



STUDIO TECNICO GEOM. UGO CELOTTI s.r.l.

CAPITALE SOCIALE EURO 100.000,00 I.V.

VIA MINCIO, 22 - C.A.P. 20139 **MILANO** TEL. 02.5393977 - FAX 02.5392262

e-mail: studiocelotti@studiocelotti.it

SONDAGGI GEOGNOSTICI GEOTECNICI AMBIENTALI GEOARCHEOLOGICI - PROVE SU TERRENI DI FONDAZIONE INDAGINI
E RICERCHE GEOLOGICHE E IDROLOGICHE - PERFORAZIONI PROFONDE PER GEOTERMIA PER
DISPERSORI PER STRUMENTAZIONI - PROSPEZIONI GEOFISICHE GEOELETRICHE - RILIEVI TOPOGRAFICI
C.C.I.A.A. REG. DELLE IMPRESE DI MILANO - COD.FISC.-PART.IVA 05092310969 - SOA 3405AL/57/01

Milano, Dicembre 2020

Prot. n. 7069/A

Spettabile
REGIONE LAZIO
UFFICIO SPECIALE RICOSTRUZIONE LAZIO
Via Sebino, 27
02100 RIETI

INDAGINE GEOFISICA

**SISMICA A RIFRAZIONE CON METODOLOGIA TOMOGRAFICA
PROVE DOWN HOLE
PROVE HVSR
PROVE SISMICHE MASW**

**AMATRICE (Rieti)
Fraz. Saletta**

Relazione





INDICE

1 – PREMESSA.....	1
2 - Metodologie utilizzate.....	2
2.1 Sismica a rifrazione con elaborazione tomografica	2
Strumentazione Utilizzata.....	3
Interpretazione dei dati.....	4
2.2 prova down hole.....	15
2.3 Sismica passive misure hvsr.....	21
2.4 prove sismiche metodologia masw.....	23
Interpretazione dei dati.....	24
3 - RISULTATI.....	25
3.1 Risultati Sismica a rifrazione onde compressive (p) e taglio (s).....	25
3.2 Risultati prova down hole	31
3.3 Risultati prove masw	35
prova masw A-M	35
prova masw B-M	38
3.4 Risultati prove HVSR	41
HVSR1	41
HVSR2	42
HVSR3	43
HVSR 4	44
HVSR 5	45
HVSR 6	46
3.5 - Report fotografico.....	47

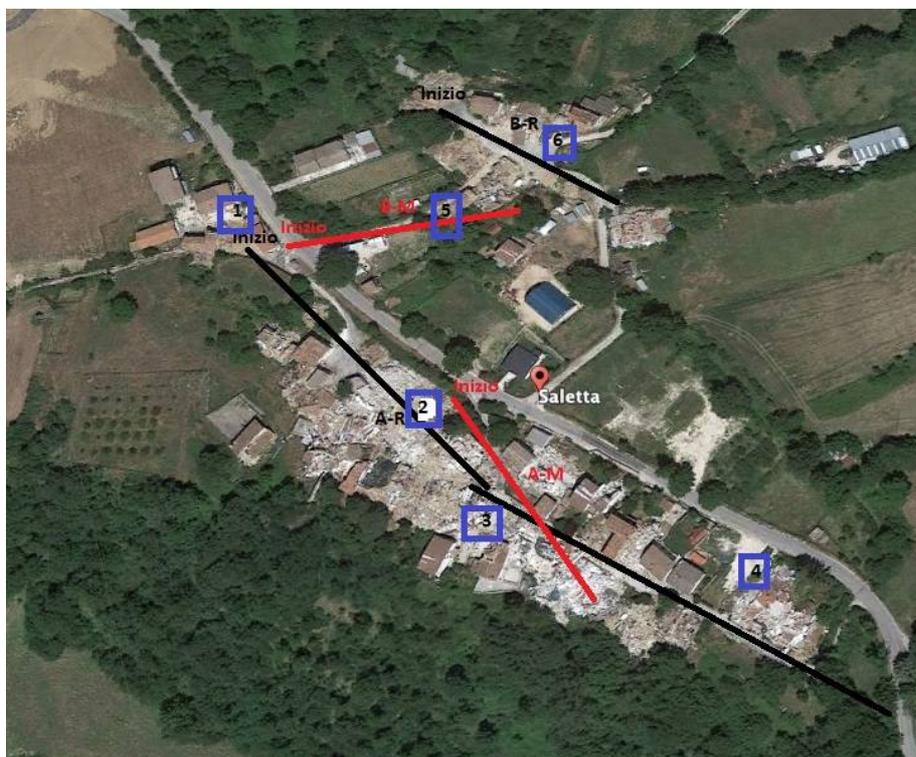
Allegati grafici esplicativi 1a e 1b Sezioni simiche onde P e S



1 - PREMESSA

Nei giorni tra 21 e 24 dicembre 2020 è stata eseguita una prospezione geofisica nella frazione di Saletta, Comune di Amatrice (RI) .

L'esatta ubicazione delle indagini è riportata nell'immagine sottostante.



Ubicazione schematica indagini. Le linee nere indicano le sezioni sismiche a rifrazione, sigla A-R e B-R. le linee rosse le prove masw, sigla A-M e A-M. I quadrati blu le prove Hvsr con il loro numero identificativo all'interno

I quantitativi delle indagini svolte sono indicati nella sottostante tabella.

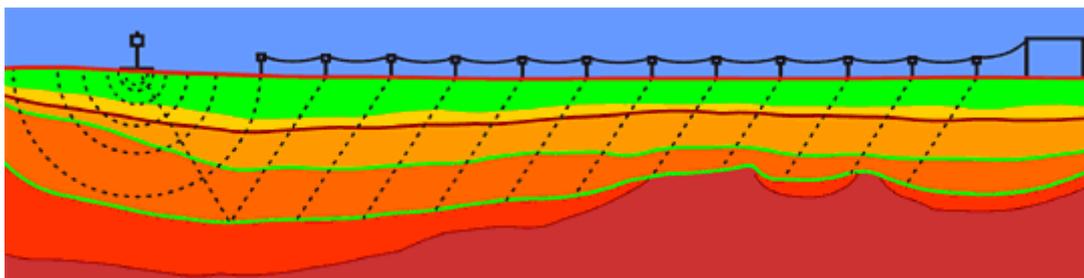
Metodologia	Numero	Passo sensori	Lunghezza stendimento	Lunghezza Totale	Sigla
Sismica a rifrazione Onde P e S	1	4 metri	92 metri	92 metri	B-R
Sismica a rifrazione Onde P e S	3	5 metri	115 metri	330 (ricoprimento 5 metri x 3)	A-R
Prove down hole	2	2	40 metri (ogni foro)	80 metri	DH1-S1 DH2-S2
Prove Masw	2	6	66 metri	132 metri	A-M B-M
Prove Hvsr	6	3			Da Hvsr1 a Hvsr6



2 METODOLOGIE UTILIZZATE

2.1 SISMICA A RIFRAZIONE CON ELABORAZIONE TOMOGRAFICA

Le indagini geosismiche a rifrazione hanno lo scopo di caratterizzare in modo dinamico, tramite la misura delle onde di compressione (V_p) e di taglio (V_s), i litotipi presenti nell'area d'interesse e definirne la geometria di sviluppo nel sottosuolo.



Tale metodologia trova il miglior campo di applicazione per profondità di studio inferiori ai 30-40 metri da p.c. E' necessario che il volume di terreno sia caratterizzato da valori di velocità di V_p e V_s progressivamente crescenti con la profondità, infatti, come è noto, il principale limite di tale metodologia è rappresentato dal non poter distinguere ed individuare strati con velocità delle onde P e SH minori sottostanti a strati con velocità più elevate.

L'indagine consiste nel creare delle onde sismiche artificiali sulla superficie del terreno da investigare e registrare le vibrazioni prodotte a distanze note e prestabilite mediante geofoni a prevalente componente verticale ed orizzontale.

E' importante precisare che le onde SH dirette e rifratte costituiscono sempre il primo arrivo rispetto alle onde superficiali (onde di Love) e che per brevi stendimenti risultano sufficientemente forti da poter essere registrate. Inoltre con questo tipo di metodologia di studio non esistono le limitazioni connesse con l'orizzontalità degli strati proprie delle tecniche utilizzanti le onde superficiali.



STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

L'acquisizione è avvenuta tramite l'utilizzo di un sismografo a 24 bit DAQlink III prodotto da Seismic Source Co. (USA) utilizzando 24 canali in registrazione. Lo strumento viene collegato a geofoni verticali e orizzontali, con frequenza propria pari a 10 e 4.5 Hz, posizionati sul terreno a distanza di 5 metri.

Caratteristiche tecniche:

1 to 24 channels per unit

Weatherproof enclosure

Multiple units can be used together for large channel count

A/D conversion:

24 bit high-speed sigma delta converters

Dynamic Range:

144dB (system)

Greater than 118 dB (measured at 2msec)

Bandwidth:

DC to 15 KHz

Analog filter flat response to 8000Hz

Digital filter bandwidth=85% of Nyquist frequency

Common Mode Rejection:

Greater than 100 dB

Crosstalk:

Better than 125 dB

Noise Floor:

0.2 microvolt RMS noise (2msec sample rate)

Trigger accuracy:

+/- 1microsecond at all sample rates

Maximum Input Signal:

Standard (x 2 gain) 3.58 Volts peak to peak

(optional: (x 1 gain) 7.16 Volts peak to peak

Input Impedance:

100 K Ohms

Preamplifier Gains:

X2 (6dB) and x32 (30 dB) standard; software selectable

(x1 (0 dB) and x16 (24 dB) available on special request)

Anti-alias Filters:

85% of Nyquist frequency

Digital Filters:

Low Cut – User Selectable frequency

Notch – 50 or 60 Hz standard; User Selectable

High Cut - User Selectable

Sample Interval:

0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 millisecond

Sample Frequency:

48000, 16000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 62.5 sample/second





INTERPRETAZIONE DEI DATI

Introduzione

Quando è necessario esplorare i primi metri di profondità, la cosiddetta *sismica superficiale in rifrazione* permette di caratterizzare il sottosuolo in termini di velocità di propagazione delle onde sismiche compressive (v_p) e di taglio (v_s), le quali variano in funzione del litotipo che viene attraversato dall'energia sismica. Si tratta di un metodo di indagine *attivo*, cioè che viene applicato sfruttando energia sismica controllata artificialmente, generata mediante una serie di sorgenti, tra i quali mazza, esplosivo, cannoncino sismico, ecc.

Operativamente parlando, una volta accoppiati col terreno i geofoni (sensori che registreranno la propagazione dell'onda sismica) lungo un profilo rettilineo si effettuano energizzazioni mediante delle geometrie ben definite, ottenendo i cosiddetti *sismogrammi*, cioè la registrazione nel dominio dello spazio/tempo del campo di deformazione dei litotipi indotto dalla propagazione d'onda. I sismogrammi permettono dunque di riconoscere i vari eventi dovuti alla propagazione d'onda nel sottosuolo e la sua riemersione in superficie dove viene registrata dai geofoni, in funzione dello spazio/tempo. Avendo l'informazione sullo spazio e sul tempo, si costruisce un modello di velocità del sottosuolo. Come da titolo, la sismica a rifrazione si occupa della fase d'onda rifratta *criticamente*, cioè quella fase che viene ritrasmessa verso la superficie dopo aver viaggiato attraverso una discontinuità nel sottosuolo dovuta ad un cambio litologico, ad esempio (Fig. 1). Solitamente più battute vengono effettuate lungo il profilo, maggiore sarà l'informazione riguardo ai percorsi delle onde all'interno del sottosuolo, maggiore sarà la robustezza del modello di velocità (geologico) finale. Il riconoscimento e la ricostruzione dei percorsi, chiamati in inglese *ray-path*, deriva dall'assunzione teorica dello studio della propagazione dell'energia sismica per *alte frequenze*, secondo la quale a partire dalla sorgente, l'energia si distribuisce radialmente su percorsi rettilinei (i cosiddetti *raggi sismici*) che vengono deviati nel sottosuolo nel momento in cui incontrano una discontinuità. Tale deviazione è regolata dalla legge di Snell, la quale asserisce che lungo un *raggio sismico*, la quantità

$$\bar{p} = s(z) \cdot \sin(\alpha) \quad (3.1.1)$$

ove $s(z) = 1/v(z)$ rappresenta la funzione di *slowness* (*lentezza*), pari all'inverso della velocità, deve conservarsi.

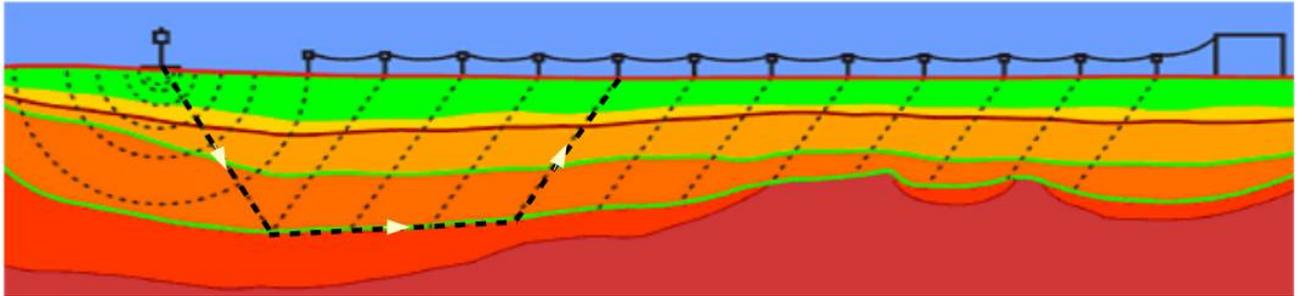


Figura 1: Indagine in sismica a rifrazione: è possibile notare il percorso dei raggi sismici che vengono rifratti dalle discontinuità presenti nel sottosuolo e rilevati in superficie.

In pratica, se si considera una interfaccia tra due mezzi omogenei di velocità v_1 e v_2 qualsiasi, ciò significa che:

$$\frac{\sin(\vartheta_1)}{v_1} = \frac{\sin(\vartheta_2)}{v_2} \quad (3.1.2)$$

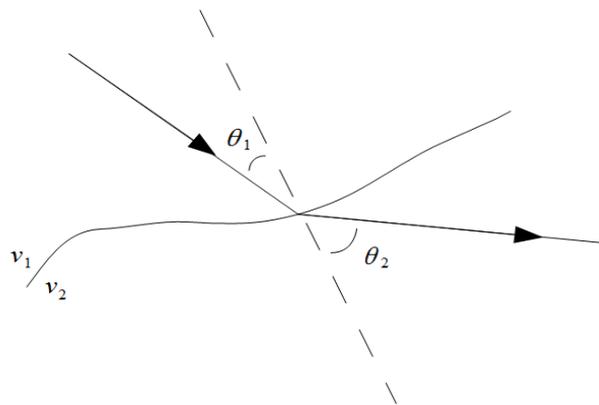


Figura 2: Rappresentazione schematica della Legge di Snell

Tra le varie tecniche di inversione, la più utilizzata in sismica a rifrazione è la cosiddetta *tomografia sismica*, la quale è preferibile ai metodi analitici come Plus-Minus o GRM perché permette di ottenere una più robusta mappatura delle velocità del sottosuolo in maniera semplice, caratterizzandone così le litologie di cui è composto. Il set di dati iniziale che verrà utilizzato per la modellazione corrisponde ai tempi di primo arrivo letti sul sismogramma, corrispondenti ai tempi di arrivo delle onde rifratte *criticamente*.



