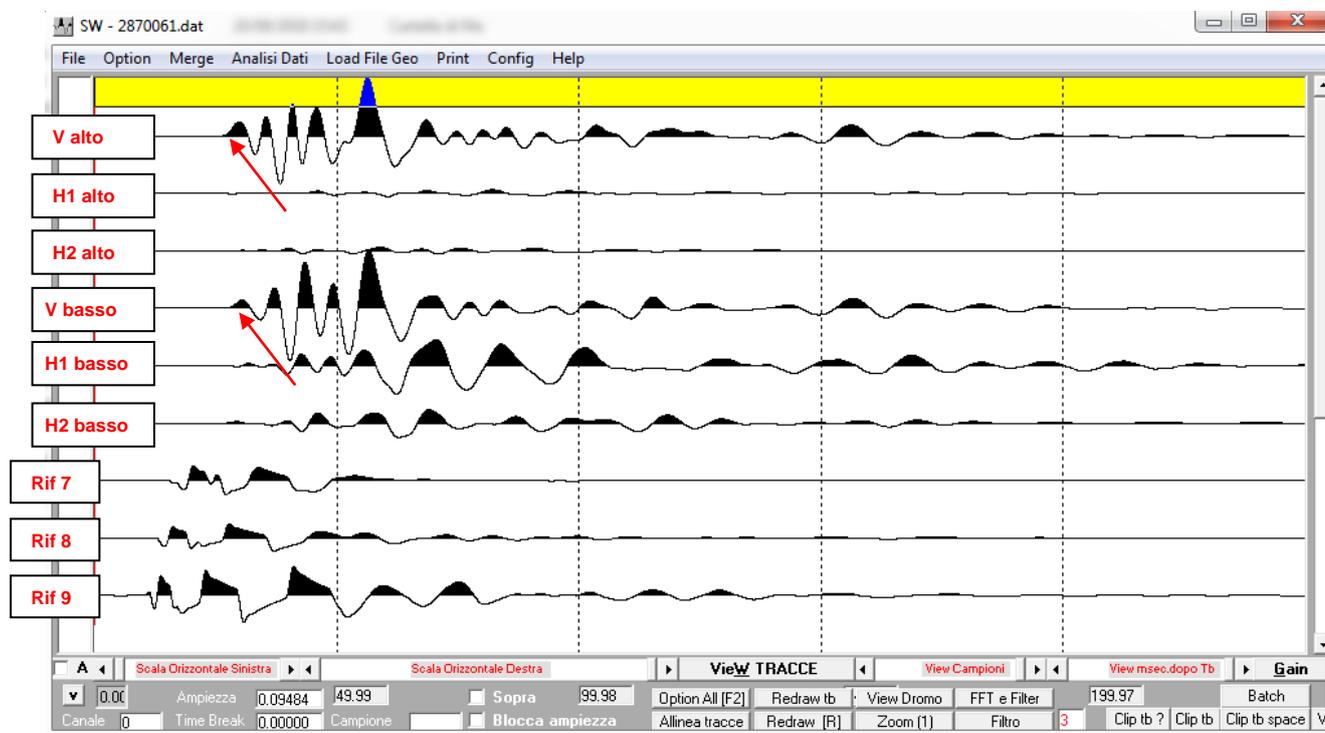
Gli impulsi sismici ricevuti dalla sonda in foro sono stati acquisiti utilizzando l'apparecchiatura EG&G Geometrics Geode con un passo di campionamento di 0.02 millisecc, tramite la quale, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono trasferiti e registrati su P.C.

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)

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:



*Fig. 4.3 - 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.

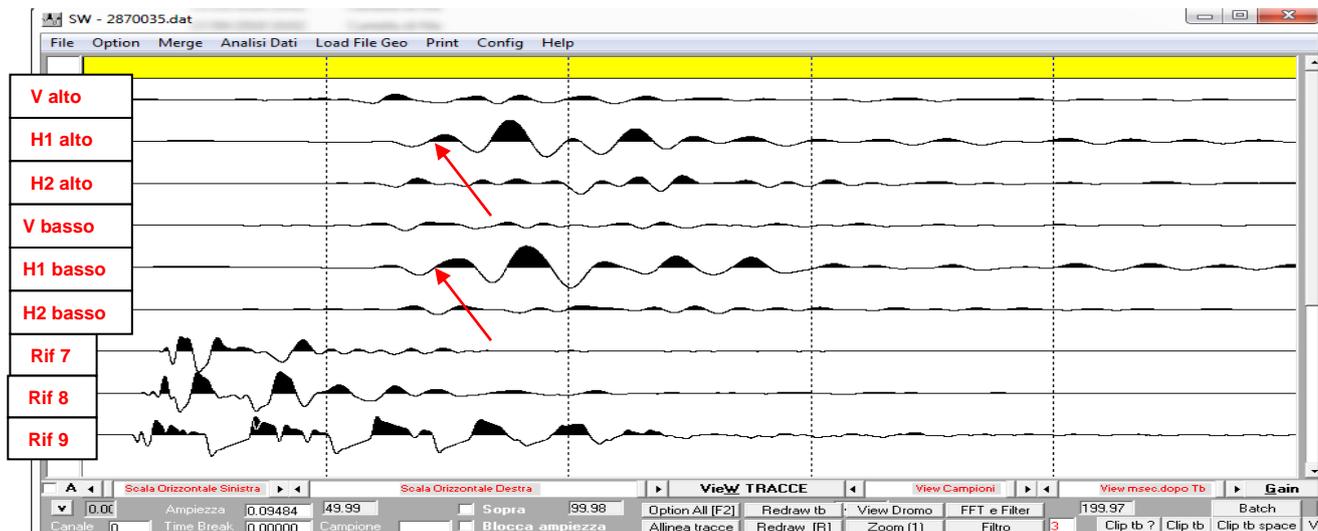


Fig. 4.4 - Il sismogramma cumulato dei due record (in rosso ed in nero) a polarizzazione invertita che ne consegue è quello qui di seguito presentato.

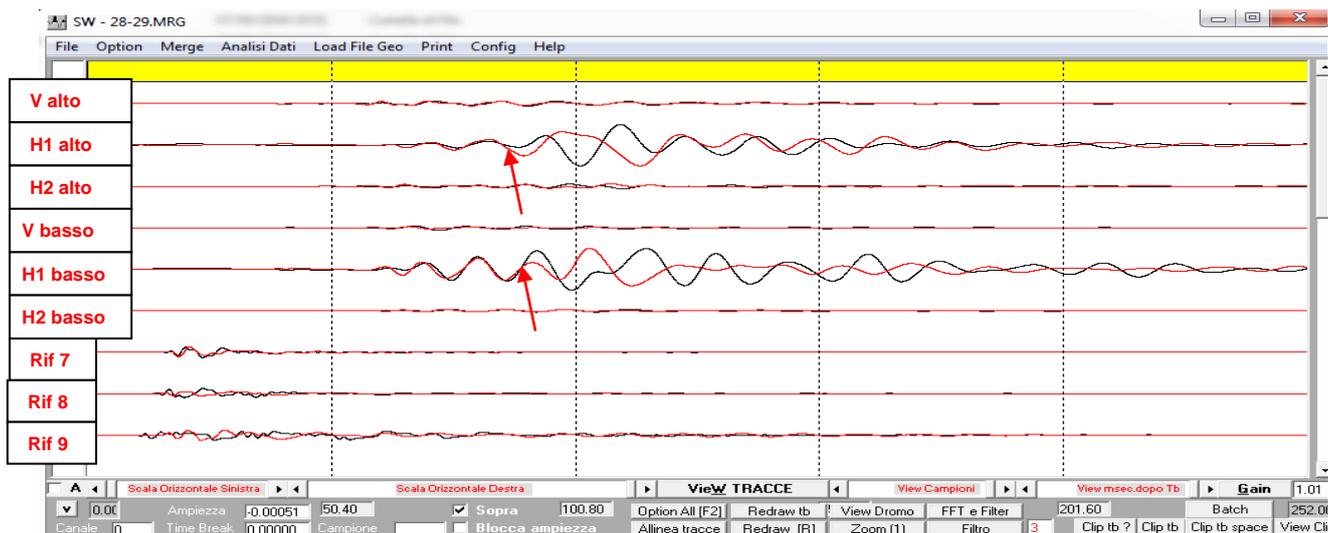


Fig. 4.5 - In questo sismogramma risulta evidente che la traccia H1 rossa è invertita di fase rispetto a quella H1 blu come si rileva anche dal diagramma a farfalla di seguito dove le due tracce vengono visualizzate sovrapposte. E' presente un minimo shift in quanto su queste tracce originali non è stata ancora effettuata la correzione del trigger.

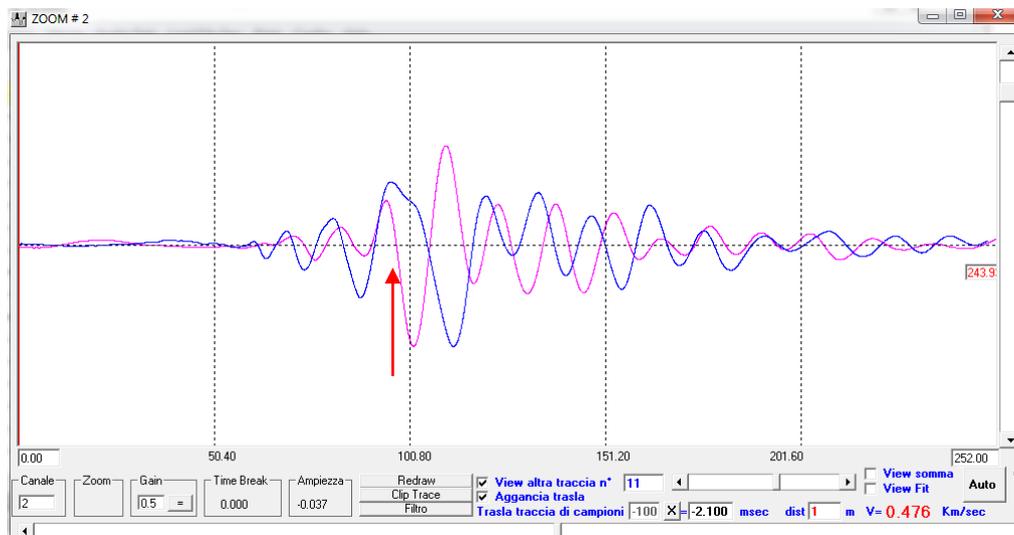


Fig. 4.6 - Esempio di diagramma a farfalla per valutare l'inversione di polarità delle onde di taglio

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.

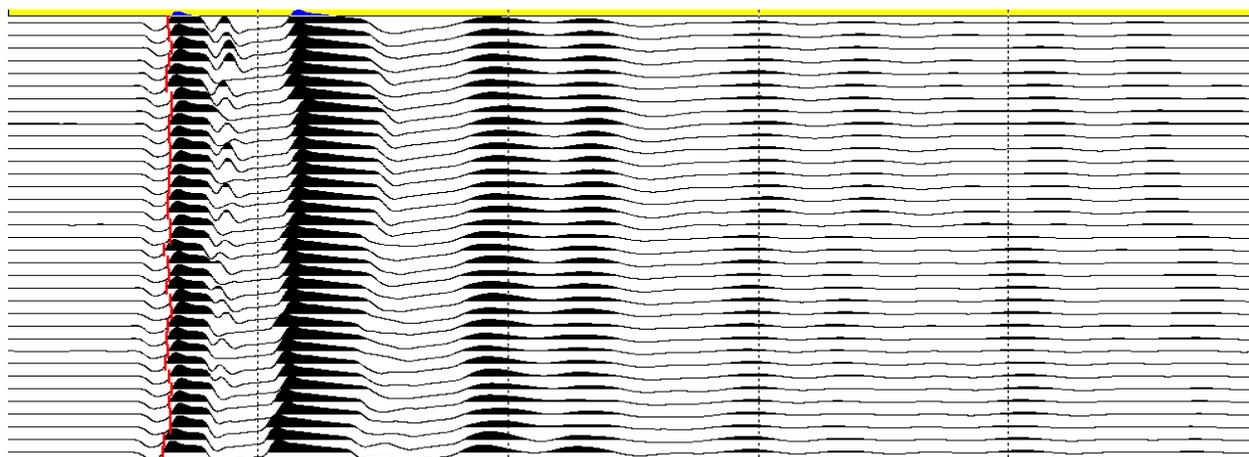


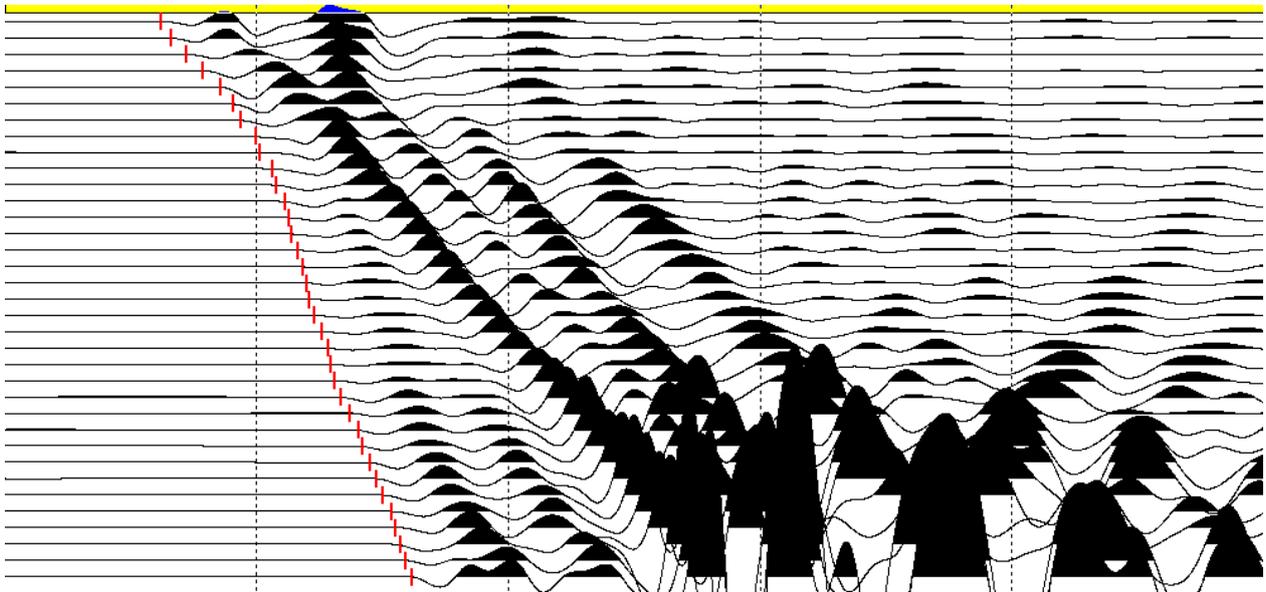
Fig. 4.7 - Esempio Gather del canale di riferimento n° 5

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.

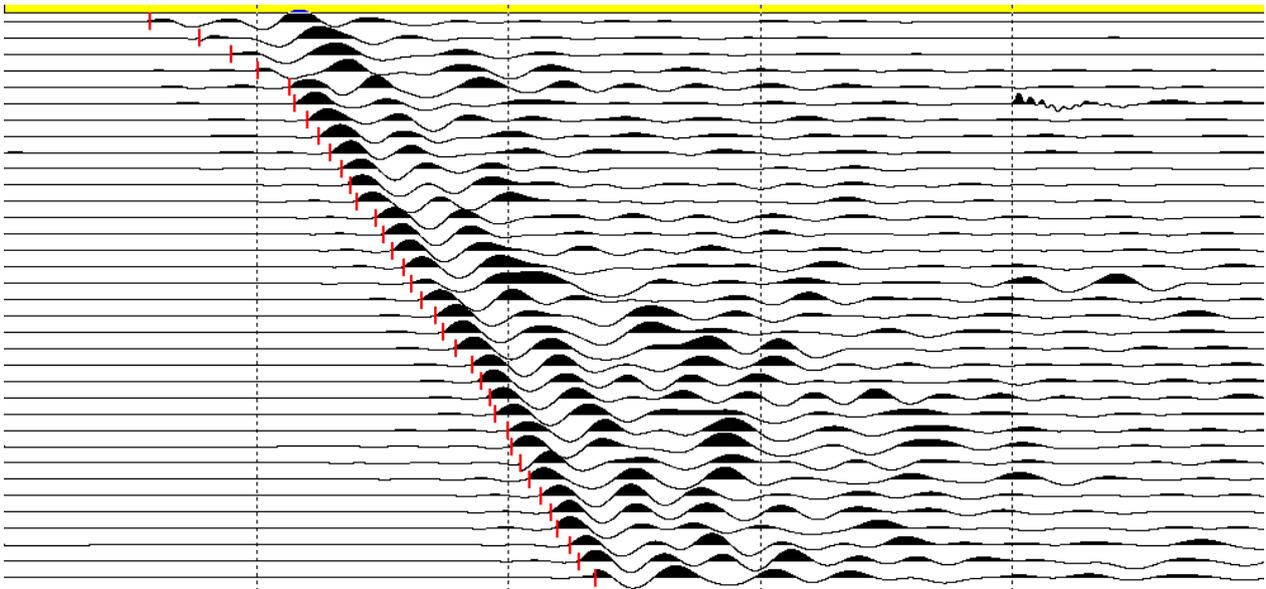
Analoga procedura si attua per le correzioni del tempo "0" relativo alle onde di taglio.

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.



*Fig. 4.8 - Esempio: 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.



*Fig. 4.9 - Esempio: Gather delle onde di taglio - canale 2 (H1)*

## 4.2. 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.

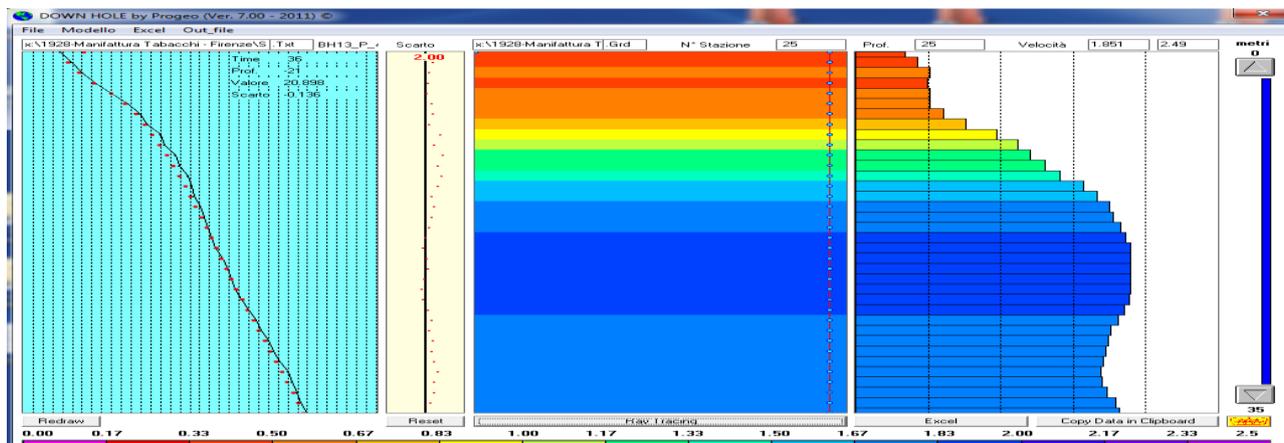


Fig. 4.10 - Esempio: Immagine di uno step del processing del Down Hole Tomografico

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.

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

MASW è l'acronimo di Multichannel Analysis of Surface Waves. È una tecnica di esplorazione sismica introdotta per la prima volta in GEOPHYSICS da Park et al., (1999) e consente di stimare la rigidità del terreno misurando la velocità dell'onda di taglio ( $V_s$ ) del sottosuolo in modalità 1-D, 2-D e 3-D comunemente fino a 30 m di profondità.

La tecnica MASW utilizza le onde di superficie sismiche generate da vari tipi di fonti sismiche - come la mazza - analizzandone le velocità di propagazione ricavandone infine le variazioni di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) al di sotto dell'area indagata.

La velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) è una delle costanti elastiche strettamente correlata ai moduli di Young e di Taglio. Nella maggior parte dei casi,  $V_s$  è un indicatore diretto della resistenza al suolo (rigidità) e quindi comunemente può essere usato per stimare la capacità portante.

La procedura generale per produrre una tipica sezione trasversale della S-velocità 2D ( $V_s$ ) consiste nel raccogliere record sismici multicanale in più posizioni, come illustrato di seguito.

Ogni record genera quindi un profilo di velocità 1-D (profondità) ( $V_s$ ), il multiplo dei quali costruirà la sezione trasversale 2D finale.

### 5.1. APPLICAZIONI

Le informazioni sulla velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) dei materiali del sottosuolo sono direttamente correlate alla proprietà di rigidità dei materiali, che è la proprietà primaria trattata in tutti i progetti di ingegneria geotecnica. In questo senso, il metodo MASW può essere applicato a qualsiasi progetto di ingegneria geotecnica che richiede la mappatura della rigidità del sottosuolo nei formati 1-D, 2-D e 3-D.

Il tipo più comune di applicazione è la mappatura suolo-roccia, che delinea il confine topografico tra suolo e roccia attraverso un'interfaccia con un aumento significativo della velocità ( $V_s$ ) (ad esempio, da 300 m/sec a 1000 m/sec). Mostra inoltre la variazione verticale e orizzontale della rigidità del suolo visualizzando le variazioni di velocità ( $V_s$ ) all'interno del suolo (ad es. 100 m / sec - 300 m / sec).

Questo limite mostra spesso un graduale cambiamento di velocità su un certo intervallo di profondità piuttosto che un'interfaccia definita in modo nitido, ciò indica la possibile zona esposta all'aria in cima al substrato roccioso. Più recentemente si stanno utilizzando misure MASW per rilevare anomalie del sottosuolo (cavità, sinkhole ecc.).

Queste anomalie possono includere zone localizzate a bassa velocità create da vari motivi come tunnel di utilità esistenti, sviluppo del vuoto dovuto al collasso, substrato roccioso fortemente esposto alle intemperie, perdita di coesione nei materiali riempiti, ecc. In questo caso, il rilevamento è spesso facilitato da approcci di mappatura della velocità come analisi back-scattering e generazione di sezioni di offset comune.

Un altro tipo di applicazione è la valutazione delle prestazioni che viene eseguita prima e dopo l'applicazione di un'operazione specifica. Ciò include la valutazione della compattazione per materiali superficiali e sotterranei durante la costruzione di strade e edifici. Include anche la valutazione delle prestazioni di stuccatura.

La caratterizzazione del sito sismico richiede una valutazione di una velocità media delle onde di taglio ( $V_s$ ) per la profondità massima di 30 m. Questa è l'applicazione 1-D (ovvero profondità) più comune del metodo MASW.

In generale, le applicazioni MASW possono essere raggruppate nelle seguenti categorie:

Mappatura del Suolo;  
Caratterizzazione sismica locale;

Localizzazione di anomalie o difformità nel sottosuolo;  
Analisi della compattazione;  
Analisi delle consistenze del terreno.

## 5.2. PROCEDURE GENERALI

La metodologia sismica MASW è relativamente semplice: in campagna si deve predisporre un allineamento di geofoni equamente distanziati lungo una linea di rilevamento lineare (Figura 6.1).

Considerando la dipendenza frequenza-profondità delle onde superficiali e le caratteristiche di risposta dei geofoni, i geofoni a bassa frequenza (4.5 Hz) vengono normalmente utilizzati come ricevitori e una sorgente sismica a impatto elevato come una mazza da 10 kg può produrre un segnale a banda larga, relativamente bassa frequenza.

La distanza ( $x_1$ ) tra la sorgente e la stazione più vicina (chiamata offset della sorgente) viene scelta per ridurre al minimo gli effetti del campo vicino causati dall'eccessiva relazione stress-deformazione dalla sorgente di impatto (Park et al., 2002; 2001).

Questo offset viene di solito scelto per essere quasi uguale alla profondità massima di indagine. Tuttavia, esistono situazioni in cui è meglio operare con distanze inferiori alla profondità d'indagine (Park et al., 1999a).

La spaziatura del ricevitore ( $dx$ ) viene scelta per evitare ogni possibile aliasing spaziale della lunghezza d'onda più corta registrata e per massimizzare l'efficacia dell'analisi della dispersione (Park et al., 2001).

La lunghezza totale dell'array dei sensori ( $x_T$ ) ne determina l'offset.