A livello teorico, si ricordino i due limiti di tale metodologia:

- *Strati nascosti a bassa velocità* - come già anticipato, le onde rifratte *criticamente* corrispondono a quei raggi sismici che si approssimano all'interfaccia con un angolo definito *critico* ϑ_c tale da far viaggiare l'onda a cavallo della discontinuità con la velocità del mezzo più denso (e quindi più veloce). Tale propagazione perturba lo strato al top (meno denso) che ritrasmetterà così l'energia dell'onda in superficie, venendo registrata dai geofoni (Fig. 1). La c.n.s. a rendere possibile ciò è che $\vartheta_2 = 90^\circ$ (con riferimento alla Fig. 2) che trasforma l'eq 3.1.2 in

$$\sin(\vartheta_c) = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.1.3)$$

necessariamente con $v_2 > v_1$. Se così non fosse, l'onda rifratta viaggerebbe immergendosi nel secondo strato e non riuscirebbe a riemergere in superficie (e quindi essere considerata come primo arrivo) prima delle altre fasi sismiche. Ne consegue che se esistesse un rifratore (es. una discontinuità litologica) nel sottosuolo con velocità inferiore al mezzo che gli giace al suo top, questo risulterebbe mascherato sul sismogramma ed impossibile da riconoscere con certezza. Dunque deve esistere un gradiente di velocità crescente dalla superficie in profondità. Se il sottosuolo fosse diviso in $i = 1, \dots, n$ strati (dall'alto verso il basso) allora deve necessariamente essere che $v_1 < v_2 < \dots < v_n$. Tuttavia è possibile che particolari condizioni geologiche a complessa geometria del sottosuolo portino al calcolo nel modello di velocità finale di regioni a velocità in cui si abbia una inversione nel gradiente. In tal caso la robustezza del risultato finale è quindi affidata alla esperienza del geofisico.

- *Strati sottili* - Possono esistere delle condizioni per cui il gradiente di velocità venga rispettato ma lo spessore dello strato non è in grado di generare onde rifratte criticamente che arrivino prima di quelle dello strato sottostante: queste viaggiando ad una velocità maggiore (essendo state generate più in profondità) ed essendosi generate molto ravvicinate rispetto a quelle dello strato sottile, superano in fase queste ultime le quali risulteranno sul sismogramma come secondi arrivi, e quindi di difficile interpretazione. Dunque, gli strati sottili, pur rispettando il gradiente di velocità, generano arrivi secondari e quindi di difficile interpretazione.

Bisogna tener dunque ben presente quale sia l'obiettivo dell'indagine commissionata. La sismica a rifrazione è un metodo molto efficace quando si vuole mappare un bedrock al di sotto delle sue coperture sedimentarie oppure per verificare la presenza di cambi litologici verticali laterali. Effettuare una analisi tomografica significa a tutti gli effetti risolvere un *problema inverso*.



Cenni teorici sull'inversione tomografica

La risoluzione del problema inverso tomografico consiste nel raccogliere i tempi di primo arrivo del treno di onde compressive/di taglio (appartenenti allo *Spazio dei Dati*) rifratte criticamente e determinare le velocità che possono aver prodotto quei tempi di arrivo sul sismogramma, cioè i *parametri* (appartenenti allo spazio omonimo) con la quale si vuole descrivere il proprio modello. La relazione tra spazio dei Dati e spazio dei Parametri è gestita dalla teoria, che nel caso in esame è la propagazione di onde elastiche in mezzi continui. Esiste dunque una relazione matematica matriciale del tipo:

$$t_i = G_{ij}(v_j) \quad (3.2.1)$$

dove t rappresenta il vettore dei i -dati (tempi d'arrivo) e v il vettore dei j -parametri (velocità) che descrive il modello e G_{ij} rappresenta la matrice che gestisce la relazione tra i due. La soluzione dei problemi inversi consiste nel cercare una soluzione al sistema di equazioni definite dalla eq. 3.2.1 che sono generalmente non lineari e quindi di non semplice soluzione. Determinare una soluzione, e quindi i parametri che giustificano completamente i dati è impossibile per via delle incertezze che sono intrinsecamente legate ai dati e perché la parametrizzazione scelta è molto improbabile che rappresenti effettivamente la distribuzione reale dei parametri di modello.

Quindi operativamente si cerca la soluzione che meglio giustifichi i dati in ingresso al sistema, minimizzando la cosiddetta *funzione di misfit*, che viene generalmente descritta dalla norma quadra l_2 dello scarto tra i dati osservati e calcolati:

$$\varepsilon = \|\bar{t} - G(v)\|_{l_2}^2 \quad (3.2.2)$$

La soluzione che si determina è quindi iterativa: partendo da un modello iniziale v_0 (starting model) si calcola una possibile matrice G e se ne calcola il misfit con i dati sperimentali. Il risultato di ciascun step sarà il modello iniziale nuovo da reiterare ed il processo trova termine, di norma, quando l'errore di misfit è dello stesso ordine di grandezza dell'errore sui dati sperimentali.

Nei casi semplici, il problema potrebbe essere risolto esattamente come descritto sopra, con algoritmi di calcolo che utilizzano relazioni derivanti dalla linearizzazione del problema (il cosiddetto *approccio locale*). Questo è però consigliabile solo per problemi inversi debolmente non lineari o lineari e per i quali il modello iniziale è ben posto, possibilmente da delle informazioni *a priori* raccolte in campo. Purtroppo la maggior parte dei problemi tomografici è non lineare il che implica il dover utilizzare una particolare strategia che permetta di determinare il modello iniziale più corretto possibile e la funzione di misfit più adeguata. Il tutto viene ricondotto alla cosiddetta analisi tomografica ad *approccio globale*, che è quella eseguita dal software utilizzato.



L'intero mezzo di propagazione viene discretizzato mediante una griglia regolare di nodi. Per ciascuno di questi nodi vengono stimati i valori di velocità del mezzo di propagazione (parametri del modello). In funzione dei tempi di arrivo, risolvendo la famosa *equazione Eikonale*,

$$|\nabla T(\vec{x})|^2 = s(\vec{x}) \quad (3.2.3)$$

è possibile ricostruire i fronti delle onde rifratte e dunque il loro percorso dalla sorgente ai geofoni, adattando in ogni nodo la velocità opportuna per correlare il modello ai dati raccolti. Questo calcolo di massima, figlio dei dati raccolti in campo, dà il modello iniziale v_0 da dover ottimizzare mediante il processo iterativo ad approccio globale. La funzione di misfit sulla quale è basato l'approccio non lineare è la seguente:

$$\varepsilon(\bar{t}, \bar{v}) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{N_i} \gamma_{ij} (t_{ij}^{obs} - t_{ij}^{calc})^2 \quad (3.2.4)$$

con γ un coefficiente che pesa il risultato finale in funzione della qualità dei tempi di primo arrivo osservati (tale coefficiente varia dipendentemente dall'algoritmo del software utilizzato ed è in generale funzione dell'errore di misura sui tempi d'arrivo), N_s il numero di sorgenti utilizzate, N_i è il numero di tempi di arrivo letti per l' i -esima sorgente. Dal modello così calcolato ci si aspetta che abbia un misfit ε_1 minore del misfit iniziale ε_0 (o più in generale del precedente). Se questo è il caso (non si andrebbe mai a convergenza altrimenti), allora il nuovo modello (es. il primo calcolato) viene condizionalmente accettato con una probabilità (di tipo Bayesiano) di:

$$p(\bar{t} | \bar{v}) = N \cdot \exp \left[\frac{(\varepsilon_{min} - \varepsilon_n)^q \cdot \Delta \varepsilon}{T} \right] \quad (3.2.5)$$

con $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n$, T un parametro chiamato *temperatura*, q un coefficiente empirico e ε_{min} il valore del misfit al minimo locale (idealmente nullo). Tale condizione permette ai modelli con errori minimi quadrati più alti di poter evitare i minimi locali ed andare alla ricerca del minimo globale. Le scelte dei parametri T e q sono affidate alla architettura del software utilizzato e sono messe a punto proprio per dare un compromesso tra obiettivo (scartare i minimi locali e raggiungere la convergenza finale al minimo globale) e tempo di calcolo. Il processo viene iterato fino a quando il modello calcolato non verrà accettato con una probabilità tendente a uno. Infine, l'ulteriore vantaggio dell'approccio Bayesiano è quello di poter utilizzare informazioni *a priori* (t_0) riguardanti lo spazio dei parametri, potendo così calcolare la funzione di probabilità *condizionata* per il modello



v, permettendo dunque di avere un ulteriore strumento al fine di render più robusta l'inversione:

$$p(\bar{v}|\bar{t}_0) = N' \cdot p(\bar{t}_0|\bar{v}) \cdot \delta(\bar{v}) \quad (3.2.6)$$

La funzione $\delta(v)$ rappresenta lo stato di conoscenze dello spazio dei modelli prima di utilizzare le informazioni fornite dai dati osservati t_0 ed è definita a sua volta come:

$$\delta(\bar{v}) = \begin{cases} 1 & v \in [v_p - \Delta v; v_p + \Delta v] \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (3.2.7)$$

Il vettore v_p rappresenta le velocità calcolate interpolando quelle ottenute per il modello di velocità finale stimato nell'iterazione precedente e la variazione Δv rappresenta un intervallo di velocità arbitrariamente assegnato.

Il risultato finale sarà dunque un grid bidimensionale in cui vengono presentate le isolinee di velocità del modello che è andato in convergenza, sul quale viene successivamente eseguita una interpretazione dei litotipi.



Correlazioni tra le velocità sismiche e i parametri elastici geomeccanici

La liberazione istantanea di energia nel terreno genera un sistema di onde sismiche la cui propagazione è regolata dalle classiche leggi della fisica.

Tale fenomenologia è trattata e descritta nel capitolo sismico delle scienze geofisiche.

Le deformazioni e le tensioni generate da una sollecitazione artificiale impulsiva sono abbastanza complesse ma nell'ambito di cui si tratta in queste note è sufficiente fare riferimento ai due tipi principali di onde sismiche, (dette anche onde di volume - body waves): le onde sismiche di compressione (longitudinali, onde prime) e le onde sismiche di taglio (trasversali, onde seconde).

Le onde di volume si propagano nel terreno in ogni direzione ed intercettando il piano topografico danno origine sullo stesso ad onde di natura diversa (Rayleigh e Love) che si propagano esclusivamente in superficie.

Nel loro complesso, le onde sismiche creano sollecitazioni e conseguenti deformazioni nel mezzo attraversato che generalmente ricadono nel campo elastico del diagramma sforzi/deformazioni. Pertanto in questo ambito sono applicabili le relazioni classiche della teoria dell'elasticità.

Le onde sismiche longitudinali sono deformazioni che si propagano in linea retta con un'alternanza continua di compressioni e dilatazioni della materia lungo il percorso di propagazione.

Ogni particella di materia oscilla attorno al suo punto di quiete lungo un asse coincidente con il raggio di propagazione dell'onda sismica.

Le onde sismiche di taglio sono invece deformazioni che si propagano nella stessa direzione delle precedenti ma con movimento oscillatorio delle particelle ortogonale alla traiettoria dei raggi sismici.

Per la descrizione dettagliata di questi fenomeni è sufficiente far riferimento ai testi generali di geofisica.

La velocità di propagazione delle onde sismiche dipende dalle costanti elastiche e dalla densità del mezzo attraversato, e pertanto risulta variabile in funzione delle caratteristiche geomeccaniche e fisiche del terreno o delle rocce.

In uno stesso tipo di materiale le velocità di propagazione dei vari tipi di onde differiscono tra loro: le più veloci sono le onde di compressione, a cui seguono le onde di taglio e successivamente le diverse onde superficiali.

Poichè le tensioni e le deformazioni che si generano nel campo sismico sono di modestissima entità anche il terreno e le rocce sollecitate in questo ambito possono essere considerati in prima approssimazione come materiali omogenei, isotropi ed elastici. E' applicabile quindi la legge di Hooke (proporzionalità tra lo sforzo applicato d e la deformazione prodotta e):

$$d = e \times E$$



La costante E, definita come rapporto tra sollecitazione e conseguente deformazione longitudinale, rappresenta il modulo elastico (o di Young) del materiale. E' importante sottolineare che in campo dinamico si parla di modulo elastico dinamico (e non statico), ricavandosi tale modulo da prove dinamiche (o sismiche). Il rapporto tra la sollecitazione ortogonale (trasversale o di taglio) e la deformazione definisce il modulo di elasticità tangenziale (o di taglio) G.

Il rapporto tra la tensione idrostatica e la deformazione cubica (o di volume) definisce il modulo di compressione cubica (o di bulk) k.

Infine il coefficiente (o rapporto) di Poisson ν è definito come il rapporto tra la deformazione trasversale e quella longitudinale.

Tale coefficiente varia da 0 a 0.5 con valore medio di 0.25 per molte rocce: i valori tendono a 0.05 per materiali estremamente duri ed a 0.45 per i materiali incoerenti.

Per i fluidi il coefficiente assume il valore limite di 0.5.

In senso più generale possono ancora essere definite le costanti di Lamè I e m come caratteristiche elastiche indipendenti dalle direzioni lungo cui vengono registrate le deformazioni. Queste due costanti sono definite dalle relazioni:

$$I = \frac{\nu \times E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (1)$$

$$m = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

Analogamente il modulo E e il coefficiente ν possono essere espressi in funzione delle costanti di Lamè I e m:

$$E = \frac{m(3I + 2m)}{I + m} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{I}{2(I + m)} \quad (4)$$

La seconda costante di Lamè m ha lo stesso significato fisico del modulo di elasticità tangenziale G prima definito.

Dimensionalmente il modulo elastico e le due costanti di Lamè esprimono il rapporto tra una forza ed una superficie mentre il coefficiente di Poisson è adimensionale.

Un'ultima costante entra a far parte delle relazioni tra caratteristiche elastiche e velocità: si tratta della densità ρ espressa come rapporto tra massa e volume.

Le velocità longitudinale V_p e trasversale V_s si correlano alle costanti elastiche con le relazioni:



$$V_p = \left[I + 2m/r \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$V_s = \left[m/r \right]^{1/2} \quad (6)$$

Pertanto, avendo determinato i valori di V_p e V_s con rilievi sismici ed il valore della densità con prove di laboratorio, è possibile calcolare i valori delle costanti elastiche che caratterizzano i terreni esaminati con le espressioni:

$$\nu = 0.5 \times \frac{V_p/V_s^2 - 2}{V_p/V_s^2 - 1} \quad (7)$$

(8)

L'analisi delle varie relazioni illustrate permette una serie di considerazioni assai interessanti che si traducono in altrettanti comportamenti fisici riscontrabili nell'applicazione pratica.

Il confronto fra le espressioni (5) e (6) delle velocità conferma come per uno stesso materiale la velocità longitudinale abbia sempre un valore superiore a quello trasversale. Per i fluidi il coefficiente di Poisson vale 0.5 e la seconda costante di Lamè $m = 0$: ne risulta che nei fluidi non possono essere trasmessi sforzi di taglio e quindi la velocità longitudinale ha sempre un valore superiore a quello della velocità trasversale.

Il rapporto tra le velocità di propagazione V_s/V_p è solo funzione del coefficiente di Poisson: al variare del coefficiente da 0 a 0.5, il rapporto varia da 0.7 a 0. Per il valore medio delle rocce ($\nu = 0.25$) il rapporto vale $V_s/V_p = 0.58$.

Merita essere ricordato infine che i parametri ricavati per via dinamica hanno in genere valori superiori a quelli ricavati da prove statiche in laboratorio proprio per il diverso campo di sollecitazione applicata e la diversa deformazione raggiunta.

I valori di velocità di propagazione delle onde longitudinali variano da poche centinaia di metri al secondo sino ad alcune migliaia (7-8) di metri al secondo.

Velocità inferiori alla velocità del suono nell'aria (344 m/s) sono misurabili in terreni soffici superficiali anidri con elevato contenuto di materiali organici.

Gli stessi materiali, saturi d'acqua, incrementano i loro valori sino a 500-800 m/s.

I terreni incoerenti alluvionali presentano valori variabili tra 600 e 1800 m/s con prevalenza di velocità superiori a 1400 m/s per quelli saturi d'acqua.

Si ricorda che il valore della velocità nell'acqua varia tra 1480 e 1520 m/s al variare della temperatura e della salinità.

La velocità nelle rocce sedimentarie spazia tra valori di 2000 e 5000 m/s incrementandosi sia con la profondità dei sedimenti che con la loro età geologica.



Le rocce metamorfiche si attestano tra i valori di 3000 e 5000 m/s mentre le rocce ignee intrusive ed effusive salgono sino ai massimi valori di 8000 m/s.

Per l'anisotropia delle rocce tutti questi valori cambiano in funzione della direzione di propagazione rispetto alla stratificazione con differenze variabili dal 5 al 25%.

Analogamente questi valori, che si riferiscono a rocce sane, compatte ed omogenee, tendono a decrescere in funzione dell'alterazione dei loro componenti mineralogici, del grado di fratturazione e delle discontinuità stratigrafiche.

Da tutte queste premesse scaturisce che per via sismica è possibile definire le caratteristiche di un ammasso roccioso, o comunque di un grande volume di roccia, ottenendo valori significativi dell'insieme piuttosto che del puntuale.

Molti studiosi e sperimentatori hanno proposto correlazioni di vario genere tra i valori di velocità e le varie caratteristiche geomeccaniche e la bibliografia è ricca di spunti e riferimenti.

Parametri

- 1) coefficiente di Poisson medio:

$$\nu_{\text{medio}} = 0.5 \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1}$$

- 2)

modulo di deformazione a taglio medio:

$$G_{\text{medio}} = \rho V_s^2$$

- 3) modulo di compressibilità edometrica medio:

$$E_{\text{dmedio}} = \rho V_p^2$$

- 4) modulo di Young medio:

$$E_{\text{medio}} = 2\rho V_s^2 (1 + \nu)$$



- 5) modulo di compressibilità volumetrica medio:

$$E_{v\text{medio}} = \rho \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

- 6) densità relativa:

$$r = 0.51 * V_p^{0.19}$$

Valori tipici delle caratteristiche delle rocce più comuni

Roccia	V_p Velocità longitudinale (m/s)	V_s Velocità trasversale (m/s)	Densità r (Kn/m ³)	E Modulo elastico (MPa)	ν Coefficiente di Poisson
Granito	4000-6000	2500-3000	26-28	50000-70000	0.25
Diorite	5500-6500	3000-3500	28-30	70000-100000	0.25
Basalto	6300-7000	3200-3700	28-30	60000-100000	0.25
Gneiss	4000-6000	2200-2800	25-27	40000-70000	0.25
Scisti	3500-5500	2000-4000	24-28	30000-60000	0.25
Dolomia	3500-5500	2000-2500	25-28	50000-80000	0.25
Calcere	2500-4000	1500-2000	25-28	40000-80000	0.25
Arenarie	1500-3000	800-2000	22-25	10000-30000	0.28
Marne	1500-3500	500-1500	18-22	10000-30000	0.30
Gessi	1500-3000	500-1500	20-25	10000-30000	0.30
Argille	800-2000	500-1500	15-20	10000-20000	0.30
Alluvioni	300-800	100-300	15-20	10000-30000	0.32



2.2 PROVA DOWN HOLE

Le prove sismiche Down-Hole vengono eseguite con lo scopo di misurare la velocità delle onde sismiche dirette che si propagano dalla superficie nel terreno in profondità.

Il terreno viene energizzato in superficie, in prossimità di testa foro, e la registrazione avviene in foro grazie ad un geofono triassiale ancorato a profondità via via crescenti

Le onde sismiche possono essere generate energizzando il terreno in direzione verticale oppure in direzione trasversale (parallelamente al suolo). Nel primo caso verranno generate prevalentemente onde compressive che si propagano in profondità e vengono registrate al meglio dal geofono verticale. Nel secondo caso verranno generate prevalentemente onde di taglio visibili principalmente sui geofoni con l'asse posto orizzontalmente.



Le onde di taglio hanno velocità inferiori a quelle compressive e quindi raggiungeranno la terza geofonica quando già il primo fronte d'onda compressiva è già transitato. Questo passaggio costituisce un disturbo per la misura delle onde trasversali in quanto i geofoni orizzontali si trovano ancora in movimento all'arrivo dell'onda trasversale. Per migliorare il rapporto fra l'energia dell'onda compressiva e l'energia dell'onda trasversale a favore di quest'ultima, si realizza una doppia energizzazione orizzontale con verso opposto. La sottrazione delle forme d'onda relative a queste due acquisizioni, riduce sensibilmente la componente compressiva presente nel segnale.

La misura dei primi arrivi sismici deve essere realizzata con precisione e un dettaglio non superiore al decimo di millisecondo. Ogni ritardo fra il momento dell'impulso dato al terreno e l'inizio della registrazione al sismografo si traduce in un errore significativo nei valori di velocità misurati. Per annullare ogni effetto di ritardo, viene posizionato un geofono in prossimità del punto di battuta a testa foro. La forma d'onda prodotta da questo geofono viene acquisita su un canale del sismografo e viene analizzata separatamente, in modo da poter valutare ogni possibile anticipo o ritardo. Il valore del tempo del primo fronte di arrivo a questo geofono è sempre lo stesso per tutte le battute e il segnale è ricco di alte frequenze grazie alla prossimità con la sorgente e quindi è preciso il tempo misurato.

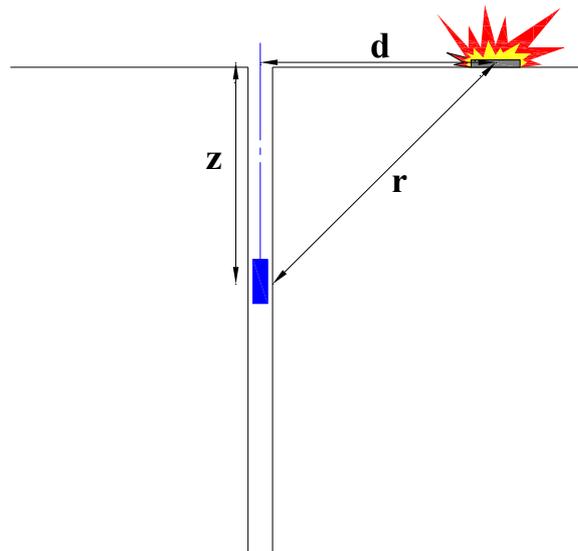
L'analisi dei dati prevede che le battute eseguite in diversi momenti vengano raccolte a ricostruire un unico sismogramma, identico a quello che sarebbe stato ricevuto da una catena di tanti geofoni quante sono le quote di misura nel foro. In



particolare vengono raggruppate in un unico sismogramma le forme d'onda relative al geofono verticale e in un altro sismogramma le forme d'onda relative ai geofoni orizzontali. Poichè i geofoni orizzontali sono due e il sismogramma uno solo è necessario che le forme d'onda vengano fra loro composte secondo un certo angolo che viene opportunamente modificato dal programma di interpretazione a cercare il piano di oscillazione principale dell'onda di taglio. La progressiva modifica dell'angolo di composizione, accompagnata dalla grafica in tempo reale della forma d'onda composta, consente di individuare quel valore per il quale è minima l'energia dell'onda compressiva e massima quella dell'onda trasversale. Questo valore dell'angolo di composizione, diverso per ciascuna profondità, viene utilizzato per la creazione dell'unico sismogramma delle onde di taglio.

INTERPRETAZIONE DOWN HOLE CON IL METODO DIRETTO

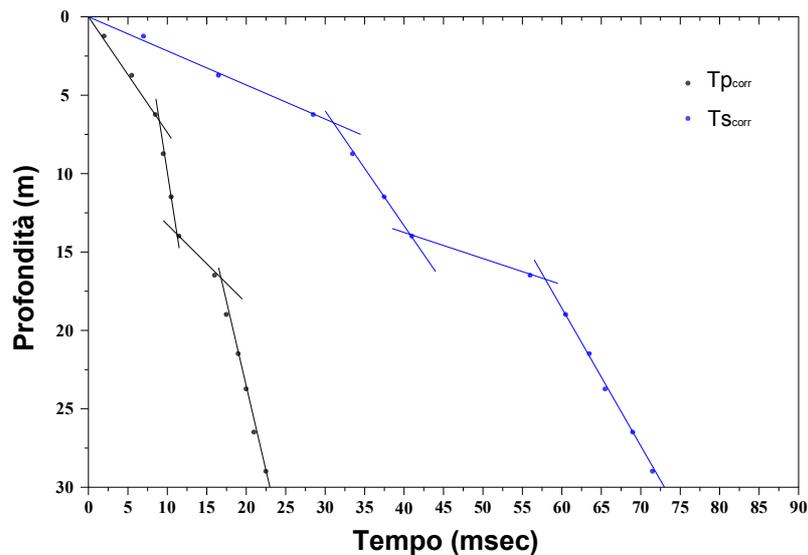
Per poter interpretare il down hole con il metodo diretto, inizialmente, bisogna correggere i tempi di tragitto (t) misurati lungo i percorsi sorgente-ricevitore per tenere conto dell'inclinazione del percorso delle onde.



Se d è la distanza della sorgente dall'asse del foro, r la distanza fra la sorgente e la tripletta di sensori, z la profondità di misura è possibile ottenere i tempi corretti (t_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$1.0) t_{\text{corr}} = \frac{z}{r} t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico $t_{\text{corr}} - z$ in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dall'inclinazione dei segmenti di retta lungo i quali si allineano i dati sperimentali .



Nell'ipotesi che anche la velocità delle onde di compressione nello scheletro solido possa essere correttamente misurata, modellando il mezzo come un continuo elastico, ricavando i valori di V_p , V_s e ρ (densità del mezzo bifase), possono essere dedotti i seguenti parametri:

7) coefficiente di Poisson medio:

$$v = [0.5(V_p/V_s)^2 - 1] / [(V_p/V_s)^2 - 1]$$

8) modulo di deformazione a taglio iniziale:

$$G_o = \rho V_s^2$$

9) modulo di compressibilità edometrica iniziale:

$$M_o = \rho V_p^2$$

10) modulo di Young :

$$E = 2\rho V_s^2(1+v)$$

11) modulo di compressibilità volumetrica iniziale:

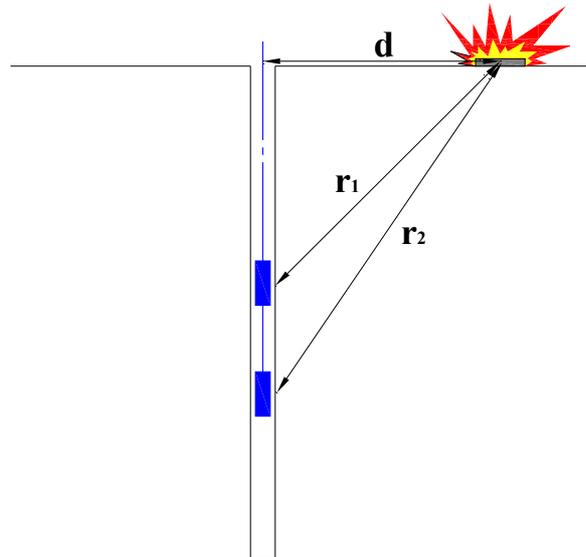
$$K_o = \rho (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

Parametri che descrivono il comportamento del terreno per piccole deformazioni, un comportamento che nella fase iniziale può essere definito pseudo-lineare.



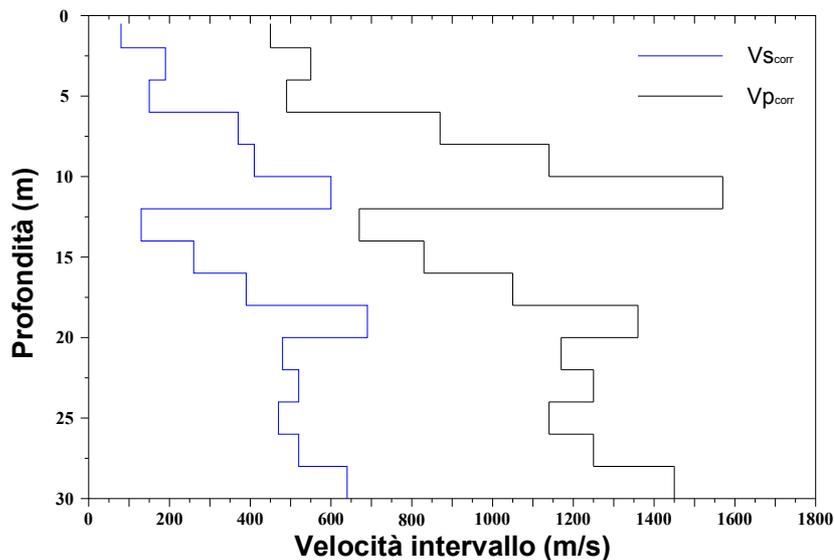
INTERPRETAZIONE DOWN HOLE CON IL METODO INTERVALLO

Con il metodo intervallo i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità, consentendo così di migliorare la qualità delle misure (*velocità d'intervallo*).



Quando si dispone di un solo ricevitore, cioè nell'ipotesi in cui le coppie non corrispondano ad un unico impulso, i valori di velocità determinati vengono definiti di *pseudo-intervallo*, consentendo solo un'apparente migliore definizione del profilo di velocità. Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la 1.0) e la velocità intervallo delle onde P e S, con relativo grafico, con la formula seguente:

$$7.0) V_{p,s} = \frac{z_2 - z_1}{t_{2\text{corr}} - t_{1\text{corr}}}$$





Ottenute le velocità intervallo si calcolano la densità, il coefficiente di Poisson, il modulo di deformazione a taglio, il modulo di compressibilità edometrica, il modulo di Young, il modulo di compressibilità volumetrica per ogni intervallo con le formule riportate sopra.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti:

- a) non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti;
- b) non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

Ambedue le procedure d'interpretazione sopra descritte sono comunque suscettibili di una critica fondamentale, cioè si basano sull'ipotesi che i percorsi delle onde siano rettilinei e coincidenti con quelli che collegano la sorgente ai ricevitori. Di solito ciò non è esatto, dato che, prima di giungere ai ricevitori, le onde subiscono fenomeni di rifrazione che ne modificano il percorso.

ELABORAZIONE DEI DATI

L'energizzazione è avvenuta a testa foro su un apposito asse ancorato al terreno. L'impulso di trigger è stato dato dalla chiusura di un circuito collegato alla mazza battente.

L'elaborazione dei dati è avvenuta con programma **Geogiga PS Log** rispettando la seguente procedura di trattamento:

- immissione dei files dei dati in sequenza alle varie profondità;
- estrazione della componente longitudinale della vibrazione sismica dal segnale del geofono verticale;
- composizione per rotazione della componente trasversale della vibrazione sismica a partire dai segnali dei geofoni orizzontali;
- definizione dei tempi di arrivo per le onde longitudinali e trasversali;
- calcolo delle distanze fra i punti di energizzazione e di ricezione;
- compilazione e stampa delle tabelle e plottaggio delle forme d'onda relative alle onde longitudinali e trasversali.