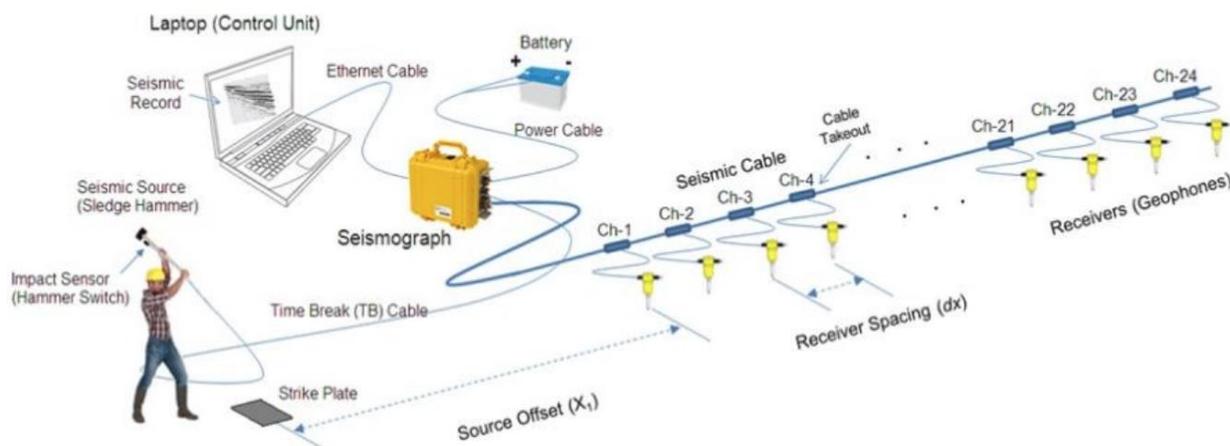


Fig. 5.1. Configurazione MASW

La storia della vibrazione correlata al campo d'onda sismica generato dalla sorgente viene misurata da ciascun gefono all'interno della dispersione ed è rappresentata da una serie temporale definite come traccia (Figura 6.2).

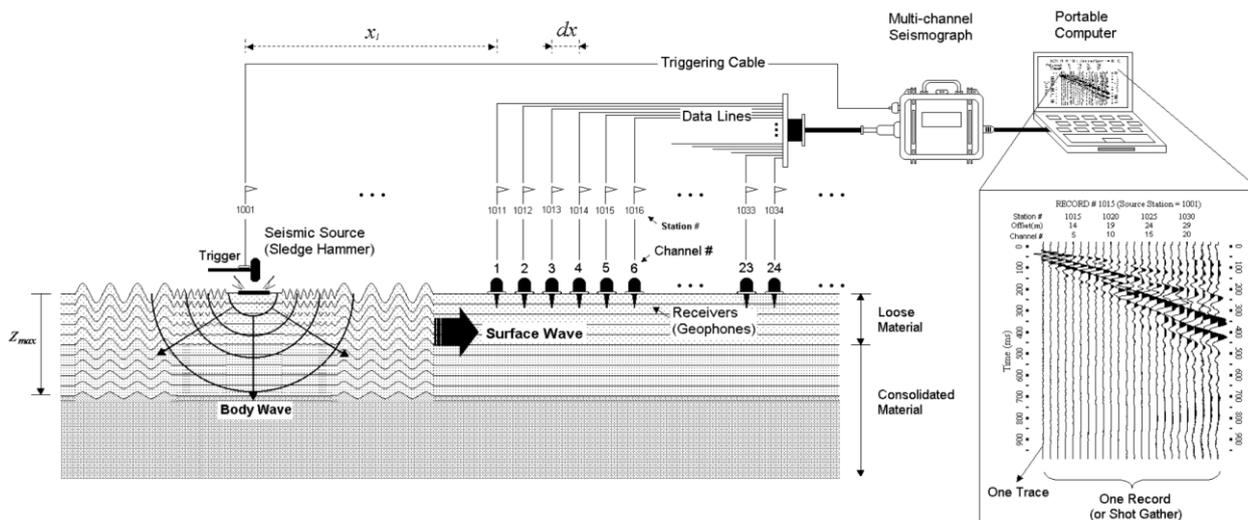


Fig. 5.2. Tipica configurazione di campo per prova MASW

Da ogni misurazione deriva un singolo profilo Vs 1-D del suolo direttamente sotto la l'allineamento dei sensori. In un rilevamento progettato per generare una mappa Vs 2-D, una configurazione SR scelta viene spostata in modo uniforme e coerente di una data distanza (chiamata intervallo di sorgente, che di solito è un multiplo della spaziatura del singolo ricevitore).

Questo stile di acquisizione dati a diffusione mobile è chiamato modalità roll-along (Sheriff and Geldart, 1982).

Lo schema generale del trattamento dei dati prevede i seguenti passaggi:

1. eliminare (modifica) i colpi rumorosi;
2. convertire i dati sismici grezzi (SEG-2) nel formato di elaborazione (SEGY), combinando tutti gli shot generati per essere elaborati in un unico file;
3. assegnare la geometria del campo e ricompilare il set di dati della modalità di acquisizione (singola o roll-along);
4. visualizzare tutti i colpi raccolti per valutare il rapporto segnale-rumore generale (S / N);
5. selezionare i vari shot ed elaborarle le dispersioni per determinare intervalli ottimali di frequenza e velocità di fase;
6. analisi della curva di dispersione per tutti gli shot generati;
7. analisi di inversione per tutte le curve di dispersione analizzate;
8. costruire una mappa Vs 1-D o 2-D dai risultati di inversione usando uno schema di interpolazione 1-D o 2-D appropriato.

Gli shot generati con errori di trigger o con S / N al di sotto delle soglie accettabili vengono scartati.

Tutti i restanti raggruppamenti vengono quindi convertiti e combinati in un singolo file con numeri di file di campo in aumento sequenziale (numero record).

I numeri di stazione per sorgente e ricevitori e la spaziatura del ricevitore vengono assegnati a ciascun record nel file combinato.

Quindi, tutti i record con codifica geometrica vengono ricompilati nel set di dati della modalità roll-along equivalente eliminando determinate porzioni di tracce in ciascun record.

Tutti i record vengono quindi visualizzati per valutare generalmente la qualità dei dati (S / N).

Successivamente, vengono selezionati diversi record da diverse posizioni lungo la linea di rilevamento e le loro caratteristiche di dispersione vengono esaminate usando il metodo di imaging (Park et al., 1998).

Durante questo passaggio, viene scelto un intervallo ottimale di frequenze e velocità di fase che viene utilizzato per guidare l'elaborazione di tutti i record nel set di dati.

Ogni record viene analizzato per generare un'immagine di dispersione (chiamata immagine di overtone) con la tendenza alla dispersione in modalità fondamentale identificata e una curva di dispersione del segnale estratta in base all'immagine identificata.

Una volta estratte tutte le curve di dispersione necessarie, vengono invertite per generare un profilo Vs 1-D da ciascuna curva di dispersione.

Al profilo Vs risultante viene assegnata la posizione della stazione nel mezzo della diffusione del ricevitore. Quando tutti i profili Vs 1-D vengono generati per tutte le curve di dispersione, viene utilizzato uno schema di interpolazione 2-D (ad esempio, schema bilineare o Kriging) per costruire la mappa Vs-2 finale.

L'acquisizione dei dati MASW più tipica per la caratterizzazione del sito sismico (SSC) richiede un sistema di acquisizione sismica a 24 canali composto da sismografo a 24 canali, cavo sismico con 24 collegamenti (da asporto), 24 geofoni verticali o orizzontali a bassa frequenza (ad es. 4.5-Hz quelli) e un martello pesante (ad es. 10 kg o più pesante).

I parametri geometrici (dx e X1) influenzano la profondità massima di indagine (Zmax).

In generale, la dispersione del ricevitore più lunga associata a una spaziatura del ricevitore più lunga assicura uno Zmax più profondo. Inoltre, è necessario un offset della sorgente più lungo (X1) per una data diffusione del ricevitore per garantire l'alta qualità delle onde di superficie per lunghezze d'onda relativamente più lunghe minimizzando il più possibile alcuni effetti dannosi, come gli effetti del campo vicino.

Sono necessarie lunghezze d'onda più lunghe per l'analisi di profondità più profonde. D'altra parte, è necessario anche un X1 più corto per garantire la stessa qualità per lunghezze d'onda relativamente brevi necessarie per l'analisi a profondità più basse.

Pertanto, di solito è una combinazione di diversi X1 che può raggiungere la massima qualità possibile per una vasta gamma di lunghezze d'onda per coprire il maggior intervallo di profondità possibile per una data impostazione.

In effetti, la stessa combinazione di X1 diversi può essere applicata sui lati anteriore (avanti) e posteriore (retro) della diffusione del ricevitore in modo che la possibile modifica della proprietà del sottosuolo nella direzione laterale (ad esempio, modifica della profondità della roccia fresca) possa essere corretta rappresentato durante l'elaborazione.

All'analisi dei dati, tutti i record di campo vengono elaborati per generare immagini di dispersione corrispondenti, che vengono quindi impilate per generare un'immagine di dispersione impilata della massima qualità, come illustrato nella figura 6.3

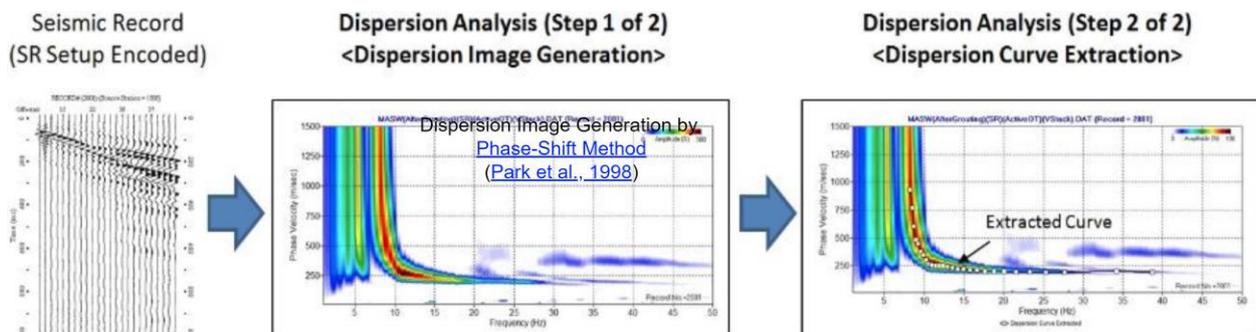


Fig. 5.3 – Analisi MASW (sismogramma – Spectral analysis e curva di dispersione – Picking).

Questa immagine impilata avrà il rapporto segnale-rumore (SN) più elevato rispetto a tutte le altre a causa degli effetti di rumore incoerenti soppressi, mentre gli effetti di dispersione delle onde superficiali coerenti migliorati, per quanto possibile. Allo stesso tempo, gli effetti avversi sul campo vicino e lontano (se presenti) saranno attenuati attraverso lo stesso effetto di media.

Infine, la curva di dispersione in modo fondamentale più affidabile (M0) viene estratta da questa immagine sovrapposta e il profilo più affidabile della velocità dell'onda di taglio 1-D (Vs) si ottiene dall'inversione di questa curva, come illustrato nella figura 6.4.

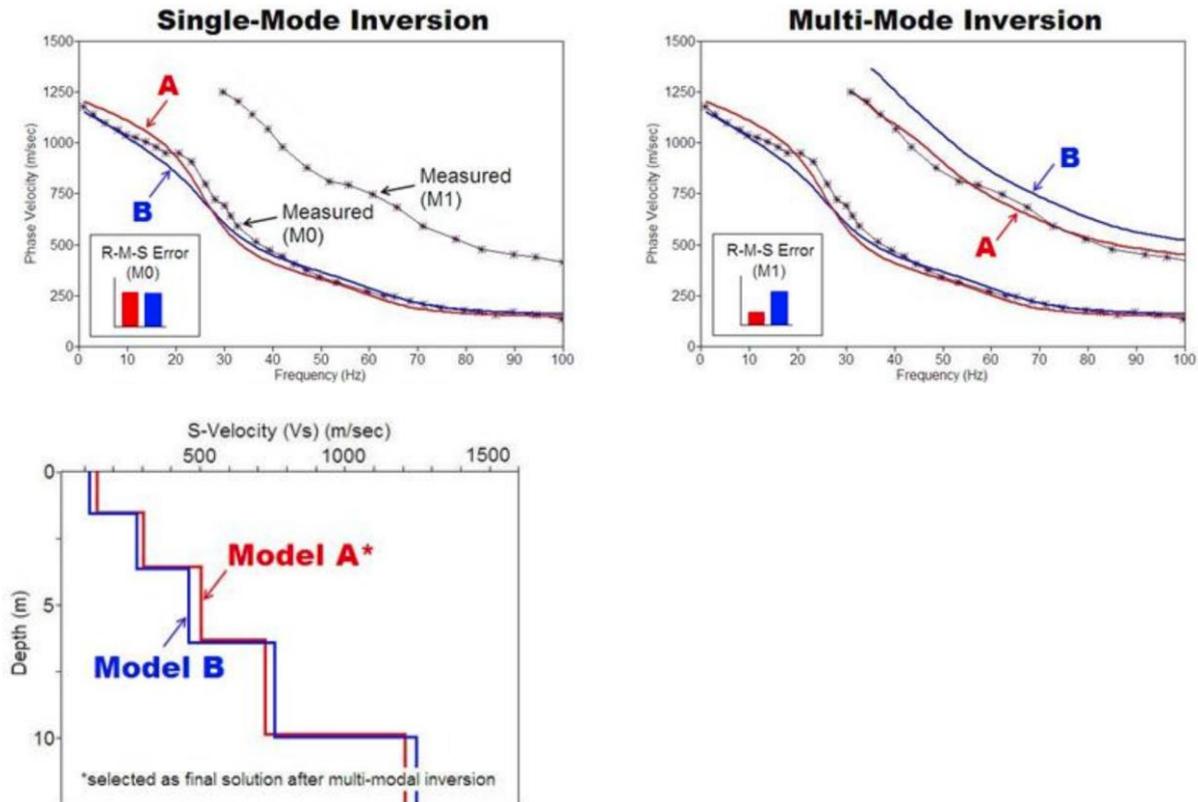


Figura 5.4 – Inversione dei dati (Curva di dispersione con picking – Log Vs)

## 6. INDAGINI DI SISMICA PASSIVA

### 6.1. GENERALITÀ

Per la loro natura le vibrazioni ambientali hanno un andamento estremamente irregolare ed esibiscono una natura essenzialmente stocastica.

Questo implica che lo studio di questo tipo di fenomeno richiede un approccio sostanzialmente diverso da quello tipico di una indagine sismica (Tomografia, Masw ecc.), solitamente legato ad una visione "deterministica" del fenomeno: l'attenzione si sposta dallo studio delle singole fasi sismiche a quello delle proprietà medie del segnale.

In generale studi di questo genere nel corso degli anni hanno messo in evidenza che il rumore ambientale può essere differenziato in tre domini di frequenza:

#### 1. Bassa frequenza (<0.5 Hz) – riferibile a microsismi

E' di origine essenzialmente naturale con sorgenti di grandi dimensioni spaziali (onde oceaniche, grandi perturbazioni atmosferiche ecc; ha un carattere stazionario (ovvero le sue proprietà statistiche non cambiano nel tempo) alla scala delle ore e dei giorni.

#### 2. Alta frequenza (>1 H z) – Microtremore

E' di origine essenzialmente antropica (traffico veicolare e pedonale, attività industriale, ecc.) e talvolta naturale ma a scala locale (vento su gli edifici e le piante, ecc.); mostra significative variazioni alla scala delle attività antropiche (giorno/notte, festivi/feriali, ecc.).

#### 3. Frequenza intermedia (0<1 Hz e >0.5 Hz)

A seconda delle caratteristiche del sottosuolo, sia sorgenti naturali che antropiche possono condizionare le vibrazioni ambientali, con un livello di stazionarietà variabile da caso a caso.

Si tratta quindi di onde sismiche generate da una molteplicità di sorgenti che vanno dalle onde sismiche in mare (soprattutto nella banda in bassa frequenza o banda dei microsismi) al traffico cittadino o alle attività industriali (nella banda in alta frequenza o bande del tremore sismico).

Intendendo sfruttare questo campo d'onde per studiare il sottosuolo è necessario disporre di un modello teorico che lega le caratteristiche del terreno (la stratigrafia sismica) a quanto osserviamo: in pratica si tratta innanzitutto di identificare quali fasi sismiche sono presenti nel campo di vibrazioni ambientali.

Ci si può aspettare che nel campo d'onde delle vibrazioni ambientali siano presenti tutte le diverse fasi sismiche (onde P, onde S, onde di Rayleigh, Love e relativi modi superiori).

Il problema è quello di valutare il peso relativo delle diverse fasi nei diversi casi, ovvero in funzione della tipologia (media) delle sorgenti e delle caratteristiche meccaniche del mezzo attraverso cui si propagano le perturbazioni elastiche.

Dato che in generale le onde di volume si attenuano più rapidamente e che la maggior parte delle possibili sorgenti si trovano alla superficie, ci si può aspettare che un ruolo dominante sia giocato dalle onde superficiali.

In molti casi quest'ultima congettura sembra confermata dalle osservazioni soprattutto per quanto riguarda le frequenze più basse (per esempio confrontando le ampiezze dei segnali misurati in superficie e quelli in profondità come si ricava dalle immagini seguenti (fig. 7.1).

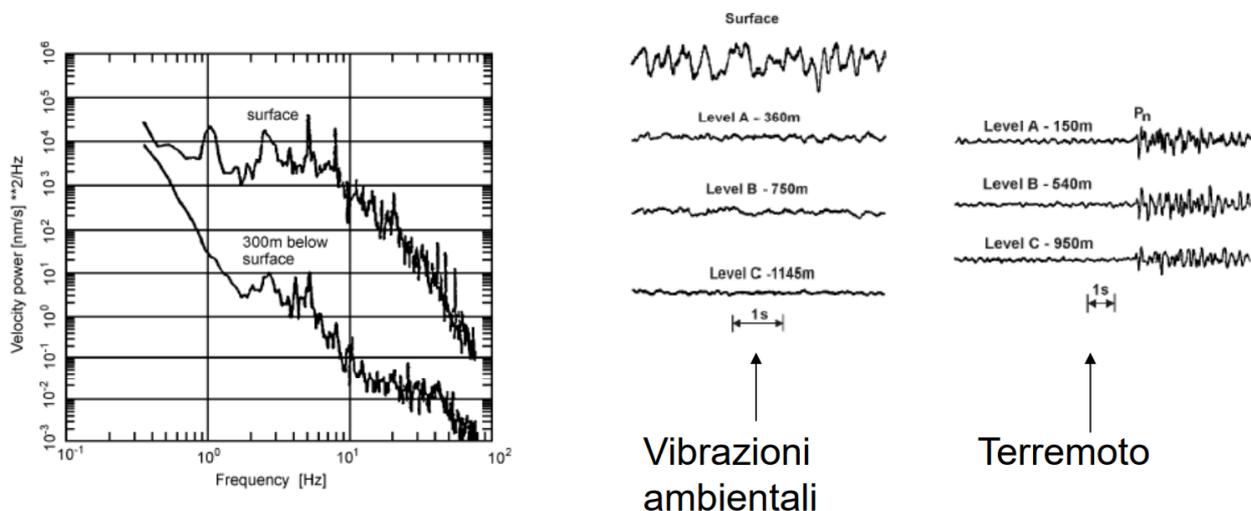


Fig. 6.1 – Esempio di ampiezze di segnali acquisiti a profondità differenti.

A seguito di molte analisi e misurazioni si hanno le seguenti risultanze di massima e cioè:

1. Le frequenze di risonanza delle onde di taglio ( $f_s$ ) sono di intensità maggiore e a più bassa frequenza di quelle ottenuti dalle onde di compressione ( $f_p$ ) - vedasi Spettro di potenza in fig 5.2 a sinistra;

2. E' significativo il rapporto spettrale (H/V) tra il segnale orizzontale (H) e verticale (V) delle onde superficiali e permette di ottenere una primaria frequenza di risonanza (fig. 7.2 a destra).

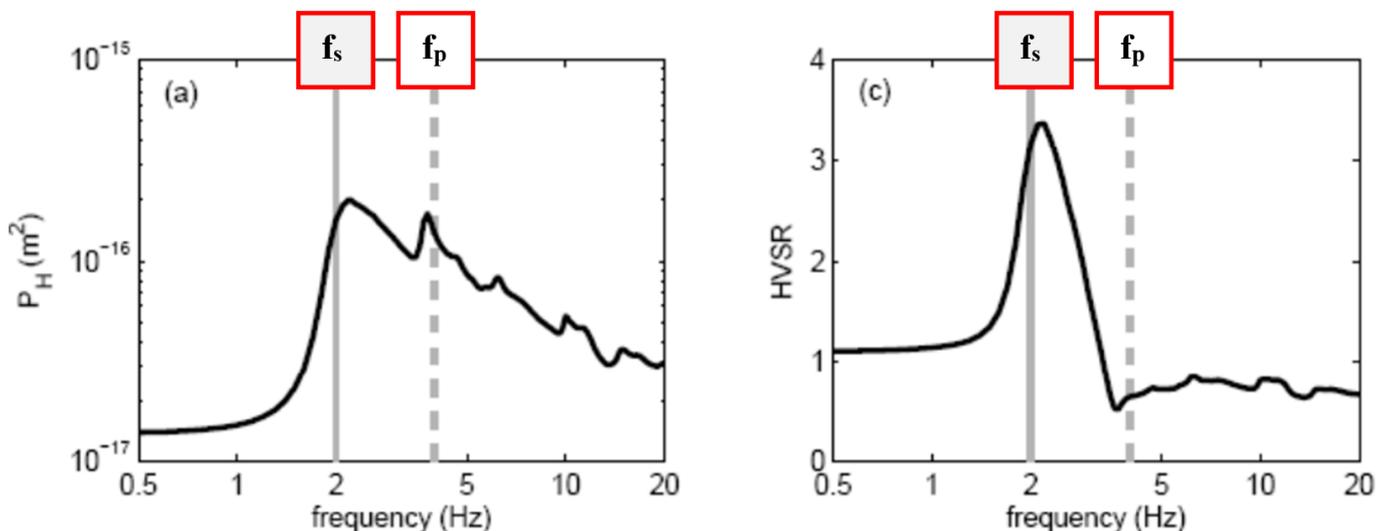


Fig. 6.2 - Spettro di potenza (a sinistra) e HVSR (a destra) relativi alle onde di taglio e compressione

3. L'ampiezza del rapporto H/V tende ad aumentare con l'aumentare del contrasto di impedenza sismica<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Prodotto della densità del terreno per la velocità delle onde sismiche, che varia fra strati differenti di terreno, comunemente indicata con Z.

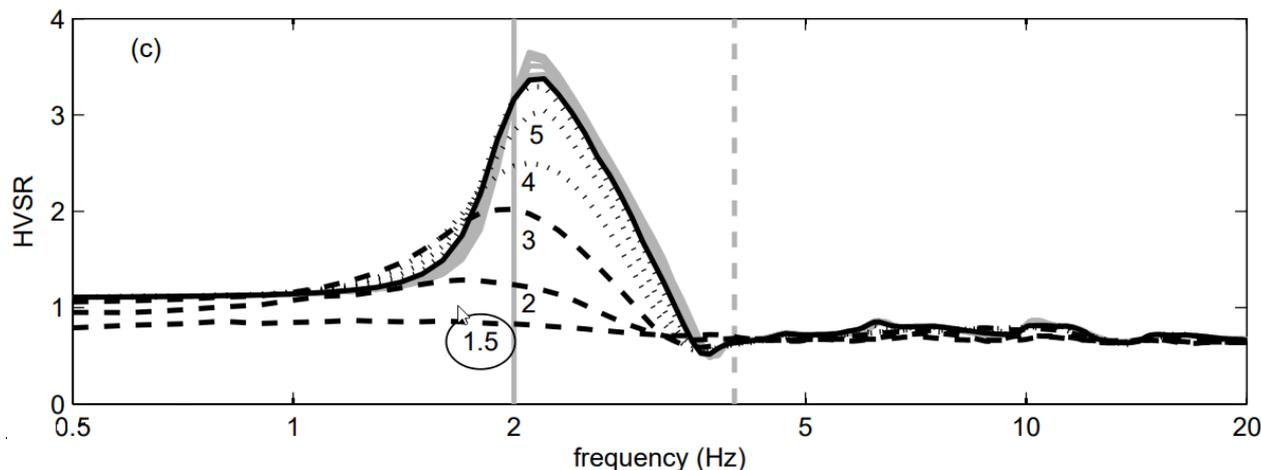


Fig. 6.3 - Variazione del rapporto HVSR-Frequenza al variare dell'impedenza sismica (1.5-2.0-3.0-4.0-5.0)

Grazie alle molte sorgenti potenzialmente attive, il campo di rumore è ubiquitario (anche se con caratteristiche differenti da sito a sito) e talvolta molto intenso (si pensi alle aree urbane).