La tabella finale contiene i seguenti risultati.

<i>Profondità</i>	Distanza tra ricevitore e testa foro in metri
<i>Distanza</i>	Distanza tra sorgente e testa foro in metri
<i>Tp:</i>	Tempi onde P in mS
<i>Ts:</i>	Tempi onde S in mS
<i>TpV:</i>	Tempi onde P corretti sulla verticale in mS
<i>TsV:</i>	Tempi onde S corretti sulla verticale in mS
<i>Vp Intervallo:</i>	Velocità Intervallo onde P in m/s
<i>Vs Intervallo:</i>	Velocità Intervallo onde S in m/s
<i>Vp average:</i>	Velocità media onde P in m/s
<i>Vs Average:</i>	Velocità media onde S in m/s
<i>Ei:</i>	Modulo di elasticità dinamica iniziale (Gpa)
<i>Gi:</i>	Modulo di taglio dinamico iniziale (Gpa)
<i>r:</i>	Densità Relativa (kN/m ³)
<i>Ki:</i>	Modulo di compressibilità dinamica iniziale (Gpa)



Dove in particolare la **velocità d'intervallo** è il risultato dell'applicazione della seguente formula:

$$V_i = \frac{H_i}{T_i - T_{i-1}}$$

Dove V_i è la velocità d'intervallo dello strato i

Dove H_i è lo spessore strato H_i

Dove T_i è la il tempo corretto dalla superficie alla base dello strato H_i

Dove T_{i-1} è la il tempo corretto dalla superficie alla base dello strato H_{i-1}

Mentre la **velocità media** è il risultato dell'applicazione della seguente formula:

$$V_m = \frac{D}{T}$$

Dove V_m è la velocità media

Dove D è la profondità a cui è posizionato il ricevitore.

Dove T è il tempo corretto sulla verticale impiegato dall'onda sismica per andare dalla superficie al ricevitore.



2.3 SISMICA PASSIVE MISURE HVSR

La metodologia microtremori HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) è una tecnica di analisi passiva non invasiva a stazione singola del rumore sismico ambientale presente attorno ad una determinata posizione sulla superficie del terreno. Essa consiste essenzialmente nel calcolare il rapporto fra le ampiezze degli spettri di Fourier delle componenti orizzontale e verticale di tale rumore e analizzare i picchi (o massimi di tale funzione).

Quello che ci si aspetta è che le eventuali frequenze di risonanza caratteristiche del sito specifico corrispondano ad alcuni dei massimi eventualmente presenti nella funzione H/V. L'ampiezza di questi massimi è proporzionale, anche se non linearmente, all'entità dei contrasti di impedenza sismica esistenti.

La presente metodologia permette di indagare profondità difficilmente raggiungibili con altre metodologie e dunque è possibile evidenziare picchi anche a frequenze molto basse.



Geofono triassiale a basse frequenze

Il rumore è naturalmente presente sempre per effetto di micro-vibrazioni propagantesi nel terreno; studi precedenti hanno concluso che ciò che le origina provenga principalmente da una moltitudine di deboli sorgenti, tra loro non correlate, riferibili in ultima analisi ai più disparati meccanismi di propagazione di impulsi-vibrazioni indotti in mezzi solidi anche da regioni remote, e il loro conseguente scattering, definito come il processo fisico per cui le onde vengono deflesse in modo casuale dalle irregolarità presenti nel terreno. E' lecito assumere almeno in prima istanza che queste micro-sorgenti di rumore abbiano una distribuzione casuale attorno al punto di osservazione.

Sorgenti di tipo antropico (tipicamente direzionali) possono comunque essere sempre presenti e complicare le interpretazioni dei dati, dal momento che possono introdurre picchi ulteriori nella funzione H/V, non riferibili a risonanze, ma nei medesimi range di frequenze.



Le vibrazioni ambientali possono anche essere categorizzate in base al loro tipico contenuto in frequenza, a seconda delle fonti che le hanno originate; inoltre possono presentarsi non trascurabili variazioni-oscillazioni come quelle dipendenti dall'ora del giorno-notte e dalle condizioni atmosferiche.

Le misurazioni sono state effettuate in acquisizione continua con una terna triassiale di geofoni

Nel caso in cui la morfologia del sottosuolo contenga variazioni di impedenza sufficientemente consistenti, ad esempio strati a diversa composizione, gli spettri in frequenza delle componenti registrate esibiranno andamenti tali che calcolandone i rapporti, possono mostrare, come detto in precedenza, i picchi caratteristici.

Questi picchi possono essere associati a determinate profondità, specialmente quando si ha a disposizione un dato di riferimento aggiuntivo, tipicamente proveniente da una prova di tipo down-hole o di tipo Masw, in grado di fornire il vincolo iniziale sulla successione locale in profondità dei macro-strati al processo di inversione della curva HVSR estratta dai dati.

La frequenza di risonanza f_0 di una copertura di materiale omogeneo e di spessore H , sovrapposta a un basamento rigido in condizioni di stratificazione piana, assumendo un comportamento elastico-lineare, è data dalla formula:

$$f_0 = \frac{\overline{V_s}}{4H}$$

dove V_s è la velocità media delle onde S nel sedimento.

Utilizzando questa relazione approssimata è possibile stimare, a partire dalla frequenza di risonanza ricavata dall'analisi HVSR, lo spessore della copertura una volta nota la velocità media delle onde di taglio V_s o, viceversa, la velocità media se lo spessore H è noto.

Eventuali picchi multipli presenti nello spettro dei rapporti HVSR possono essere ricondotti a determinate profondità (stimate) sfruttando questa stessa equazione; inoltre con questo sistema si può verificare che un determinato picco in frequenza corrisponda effettivamente ad uno dei salti di impedenza desunti.

Studi teorici dimostrano che le frequenze di picco ricavate dalle curve H/V corrispondono alle frequenze di risonanza della funzione di trasferimento, mentre l'ampiezza delle curve H/V non consente di stimare l'ampiezza della funzione di trasferimento.

L'eventuale assenza di massimi della funzione H/V suggerisce la mancanza di fenomeni di amplificazione sismica, dovuti a risonanze per rilevanti contrasti di impedenza.



2.4 PROVE SISMICHE METODOLOGIA MASW

L'acquisizione è avvenuta tramite l'utilizzo di un sismografo a 24 bit DAQlink III prodotto da Seismic Source Co. (USA) utilizzando 12 canali in registrazione. Lo strumento viene collegato ai geofoni verticali aventi frequenza propria di 4.5 Hz, posizionati sul terreno a distanza di 6 metri. Il tempo di registrazione dello strumento è fissato in 2 secondi. Gli offset di energizzazione sono pari a 6 e 12 metri e le acquisizioni vengono ripetute su entrambi i lati dello stendimento al fine di verificare l'effettiva presenza di strati piano paralleli.

Caratteristiche tecniche:

1 to 24 channels per unit

Weatherproof enclosure

Multiple units can be used together for large channel count

A/D conversion:

24 bit high-speed sigma delta converters

Dynamic Range:

144dB (system)

Greater than 118 dB (measured at 2msec)

Bandwidth:

DC to 15 KHz

Analog filter flat response to 8000Hz

Digital filter bandwidth=85% of Nyquist frequency

Common Mode Rejection:

Greater than 100 dB

Crosstalk:

Better than 125 dB

Noise Floor:

0.2 microvolt RMS noise (2msec sample rate)

Trigger accuracy:

+/- 1microsecond at all sample rates

Maximum Input Signal:

Standard (x 2 gain) 3.58 Volts peak to peak

(optional: (x 1 gain) 7.16 Volts peak to peak

Input Impedance:

100 K Ohms

Preamplifier Gains:

X2 (6dB) and x32 (30 dB) standard; software selectable

(x1 (0 dB) and x16 (24 dB) available on special request)

Anti-alias Filters:

85% of Nyquist frequency

Digital Filters:

Low Cut – User Selectable frequency

Notch – 50 or 60 Hz standard; User Selectable

High Cut - User Selectable

Sample Interval:

0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.00 millisecond

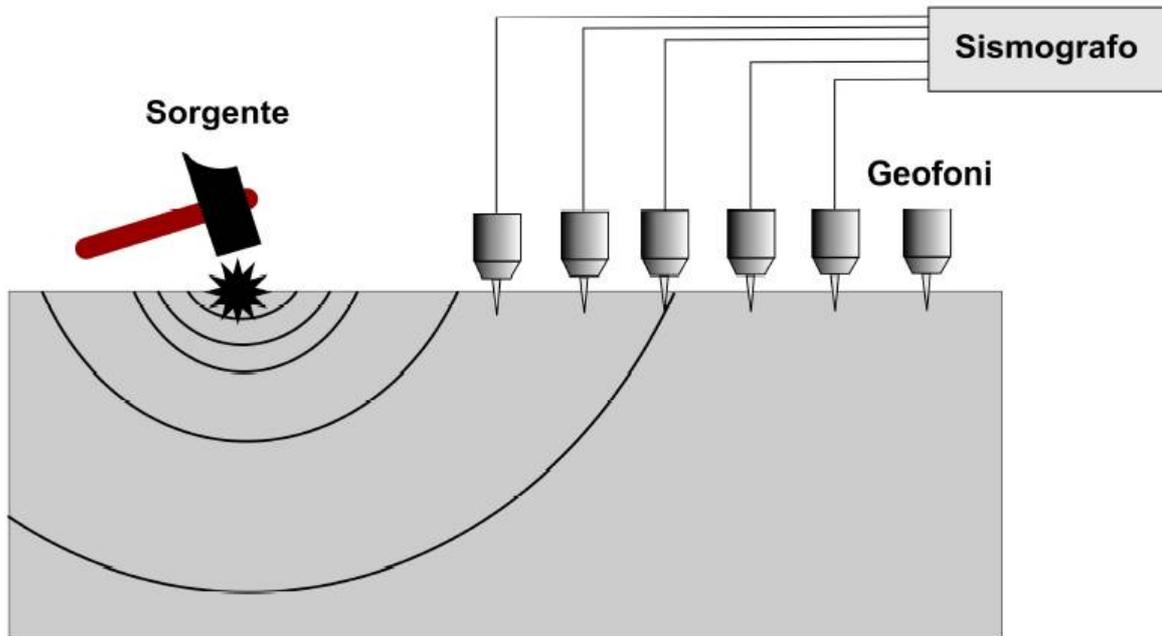
Sample Frequency:

48000, 16000, 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125, 62.5 sample/second





Di seguito viene riportata una figura che illustra la disposizione dei sensori e la trasmissione dell'impulso.



INTERPRETAZIONE DEI DATI

La procedura elaborativa prevede, sinteticamente, i seguenti passi:

- Trasformazione dei files in formato compatibile
- Immissione delle geometrie di acquisizione dei dati (sorgente e ricettori)
- Generazione dell'immagine di dispersione
- Analisi della curva di dispersione (picking)
- Verifica dei modi
- Modellazione e/o inversione
- Calcolo del parametro V_{s30} dal profilo delle velocità di taglio

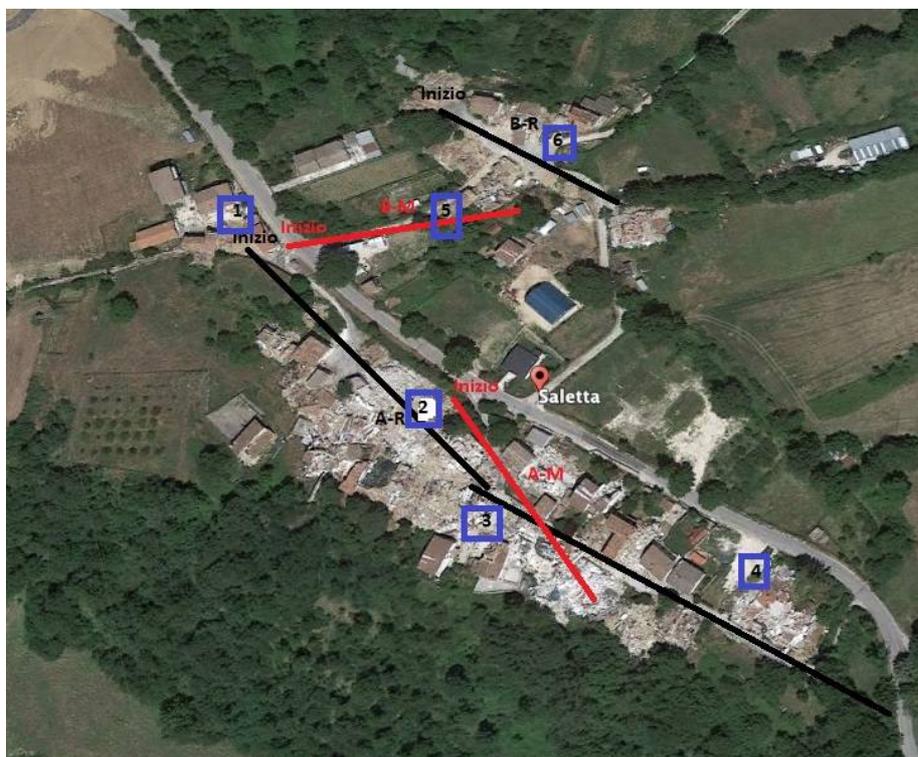
I software utilizzati per l'interpretazione sono SurfSeis della KGS (Kansas Geological Survey) e WinMASW 4.1.1 Pro (Eliosoft)



3 RISULTATI

3.1 RISULTATI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE COMPRESSIVE (P) E TAGLIO (S)

A seguire l'ubicazione schematica delle indagini eseguite.



Ubicazione schematica indagini. Le linee nere indicano le sezioni sismiche a rifrazione, sigla A-R e B-R. le linee rosse le prove masw, sigla A-M e A-M. I quadrati blu le prove Hvsr con il loro numero identificativo all'interno

Gli allegati, 1A e 1B riportano le **linee geosimiche (A-R e B-R)** in onde compressive e di taglio interpretate.

Le basi sono state acquisite con 9 punti di energizzazione il che ha consentito di processare i dati seguendo una modalità di interpretazione tomografica. Come risulta evidente dagli allegati la risoluzione ottenuta permette di apprezzare variazioni di velocità più dettagliate sia nella copertura che nei depositi sottostanti.

L'andamento del sottosuolo è mostrato meglio e in maggior dettaglio nella sezione interpretata in velocità delle onde P compressive (attraverso una scala cromatica di colori che parte dal nero e incrementa verso il ciano).

Le variazioni di velocità sono associabili al diverso grado di addensamento dei depositi di copertura e alla presenza di un substrato di base.

Vengono suddivise tre unità geosimiche differenti che costituiscono il modello geofisico proposto.



Le tre unità geosismiche possono essere così descritte:

- **prima unità geosismica** superficiale: si trova al di sopra di una linea tratteggiata di colore blu. Rispecchia l'andamento di velocità inferiori a circa 800 m/sec. Questa unità è attribuibile alla possibile presenza di depositi poco consolidati.
- **seconda unità geosismica**: si trova tra la linea tratteggiata di colore blu e la linea tratteggiata di colore rosso riferita alla velocità di 1500 m/sec. Questa unità è attribuibile alla possibile presenza di depositi più consolidati probabilmente in appoggio o in contattato anche laterale con l'ammasso di base.
- **terza unità geosismica**: si trova al di sotto di una linea tratteggiata di colore rosso. Rispecchia l'andamento di velocità superiori a circa 1500 m/sec. Questa unità è attribuibile all'ammasso di base più consolidato. Si evidenziano nette discontinuità laterali con variazioni molto consistenti delle velocità sismiche, sia orizzontali che verticali, forse attribuibili all'importante evento sismico che coinvolto l'area d'indagine.

Infine a seguire le tabelle con tabulati i principali parametri dinamici iniziali calcolati lungo una verticale di riferimento a specifiche progressive.

In particolare abbiamo:

Sezione A-R Tabella A1, A2 e A3.

Sezione B-R Tabella B1.

Le tabelle mostrano anche una indicazione sulla Classe di Suolo per il V_s equivalente estrapolato secondo la normativa di riferimento. La scelta della **Categoria di Suolo**, Classificazione sismica dei terreni di progetto, si basa sulle condizioni stratigrafiche e sui valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/sec) definita dall'espressione:

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

h_i spessore dell'i-esimo strato;

$V_{s,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;

N numero di strati;

H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato è riferita al piano di posa delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della



fondazione. Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} , ottenuto ponendo $H=30m$ nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono:

Tabella Categorie di sottosuolo NTC/2018

Categoria	Profilo stratigrafico
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> 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	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti</i> , 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	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fine mediamente consistenti</i> , 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/e e 360 m/s
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti</i> , 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 m/e e 180 m/s
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C D</i> , con la profondità del substrato non superiore a 30m.



Sezione A-R : TABELLA 1- 2 - 3

STESA SISMICA BASE 1 Tabella 1

Profilo P/S A a progressiva circa 105 metri inizio linea

Calcolo indicativo dei principali parametri dinamici

Profondità m	DV_p m/s	DV_s m/s	DV_p/DV_s	DV_s/DV_p	ν	E MPa	G_0 MPa	r Ton/mc
3	819	292	2.8	0.36	0.43	438	153	1.8
6	985	396	2.5	0.40	0.40	792	282	1.8
9	751	523	1.4	0.70	0.03	1013	492	1.8
12	760	521	1.5	0.69	0.06	1147	543	2
15	904	540	1.7	0.60	0.22	1426	583	2
18	1347	772	1.7	0.57	0.26	2993	1192	2
21	2253	849	2.7	0.38	0.42	4291	1514	2.1
24	2978	1006	3.0	0.34	0.44	6102	2125	2.1
27	2555	1217	2.1	0.48	0.35	8418	3110	2.1
30	2780	1130	2.5	0.41	0.40	7514	2681	2.1

coefficiente di Poisson medio ν ; modulo elastico E iniziale; modulo di taglio G_0

Vseq (calcolato a 18 metri) = 464 m/s Categoria suolo B

STESA SISMICA BASE 1 Tabella 2

Profilo P/S B a progressiva a circa 190 metri inizio linea

Calcolo indicativo dei principali parametri dinamici

Profondità m	DV_p m/s	DV_s m/s	DV_p/DV_s	DV_s/DV_p	ν	E MPa	G_0 MPa	r Ton/mc
3	1024	234	4.4	0.23	0.47	290	99	1.8
6	965	385	2.5	0.40	0.41	750	267	1.8
9	899	553	1.6	0.62	0.20	1316	550	1.8
12	896	556	1.6	0.62	0.19	1468	618	2
15	956	667	1.4	0.70	0.03	1825	890	2
18	1074	716	1.5	0.67	0.10	2256	1025	2
21	1260	880	1.4	0.70	0.02	3330	1626	2.1
24	1482	1002	1.5	0.68	0.08	4550	2108	2.1
27	1660	1060	1.6	0.64	0.16	5454	2360	2.1
30	1718	1130	1.5	0.66	0.12	6000	2681	2.1

coefficiente di Poisson medio ν ; modulo elastico E iniziale; modulo di taglio G_0

Vseq (calcolato a 18 metri) = 448 m/s Categoria suolo B



STESA SISMICA BASE 1 Tabella 3 Profilo P/S B a progressiva a circa 270 metri inizio linea

Calcolo indicativo dei principali parametri dinamici

Profondità m	DV_p m/s	DV_s m/s	DV_p/DV_s	DV_s/DV_p	ν	E MPa	G_0 MPa	r Ton/mc
3	600	250	2.4	0.42	0.39	314	113	1.8
6	660	390	1.7	0.59	0.23	674	274	1.8
9	840	580	1.4	0.69	0.04	1265	606	1.8
12	1125	654	1.7	0.58	0.24	2130	855	2
15	1470	625	2.4	0.43	0.39	2171	781	2
18	1901	692	2.7	0.36	0.42	2727	958	2
21	2013	775	2.6	0.38	0.41	3564	1261	2.1
24	2118	900	2.4	0.42	0.39	4728	1701	2.1
27	2452	1165	2.1	0.48	0.35	7720	2850	2.1
30	2872	1395	2.1	0.49	0.35	10998	4087	2.1

coefficiente di Poisson medio ν ; modulo elastico E iniziale; modulo di taglio G_0

Vseq (calcolato a 21 metri) = 494 m/s Categoria suolo B

STESA SISMICA BASE 2 Tabella 1 Profilo P/S B a progressiva a circa 35 metri inizio linea

Calcolo indicativo dei principali parametri dinamici

Profondità m	DV_p m/s	DV_s m/s	DV_p/DV_s	DV_s/DV_p	ν	E MPa	G_0 MPa	r Ton/mc
3	1283	531	2.4	0.41	0.40	1418	508	1.8
6	1409	673	2.1	0.48	0.35	2205	815	1.8
9	1585	638	2.5	0.40	0.40	2056	733	1.8
12	1517	621	2.4	0.41	0.40	2159	771	2
15	1516	671	2.3	0.44	0.38	2482	900	2
18	1660	622	2.7	0.37	0.42	2195	774	2
21	1900	734	2.6	0.39	0.41	3196	1131	2.1
24	2050	854	2.4	0.42	0.40	4273	1532	2.1
27	2186	847	2.6	0.39	0.41	4254	1507	2.1
30	2253	847	2.7	0.38	0.42	4272	1507	2.1

coefficiente di Poisson medio ν ; modulo elastico E iniziale; modulo di taglio G_0

Vseq (calcolato a 21 metri) = 635 m/s Categoria suolo B



STESA SISMICA BASE 2 Tabella 2

Profilo P/S B a progressiva a circa 70 metri inizio linea

Calcolo indicativo dei principali parametri dinamici

Profondità m	DV_p m/s	DV_s m/s	DV_p/DV_s	DV_s/DV_p	ν	E MPa	G_0 MPa	r Ton/mc
3	1029	394	2.6	0.38	0.41	790	279	1.8
6	1547	545	2.8	0.35	0.43	1528	535	1.8
9	2096	642	3.3	0.31	0.45	2149	742	1.8
12	2214	672	3.3	0.30	0.45	2618	903	2
15	2245	652	3.4	0.29	0.45	2472	850	2
18	2448	659	3.7	0.27	0.46	2538	869	2
21	2364	584	4.0	0.25	0.47	2102	716	2.1
24	2049	527	3.9	0.26	0.46	1708	583	2.1
27	1877	590	3.2	0.31	0.45	2113	731	2.1
30	1773	560	3.2	0.32	0.44	1903	659	2.1

coefficiente di Poisson medio ν ; modulo elastico E iniziale; modulo di taglio G_0

V_{seq} (calcolato a 30 metri) = 569 m/s Categoria suolo B



3.2 RISULTATI PROVA DOWN HOLE

Sono state eseguite due prove down Hole in due fori di sondaggio la cui ubicazione e ben nota alla Committenza. I risultati sono evidenziati nelle tabelle e nei grafici sotto riportati:

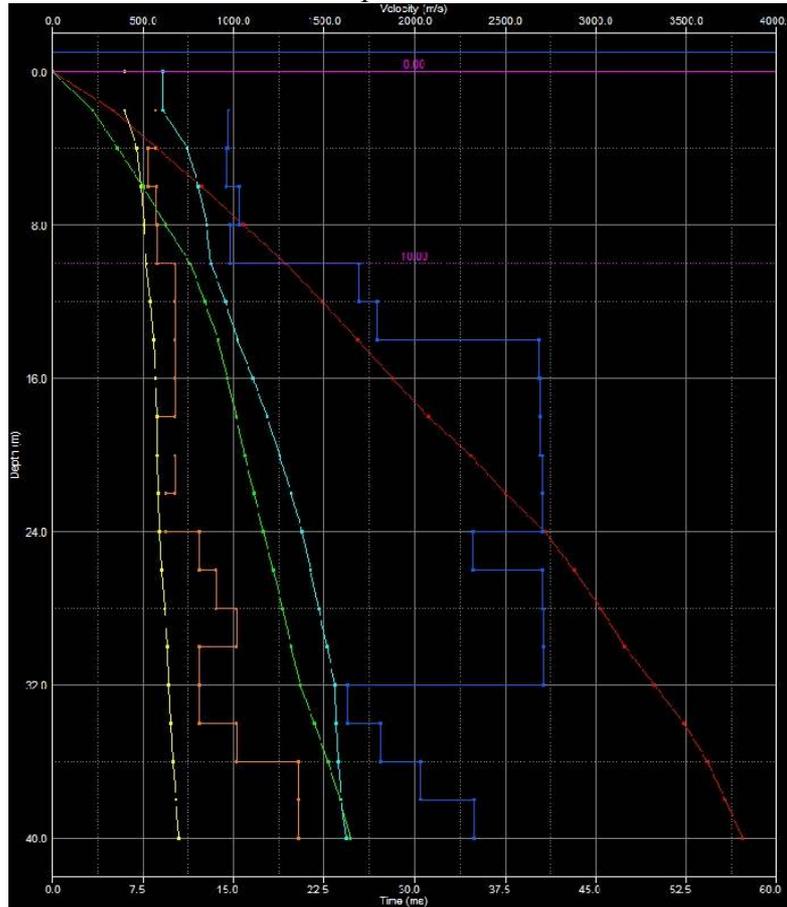
Valori tabulati prova DH1-S1 Distanza punto energizzazione dal foro 100 cm

<i>Profondità</i>	<i>Distanza tra ricevitore e testa foro in metri</i>
<i>Distanza</i>	<i>Distanza tra sorgente e testa foro in metri</i>
<i>Tp:</i>	<i>Tempi onde P in mS</i>
<i>Ts:</i>	<i>Tempi onde S in mS</i>
<i>TpV:</i>	<i>Tempi onde P corretti sulla verticale in mS</i>
<i>TsV:</i>	<i>Tempi onde S corretti sulla verticale in mS</i>
<i>Vp Intervallo:</i>	<i>Velocità Intervallo onde P in m/s</i>
<i>Vs Intervallo:</i>	<i>Velocità Intervallo onde S in m/s</i>
<i>Vp average:</i>	<i>Velocità media onde P in m/s</i>
<i>Vs Average:</i>	<i>Velocità media onde S in m/s</i>
<i>Ei:</i>	<i>Modulo di elasticità dinamica iniziale (Gpa)</i>
<i>Gi:</i>	<i>Modulo di taglio dinamico iniziale (Gpa)</i>
<i>r:</i>	<i>Densità Relativa (kN/m3)</i>
<i>Ki:</i>	<i>Modulo di compressibilità dinamica iniziale (Gpa)</i>

<i>Prof</i>	<i>Ts</i>	<i>TsV</i>	<i>Vs int</i>	<i>Vs m</i>	<i>Tp</i>	<i>TpV</i>	<i>Vp int</i>	<i>Vp m</i>	<i>v</i>	<i>Gi</i>	<i>Ei</i>	<i>Ki</i>
2	5.651	5.055	395.7	395.7	3.686	3.297	606.6	606.6	0.13	0.282	0.637	0.287
4	8.845	8.581	567.1	466.2	5.528	5.363	968	745.9	0.239	0.579	1.434	0.915
6	12.531	12.361	529.2	485.4	7.555	7.452	957.3	805.1	0.28	0.56	1.434	1.086
8	15.971	15.848	573.5	504.8	9.459	9.386	1034.3	852.3	0.278	0.658	1.681	1.262
10	19.41	19.314	577	517.8	11.486	11.429	978.9	875	0.234	0.733	1.808	1.132
12	22.359	22.282	673.8	538.6	12.654	12.61	1693.1	951.6	0.406	1.044	2.936	5.2
14	25.307	25.243	675.5	554.6	13.759	13.724	1795.7	1020.1	0.418	1.049	2.975	6.018
16	28.256	28.201	676.1	567.4	14.496	14.468	2689.1	1105.9	0.466	1.051	3.083	15.231
18	31.204	31.156	676.8	577.7	15.233	15.21	2696.2	1183.5	0.466	1.099	3.224	15.981
20	34.644	34.601	580.6	578	15.971	15.951	2697.1	1253.8	0.476	0.809	2.388	16.38
22	37.592	37.553	677.4	585.8	16.708	16.691	2703.8	1318.1	0.467	1.101	3.23	16.077
24	40.786	40.751	625.5	588.9	17.445	17.43	2706	1376.9	0.472	0.939	2.764	16.321
26	43.243	43.211	812.9	601.7	18.305	18.291	2321.3	1421.4	0.43	1.652	4.725	11.268
28	45.455	45.426	902.9	616.4	19.042	19.03	2708.6	1471.4	0.437	2.038	5.86	15.623
30	47.42	47.394	1016.4	633	19.779	19.768	2709.5	1517.6	0.418	2.583	7.326	14.909
32	49.877	49.853	813.3	641.9	20.516	20.506	2710.1	1560.5	0.451	1.72	4.99	16.803
34	52.334	52.311	813.4	650	21.744	21.735	1627.9	1564.3	0.334	1.72	4.589	4.596
36	54.3	54.279	1016.4	663.2	22.85	22.841	1807.4	1576.1	0.269	2.686	6.816	4.912
38	55.774	55.755	1355.4	681.6	23.833	23.825	2033.4	1595	0.1	4.776	10.51	4.382
40	57.248	57.23	1355.5	698.9	24.693	24.685	2324.1	1620.4	0.242	4.777	11.869	7.674



Grafico prova DH1-S1



In verde Tempi Vs
In rosso Tempi Vp
In arancione Vel Int Vs
In blu Vel Int Vp
In giallo Vel Medie Vs
In ciano Vel Medie Vp

Calcolo Vseq velocità intervallo:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

h_i spessore dell'i-esimo strato;
 $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
 N numero di strati;
 H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Profondità di riferimento: 24 metri - VSeq = 589 m/s
Categoria suolo B