Inoltre presenta una forte componente in bassa frequenza e quindi un elevato contenuto di onde superficiali di lunga lunghezza d'onda informative sugli strati più profondi.

Pertanto, lo studio delle vibrazioni ambientali si presenta come un importante strumento di indagine per la caratterizzazione sismica dei terreni anche a profondità relativamente elevate (centinaia di metri).

Il problema è il carattere irregolare dei fronti d'onda che costituiscono le vibrazioni ambientali, la mancanza di una direzione privilegiata delle vibrazioni ambientali, che consenta stime di velocità di fase con le tecniche standard.

In particolare, due caratteristiche delle onde superficiali risultano di particolare interesse:

1. L'**Ellitticità**: ovvero l'andamento dei rapporti fra le ampiezze orizzontali e verticali del moto in funzione della frequenza: l'ellitticità è massima in corrispondenza della frequenza di risonanza delle onde S;

2. La **Dispersione**: ovvero le variazioni di velocità di propagazione delle onde superficiali in funzione della frequenza di vibrazione.

3. Rilevare la frequenza di risonanza dei terreni.

Una tecnica di sismica passiva finalizzata ad ottenere queste informazioni largamente utilizzata è quella di Nakamura<sup>3</sup> o più nota come HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)<sup>4</sup> con la quale si determina la curva di "ellitticità" (curva HVSR) il cui massimo identifica la frequenza di risonanza delle onde di taglio nel sottosuolo.

<sup>3</sup> [http://www.sdr.co.jp/papers/hv\\_1989.pdf](http://www.sdr.co.jp/papers/hv_1989.pdf)

<sup>4</sup> [https://www.researchgate.net/publication/266863529\\_The\\_HVSR\\_technique\\_from\\_microtremor\\_to\\_strong\\_motion\\_empirical\\_and\\_statistical\\_considerations](https://www.researchgate.net/publication/266863529_The_HVSR_technique_from_microtremor_to_strong_motion_empirical_and_statistical_considerations)

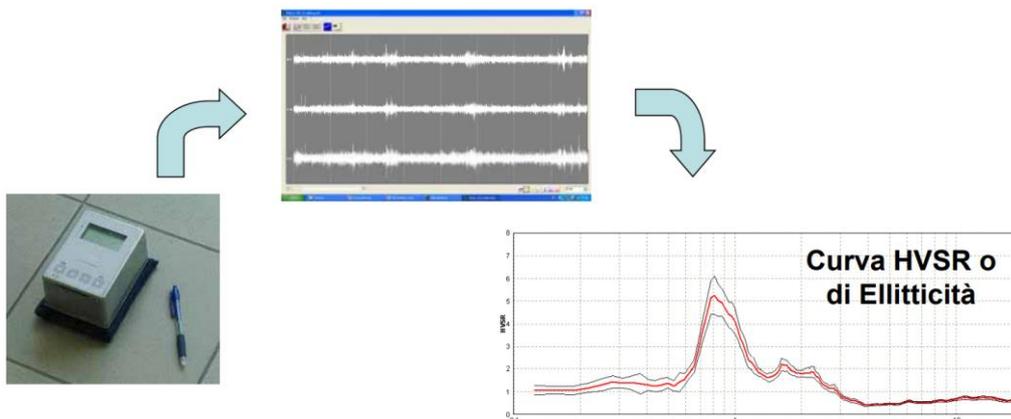


Figura 6.4 - Flow per la determinazione della curva di ellitticità

Perché la misura ottenuta possa essere considerata una stima delle proprietà medie del campo di rumore sismico occorre che:

1. I rapporti H/V ottenuti sperimentalmente siano "stabili" ovvero frutto di un campionamento statistico adeguato (non meno di 20 minuti di acquisizione);
2. Gli effetti di sorgente siano stati effettivamente mediati ovvero non ci siano sorgenti "dominanti" come la presenza di "transienti" cioè un "hotpoint" di noise (fabbrica ecc.);
3. La misura non contenga errori sistematici (p. es. dovuti al cattivo accoppiamento dello strumento con il terreno).

Per controllare che siano rispettate queste condizioni occorre analizzare la stazionarietà nel tempo dei rapporti H/V misurati (criteri statistici) e la presenza di eventuali direzionalità nel segnale come si può vedere dai grafici riportati sulla figura 7.5.

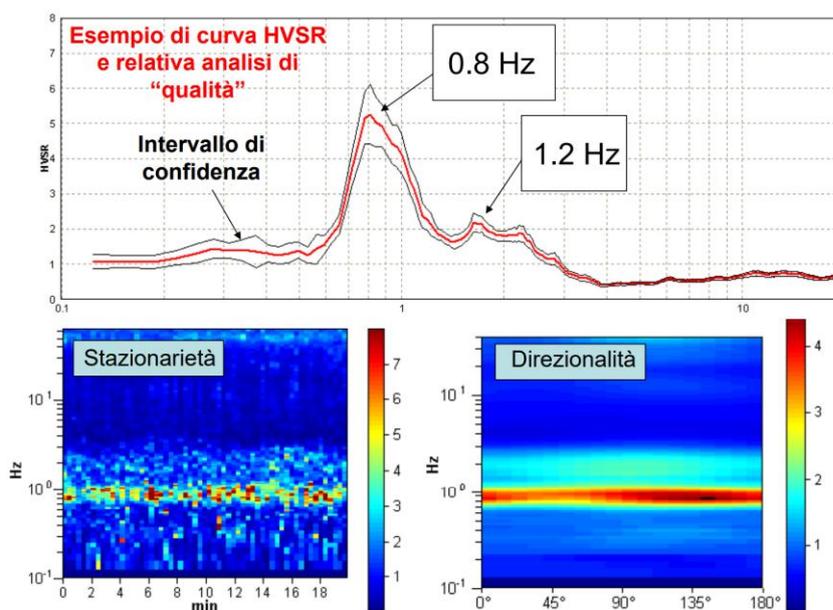


Fig. 6.5 - Spettro HV (sopra), a destra il log della stazionarietà del rapporto H/V e a destra quello della direzionalità

Sul grafico superiore di figura 7.5 è riportato lo spettro HV, che è la sintesi dei rapporti tra i segnali orizzontali (H) e quello verticale (V) di una successione di finestre di analisi di 10-15-20 sec..., corrispondenti alle varie colonnine di dati riportate sul grafico in basso a sinistra.

Ognuna di queste colonnine, quindi singoli rapporti H/V, vengono visualizzati mettendo in ascissa il tempo di acquisizione della misura (in questo caso 20 minuti) ed in ordinata la frequenza, il colore esprime l'intensità del rapporto HVSR che corrisponde all'ordinata del grafico superiore.

Ovviamente maggiore è la costanza del rapporto H/V più elevata è la stazionarietà e la qualità del dato elaborato.

L'analisi della stazionarietà permette anche di eliminare delle finestre dal calcolo della curva HVSR finale.

Anche la direzionalità è importante in quanto il valore di H, cioè dei velocigrammi orizzontali, è dato dal vettore sintesi delle due direzioni di acquisizione dei segnali; se questo vettore risulta molto condizionato per la presenza di un hotpoint di noise il rapporto HV risente nettamente della direzione del rumore.

La maggiore qualità del rapporto HVSR si presenta quando il rumore viene registrato da tutte le direzioni in maniera isotropa.

Anche in questo caso è possibile eliminare dal calcolo della curva finale settori direzionati molto condizionanti.

Il secondo aspetto importante riguarda il carattere stocastico della grandezza da misurare (rapporto spettrale medio). Affinché la misura HVSR possa essere considerata rappresentativa delle caratteristiche del sottosuolo, questa deve essere sufficientemente estesa nel tempo da includere l'effetto di un numero significativo di sorgenti a varie distanze dal ricevitore e distribuite all'intorno di quest'ultimo. Inoltre, dovendo operare su un segnale di tipo stocastico, è necessario mettere in campo tutti gli accorgimenti necessari perché l'analisi spettrale fornisca risultati statisticamente stabili ed affidabili. Per ottenere questi risultati bisogna quindi definire tempi di misura adeguatamente lunghi e procedere adottando opportune tecniche di trattamento del segnale.

**La curva HVSR permette di identificare la/e frequenze di risonanza ma non lo spettro di risposta sismica o l'amplificazione del sito, funzioni richieste per l'analisi sismica del sito.**

I risultati delle misure di vibrazioni ambientali, si prestano ad almeno tre livelli di interpretazione:

#### 1. Livello qualitativo

L'insieme dei dati ottenuti permette di identificare le aree dove esistono fenomeni di risonanza sismica nel campo di frequenze di interesse ingegneristico (0.5-10 Hz).

#### 2. Livello semi-qualitativo

Alle misure sono associate delle stime molto grossolane dello spessore delle coperture responsabili del fenomeno della risonanza e dell'entità del contrasto atteso.

La posizione dei massimi dei rapporti spettrali mostra una buona correlazione con le frequenze di risonanza delle onde S ( $f_0 = V_s / 4H$ ) e cioè la frequenza di risonanza viene determinata, dividendo la velocità delle onde di taglio medie per 4 volte lo spessore della coltre.

Normalmente ricavato visualmente il valore di  $f_0$  dal rapporto H/V si valuta la  $V_s$  oppure lo spessore della coltre alluvionale applicando le formule indicate.

$$f_0 = \frac{V_s}{4 \cdot H} \longrightarrow V_s = 4H \cdot f_0 \longrightarrow H = \frac{V_s}{4 \cdot f_0}$$

Ovviamente tale risultato deve essere semplicemente considerato come stima di massima; maggiore precisione per definire la  $V_s$  media richiede la conoscenza dello spessore della coltre alluvionale o detritica (es. da sondaggi). In alcuni casi è possibile formulare ipotesi ragionevoli riguardo

al profilo di velocità. Per esempio, nel caso di corpi di sedimenti non consolidati, si può presumere che l'andamento medio del profilo di velocità sia controllato dal carico litostatico.

In questo caso, per i mezzi granulari, è ragionevole ipotizzare un andamento delle Vs con la profondità H del tipo "Legge di potenza"<sup>5</sup> riportata in figura 7.6.

$$V_{S(H)} = V_0 (1+H)^a$$

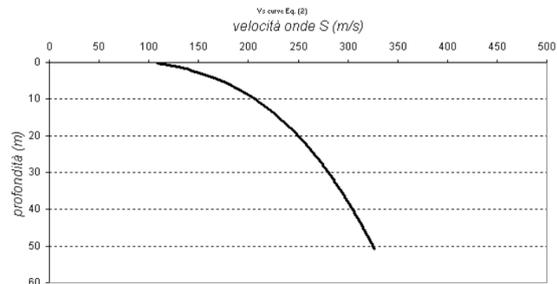


Fig. 6.6 - Andamento delle Vs in profondità

Dove  $V_0$  e l'esponente "a" dipendono dalle caratteristiche del sedimento (granulometrie, coesione, ecc..).

### 3. Livello quantitativo

Le misure vengono "invertite" (con modelli piano-paralleli) per ricavare informazioni sul profilo di velocità delle onde S nel sottosuolo del punto di misura.

In questo caso adeguati programmi ricostruiscono la curva di dispersione HVSR utilizzando un modello a strati multipli per i quali variano le caratteristiche elastiche ( $V_p$ ,  $V_s$  e Poisson) e lo spessore. Sono sistemi iterativi di calcolo con i quali viene ricostruita una stratigrafia sismica in Vs. Anche in questo caso i risultati sono da considerarsi di maggiore qualità dei precedenti ma pur sempre soggetti a errori a volte anche significativi.

Maggiore precisione si ha vincolando lo spessore della coltre alluvionale o detritica o utilizzando oltre informazioni.

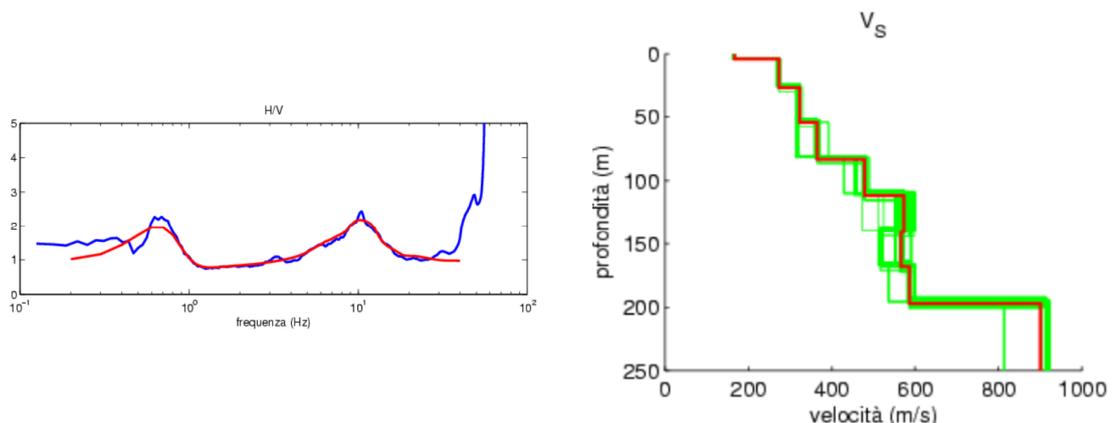


Figura 6.7 - In sinistra è riportato uno spettro H/V (curva di dispersione) in blu e la relativa curva di ellitticità elaborata, prodotta dai log in Vs riportati sul grafico a destra. In questa figura sono indicati i successivi modelli iterativi in verde ed il log Vs finale in rosso.

<sup>5</sup> [lbs-von Seht - Jürgen Wohlenberg](#)

Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bulletin of the Seismological Society of America (1999)

## 6.2 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.

## 6.3 ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati raccolti impiega un software (WinMASW Academy 2019) 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 step 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 graficizzazione 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 è costituito da 4 fogli e presenta:

- Foglio 1: Localizzazione planimetria del sito con foto;  
Foglio 2: Sismogrammi in tempo delle 3 componenti UD (Up-Down), NS (Nord-Sud), EW (Est-Ovest);  
Sismogrammi in frequenza delle 3 componenti;  
Rapporto di persistenza dello spettro HVSR;  
Direzionalità del rapporto HVSR.

Il rapporto di persistenza permette di verificare la presenza ed attendibilità temporanea di un picco HV mentre la direzionalità consente di valutare l'omogeneità azimutale del rumore di fondo e l'eventuale eliminazione di rumore antropici direzionati.

- Foglio 3: Grafico dello spettro HVSR con indicato il valore medio e gli scarti;  
Grafico dell'ampiezza degli spettri delle singole componenti;  
Criteri Sesame della curva H/V;  
Criteri Sesame del picco H/V.

- Foglio 4: Curve di dispersione ed ellitticità;  
Parametri delle Velocità delle onde di taglio, Modulo di taglio e Densità, variabili con la profondità;  
Profilo delle Vs e del Modulo di taglio;  
Vseq, Profondità del bedrock e Categoria di suolo riferite alle NTC 2018.

Nel testalino della curva HVSR sono riportati i valori della frequenza e ampiezza di picco con indicati gli scarti.

Alla destra di questo viene riportata una valutazione qualitativa del dato elaborato per Classe e Tipo secondo le indicazioni di Albarello (2010-2011)<sup>6</sup>.

### **Classificazione delle misure H/V**

Estratto da: Tecniche sismiche passive: Indagini a stazione singola - Albarello – Castellaro 2011)

Obiettivo della classificazione è fornire una indicazione immediata circa la qualità delle singole misure H/V, con lo scopo di aiutare gli operatori nella fase interpretativa e nel confronto con altri dati osservati. Questo tipo di classificazione trova il suo principale impiego nella redazione delle mappe delle indagini relative al livello 1 della microzonazione sismica.

I criteri proposti sono più rigidi di quelli di SESAME in quanto includono elementi di giudizio non contemplati in precedenza, quali:

1. durata complessiva della registrazione che deve essere tale da produrre stime "robuste" del campo medio delle vibrazioni ambientali
2. stazionarietà temporale dei rapporti spettrali
3. isotropia del segnale in termini dei rapporti spettrali
4. assenza di rumore elettromagnetico
5. andamento complessivo della curva H/V

Si confrontano misure ottenute con spettri lisciati con una finestra triangolare al 5% della frequenza centrale. Valori maggiori dell'ampiezza della finestra di lisciamento possono essere utilizzati per migliorare la leggibilità della curva in fase di interpretazione.

Vengono proposte tre classi di qualità:

<sup>6</sup> Albarello D., Cesi C., Eulilli V., et alii (2010) - The contribution of the ambient vibration prospecting in seismic microzonation: an example from the area damaged by the 26th April 2009 L'Aquila (Italy) earthquake. Boll. Geofis. Teor. Appl., 52 (3).

**Classe A:** H/V affidabile e interpretabile: può essere utilizzata anche da sola

1. la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura (stazionarietà).
2. le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo (isotropia)
3. non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse (assenza di disturbi)
4. i massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale (plausibilità fisica)
5. i criteri di SESAME per una curva H/V attendibile (primi 3 criteri) sono verificati (robustezza statistica)
6. la misura è durata almeno 15/20 minuti (durata)

**ECCEZIONE:** misure effettuate su roccia integra affiorante o in zone alluvionali fini con basamento sismico molto profondo (tipicamente > 1 km) possono non mostrare alcun picco statisticamente significativo della curva H/V nell'intervallo di frequenze di interesse ingegneristico, a causa dell'assenza di contrasti di impedenza sufficientemente marcati. In questi casi, in cui la curva H/V apparirà piatta e con ampiezza circa pari a 1, il criterio 5 risulterà non verificato anche se la misura è di fatto attendibile. In questo solo caso la misura può ricadere nella classe A ma si consiglia di ripetere la misura per confermare l'effettiva assenza di massimi significativi.

**Classe B:** curva H/V sospetta (da "interpretare"): va utilizzata con cautela e solo se coerente con altre misure ottenute nelle vicinanze

1. almeno una delle condizioni della classe A non è soddisfatta, a condizione che non si rientri nell'ECCEZIONE citata per la Classe A

**Classe C:** curva H/V scadente e di difficile interpretazione: non va utilizzata

1. misura di tipo B nella quale la curva H/V mostra una ampiezza crescente al diminuire della frequenza (deriva), indice di un movimento dello strumento durante la misura
2. misura di tipo B nella quale si evidenzia la presenza di rumore elettromagnetico nell'intervallo di frequenze di potenziale interesse

I criteri delineati sopra non riguardano l'interpretazione in chiave geologico-stratigrafica della curva, per la quale sono richiesti ulteriori criteri (per esempio i criteri SESAME per la "chiarezza" del picco).

Per le sole Classi A e B si possono pertanto definire due sottoclassi delle classi precedenti, ossia:

- Tipo 1. Presenta almeno un picco "chiaro" secondo i criteri di SESAME: possibile risonanza  
Tipo 2. Non presenta picchi "chiari" nell'intervallo di frequenze di interesse: assenza di risonanza.

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>7</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:

<sup>7</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.

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

dove Z è lo spessore dello strato di sedimenti e Vs dipende dalla velocità delle onde di taglio al suo interno. In base a tale relazione, quindi, a partire da valori misurati di fr e Vs ricavati è possibile stimare lo spessore della coltre sedimentaria di un bacino.

Tuttavia, non essendo sempre presente la misura di Vs 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 Vs 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 Vs per la porzione più superficiale del terreno, è possibile estrapolare l'andamento delle Vs 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 V0 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:

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

Una volta ricostruito un log in Vs è possibile ottenere il valore stimato della frequenza fondamentale o di risonanza:

$$f_0 = V_s / (4h)$$

Generalizzando la relazione per n strati si ottiene:

$$f_0 = \frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} \cdot h_i}{4 \cdot \sum_{i=1}^n h_i}$$

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.

Su ogni prova è possibile verificare l'attendibilità<sup>8</sup> della misura della frequenza di risonanza (i primi tre check dei certificati sono validi) come anche se i criteri di chiarezza per picco HVSR non sempre sono ben definiti.

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

<sup>8</sup> Per l'attendibilità si fa riferimento alle specifiche SESAME (2005)

## 7. CONCLUSIONI

Per la caratterizzazione sismica dei suoli su cui si sviluppa il progetto della linea ferroviaria nella tratta PM228 - Albacina, sono state eseguite indagini sismiche di tip.: Down Hole, MASW e HVSR.

L'ubicazione delle indagini eseguite è riportata in generale nella corografia dell'intero lotto ed anche in dettaglio di ogni singolo sito indagato secondo gli allegati sottoindicati.

- Allegato Corografia (Pag.1)

Oltre ad una ricostruzione geometrica del sottosuolo indagato, le indagini eseguite hanno permesso di determinare i seguenti parametri:

- Down Hole: fornisce un logs in profondità della velocità onde compressione, taglio e moduli dinamici in forma grafica e numerica.
- HVSR + MASW: misura la frequenza fondamentale di risonanza di sito ( $f_0$ ), profilo velocità delle onde di taglio ( $V_{seq}$ ), profondità bedrock e categoria dei suoli (D.M. 17/01/2018)

### DOWN HOLE

All'interno dei fori di sondaggio opportunamente attrezzati con tubo PVC cementato sono state eseguite 2 prove di tipo **Down Hole** che hanno portato alla determinazione di logs della velocità onde compressione, taglio e moduli dinamici.

Per le risultanze dettagliate di tali indagini si rimanda alle schede riportate in allegato in forma grafica e numerica a fine relazione:

- Schede delle risultanze delle indagini Down Hole (4 allegati cadauna);

Tabella riassuntiva principali risultanze indagine Down Hole:

SONDAGGIO	Profondità (m)	$V_{seq}$ (m/s)	H Bedrock (m)	Classe Suolo
FA2	30	454	>30	<b>B</b>
FA4	30	321	18	<b>E</b>

### MASW e HVSR

La determinazione puntuale della velocità delle onde sismiche di taglio per circa 30 metri dal piano campagna e della frequenza di sito è stata ottenuta mediante 3 indagini geofisiche costituite in stendimenti sismici per la misura delle onde superficiali **MASW** con al centro una misura di rumore ambientale **HVSR**.

I terreni interessati dalle strutture presentano valori di  $V_{seq}$  ricavabili al termine di ogni certificato di prova negli allegati grafici al piede della relazione (schede MASW/HVSR).

Con tali parametri è possibile caratterizzare i terreni in relazione all'entrata in vigore del nuovo Decreto Ministeriale 17/01/2018 sulla classificazione sismica dei suoli, ricavabile al termine di ogni certificato di prova.

Per le risultanze dettagliate di tali indagini si rimanda alle schede riportate in allegato in forma grafica e numerica a fine relazione:

- Schede delle risultanze delle indagini MASW ed HVSR elaborate in tecnica congiunta (5 pagine cadauna).