Valori tabulati prova DH2-S2

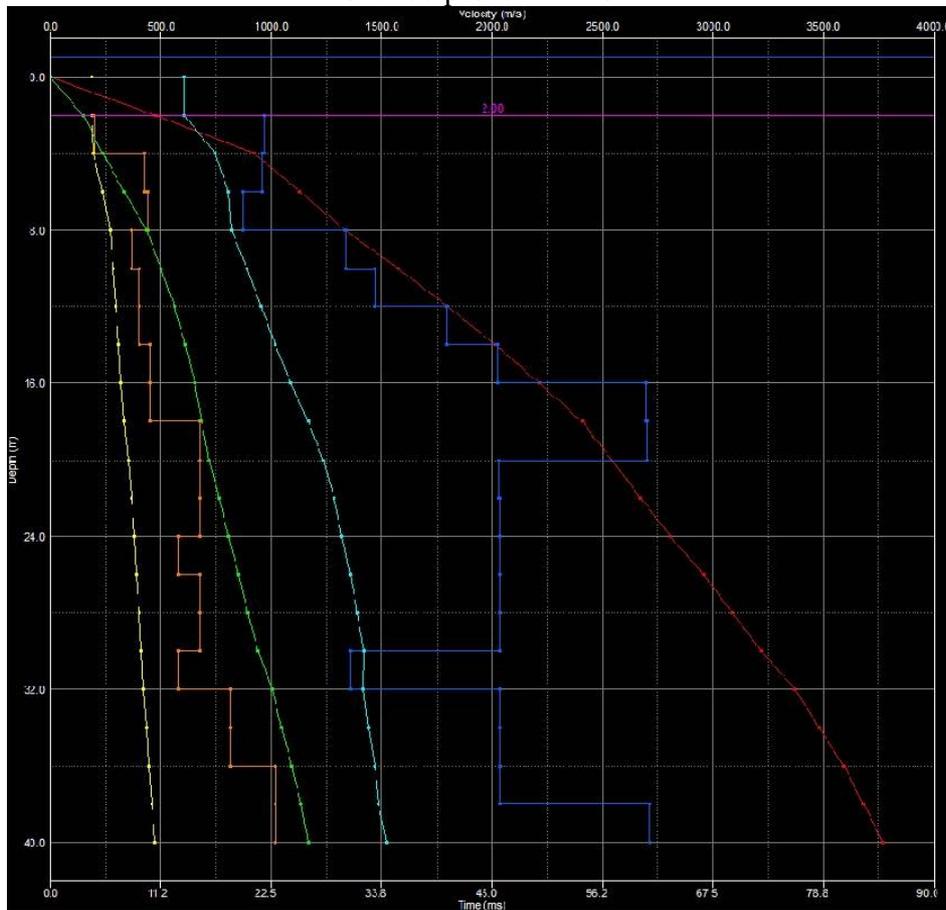
Distanza punto energizzazione dal foro 100 cm

<i>Profondità</i>	<i>Distanza tra ricevitore e testa foro in metri</i>
<i>Distanza</i>	<i>Distanza tra sorgente e testa foro in metri</i>
<i>Tp:</i>	<i>Tempi onde P in mS</i>
<i>Ts:</i>	<i>Tempi onde S in mS</i>
<i>TpV:</i>	<i>Tempi onde P corretti sulla verticale in mS</i>
<i>TsV:</i>	<i>Tempi onde S corretti sulla verticale in mS</i>
<i>Vp Intervallo:</i>	<i>Velocità Intervallo onde P in m/s</i>
<i>Vs Intervallo:</i>	<i>Velocità Intervallo onde S in m/s</i>
<i>Vp average:</i>	<i>Velocità media onde P in m/s</i>
<i>Vs Average:</i>	<i>Velocità media onde S in m/s</i>
<i>Ei:</i>	<i>Modulo di elasticità dinamica iniziale (Gpa)</i>
<i>Gi:</i>	<i>Modulo di taglio dinamico iniziale (Gpa)</i>
<i>r:</i>	<i>Densità Relativa (kN/m3)</i>
<i>Ki:</i>	<i>Modulo di compressibilità dinamica iniziale (Gpa)</i>

<i>Prof</i>	<i>Ts</i>	<i>TsV</i>	<i>Vs int</i>	<i>Vs m</i>	<i>Tp</i>	<i>TpV</i>	<i>Vp int</i>	<i>Vp m</i>	<i>v</i>	<i>Gi</i>	<i>Ei</i>	<i>Ki</i>
2	12.039	10.768	185.7	185.7	3.686	3.297	606.6	606.6	0.448	0.062	0.18	0.58
4	21.376	20.738	200.6	192.9	5.528	5.363	968	745.9	0.478	0.072	0.214	1.59
6	25.799	25.448	424.6	235.8	7.555	7.452	957.3	805.1	0.378	0.361	0.994	1.352
8	30.221	29.988	440.5	266.8	9.828	9.752	869.6	820.3	0.327	0.388	1.03	0.995
10	35.627	35.45	366.2	282.1	11.302	11.246	1338.9	889.2	0.46	0.295	0.861	3.55
12	40.541	40.401	404	297	12.654	12.61	1465.9	951.6	0.459	0.375	1.095	4.442
14	45.455	45.339	405	308.8	13.759	13.724	1795.7	1020.1	0.473	0.377	1.111	6.914
16	49.877	49.78	450.4	321.4	14.742	14.713	2021.7	1087.5	0.474	0.466	1.375	8.779
18	54.3	54.216	450.8	332	15.479	15.455	2695.9	1164.7	0.486	0.488	1.449	16.792
20	57.248	57.177	675.5	349.8	16.216	16.196	2700.5	1234.9	0.467	1.095	3.213	16.042
22	60.197	60.134	676.2	365.8	17.199	17.181	2029.4	1280.5	0.438	1.097	3.155	8.422
24	63.145	63.09	676.6	380.4	18.182	18.166	2030.5	1321.1	0.438	1.099	3.159	8.43
26	66.585	66.536	580.5	390.8	19.165	19.151	2031.3	1357.6	0.456	0.842	2.452	9.192
28	69.533	69.489	677.2	402.9	20.147	20.134	2033.9	1390.7	0.438	1.147	3.297	8.813
30	72.482	72.441	677.4	414.1	21.13	21.118	2032.3	1420.6	0.438	1.147	3.298	8.796
32	75.921	75.884	580.9	421.7	22.604	22.593	1356.2	1416.4	0.388	0.877	2.435	3.612
34	78.378	78.345	813	434	23.587	23.577	2032.9	1442.1	0.405	1.718	4.828	8.453
36	80.835	80.804	813.1	445.5	24.57	24.561	2033.1	1465.8	0.405	1.719	4.83	8.455
38	82.801	82.772	1016.2	459.1	25.553	25.544	2033.3	1487.6	0.334	2.685	7.161	7.169
40	84.767	84.74	1016.4	472	26.29	26.282	2711.4	1522	0.418	2.686	7.618	15.533



Grafico prova DH2-S2



In verde Tempi Vs
In rosso Tempi Vp
In arancione Vel Int Vs
In blu Vel Int Vp
In giallo Vel Medie Vs
In ciano Vel Medie Vp

Calcolo Vseq:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

- h_i spessore dell'i-esimo strato;
- $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell'i-esimo strato;
- N numero di strati;
- H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_s non inferiore a 800 m/s.

Profondità di riferimento: 30 m - VSeq = 414 m/s
Categoria suolo B



3.3 RISULTATI PROVE MASW

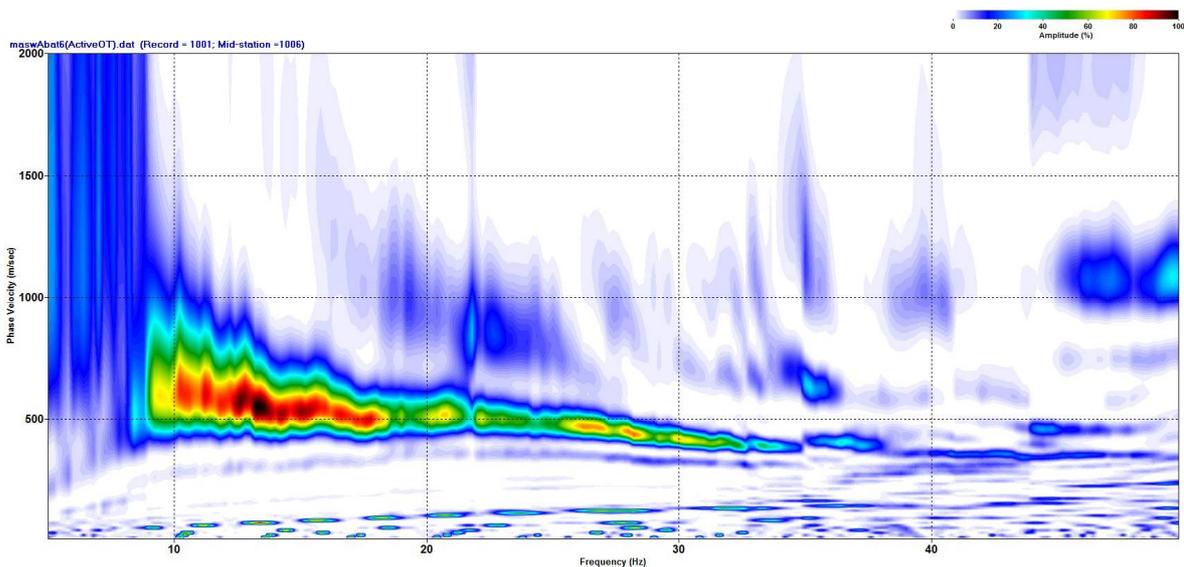
Sono state eseguite due prove masw indicate nell'immagine che riporta le ubicazioni delle indagini sismiche con le sigle **A-M** e **B-M**.

PROVA MASW A-M

La figura di seguito riportata mostra l'immagine di dispersione della sezione MASW acquisita in campagna, ossia lo spettro delle velocità di fase calcolato sull'insieme di tutte le tracce registrate dai geofoni posizionati lungo lo stendimento.

Sovrapposto alla medesima immagine è presente anche il **picking** dei diversi modi che sono stati identificati (curve di dispersione dei modi).

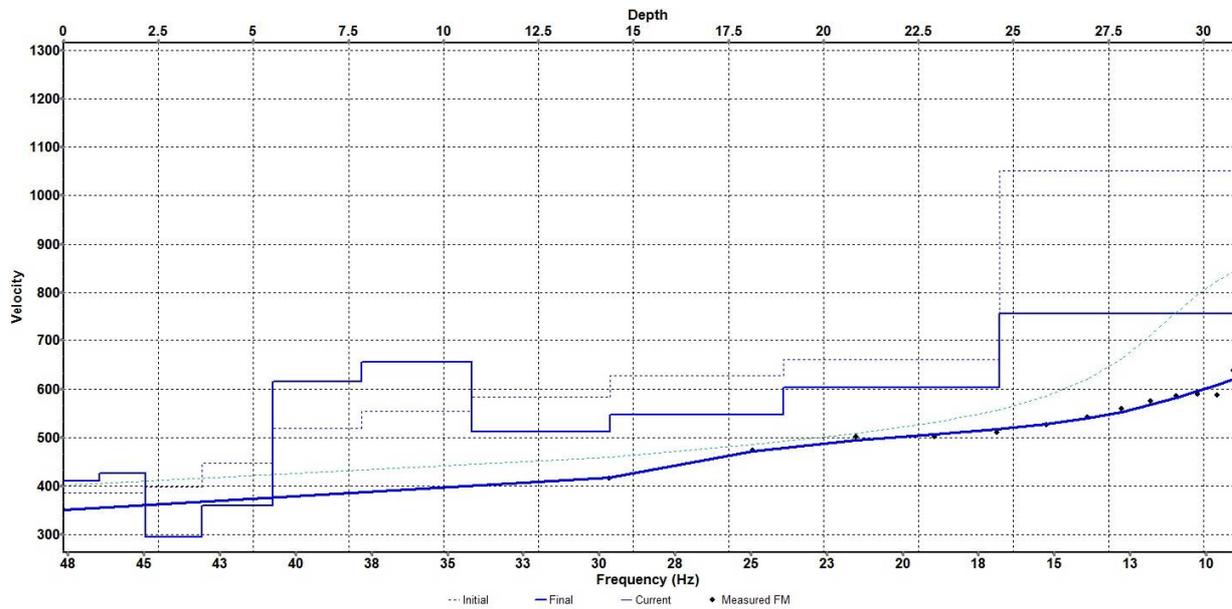
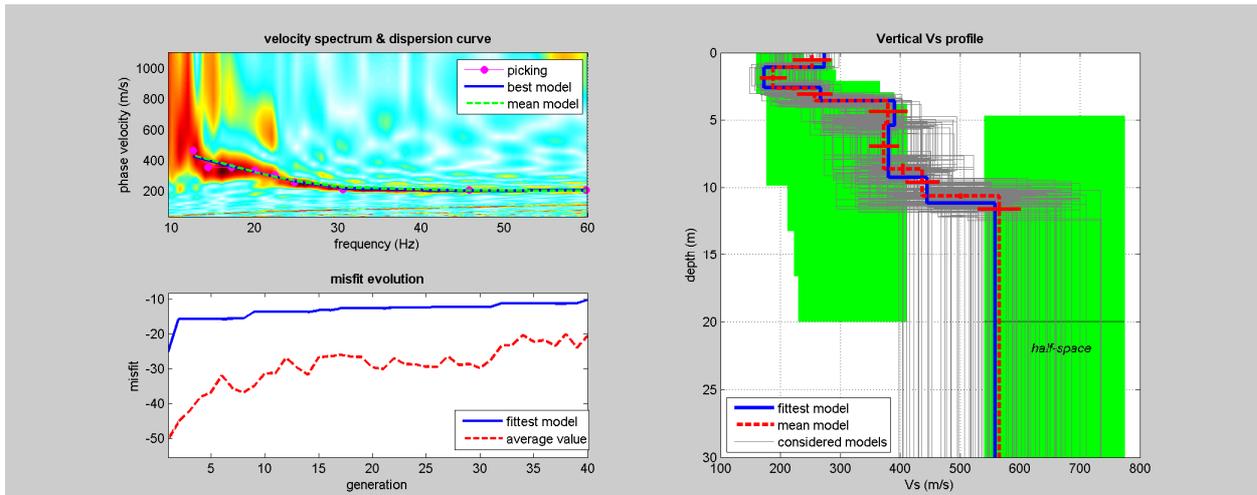
La modellazione diretta sulla base dello spettro di velocità e/o il processo di inversione di tali curve porta all'ottenimento della curva di dispersione **interpretata** e da questa al più probabile profilo verticale delle onde di taglio V_s , da cui si ricava infine il parametro $V_{s,eq}$ come richiesto dalla normativa.



Spettro delle velocità di fase e picking dei modi

E' sempre bene tenere in considerazione che differenti modelli di velocità delle onde di taglio possono portare al medesimo risultato del parametro $V_{s,eq}$; ciò significa che senza un'adeguata disponibilità di dati stratigrafici attendibili il parametro di legge calcolato risulta significativo, mentre l'esatta distribuzione delle velocità in funzione della profondità è da considerarsi in qualche modo indicativa.

Si mostra, nella figura che segue, la convergenza del '**Misfit**' verso un valore minimo, al progredire del calcolo di inversione:



*Andamento del **Misfit** durante il processo di inversione delle curve di picking e risultati finali*

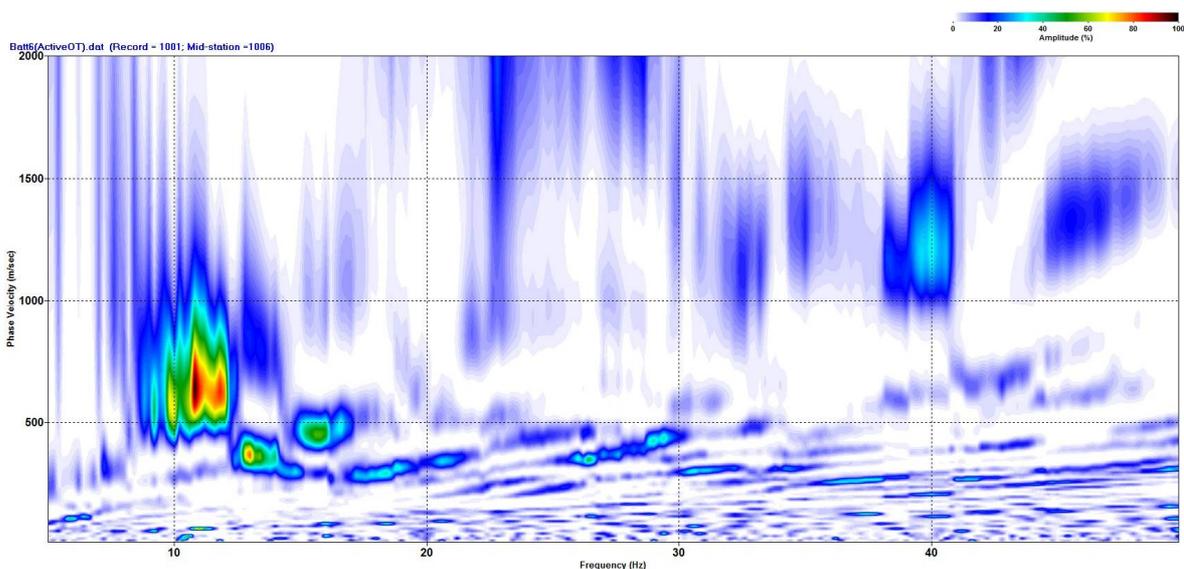


PROVA MASW B-M

La figura di seguito riportata mostra l'immagine di dispersione della sezione MASW acquisita in campagna, ossia lo spettro delle velocità di fase calcolato sull'insieme di tutte le tracce registrate dai geofoni posizionati lungo lo stendimento.

Sovrapposto alla medesima immagine è presente anche il **picking** dei diversi modi che sono stati identificati (curve di dispersione dei modi).

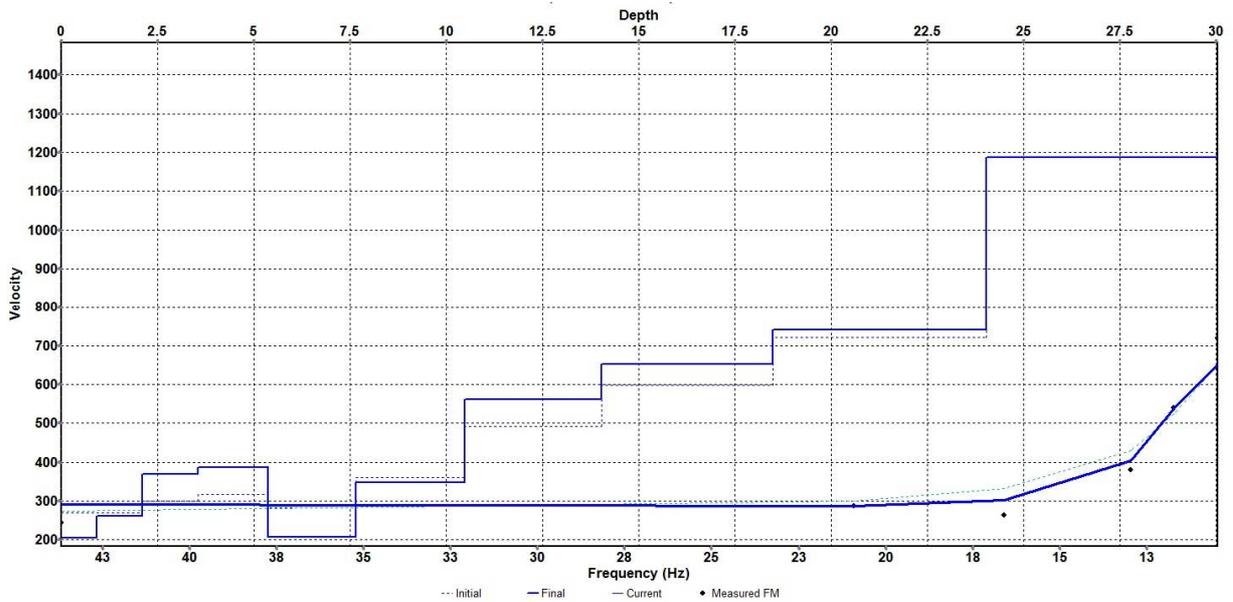
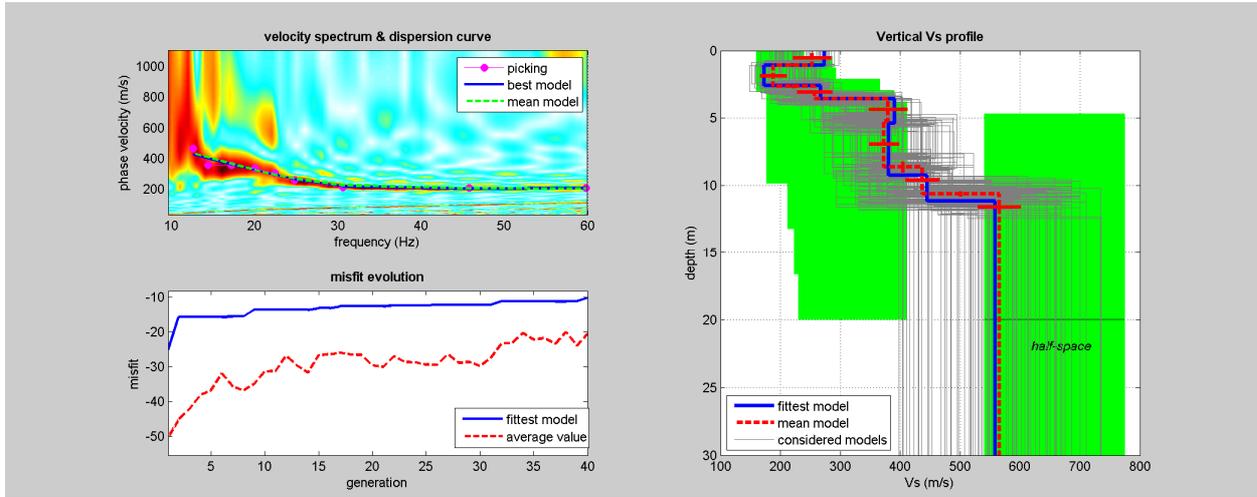
La modellazione diretta sulla base dello spettro di velocità e/o il processo di inversione di tali curve porta all'ottenimento della curva di dispersione **interpretata** e da questa al più probabile profilo verticale delle onde di taglio V_s , da cui si ricava infine il parametro $V_{s,eq}$ come richiesto dalla normativa.



Spettro delle velocità di fase e picking dei modi

E' sempre bene tenere in considerazione che differenti modelli di velocità delle onde di taglio possono portare al medesimo risultato del parametro $V_{s,eq}$; ciò significa che senza un'adeguata disponibilità di dati stratigrafici attendibili il parametro di legge calcolato risulta significativo, mentre l'esatta distribuzione delle velocità in funzione della profondità è da considerarsi in qualche modo indicativa.

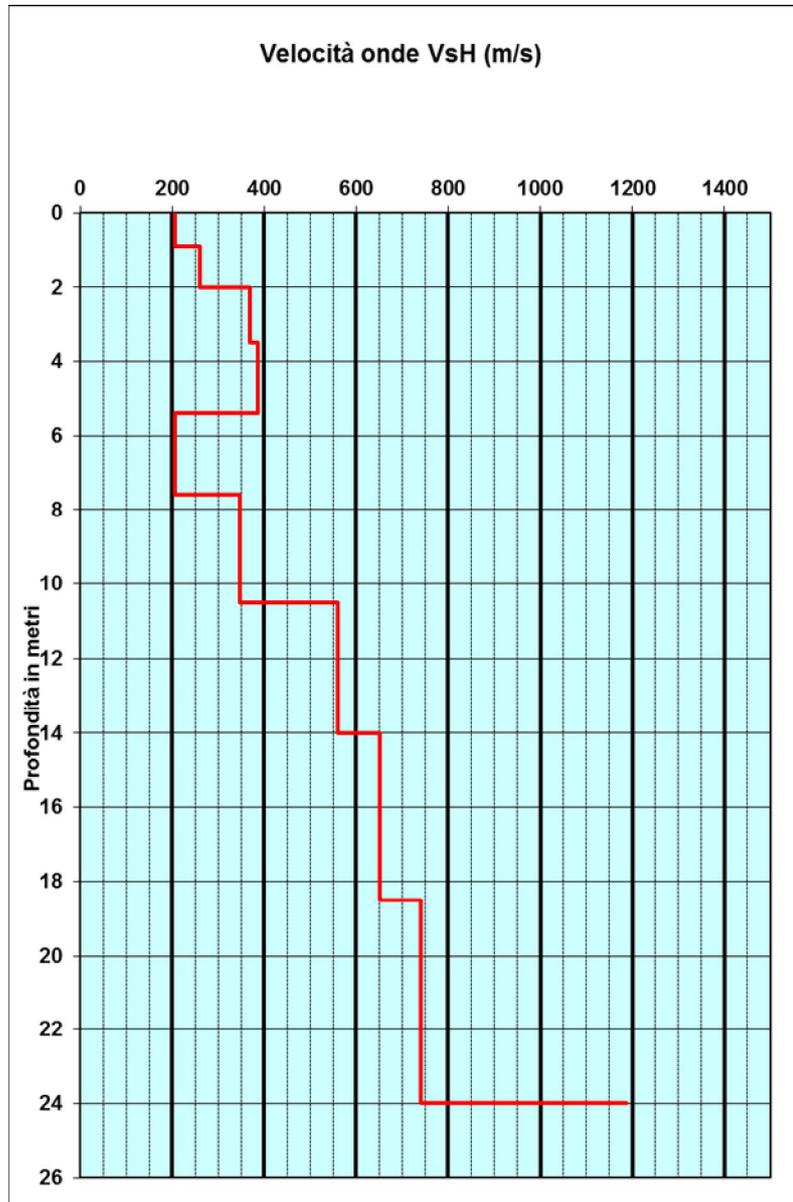
Si mostra, nella figura che segue, la convergenza del '**Misfit**' verso un valore minimo, al progredire del calcolo di inversione:



Andamento del Misfit durante il processo di inversione delle curve di picking e risultati finali



Nel grafico successivo viene presentato il profilo delle velocità di taglio V_s in funzione della profondità. Esso è prodotto al termine del calcolo di inversione delle curve di picking. Il calcolo viene effettuato sfruttando un algoritmo genetico.



Prova MASW - valore di V_{s30} .

V_s equivalente pari a a 420 m/s

Categorie di sottosuolo NTC/2018

Categoria B



3.4 RISULTATI PROVE HVSR

Sono state eseguite sei prove Hvsr indicate, nell'immagine che riporta le ubicazioni delle indagini sismiche, con un quadrato blu riportante, nel suo interno, il numero progressivo corrispondente .

HVSR1

Dataset: 00000003.sg2

DATA PROCESSING

Date: 29 12 2020

Time: 12 32

Sampling frequency (Hz): 250

Window length (sec): 20

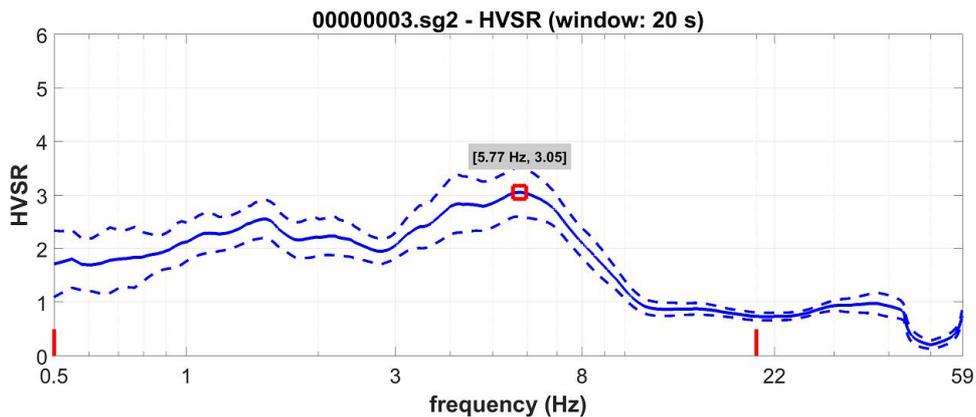
HVSR computation: quadratic mean

Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz

Length of analysed dataset (min): 20.0

Tapering (%): 5

Smoothing (%): 15



SESAME criteria

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 5.8 (±2.2)

Peak HVSR value: 3.1 (±0.5)

==== Criteria for a reliable H/V curve =====

#1. [$f_0 > 10/Lw$]: $5.769 > 0.5$ (OK)

#2. [$n_c > 200$]: $12577 > 200$ (OK)

#3. [$f_0 > 0.5\text{Hz}$; $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$] (OK)

==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

#1. [exists f^- in the range $[f_0/4, f_0]$ | $AH/V(f^-) < A_0/2$]: yes (considering standard deviations), at frequency 1.8Hz (OK)

#2. [exists f^+ in the range $[f_0, 4f_0]$ | $AH/V(f^+) < A_0/2$]: yes, at frequency 9.4Hz (OK)

#3. [$A_0 > 2$]: $3.1 > 2$ (OK)

#4. [$f_{peak}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$]: (NO)

#5. [$\sigma_{Af} < \epsilon(f_0)$]: $2.221 > 0.288$ (NO)

#6. [$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$]: $0.893 < 1.58$ (OK)

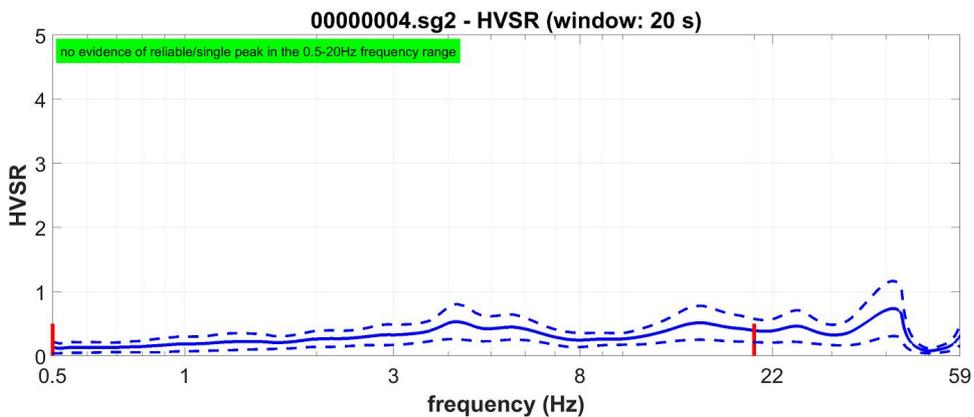


HVSR2

Dataset: 00000004.sg2

DATA PROCESSING

Sampling frequency (Hz): 250
 Window length (sec): 20
 HVSR computation: quadratic mean
 Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz
 Length of analysed dataset (min): 20.0
 Tapering (%): 5
 Smoothing (%): 15



SESAME criteria

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 4.2 (±5.7)

Peak HVSR value: 0.5 (±0.3)

==== Criteria for a reliable H/V curve =====

- #1. [f0 > 10/Lw]: 4.182 > 0.5 (OK)
- #2. [nc > 200]: 9786 > 200 (OK)
- #3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0] (OK)

==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

- #1. [exists f- in the range [f0/4, f0] | AH/V(f-) < A0/2]: yes, at frequency 1.1Hz (OK)
- #2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] | AH/V(f+) < A0/2]: yes, at frequency 7.4Hz (OK)
- #3. [A0 > 2]: 0.5 < 2 (NO)
- #4. [fpeak[Ah/v(f) ± sigmaA(f)] = f0 ± 5%]: (NO)
- #5. [sigmaAf < epsilon(f0)]: 5.657 > 0.209 (NO)
- #6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 0.357 < 1.58 (OK)