Tabella riassuntiva risultanze indagine congiunta MASW – HVSR:

MASW	HVSR	$f_0$ (Hz)	A0 (H/V)	V <sub>seq</sub> (m/s)	H Bedrock (m)	Classe Suolo
1	227	18.85 ± 0.9	3.6 ± 0.4	438	22	<b>B</b>
2	228	12.36 ± 0.3	3.4 ± 0.4	375	15	<b>B</b>
3	229	0.68 ± 1.8	3.0 ± 0.7	317	4	<b>E</b>

**PROGEO S.r.l.**

Dott. Gabriele Pulelli



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

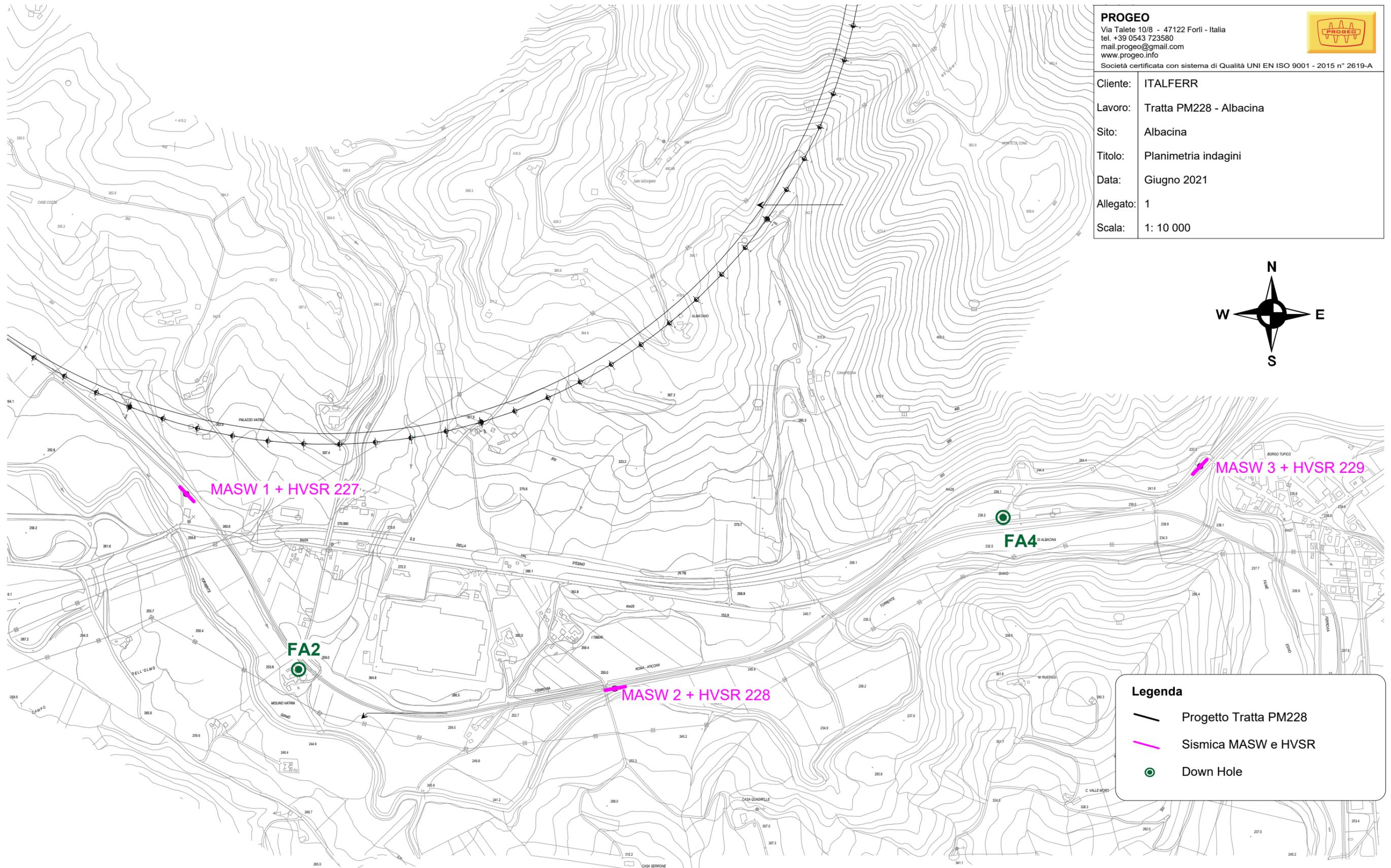
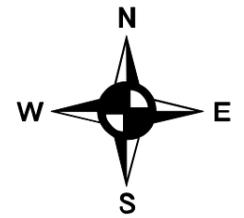
**PROGEO**

Via Talete 10/8 - 47122 Forlì - Italia  
tel. +39 0543 723580  
mail.progeo@gmail.com  
www.progeo.info



Società certificata con sistema di Qualità UNI EN ISO 9001 - 2015 n° 2619-A

Cliente: ITALFERR  
Lavoro: Tratta PM228 - Albacina  
Sito: Albacina  
Titolo: Planimetria indagini  
Data: Giugno 2021  
Allegato: 1  
Scala: 1: 10 000



**Legenda**

- Progetto Tratta PM228
- Sismica MASW e HVSR
- Down Hole



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

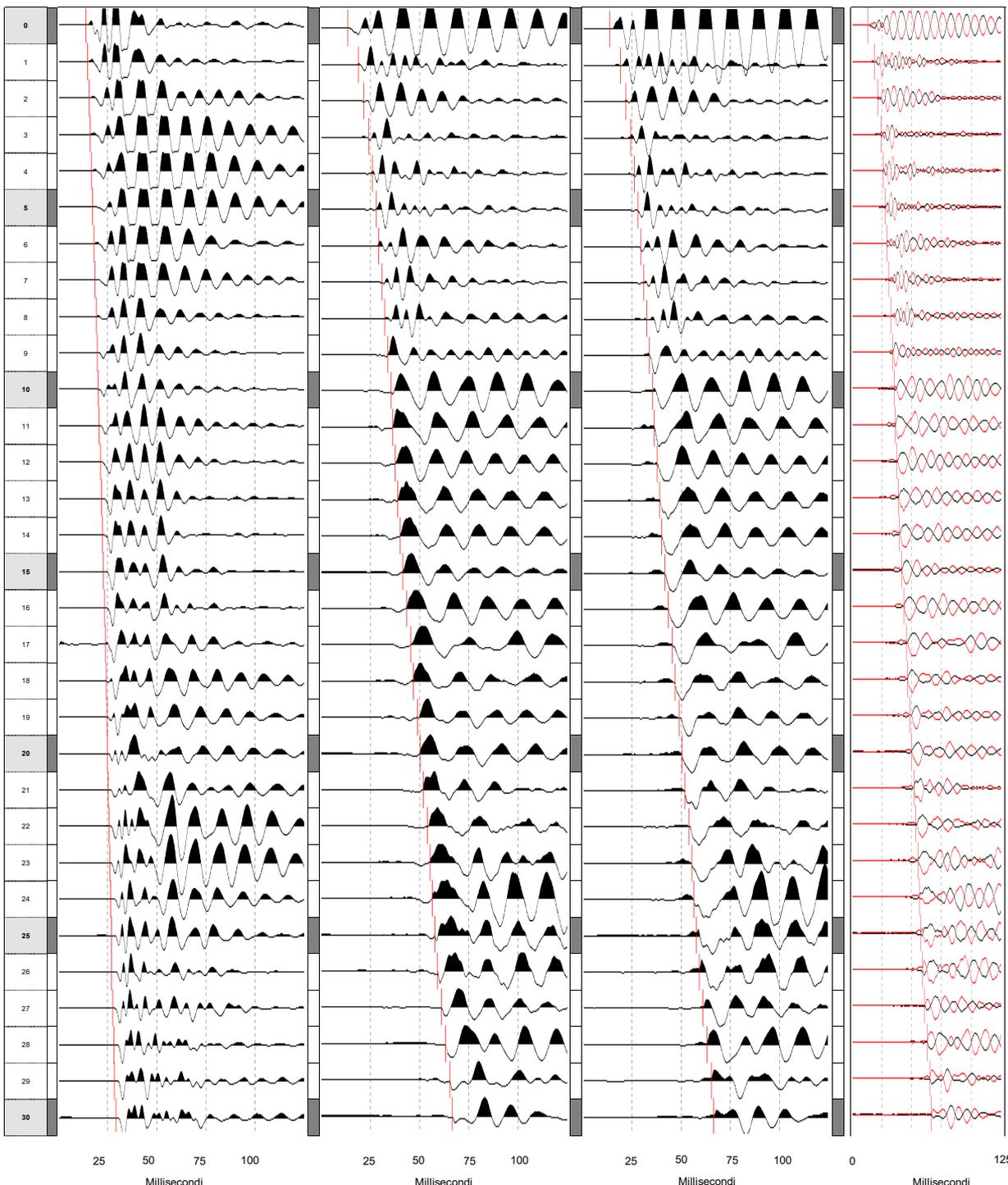
**ITALFERR**  
**FA 02**  
**Albacina**  
**15 Giugno 2021**

**SISMOGRAMMI**  
 Misura eseguita con sonda 3d costituita da due gruppi di sensori, con orientamento tridirezionale, a distanza di 1 m  
**Distanza bocca foro - shot = 2.8 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
-------------------	--	--	--	--	--------------



Da 0.00 a 4.95 m  
 Sabbie limose con ghiaia.

Da 4.95 m a 16.60 m  
 Sabbia ghiaiosa sabbiosa, in matrice limosa.

Da 16.60 m a 30.00 m  
 Argille marrone debolmente sabbiose, a struttura da indurita a compatta, a lami frantumata. Presenti rare ciassi di natura argillita, centometrici, angolari.

<b>COMMITTENTE</b>	<b>ITALFERR</b>
<b>DOWN HOLE</b>	<b>FA 02</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>Albacina</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>15 Giugno 2021</b>

<b>Metodologia Down Hole</b>
Differenziale
Progressivo
Distanza bocca foro - shot = 2.8 m



Falda = 10 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) min media max	Vs (km/sec) min media max	ε	ε				
0.0	4.67	14.00	0.77	0.19	0.47	1.64	1803	614	9164	Da 0.00 a 4.95 m Sabbie limose con ghiaia.	1.06	0.22	0.48	1.70	2648	897	19252	0.75	0.77	0.82	0.036	0.19	0.19	0.20	0.005
1.0	5.58	18.70	0.87	0.20	0.47	1.65	1950	662	11955		0.85	0.87	0.92	0.036	0.19	0.20	0.20	0.004							
2.0	7.14	22.74	1.10	0.21	0.48	1.67	2159	729	19746		1.09	1.10	1.11	0.009	0.20	0.21	0.21	0.005							
3.0	8.59	25.20	1.16	0.25	0.48	1.75	3330	1128	22541		1.12	1.16	1.21	0.043	0.22	0.25	0.27	0.028							
4.0	10.52	27.48	1.38	0.27	0.48	1.79	3999	1351	32855		1.32	1.38	1.43	0.053	0.24	0.27	0.29	0.024							
5.0	11.16	29.18	1.45	0.31	0.48	1.85	5316	1801	37071	1.40	1.45	1.50	0.049	0.29	0.31	0.32	0.012								
6.0	12.13	31.33	1.62	0.56	0.43	2.14	19393	6766	48241	1.60	1.62	1.65	0.029	0.54	0.56	0.57	0.012								
7.0	13.42	32.84	1.87	0.61	0.44	2.19	23790	8255	67177	1.85	1.87	1.90	0.025	0.60	0.61	0.62	0.008								
8.0	14.54	34.21	1.88	0.64	0.43	2.21	26532	9248	67582	1.86	1.88	1.91	0.023	0.64	0.64	0.64	0.003								
9.0	15.67	35.69	1.89	0.65	0.43	2.22	27408	9563	68202	1.87	1.89	1.91	0.021	0.65	0.65	0.65	0.004								
10.0	17.12	37.11	1.90	0.66	0.43	2.23	28281	9878	68821	1.88	1.90	1.92	0.019	0.65	0.66	0.66	0.005								
11.0	17.78	38.41	1.91	0.66	0.43	2.23	28309	9883	69571	1.89	1.91	1.93	0.018	0.66	0.66	0.66	0.003								
12.0	18.72	39.89	1.92	0.66	0.43	2.23	28416	9917	70312	1.89	1.91	1.93	0.018	0.66	0.66	0.67	0.005								
13.0	19.69	41.50	1.93	0.66	0.43	2.23	27991	9757	71131	1.91	1.93	1.94	0.014	0.65	0.66	0.66	0.006								
14.0	20.17	42.74	1.93	0.65	0.44	2.22	27830	9693	71915	1.92	1.93	1.95	0.012	0.65	0.65	0.66	0.007								
15.0	20.79	44.51	1.94	0.65	0.44	2.23	27946	9731	72665	1.93	1.94	1.95	0.010	0.64	0.65	0.66	0.009								
16.0	21.50	45.95	1.95	0.66	0.44	2.23	28058	9767	73419	1.94	1.95	1.96	0.008	0.64	0.66	0.66	0.009								
17.0	21.78	47.93	1.96	0.66	0.44	2.23	28179	9807	74177	1.96	1.96	1.97	0.006	0.65	0.66	0.67	0.009								
18.0	22.18	49.17	1.87	0.62	0.44	2.20	24986	8689	67045	1.80	1.87	1.95	0.075	0.62	0.62	0.63	0.005								
19.0	22.78	51.14	1.83	0.61	0.44	2.18	23637	8220	63252	1.80	1.83	1.87	0.037	0.60	0.61	0.61	0.002								
20.0	23.09	52.75	1.82	0.61	0.44	2.18	23542	8188	62901	1.78	1.82	1.88	0.048	0.60	0.61	0.61	0.002								
21.0	23.25	54.36	1.83	0.60	0.44	2.18	23150	8044	63263	1.79	1.83	1.88	0.046	0.60	0.60	0.61	0.005								
22.0	23.59	56.21	1.83	0.60	0.44	2.18	23340	8111	63558	1.79	1.83	1.88	0.045	0.60	0.60	0.61	0.005								
23.0	23.76	57.94	1.83	0.60	0.44	2.18	23337	8108	63875	1.80	1.83	1.88	0.044	0.60	0.60	0.61	0.005								
24.0	23.99	59.06	1.84	0.60	0.44	2.18	23325	8102	64195	1.80	1.84	1.89	0.043	0.60	0.60	0.61	0.005								
25.0	24.32	60.42	1.84	0.60	0.44	2.18	23268	8080	64519	1.81	1.84	1.89	0.041	0.60	0.60	0.61	0.005								
26.0	24.55	62.15	1.84	0.60	0.44	2.18	23364	8113	64828	1.81	1.84	1.89	0.040	0.60	0.60	0.61	0.005								
27.0	24.91	64.12	1.85	0.61	0.44	2.18	23463	8147	65137	1.82	1.85	1.89	0.039	0.60	0.61	0.61	0.005								
28.0	25.19	66.10	1.85	0.61	0.44	2.18	23564	8182	65447	1.82	1.85	1.90	0.038	0.60	0.61	0.61	0.005								
29.0	25.41	68.33	1.86	0.61	0.44	2.19	23743	8245	65749	1.83	1.86	1.90	0.036	0.61	0.61	0.61	0.001								
30.0	25.84	69.81	1.86	0.61	0.44	2.19	23749	8245	66071	1.83	1.86	1.90	0.035	0.61	0.61	0.61	0.003								

Legenda parametri dinamici			
Tp	Tempi onde di compressione	γ	Peso di volume
Ts	Tempi onde di taglio	Edin	Modulo di Elasticità dinamico
Vp	Velocità onde di compressione	Gdin	Modulo di Taglio dinamico
Vs	Velocità onde di taglio	Kdin	Modulo di Compressibilità dinamico
v	Coefficiente di Poisson	■	Campioni di laboratorio
			T/m³
			Kg/cm
			Kg/cm
			Kg/cm

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

Quota Vs=800 m/sec > 30 m

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,11} \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

Vs,eq = 454 m/sec

G<sub>0,eq</sub> = 4359 Kg/cm²

CATEGORIA SUOLO = B

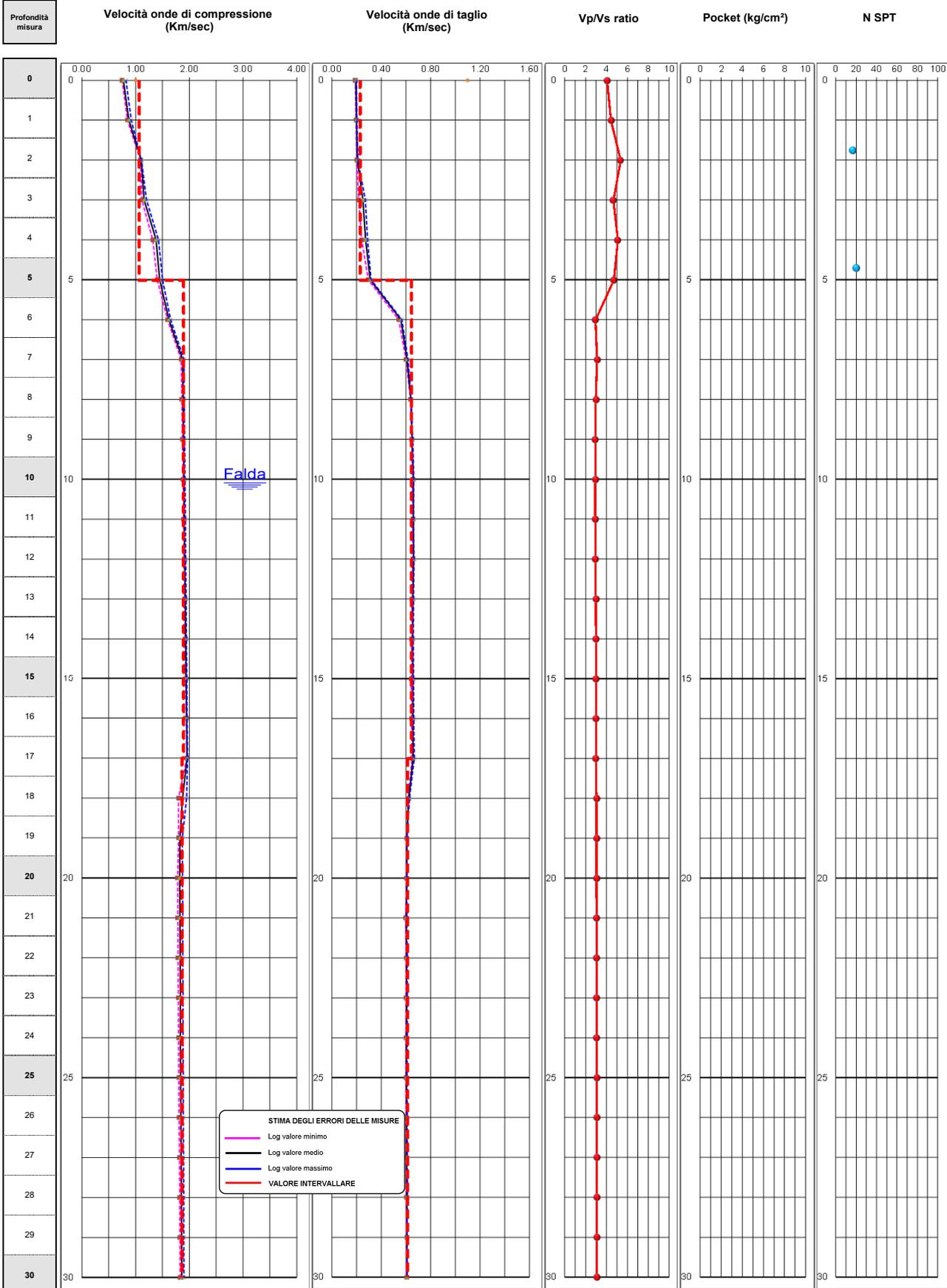
<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>FA 02</b>
<b>Albacina</b>
<b>15 Giugno 2021</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2.8 m</b>



**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 4.95 m  
Sabbie limose con ghiaia.

Da 4.95 m a 16.60 m  
Sabbia ghiaiosa e/o ghiaie sabbiose, in matrice limosa.

Da 16.60 m a 30.00 m  
Argille marnose debolmente sabbiose, a struttura da indistinta a compatta, a luoghi frantumata. Presenti rari clasti di natura argillitica, centimetrici, angolari.

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

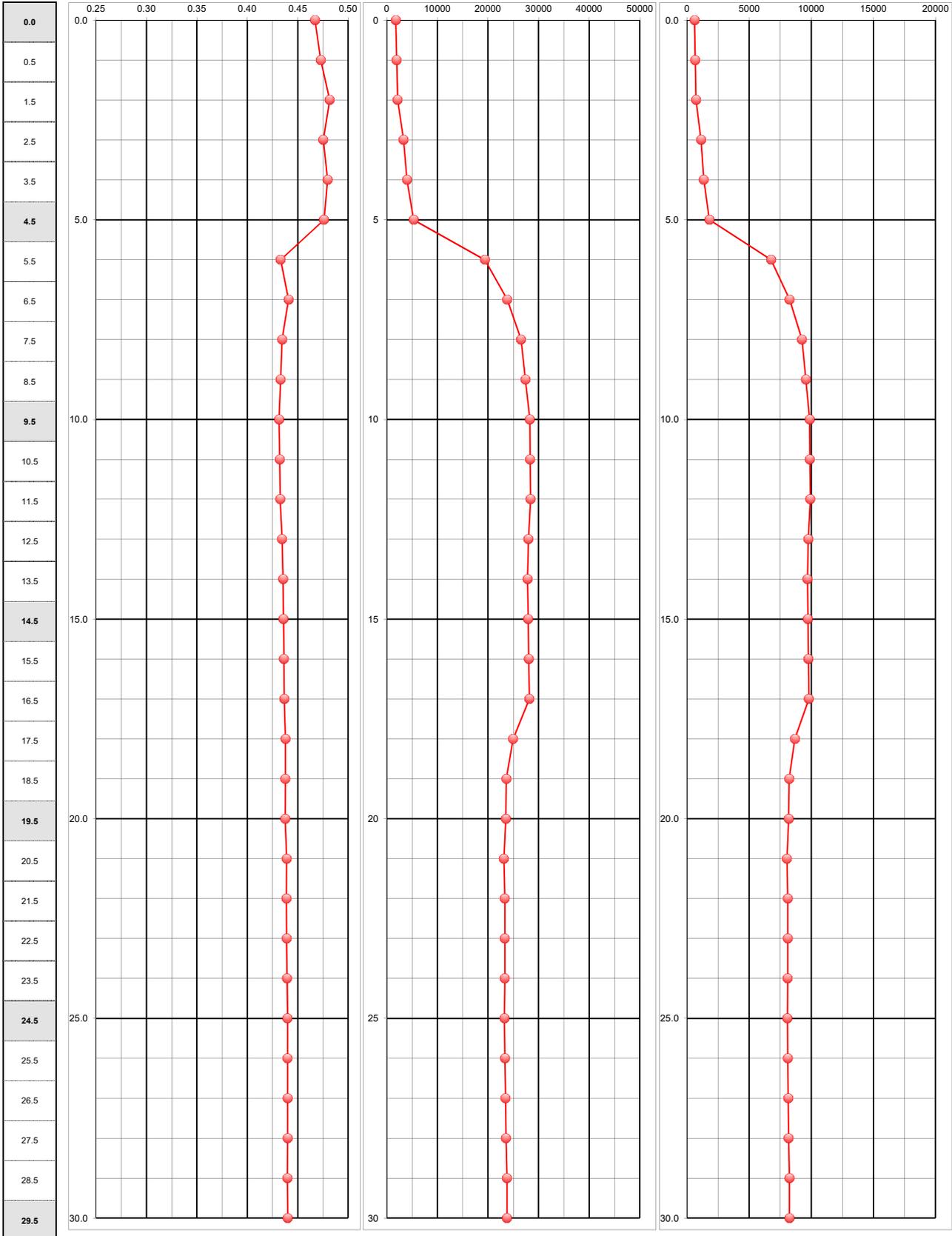
<b>ITALFERR</b>
<b>FA 02</b>
<b>Albacina</b>
<b>15 Giugno 2021</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2.8 m</b>



**Stratigrafia sintetica**

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



Da 0.00 a 4.95 m  
Sabbie limose con ghiaia.

Da 4.95 m a 16.60 m  
Sabbia ghiaiosa e/o ghiaie sabbiose, in matrice limosa.

Da 16.60 m a 30.00 m  
Argille marnose debolmente sabbiose, a struttura da indistinta a compatta, a luoghi frantumata. Presenti rari clasti di natura argillitica, centimetrici, angolari.

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

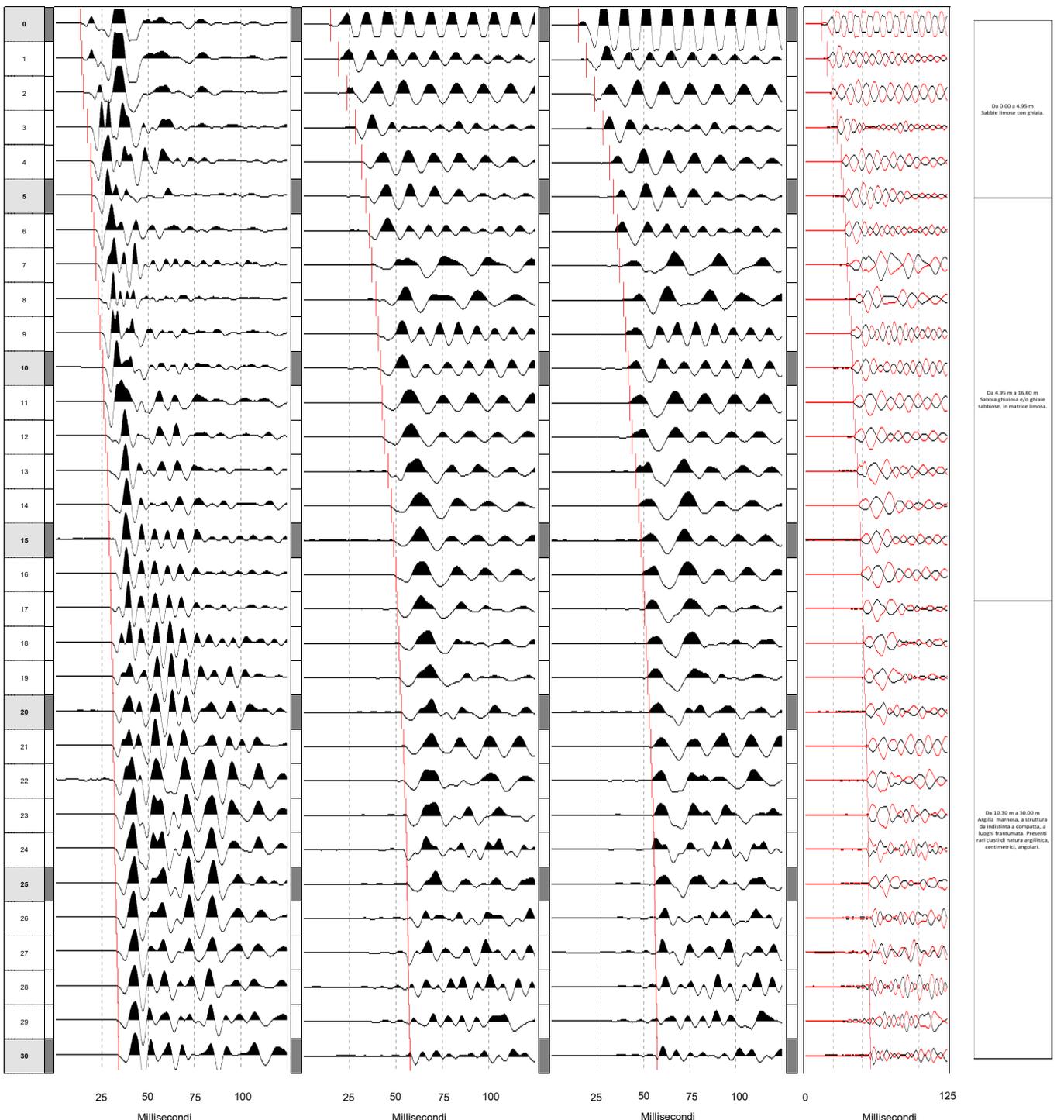
**ITALFERR**  
**FA 4**  
**Albacina**  
**15 Giugno 2021**

**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 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>FA 4</b>
<b>Località - Progetto</b>	<b>Albacina</b>
<b>Data acquisizione</b>	<b>15 Giugno 2021</b>

<b>Metodologia Down Hole</b>
Differenziale
Progressivo
Distanza bocca foro - shot = 2 m



Falda = 10m

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) min media max	Vs (km/sec) min media max	v min media max	γ min media max	Edin min media max	Gdin min media max	Kdin min media max	
0.0	3.33	10.00	0.85	0.17	0.48	1.60	1456	492	11173	Da 0.00 a 1.30 m Sabbia medio-fine con ghiaia.	0.85	0.17	0.48	1.60	1456	492	11173	0.81	0.85	0.89	0.043	0.17	0.17	0.18	0.006
1.0	4.25	14.47	0.87	0.21	0.47	1.67	2142	729	11858									0.86	0.87	0.88	0.006	0.20	0.21	0.22	0.012
2.0	5.61	19.24	1.00	0.22	0.47	1.70	2579	875	16105									0.98	1.00	1.03	0.027	0.22	0.22	0.23	0.002
3.0	7.26	23.86	1.07	0.24	0.47	1.72	2871	973	18768	Da 1.30 a 5.00 m Sabbia ghiaioso-flosca, a granulometria medio-fine.	1.00	0.23	0.47	1.71	2755	936	16412	1.05	1.07	1.10	0.025	0.23	0.24	0.24	0.003
4.0	9.19	27.46	1.07	0.26	0.47	1.76	3428	1166	18918									1.05	1.07	1.10	0.025	0.25	0.26	0.26	0.002
5.0	9.83	29.77	1.10	0.26	0.47	1.77	3729	1269	20059									1.08	1.10	1.13	0.023	0.26	0.26	0.27	0.004
6.0	10.79	31.79	1.16	0.33	0.46	1.87	5928	2034	23166									1.15	1.16	1.19	0.023	0.31	0.33	0.34	0.012
7.0	12.08	33.09	1.23	0.36	0.45	1.91	7302	2511	26353	Da 5.00 a 10.30 m Sabbia con ghiaia, debolmente flosca, a granulometria medio-fine, con ciottoli.	1.19	0.34	0.46	1.89	6692	2303	24444	1.22	1.23	1.26	0.023	0.36	0.36	0.36	0.002
8.0	13.21	35.40	1.23	0.37	0.45	1.93	7936	2737	26338									1.22	1.23	1.26	0.023	0.36	0.37	0.39	0.013
9.0	14.34	36.70	1.23	0.39	0.45	1.95	8566	2962	26302									1.22	1.23	1.26	0.023	0.37	0.39	0.41	0.024
10.0	15.78	38.00	1.28	0.40	0.45	1.97	9273	3206	28804									1.27	1.28	1.31	0.023	0.39	0.40	0.41	0.008
11.0	16.45	38.87	1.34	0.44	0.44	2.02	11599	4030	31628									1.32	1.34	1.37	0.023	0.43	0.44	0.45	0.008
12.0	17.39	40.17	1.40	0.47	0.44	2.05	13098	4557	34682	Da 10.30 m a 15.00 m Ghiaia di origine fluviale immersa in matrice sabbiosa.	1.39	0.45	0.44	2.04	12996	4523	34216	1.38	1.40	1.42	0.022	0.46	0.47	0.47	0.005
13.0	18.36	42.19	1.40	0.47	0.43	2.05	13514	4709	34628									1.38	1.40	1.42	0.022	0.47	0.47	0.48	0.006
14.0	18.84	43.92	1.42	0.48	0.44	2.06	13774	4796	35928									1.40	1.42	1.45	0.023	0.47	0.48	0.49	0.009
15.0	19.45	45.22	1.63	0.50	0.45	2.08	15148	5227	49439									1.59	1.63	1.68	0.045	0.49	0.50	0.51	0.011
16.0	20.16	46.52	1.88	0.54	0.45	2.12	18638	6409	67734	Da 15.00 m a 18.00 m Sabbia ghiaiosa con fimo, a granulometria medio-fine, mediamente addensata.	1.86	0.54	0.45	2.12	18551	6380	67291	1.83	1.88	1.92	0.045	0.53	0.54	0.55	0.010
17.0	20.45	47.24	2.07	0.58	0.46	2.16	21867	7504	84701									2.03	2.07	2.12	0.044	0.58	0.58	0.59	0.003
18.0	20.85	48.10	2.35	0.77	0.44	2.32	40651	14121	111698									2.30	2.35	2.40	0.050	0.74	0.77	0.81	0.036
19.0	21.45	48.83	2.51	0.87	0.43	2.39	52834	18453	128740									2.46	2.51	2.56	0.047	0.86	0.87	0.88	0.013
20.0	21.75	49.69	2.73	1.09	0.41	2.53	85351	30348	151667									2.69	2.73	2.78	0.045	1.07	1.09	1.10	0.017
21.0	21.92	50.80	2.80	1.19	0.39	2.58	103160	37087	157419									2.76	2.80	2.85	0.042	1.18	1.19	1.20	0.012
22.0	22.25	51.51	2.84	1.22	0.39	2.60	109439	39448	161612									2.80	2.84	2.89	0.042	1.20	1.22	1.24	0.020
23.0	22.42	52.21	2.92	1.24	0.39	2.61	114335	41136	172759									2.88	2.92	2.97	0.044	1.22	1.24	1.26	0.020
24.0	22.65	52.64	3.01	1.34	0.38	2.66	135071	49106	180510	Da 18.00 m a 30.00 m Calcarene calcinelle, molto fittissime.								2.96	3.01	3.05	0.045	1.31	1.34	1.39	0.040
25.0	22.99	53.31	3.15	1.44	0.37	2.71	156967	57403	197050									3.10	3.15	3.19	0.043	1.42	1.44	1.46	0.021
26.0	23.21	53.86	3.30	1.53	0.36	2.75	179323	65766	218686									3.26	3.30	3.35	0.042	1.51	1.53	1.55	0.021
27.0	23.57	54.41	3.47	1.51	0.38	2.74	176420	63794	250724									3.42	3.47	3.51	0.041	1.50	1.51	1.52	0.010
28.0	23.86	55.04	3.54	1.55	0.38	2.76	186178	67384	261780									3.49	3.54	3.58	0.042	1.53	1.55	1.57	0.020
29.0	24.08	55.54	3.65	1.57	0.39	2.77	192784	69514	283486									3.61	3.65	3.69	0.043	1.55	1.57	1.59	0.020
30.0	24.51	56.10	3.69	1.58	0.39	2.78	196852	70969	290026									3.64	3.69	3.73	0.044	1.56	1.58	1.60	0.021

Legenda parametri dinamici			
Tp	Tempi onde di compressi millisecondi	γ	Peso di volume T/m³
Ts	Tempi onde di taglio millisecondi	Edin	Modulo di Elasticità dinamico Kg/cm
Vp	Velocità onde di compr/Km/sec	Gdin	Modulo di Taglio dinamico Kg/cm
Vs	Velocità onde di taglio Km/sec	Kdin	Modulo di Compressibilità dinamico Kg/cm
v	Coefficiente di Poisson		Campioni di laboratorio

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

Quota Vs=800 m/sec = 18 m

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,11} \frac{h_i}{V_{S_i}}}$$

Vs,eq = 321 m/sec

G<sub>0,eq</sub> = 2177 Kg/cm²

**CATEGORIA SUOLO = E**

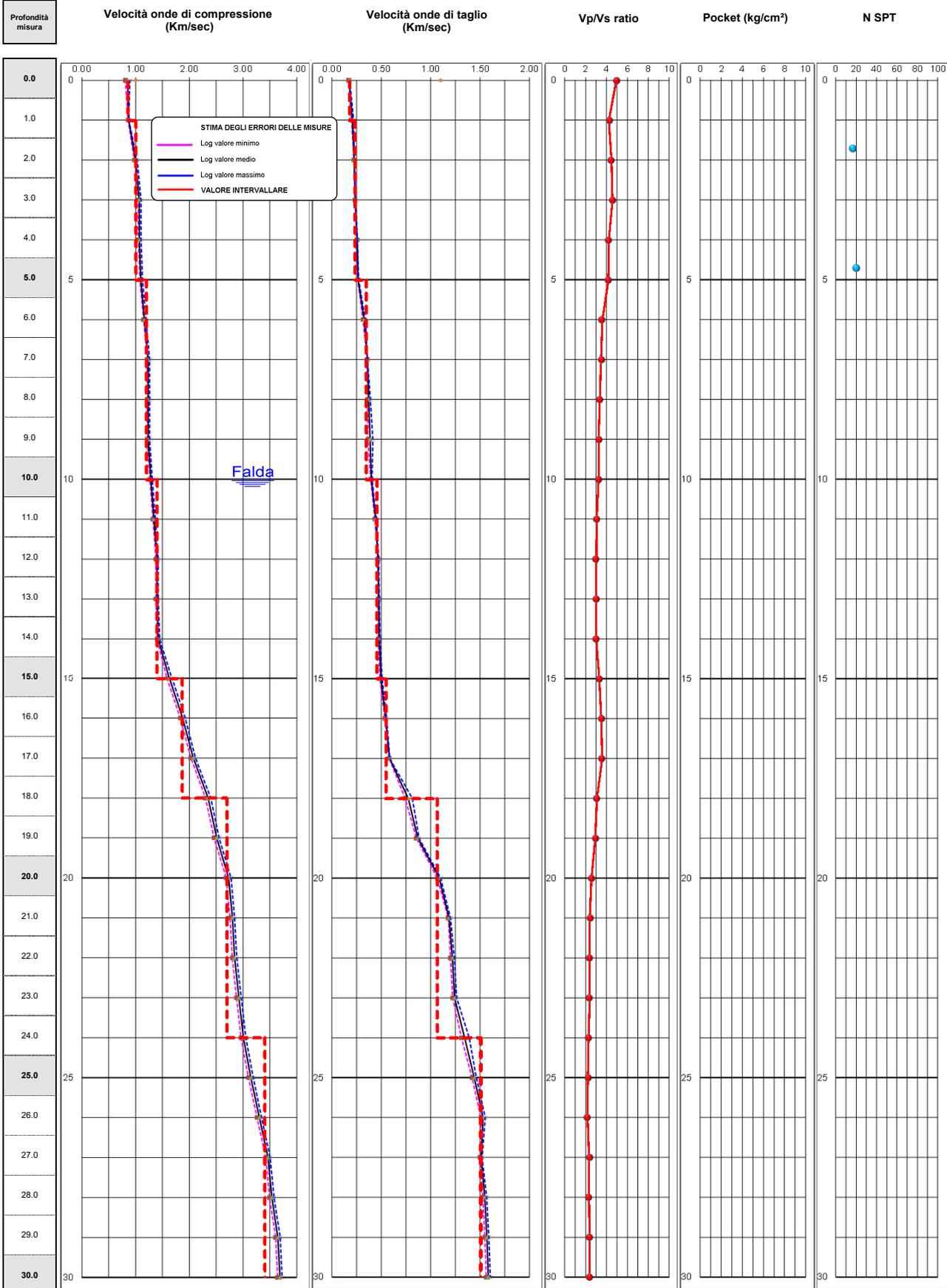
<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>FA 4</b>
<b>Albacina</b>
<b>15 Giugno 2021</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2 m</b>



**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 1.30 m Sabbia medio-fine con ghiaia.
Da 1.30 a 5.00 m Sabbia ghiaioso-limosa, a granulometria medio-fine.
Da 5.00 a 10.30 m Sabbia con ghiaia debolmente limosa, a granulometria medio-fine, con ciottoli.
Da 10.30 m a 15.00 m Ghiaia di origine fluviale immersa in matrice sabbiosa.
Da 15.00 m a 18.00 m Sabbia ghiaiosa con limo, a granulometria medio-fine, mediamente addensata.
Da 18.00 m a 30.00 m Calcarenite-calciarudite, molto fratturata.

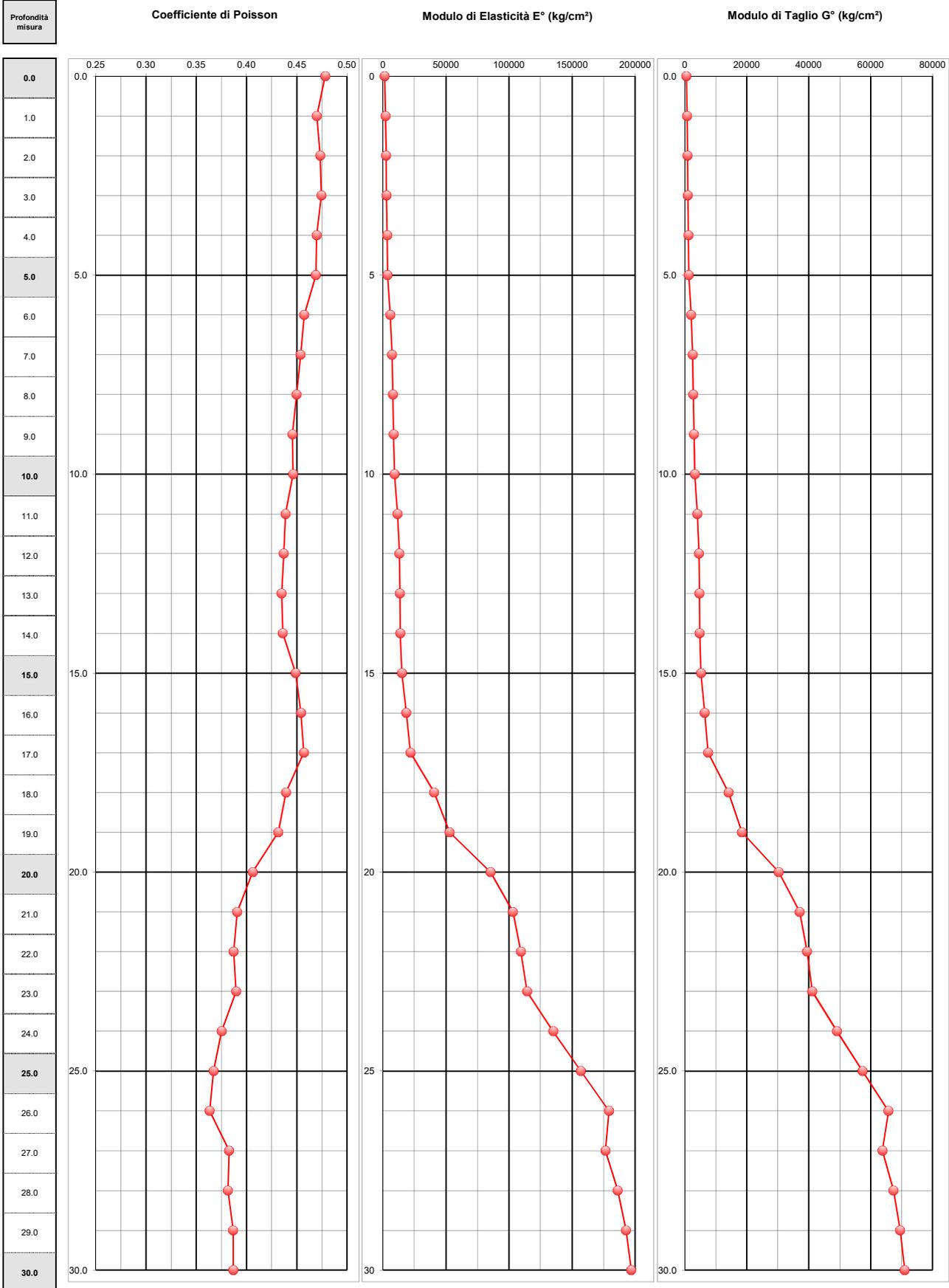
<b>COMMITTENTE</b>
<b>DOWN HOLE</b>
<b>Località</b>
<b>Data acquisizione</b>

<b>ITALFERR</b>
<b>FA 4</b>
<b>Albacina</b>
<b>15 Giugno 2021</b>

<b>LOG DEI PARAMETRI ELASTICI</b>
<b>Progressivo</b>
<b>Distanza bocca foro - shot = 2 m</b>



**Stratigrafia sintetica**



Da 0.00 a 1.30 m Sabbia medio-fine con ghiaia.
Da 1.30 a 5.00 m Sabbia ghiaiosa-limoso, a granulometria medio-fine.
Da 5.00 a 10.30 m Sabbia con ghiaia debolmente limosa, a granulometria medio fine, con ciottoli.
Da 10.30 m a 15.00 m Ghiaia di origine fluviale immersa in matrice sabbiosa.
Da 15.00 m a 18.00 m Sabbia ghiaiosa con limo, a granulometria medio-fine, mediamente addensata.
Da 18.00 m a 30.00 m Calcareo-calciolitite, molto fratturata.

# MAPPA INDAGINE CONGIUNTA MASW E HVSR

<b>Committente:</b>	<b>ITALFERR</b>	<b>DATA PROVA:</b>	13/05/2021
<b>CODICE LAVORO:</b>	2178	<b>Coordinate Cartesiane:</b>	
<b>CODICE PROVA:</b>	MASW 1 + HVSR 227	<b>UTM WGS84 Fuso 33</b>	EST 334480.98
<b>LOCALITA':</b>	Castelplanio	<b>Longitudine</b>	NORD 4801259.42
<b>STRUMENTAZIONE</b>	SARA SL 06	<b>Latitudine</b>	12.957831°
<b>TERRENO DI MISURA:</b>	Naturale	<b>Latitudine</b>	43.345960°
<b>ACCOPPIAMENTO:</b>	Appoggiato al terreno	<b>QUOTA (m. s.l.m.):</b>	265
<b>ORIENTAMENTO:</b>	Nord		
<b>CONDIZIONI METEO:</b>	Soleggiato		

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO DELLA STRUMENTAZIONE



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**Committente:** ITALFERR

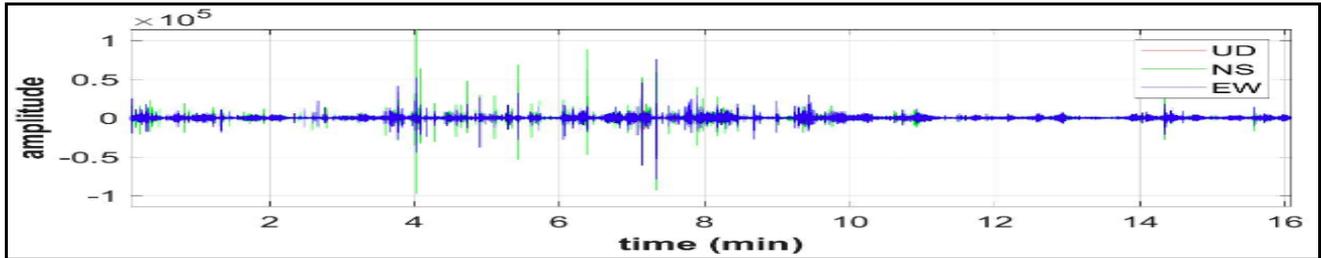
**CODICE LAVORO:** 2178  
**CODICE PROVA:** MASW 1 + HVSR 227

**LOCALITA':** Castelplanio  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

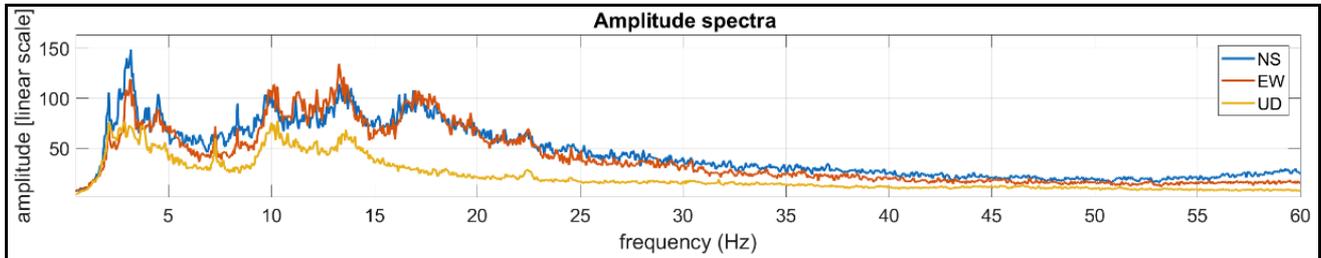
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	SARA SL 06
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	10:20:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Sampling frequency (Hz):	200
Window length (sec):	20
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]:	0.5Hz
Length of analysed dataset (min):	20.0
Tapering (%):	5
Smoothing (%):	15

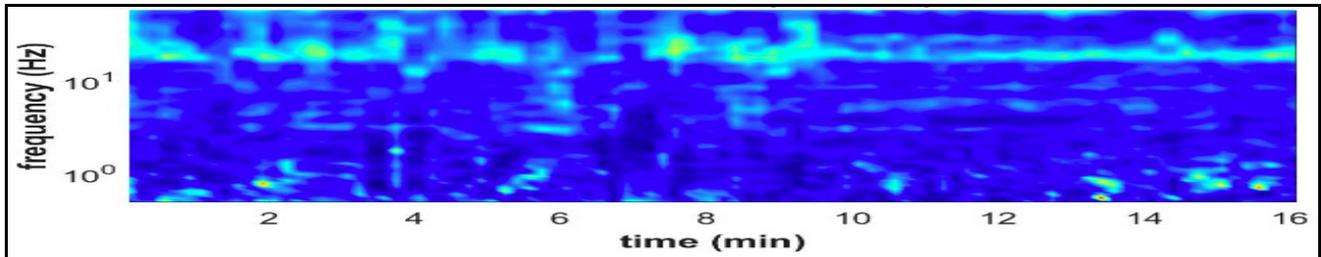
**Sismogrammi (Tempo)**



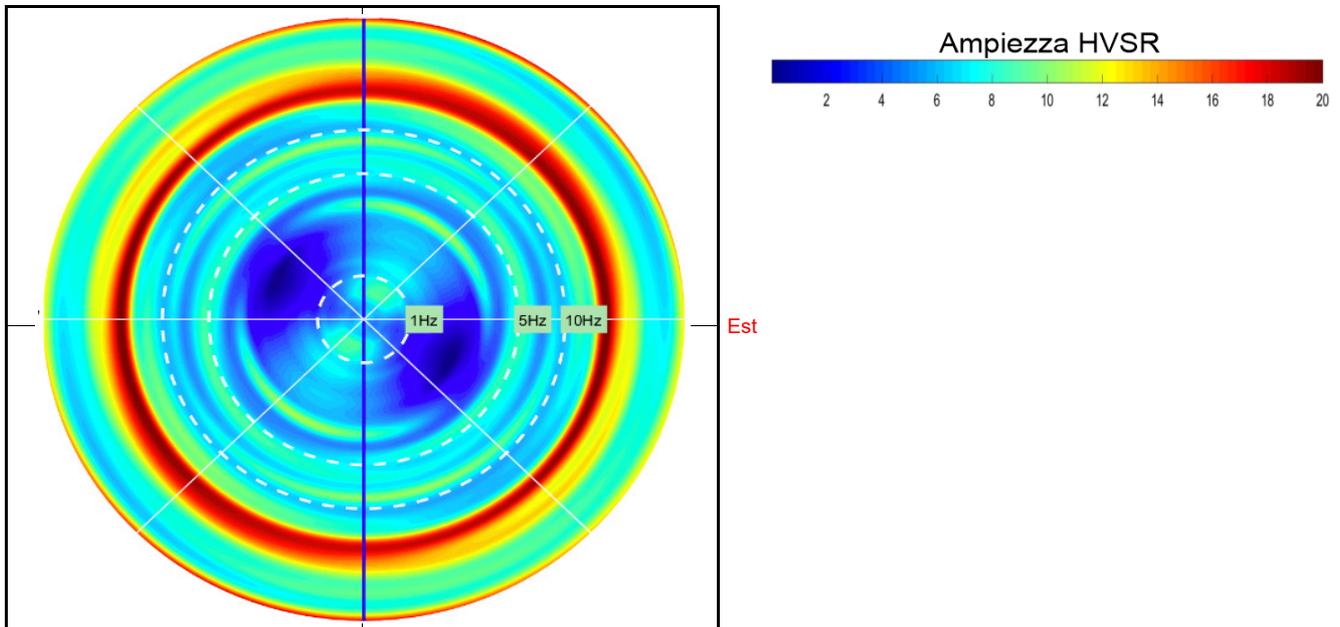
**Sismogrammi (Frequenza Hz)**



**Persistenza rapporto HVSR**



**Direzionalità rapporto HVSR**



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

Committente:

ITALFERR

CODICE LAVORO  
CODICE PROVA

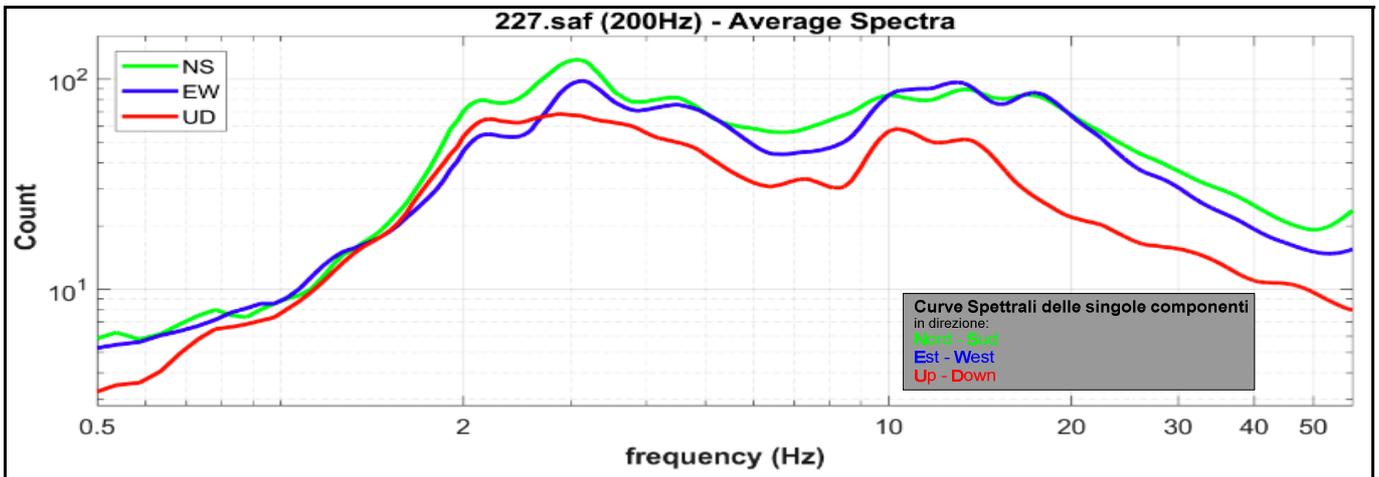
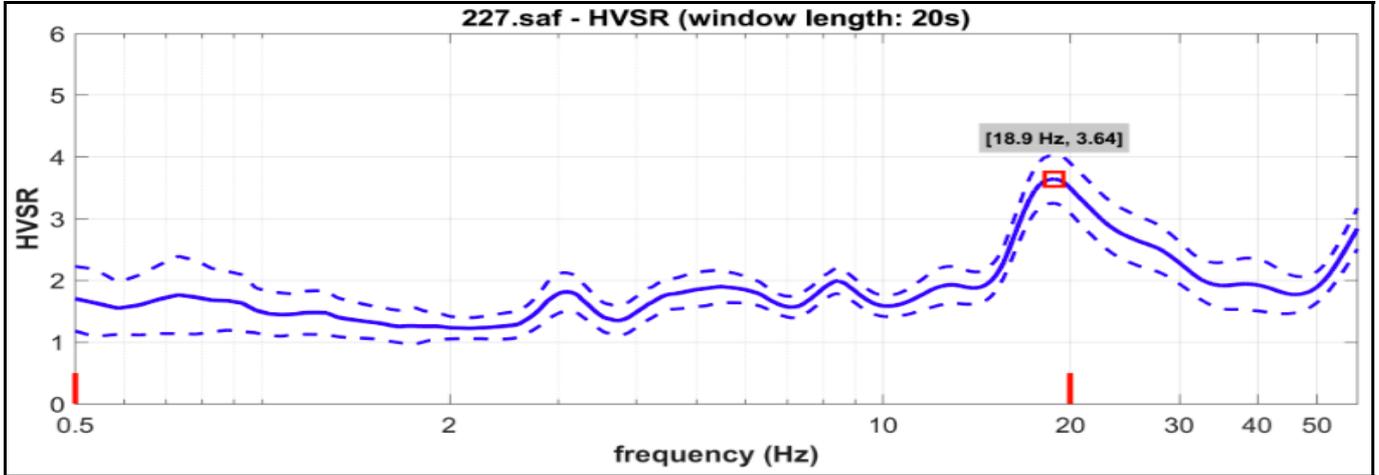
2178  
MASW 1 + HVSR 227

LOCALITA':  
DATA PROVA:

Castelplanio  
13/05/2021

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

Max HVSR 18.85 ± 0.9 Hz. A0 = 3.6 ± 0.4



### Criteri SESAME per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0 (Hz)	18.85
Lw (Sec)	2
nw	97
#1. [f0 > 10/Lw]: 18.857 > 0.5	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 36582 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0]	<input checked="" type="checkbox"/>

### Criteri SESAME 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 4.8Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 36582 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [A0 > 2]: 3.6 > 2	<input checked="" type="checkbox"/>
#4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]:	<input checked="" type="checkbox"/>
#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 7.924 > 0.943	<input type="checkbox"/>
#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.768 < 1.58	<input checked="" type="checkbox"/>

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
cf	Standard deviation of H/V peak frequency
alpha(f0)	Threshold value for the stability condition of <math>\alpha(f0)</math>

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
alpha(f)	Standard deviation of AH/V(f), alpha(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
cflogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
theta(f0)	Threshold value for the stability condition <math>\alpha(f0) < \theta(f0)</math>

Criterio soddisfatto  
 Criterio non soddisfatto

### Valutazione della Qualità della misura HVSR

CLASSE	<b>B</b>
TIPO	<b>2</b>

CLASSE A	Curva H/V affidabile e interpretabile
CLASSE B	Curva H/V "sospetta" da interpretare e da utilizzare solo in presenza di altre misure ottenute nelle vicinanze
CLASSE C	Curva H/V scadente e di difficile interpretazione e non va utilizzata
TIPO 1	Presenta almeno un picco "chiaro" secondo le norme Sesame (possibile risonanza).
TIPO 2	Non presenta picchi "chiaro" nell'intervallo delle frequenze di interesse. Nessuna Risonanza

Albarelo D.; Castellaro S. (2011)  
Tecnica sismiche passive: indagini a stazione singola.  
Suppl. Riv. Ingegneria Sismica Anno XXVIII, n.2, 2011

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

**Committente:** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 2178  
**CODICE PROVA** MASW 1 + HVSR 227

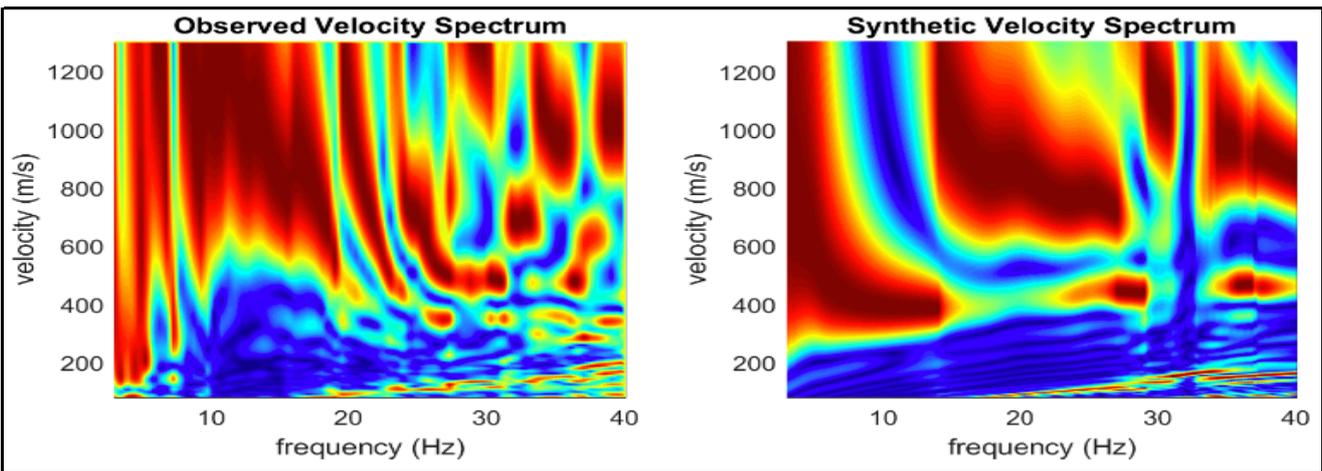
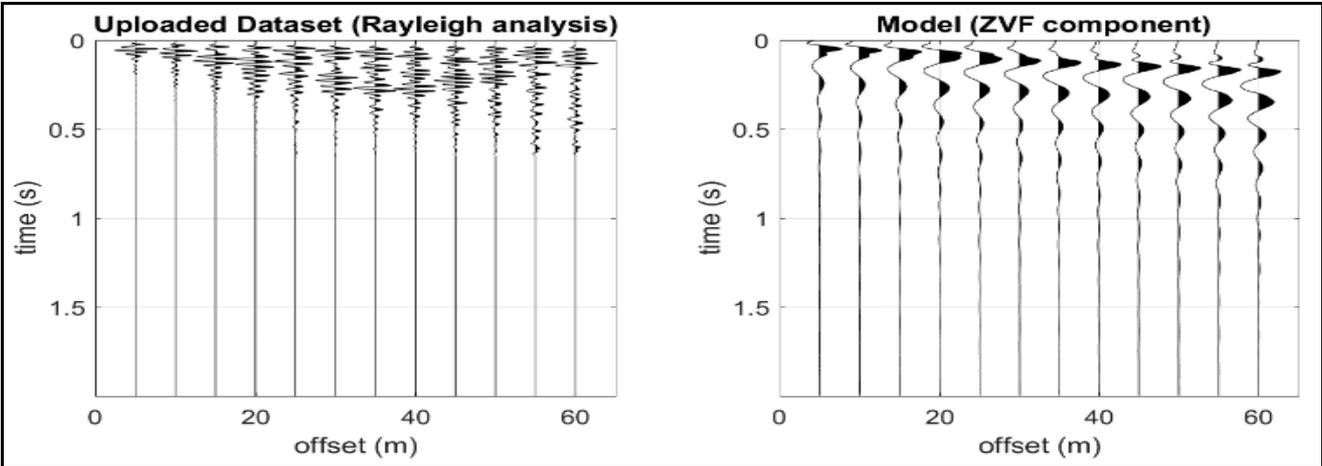
**LOCALITA':** Castelplanio  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

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

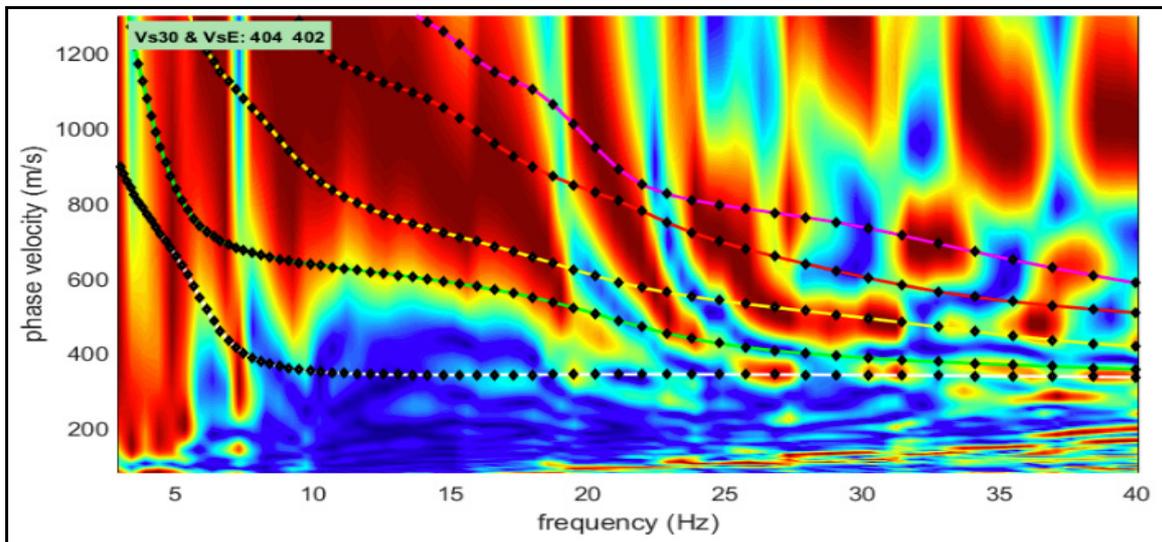
**RECORD TIME (Sec)** 2  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

**MISURA ESEGUITA CON**  Onde di Rayleigh  
**ACQUISIZIONE DI:** Onde di Love

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



VELOCITY SPECTRUM - MODELLING & PICKING



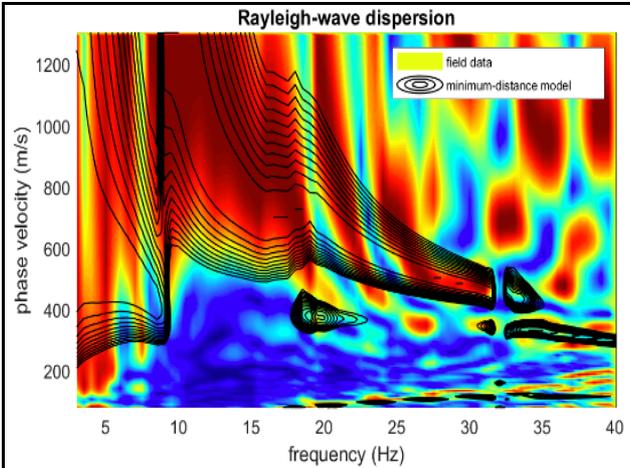
# ANALISI CONGIUNTA INDAGINE MASW & HVSR

Committente: **ITALFERR**

CODICE LAVORO 2178  
 CODICE PROVA MASW 1 + HVSR 227

LOCALITA': Castelplanio  
 DATA PROVA: 13/05/2021

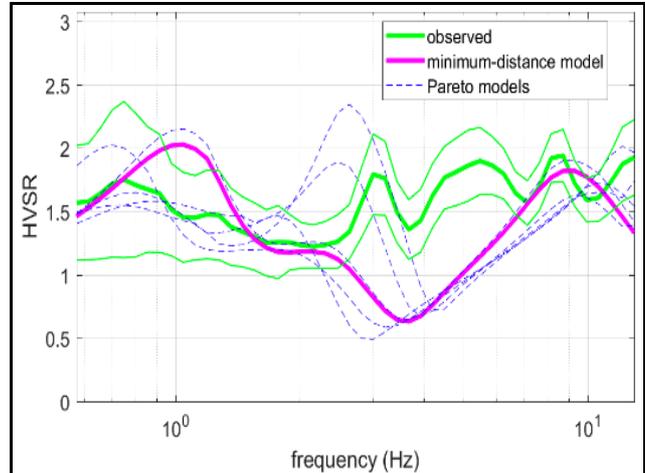
## ELABORAZIONE DATI CONGIUNTA MASW E HVSR



**MASW - SPETTRO DI VELOCITA'**

INPUT - Analisi spettrale Frequenza - Velocità di fase del segnale acquisito (base a falsi colori)  
 OUTPUT - Analisi 2D FVS (Full Velocity Spectrum) (isolinee del modello sintetico)

I dati del modello sintetico in OUTPUT vengono poi utilizzati per realizzare l'inversione numerica ed ottenere il log in Vs



**HVSR - CURVE H/V**

INPUT - Curva di dispersione del segnale acquisito (Observed)  
 OUTPUT - Curva di dispersione calcolata  
 PARETO MODELS - Valutazione statistica qualitativa dei risultati dell'analisi in Output

I dati in OUTPUT vengono poi utilizzati per realizzare l'inversione numerica ed ottenere il log in Vs

### Parametri Vs - Densità - G°

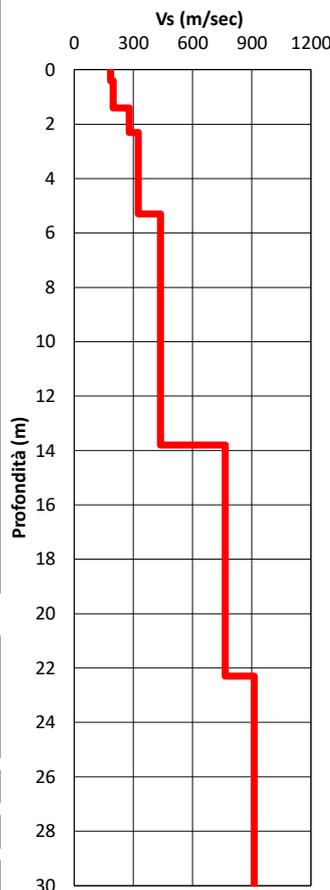
Layer	Profondità (m)		Spessori m	Vs m/sec	Deviazione m/sec	Densità t/m³	G° Mpa
	da	a					
1	0.00	0.40	0.40	185	45	1.62	59
2	0.40	1.40	1.00	198	37	1.65	69
3	1.40	2.30	0.90	280	65	1.80	150
4	2.30	5.30	3.00	325	24	1.87	209
5	5.30	13.80	8.50	438	23	2.01	409
6	13.80	22.30	8.50	765	41	2.31	1436
7	22.30	30.00	7.70	912	37	2.42	2132
8							
9							
10							
11							
12							

I valori di densità sono calcolati utilizzando la formula di Keçeli 2009-2012 ( $\gamma/9.8$ )=0.44\*Vs(m/sec)^0.25

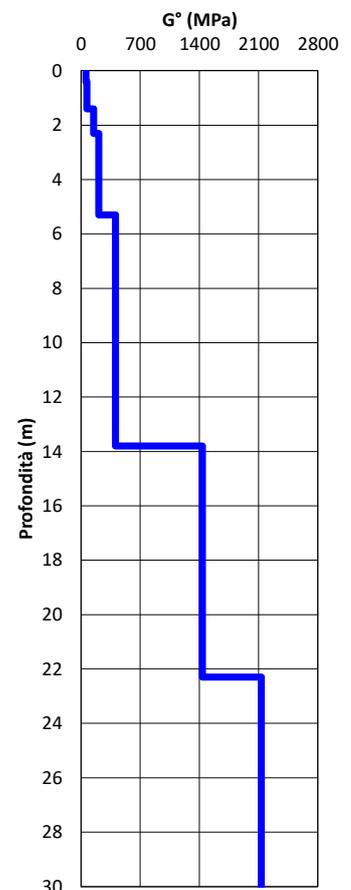
### NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI (D.M. 17/01/2018)

H bedrock	22	m
V <sub>Seq</sub>	444	m/sec
Categoria suolo	<b>B</b>	

### PROFILO Vs



### PROFILO G°



Elaborazione dati: WinMasw Academy 7.1  
 ITALFERR -- 2178 -- MASW 1 + HVSR 227

# MAPPA INDAGINE CONGIUNTA MASW E HVSR

<b>Committente:</b>	<b>ITALFERR</b>	<b>DATA PROVA:</b>	13/05/2021
<b>CODICE LAVORO:</b>	2178	<b>Coordinate Cartesiane:</b>	
<b>CODICE PROVA:</b>	MASW 2 + HVSR 228	<b>UTM WGS84 Fuso 33</b>	EST 335675.60
<b>LOCALITA':</b>	Castelplanio	<b>Longitudine</b>	NORD 4800711.38
<b>STRUMENTAZIONE</b>	SARA SL 06	<b>Latitudine</b>	12.972718°
<b>TERRENO DI MISURA:</b>	Naturale	<b>Latitudine</b>	43.341287°
<b>ACCOPPIAMENTO:</b>	Appoggiato al terreno	<b>QUOTA (m. s.l.m.):</b>	248
<b>ORIENTAMENTO:</b>	Nord		
<b>CONDIZIONI METEO:</b>	Soleggiato		

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO AREA DI INDAGINE



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**Committente:** ITALFERR

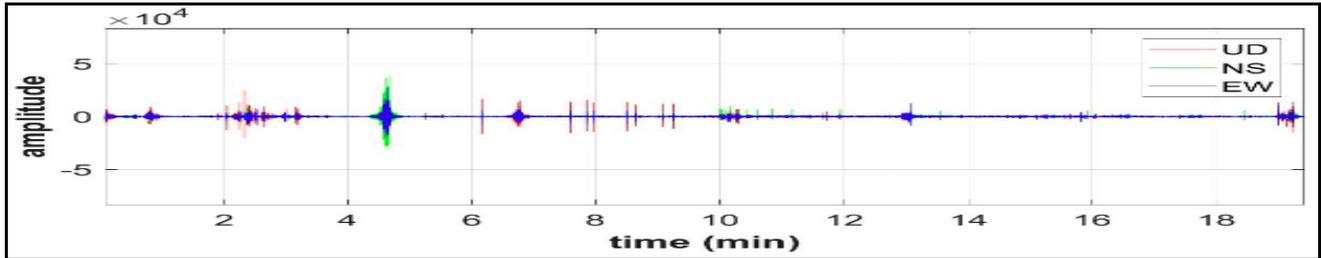
**CODICE LAVORO:** 2178  
**CODICE PROVA:** MASW 2 + HVSR 228

**LOCALITA':** Castelplanio  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

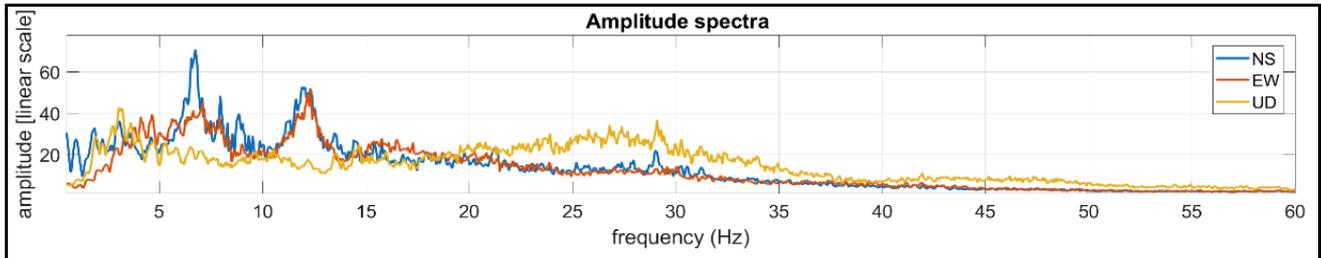
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	SARA SL 06
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	11:00:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Sampling frequency (Hz):	200
Window length (sec):	20
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]:	0.5Hz
Length of analysed dataset (min):	20.0
Tapering (%):	5
Smoothing (%):	15

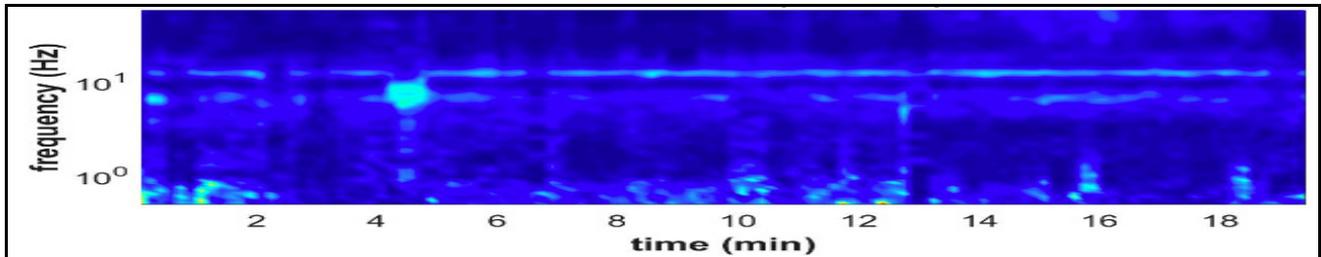
**Sismogrammi (Tempo)**



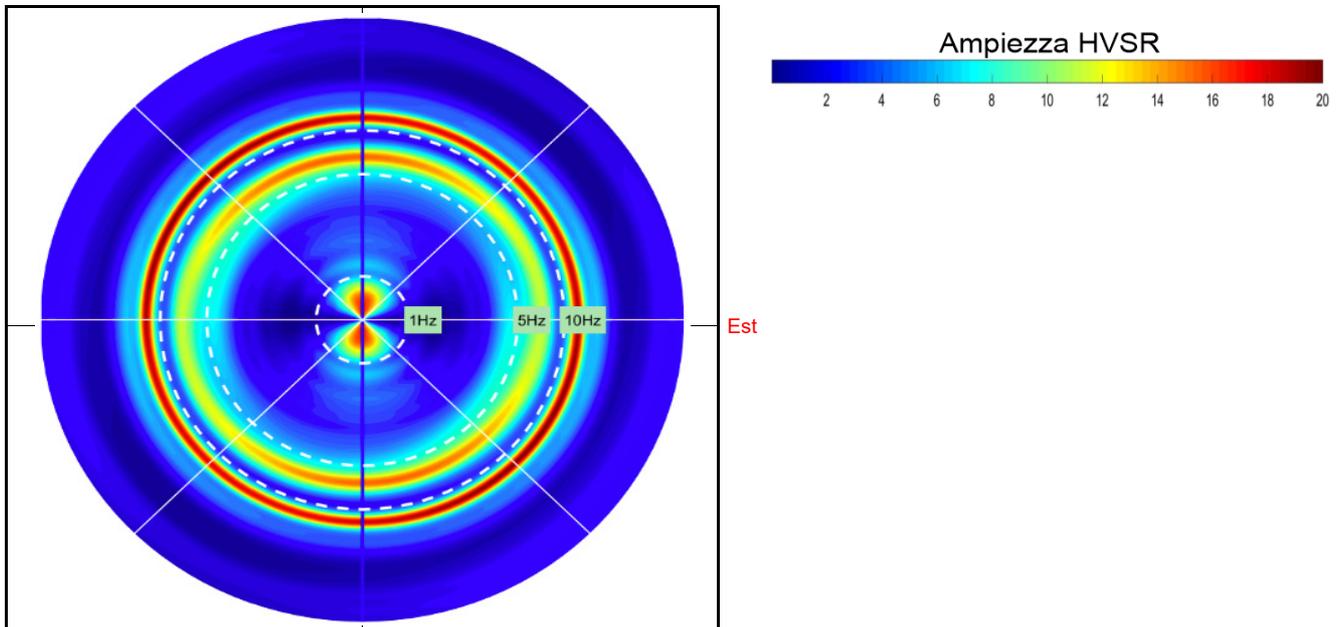
**Sismogrammi (Frequenza Hz)**



**Persistenza rapporto HVSR**



**Direzionalità rapporto HVSR**



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

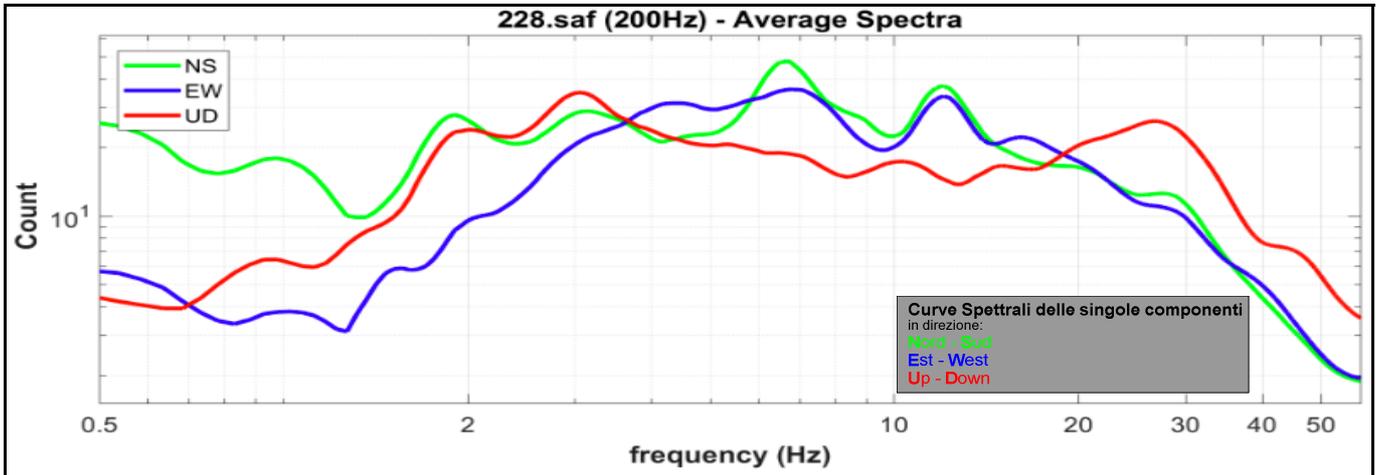
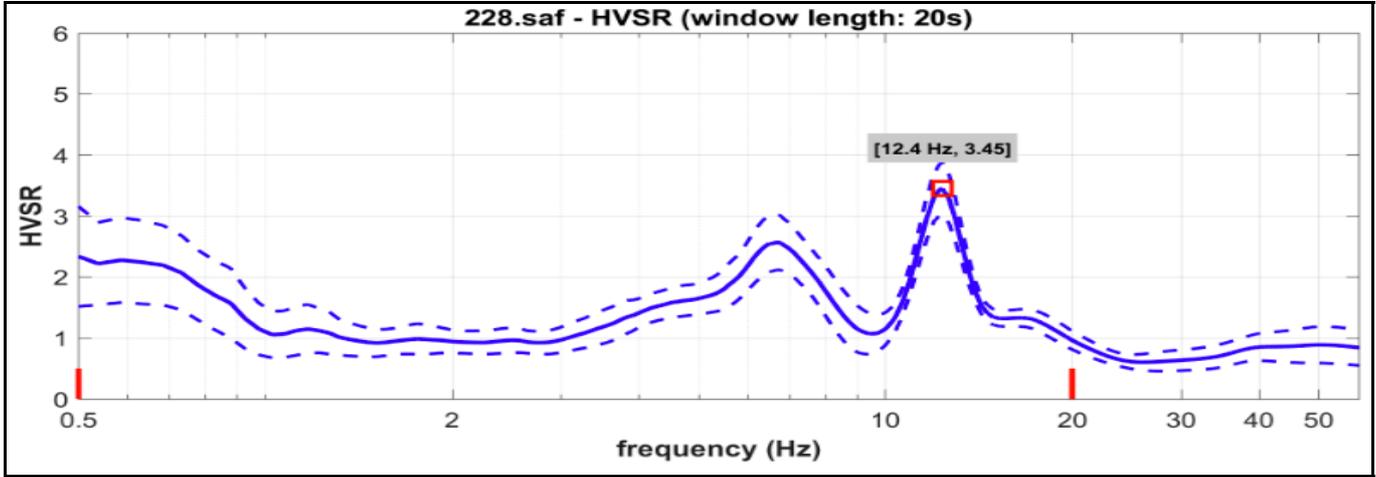
Committente: **ITALFERR**

CODICE LAVORO: 2178  
 CODICE PROVA: MASW 2 + HVSR 228

LOCALITA': Castelplanio  
 DATA PROVA: 13/05/2021

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

Max HVSR 12.36 ± 0.3 Hz. A0 = 3.4 ± 0.4



### Criteri SESAME per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0 (Hz)	12.36
Lw (Sec)	2
nw	116
#1. [f0 > 10/Lw]: 12.360 > 0.5	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 28921 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0]	<input checked="" type="checkbox"/>

### Criteri SESAME 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 3.1Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 28921 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [A0 > 2]: 3.4 > 2	<input checked="" type="checkbox"/>
#4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]:	<input checked="" type="checkbox"/>
#5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 5.554 > 0.618	<input type="checkbox"/>
#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.764 < 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
cf	Standard deviation of H/V peak frequency
alpha(f0)	Threshold value for the stability condition of < alpha(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
alpha(f)	Standard deviation of AH/V(f), alpha(f) is the factor by which the mean AH/V(f) curve should be multiplier or divided
cfogH/V(f)	Standard deviation of log AH/V(f) curve
theta(f0)	Threshold value for the stability condition alpha(f) < theta(f0)

Criterio soddisfatto  
 Criterio non soddisfatto

### Valutazione della Qualità della misura HVSR

CLASSE	<b>B</b>
TIPO	<b>2</b>

CLASSE A	Curva H/V affidabile e interpretabile
CLASSE B	Curva H/V "sospetta" da interpretare e da utilizzare solo in presenza di altre misure ottenute nelle vicinanze
CLASSE C	Curva H/V scadente e di difficile interpretazione e non va utilizzata
TIPO 1	Presenta almeno un picco "chiaro" secondo le norme Sesame (possibile risonanza).
TIPO 2	Non presenta picchi "chiaro" nell'intervallo delle frequenze di interesse. Nessuna Risonanza

Albarelo D.; Castellaro S. (2011)  
 Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola.  
 Suppl. Riv. Ingegneria Sismica Anno XXVIII, n.2, 2011

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

**Committente:** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 2178  
**CODICE PROVA** MASW 2 + HVSR 228

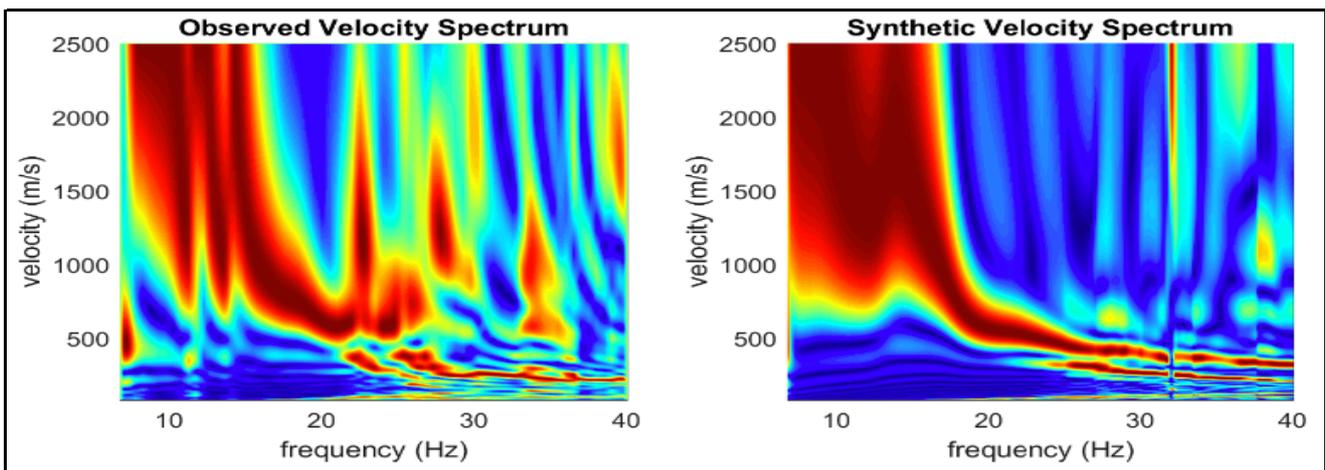
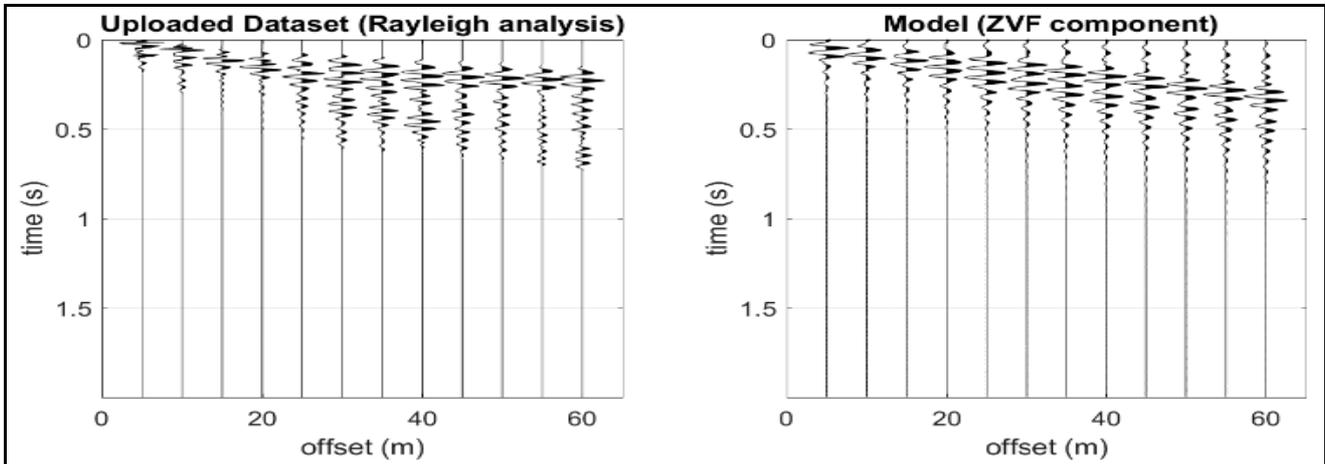
**LOCALITA':** Castelplanio  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

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

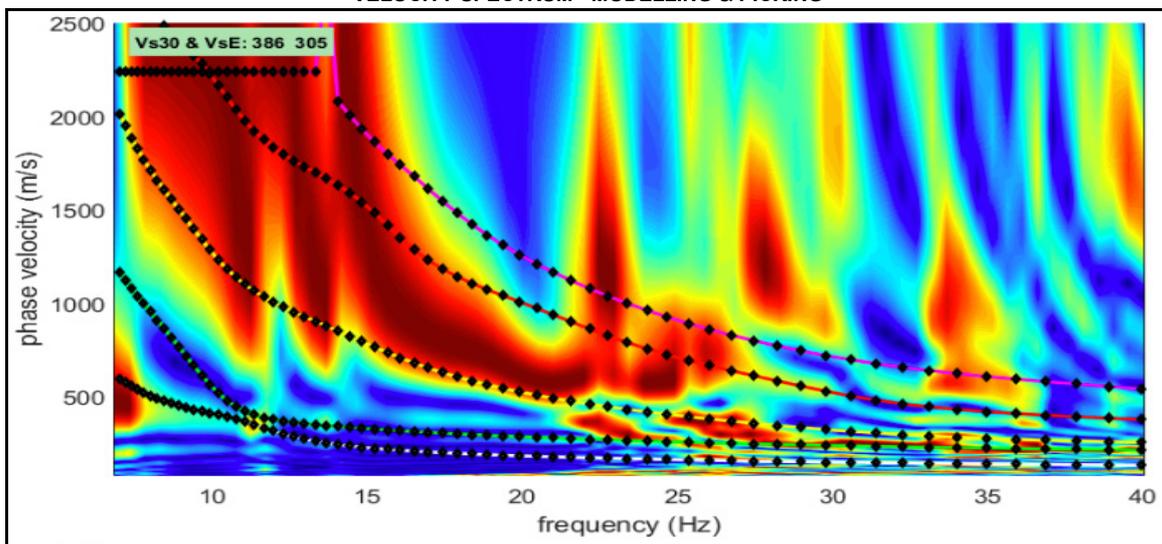
**RECORD TIME (Sec)** 2  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

**MISURA ESEGUITA CON**  Onde di Rayleigh  
**ACQUISIZIONE DI:** Onde di Love

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



VELOCITY SPECTRUM - MODELLING & PICKING



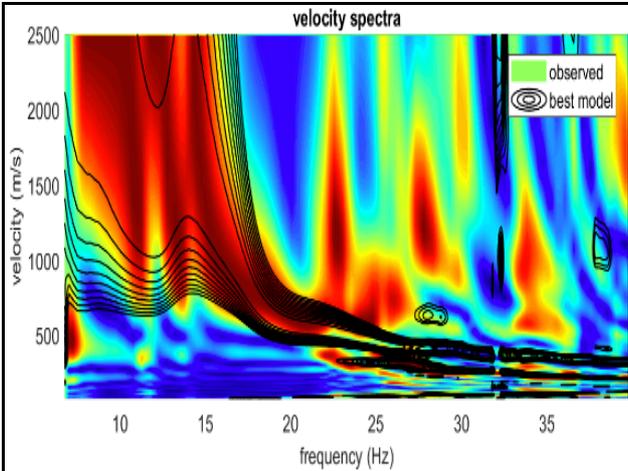
# ANALISI CONGIUNTA INDAGINE MASW & HVSR

Committente: **ITALFERR**

CODICE LAVORO 2178  
 CODICE PROVA MASW 2 + HVSR 228

LOCALITA': Castelplano  
 DATA PROVA: 13/05/2021

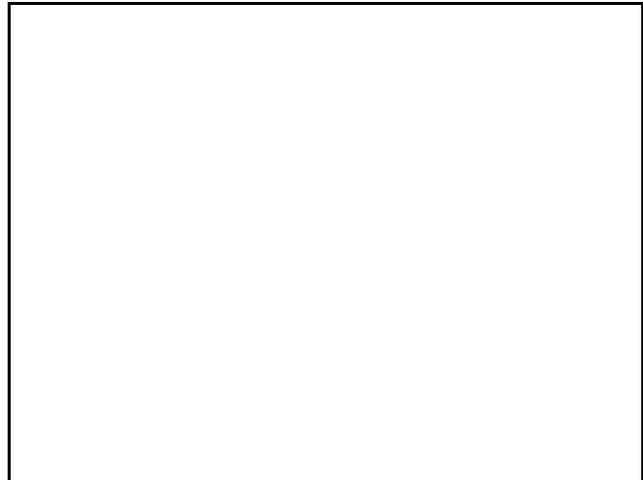
## ELABORAZIONE DATI CONGIUNTA MASW E HVSR



**MASW - SPETTRO DI VELOCITA'**

INPUT - Analisi spettrale Frequenza - Velocità di fase del segnale acquisito (base a falsi colori)  
 OUTPUT - Analisi 2D FVS (Full Velocity Spectrum) (isolinee del modello sintetico)

I dati del modello sintetico in OUTPUT vengono poi utilizzati per realizzare l'inversione numerica ed ottenere il log in Vs



**HVSR - CURVE H/V**

INPUT - Curva di dispersione del segnale acquisito (Observed)  
 OUTPUT - Curva di dispersione calcolata  
 PARETO MODELS - Valutazione statistica qualitativa dei risultati dell'analisi in Output

I dati in OUTPUT vengono poi utilizzati per realizzare l'inversione numerica ed ottenere il log in Vs

### Parametri Vs - Densità - G°

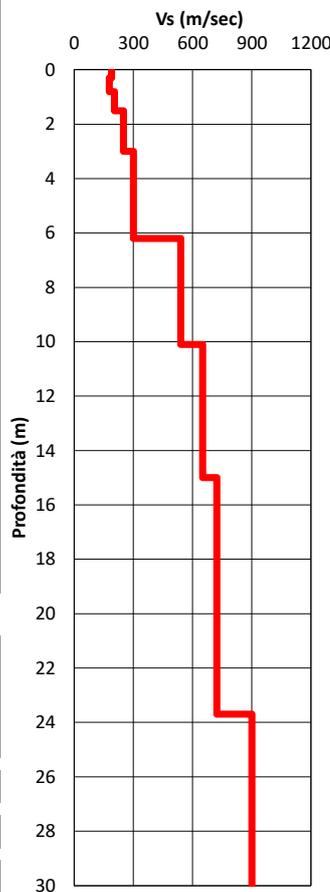
Layer	Profondità (m)		Spessori m	Vs m/sec	Deviazione m/sec	Densità t/m³	G° Mpa
	da	a					
1	0.00	0.30	0.30	190	16	1.63	63
2	0.30	0.80	0.50	178	27	1.61	54
3	0.80	1.50	0.70	205	31	1.66	74
4	1.50	3.00	1.50	250	20	1.75	116
5	3.00	6.20	3.20	300	37	1.83	175
6	6.20	10.10	3.90	540	61	2.12	656
7	10.10	15.00	4.90	650	86	2.22	995
8	15.00	23.70	8.70	722	108	2.28	1261
9	23.70	30.00	6.30	900	231	2.41	2070
10							
11							
12							

I valori di densità sono calcolati utilizzando la formula di Keçeli 2009-2012 ( $\gamma/9.8$ )=0.44\*Vs(m/sec)^0.25

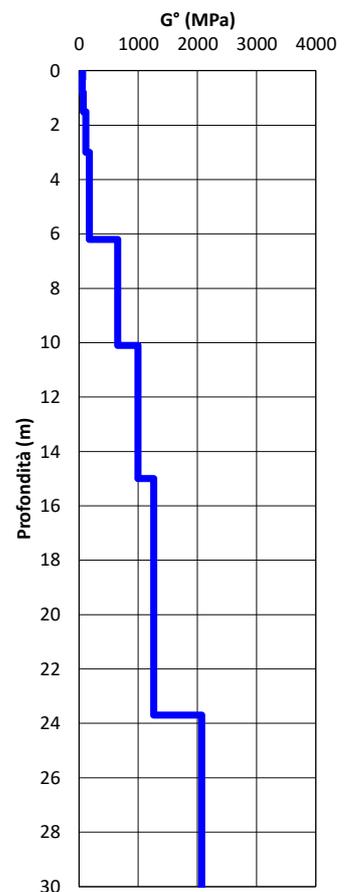
### NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI CLASSIFICAZIONE SISMICA DEI SUOLI (D.M. 17/01/2018)

H <sub>bedrock</sub>	24	m
V <sub>Seq</sub>	462	m/sec
Categoria suolo	<b>B</b>	

### PROFILO Vs



### PROFILO G°



# MAPPA INDAGINE CONGIUNTA MASW E HVSR

<b>Committente:</b>	<b>ITALFERR</b>	<b>DATA PROVA:</b>	13/05/2021
<b>CODICE LAVORO:</b>	2178	<b>Coordinate Cartesiane:</b>	
<b>CODICE PROVA:</b>	MASW 3 + HVSR 229	<b>UTM WGS84 Fuso 33</b>	EST 337308.59
<b>LOCALITA':</b>	Castelplanio	<b>Longitudine</b>	12.992673°
<b>STRUMENTAZIONE</b>	SARA SL 06	<b>Latitudine</b>	43.347280°
<b>TERRENO DI MISURA:</b>	Naturale	<b>QUOTA (m. s.l.m.):</b>	248
<b>ACCOPPIAMENTO:</b>	Appoggiato al terreno		
<b>ORIENTAMENTO:</b>	Nord		
<b>CONDIZIONI METEO:</b>	Soleggiato		

## FOTO AEREA (Google Earth)



## FOTO AREA DI INDAGINE



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

**Committente:** ITALFERR

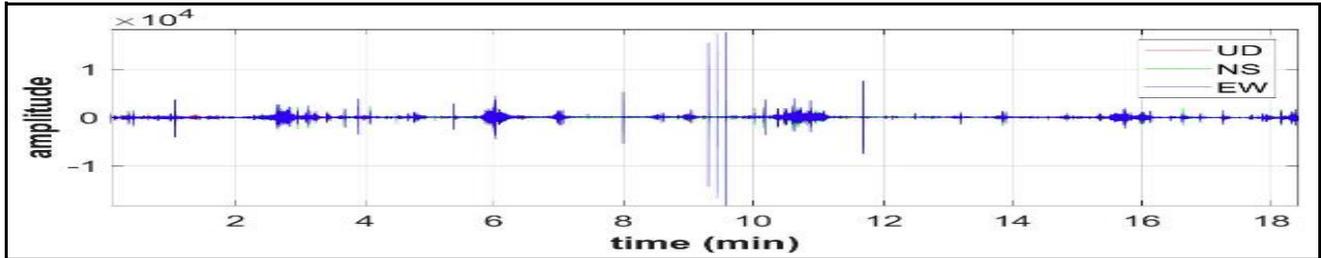
**CODICE LAVORO:** 2178  
**CODICE PROVA:** MASW 3 + HVSR 229

**LOCALITA':** Castelplanio  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

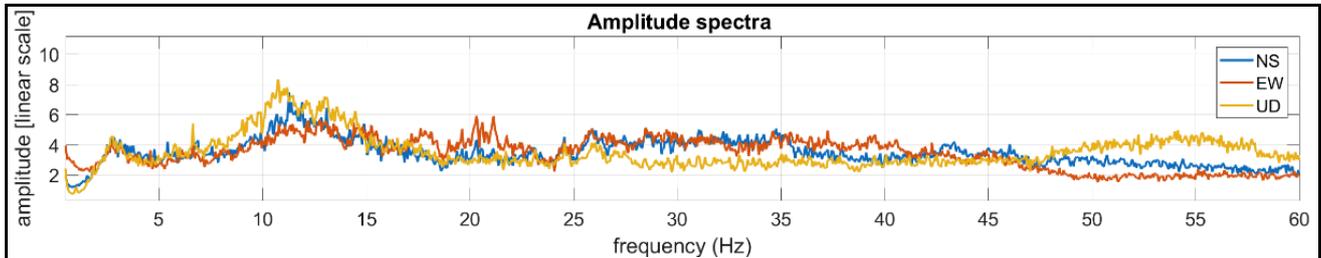
PARAMETRI DI ACQUISIZIONE	
Apparecchiatura di misura	SARA SL 06
Lunghezza registrazione	20 min
Fine registrazione	11:35:00
Frequenza di campionamento	200 Hz

PARAMETRI DI ELABORAZIONE	
Sampling frequency (Hz):	200
Window length (sec):	20
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]:	0.5Hz
Length of analysed dataset (min):	20.0
Tapering (%):	5
Smoothing (%):	15

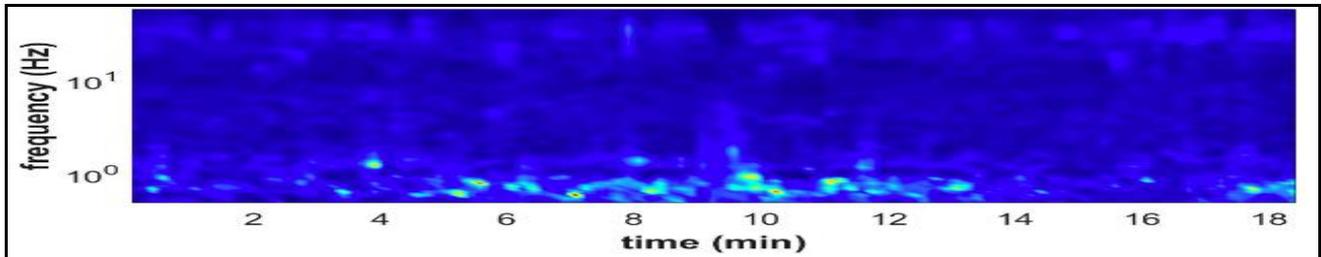
**Sismogrammi (Tempo)**



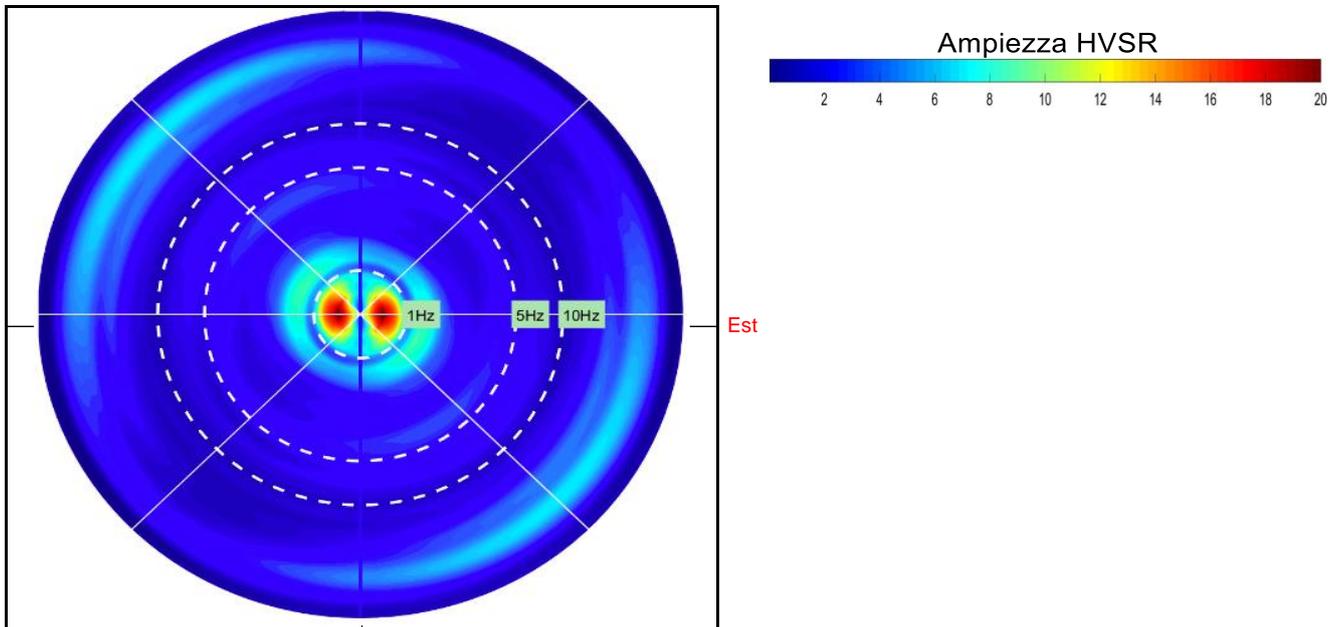
**Sismogrammi (Frequenza Hz)**



**Persistenza rapporto HVSR**



**Direzionalità rapporto HVSR**



# RAPPORTO SPETTRALE A STAZIONE SINGOLA (HVSR)

Committente: ITALFERR

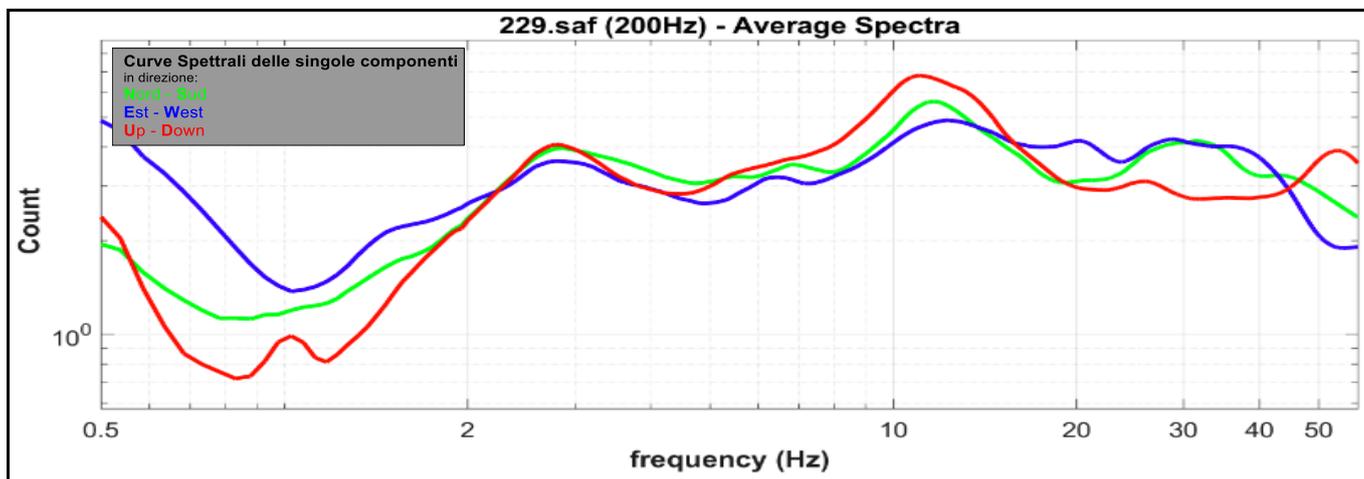
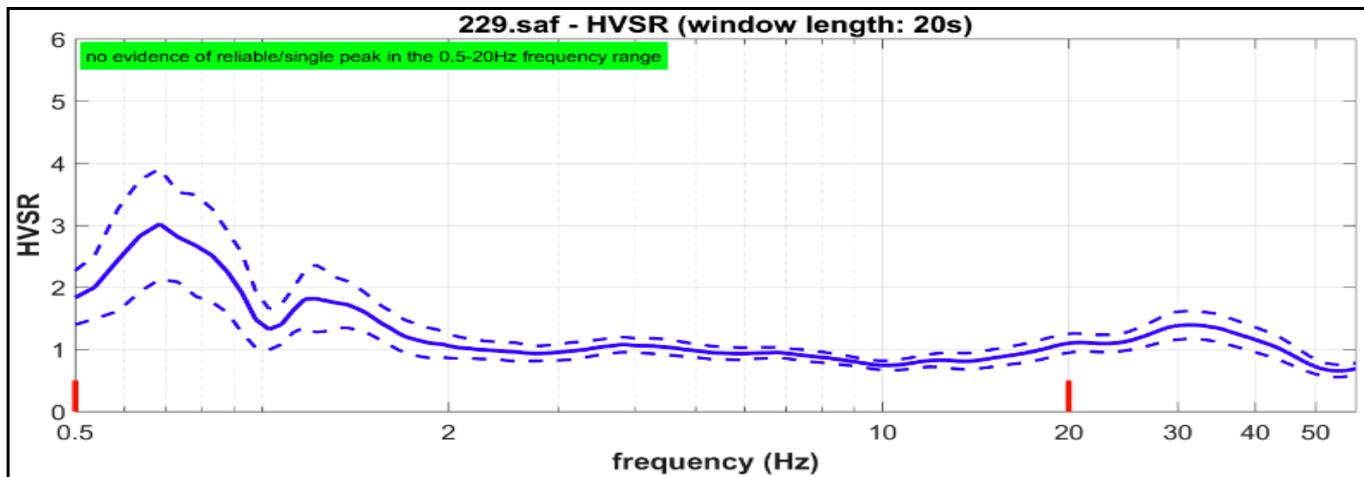
CODICE LAVORO  
CODICE PROVA

2178  
MASW 3 + HVSR 229

LOCALITA':  
DATA PROVA: Castelplano  
13/05/2021

## RAPPORTO SPETTRALE H/V

Max HVSR 0.68 ± 1.8 Hz. A0 = 3.0 ± 0.7



### Criteri SESAME per una curva H/V affidabile

[tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]

f0 (Hz)	0.68
Lw (Sec)	2
nw	111
#1. [f0 > 10/Lw]: 0.684 > 0.5	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 1518 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0]	<input checked="" type="checkbox"/>

### Criteri SESAME per un picco H/V chiaro

[almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]

#1. [exists t- in the range [t0/4, t0]   AH/V(t-) < A0/2]: yes (considering standard deviations), at frequency 0.2Hz	<input checked="" type="checkbox"/>
#2. [nc > 200]: 1518 > 200	<input checked="" type="checkbox"/>
#3. [A0 > 2]: 3.0 > 2	<input checked="" type="checkbox"/>
#4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]:	<input type="checkbox"/>
#5. [sigmaA < epsilon(f0)]: 1.828 > 0.103	<input type="checkbox"/>
#6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 22.295 < 2	<input type="checkbox"/>

### Valutazione della Qualità della misura HVSR

CLASSE	<b>B</b>
TIPO	<b>2</b>
CLASSE A	Curva H/V affidabile e interpretabile
CLASSE B	Curva H/V "sospetta" da interpretare e da utilizzare solo in presenza di altre misure ottenute nelle vicinanze
CLASSE C	Curva H/V scadente e di difficile interpretazione e non va utilizzata
TIPO 1	Presenta almeno un picco "chiaro" secondo le norme Sesame (possibile risonanza).
TIPO 2	Non presenta picchi "chiaro" nell'intervallo delle frequenze di interesse. Nessuna Risonanza
Albarello D.; Castellaro S. (2011) Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola. Suppl. Riv. Ingegneria Sismica Anno XXVIII, n.2, 2011	

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(f) < 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)

Criterio soddisfatto  
 Criterio non soddisfatto

In accordo con SESAME Guidelines 2005

# MULTICHANNEL ANALYSIS OF SURFACES WAVES (MASW)

**Committente:** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 2178  
**CODICE PROVA** MASW 3 + HVSr 229

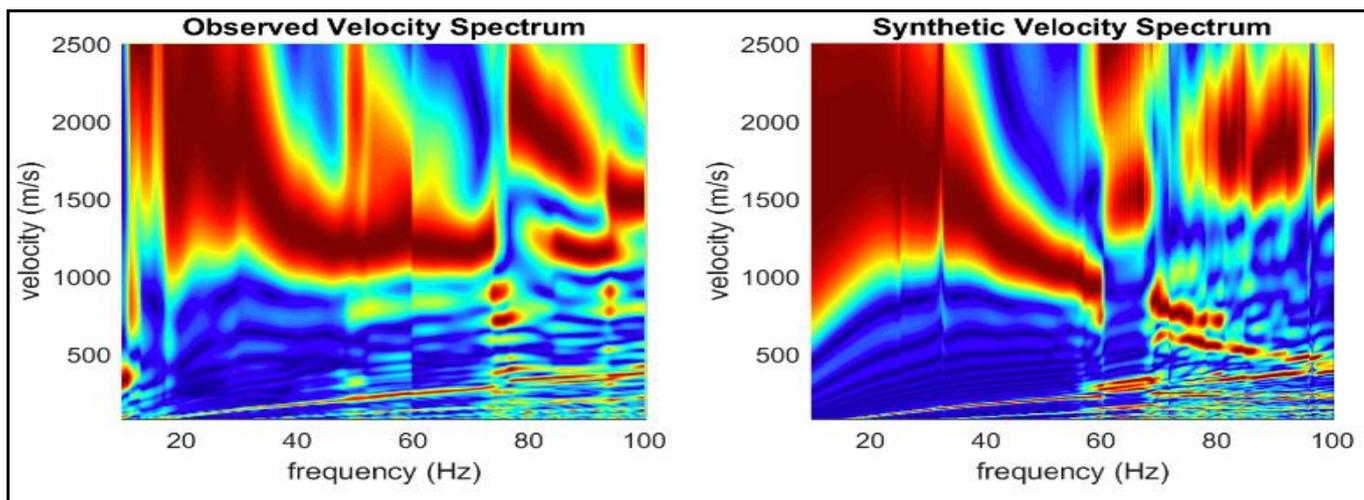
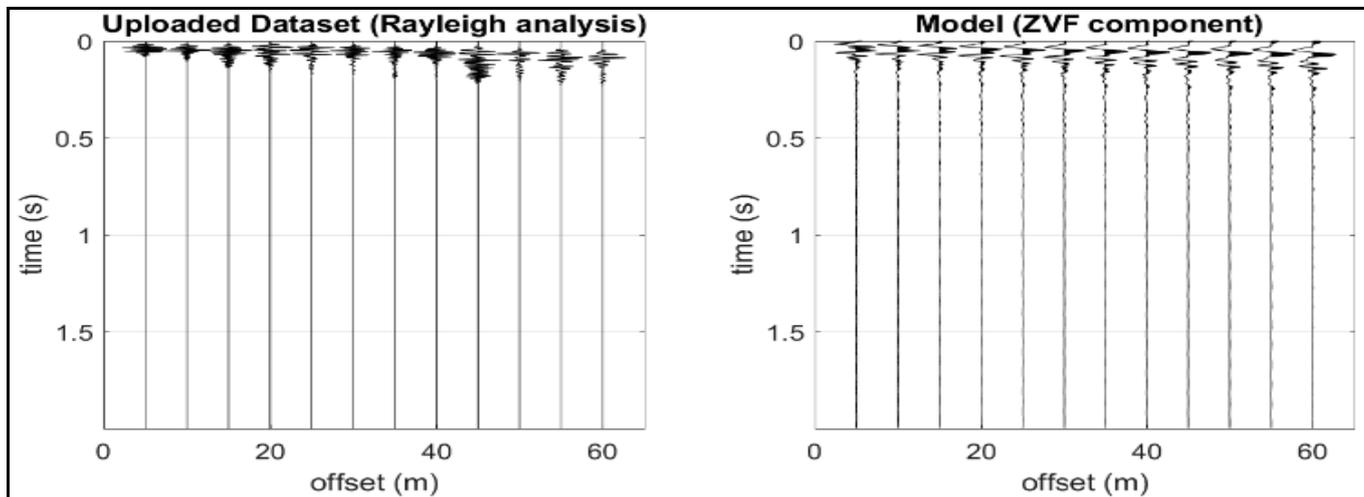
**LOCALITA':** Castelplano  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

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

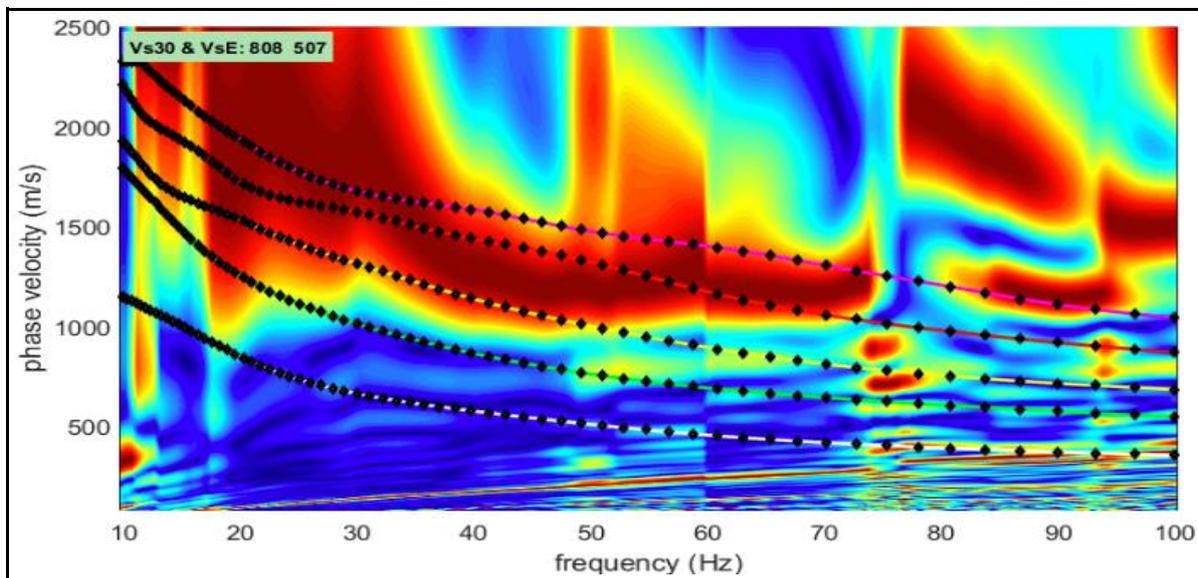
**RECORD TIME (Sec)** 2  
**SAMPLING (Sec)** 0.5

**MISURA ESEGUITA CON**  Onde di Rayleigh  
**ACQUISIZIONE DI:** Onde di Love

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



VELOCITY SPECTRUM - MODELLING & PICKING



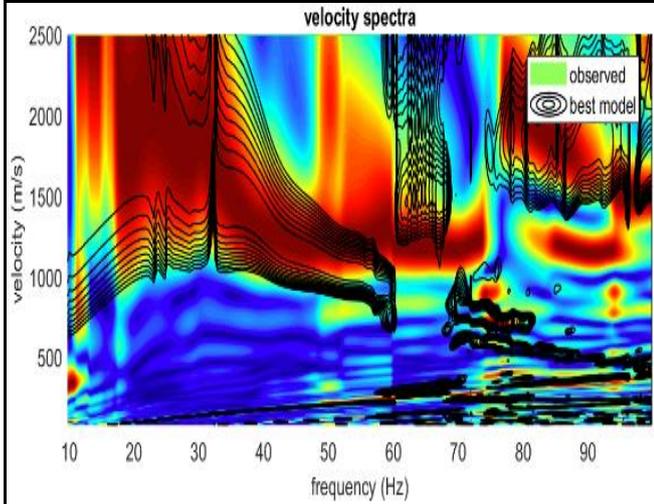
# ANALISI CONGIUNTA INDAGINE MASW & HVSR

**Committente:** ITALFERR

**CODICE LAVORO** 2178  
**CODICE PROVA** MASW 3 + HVSR 229

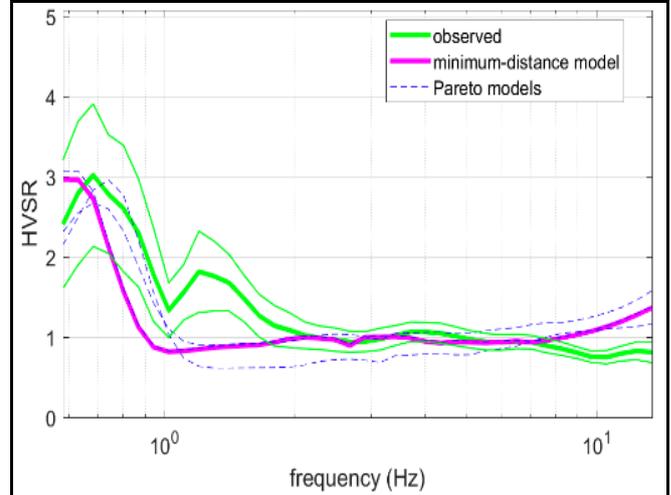
**LOCALITA':** Castelplanio  
**DATA PROVA:** 13/05/2021

## ELABORAZIONE DATI CONGIUNTA MASW E HVSR



**MASW - SPETTRO DI VELOCITA'**

INPUT - Analisi spettrale Frequenza - Velocità di fase del segnale acquisito (base a falsi colori)  
 OUTPUT - Analisi 2D FVS (Full Velocity Spectrum) (isolinee del modello sintetico)  
 I dati del modello sintetico in OUTPUT vengono poi utilizzati per realizzare l'inversione numerica ed ottenere il log in Vs



**HVSR - CURVE H/V**

INPUT - Curva di dispersione del segnale acquisito (Observed)  
 OUTPUT - Curva di dispersione calcolata  
 PARETO MODELS - Valutazione statistica qualitativa dei risultati dell'analisi in Output  
 I dati in OUTPUT vengono poi utilizzati per realizzare l'inversione numerica ed ottenere il log in Vs

### Parametri Vs - Densità - G°

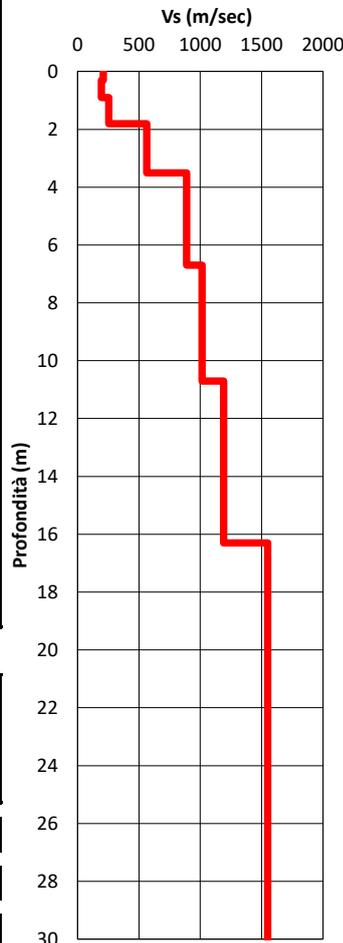
Layer	Profondità (m)		Spessori m	Vs m/sec	Deviazione m/sec	Densità t/m³	G° Mpa
	da	a					
1	0.00	0.30	0.30	210	24	1.67	78
2	0.30	0.90	0.60	195	29	1.64	66
3	0.90	1.80	0.90	255	43	1.76	121
4	1.80	3.50	1.70	565	39	2.15	726
5	3.50	6.70	3.20	890	62	2.40	2018
6	6.70	10.70	4.00	1015	76	2.48	2713
7	10.70	16.30	5.60	1190	127	2.58	3880
8	16.30	31.30	15.00	1550	90	2.76	7033
9	31.30	30.00		1880	123	2.90	10858
10							
11							
12							

I valori di densità sono calcolati utilizzando la formula di Keçeli 2009-2012 ( $\gamma/9.8$ )=0.44\*Vs(m/sec)\*0.25

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

H <sub>bedrock</sub>	4	m
V <sub>Seq</sub>	317	m/sec
Categoria suolo	E	

### PROFILO Vs



### PROFILO G°