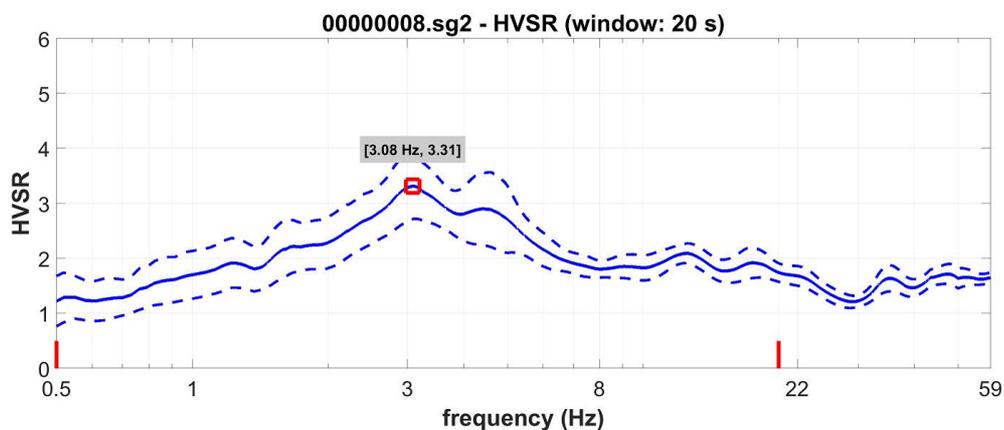


HVSR3

Dataset: 00000008.sg2

DATA PROCESSING

Sampling frequency (Hz): 250
Window length (sec): 20
HVSR computation: quadratic mean
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz
Length of analysed dataset (min): 20.0
Tapering (%): 5
Smoothing (%): 15



SESAME criteria

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 3.1 (±2.5)

Peak HVSR value: 3.3 (±0.6)

==== Criteria for a reliable H/V curve =====

- #1. [$f_0 > 10/Lw$]: $3.083 > 0.5$ (OK)
- #2. [$nc > 200$]: $6598 > 200$ (OK)
- #3. [$f_0 > 0.5\text{Hz}$; $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$] (OK)

==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

- #1. [exists f_- in the range [$f_0/4$, f_0] | $AH/V(f_-) < A_0/2$]: yes, at frequency 0.8Hz (OK)
- #2. [exists f_+ in the range [f_0 , $4f_0$] | $AH/V(f_+) < A_0/2$]: yes (considering standard deviations), at frequency Hz (OK)
- #3. [$A_0 > 2$]: $3.3 > 2$ (OK)
- #4. [$f_{\text{peak}}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$]: (NO)
- #5. [$\sigma_{\text{maf}} < \epsilon(f_0)$]: $2.476 > 0.154$ (NO)
- #6. [$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$]: $0.988 < 1.58$ (OK)

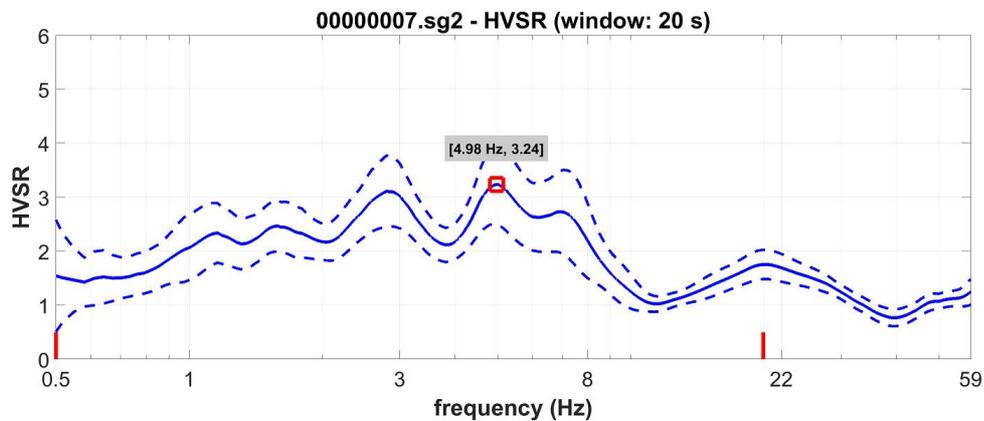


HVSR 4

Dataset: 00000007.sg2

DATA PROCESSING

Sampling frequency (Hz): 250
Window length (sec): 20
HVSR computation: quadratic mean
Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz
Length of analysed dataset (min): 20.0
Tapering (%): 5
Smoothing (%): 15



SESAME criteria

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 5.0 (±3.6)

Peak HVSR value: 3.2 (±0.8)

==== Criteria for a reliable H/V curve =====

- #1. [$f_0 > 10/Lw$]: $4.976 > 0.5$ (OK)
- #2. [$nc > 200$]: $10449 > 200$ (OK)
- #3. [$f_0 > 0.5\text{Hz}$; $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$] (OK)

==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

- #1. [exists f^- in the range [$f_0/4, f_0$] | $AH/V(f^-) < A_0/2$]: yes (considering standard deviations), at frequency 1.3Hz (OK)
- #2. [exists f^+ in the range [$f_0, 4f_0$] | $AH/V(f^+) < A_0/2$]: yes, at frequency 9.0Hz (OK)
- #3. [$A_0 > 2$]: $3.2 > 2$ (OK)
- #4. [$f_{\text{peak}}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$]: (NO)
- #5. [$\sigma_{\text{maf}} < \epsilon(f_0)$]: $3.564 > 0.249$ (NO)
- #6. [$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$]: $1.107 < 1.58$ (OK)

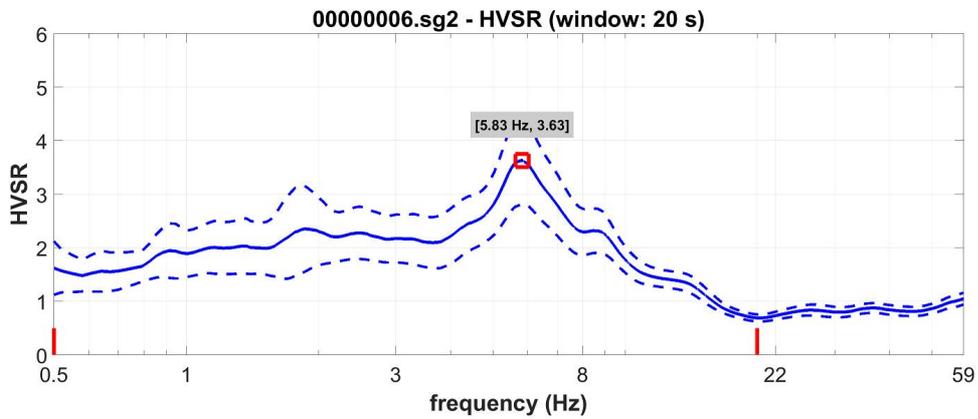


HVSR 5

Dataset: 00000006.sg2

DATA PROCESSING

Sampling frequency (Hz): 250
 Window length (sec): 20
 HVSR computation: quadratic mean
 Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz
 Length of analysed dataset (min): 20.0
 Tapering (%): 5
 Smoothing (%): 15



SESAME criteria

In the following results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range
 Peak frequency (Hz): 5.8 (a2.2)
 Peak HVSR value: 3.6 (a0.8)

=== Criteria for a reliable H/V curve =====

- #1. [f0 > 10/Lw]: 5.830 > 0.5 (OK)
- #2. [nc > 200]: 13176 > 200 (OK)
- #3. [f0 > 0.5Hz; sigmaA(f) < 2 for 0.5f0 < f < 2f0] (OK)

=== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

- #1. [exists f- in the range [f0/4, f0] | AH/V(f-) < A0/2]: yes (considering standard deviations), at frequency 1.5Hz (OK)
- #2. [exists f+ in the range [f0, 4f0] | AH/V(f+) < A0/2]: yes, at frequency 10.0Hz (OK)
- #3. [A0 > 2]: 3.6 > 2 (OK)
- #4. [fpeak[Ah/v(f) a sigmaA(f)] = f0 a 5%]: (OK)
- #5. [sigmaf < epsilon(f0)]: 2.229 > 0.292 (NO)
- #6. [sigmaA(f0) < theta(f0)]: 1.487 < 1.58 (OK)



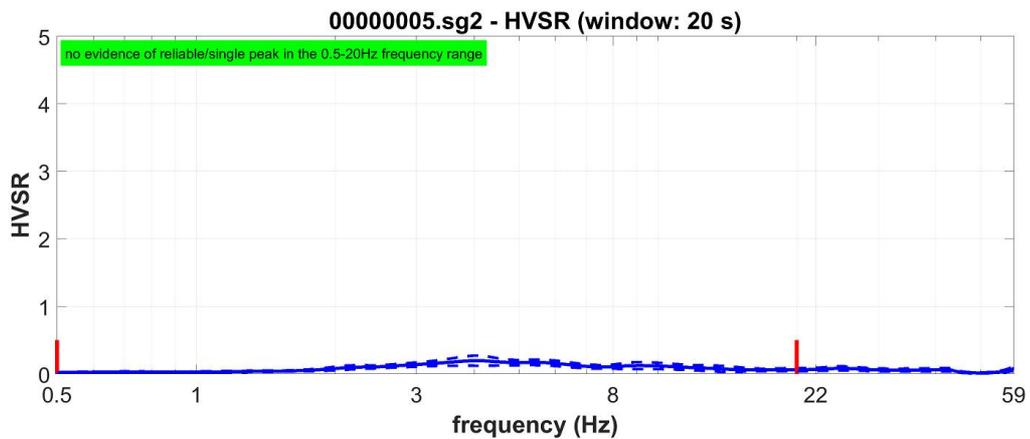
HVSR 6

Dataset: 00000005.sg2

DATA ACQUISITION

Sampling frequency (Hz): 250
Window length (sec): 20
HVSR computation: quadratic mean

Minimum frequency soundly determined [10 cycles]: 0.5Hz
Length of analysed dataset (min): 20.0
Tapering (%): 5
Smoothing (%): 15



SESAME criteria

In the following the results considering the data in the 0.5-20.0Hz frequency range

Peak frequency (Hz): 4.0 (±1.5)

Peak HVSR value: 0.2 (±0.1)

==== Criteria for a reliable H/V curve =====

- #1. [$f_0 > 10/Lw$]: $4.029 > 0.5$ (OK)
- #2. [$nc > 200$]: $9429 > 200$ (OK)
- #3. [$f_0 > 0.5\text{Hz}$; $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$] (OK)

==== Criteria for a clear H/V peak (at least 5 should be fulfilled) =====

- #1. [exists f_- in the range [$f_0/4, f_0$] | $AH/V(f_-) < A_0/2$]: yes, at frequency 1.0Hz (OK)
- #2. [exists f_+ in the range [$f_0, 4f_0$] | $AH/V(f_+) < A_0/2$]: yes, at frequency 11.5Hz (OK)
- #3. [$A_0 > 2$]: $0.2 < 2$ (NO)
- #4. [$f_{\text{peak}}[Ah/v(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$]: (NO)
- #5. [$\sigma_{\text{maf}} < \epsilon(f_0)$]: $1.538 > 0.201$ (NO)
- #6. [$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$]: $0.109 < 1.58$ (OK)



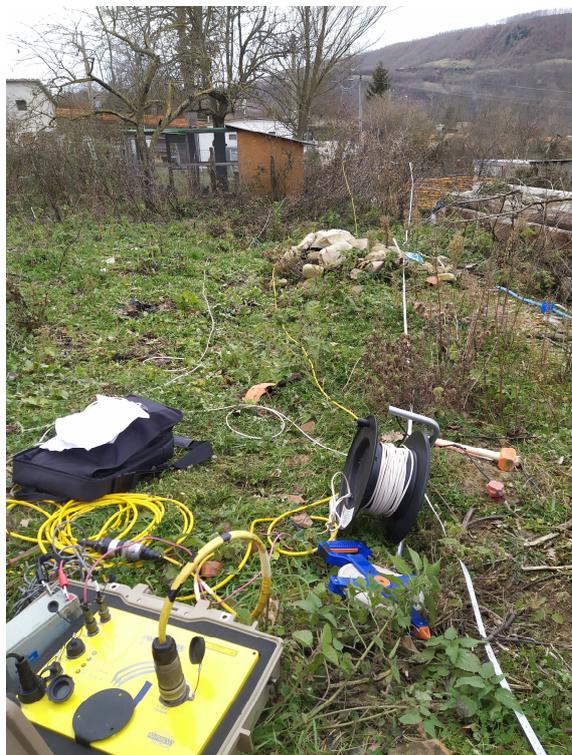
3.5 REPORT FOTOGRAFICO



*Stazione misura stesa sismica a rifrazione
Tratto A-R*



Prova Down Hole S1



Stazione di misura prova sismica Masw B-M



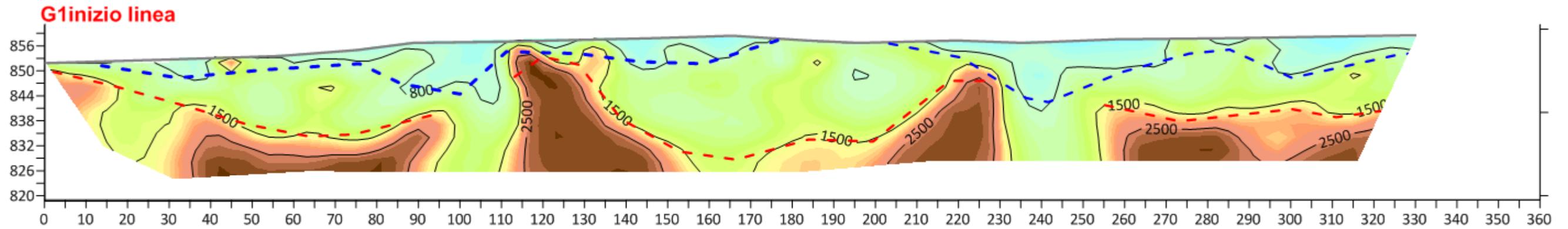
Prova sismica Hvsr 1



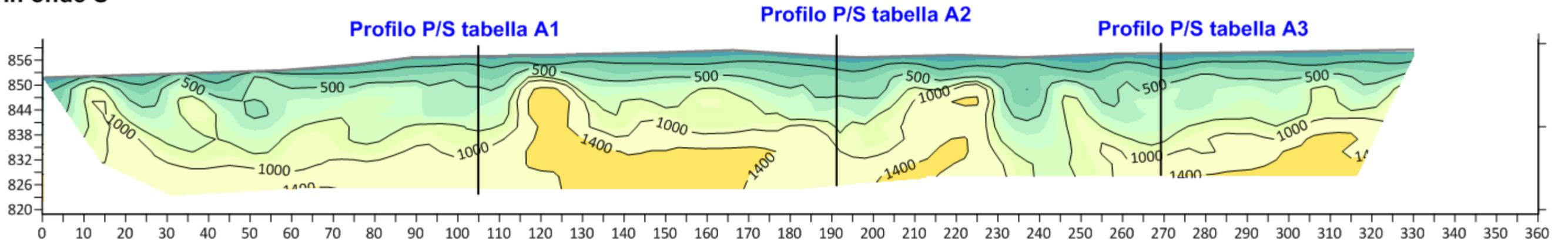
STUDIO TECNICO GEOM. UGO CELOTTI s.r.l. - VIA MINCIO, 22 - C.A.P. 20139 MILANO
CAPITALE SOCIALE EURO 100.000,00 I.V.
C.C.I.A.A. REG. DELLE IMPRESE DI MILANO - COD.FISC.-PART.IVA 05092310969 - SOA 3405AL/57/01

Allegati grafici esplicativi 1a e 1b – Sezioni sismiche onde P e S

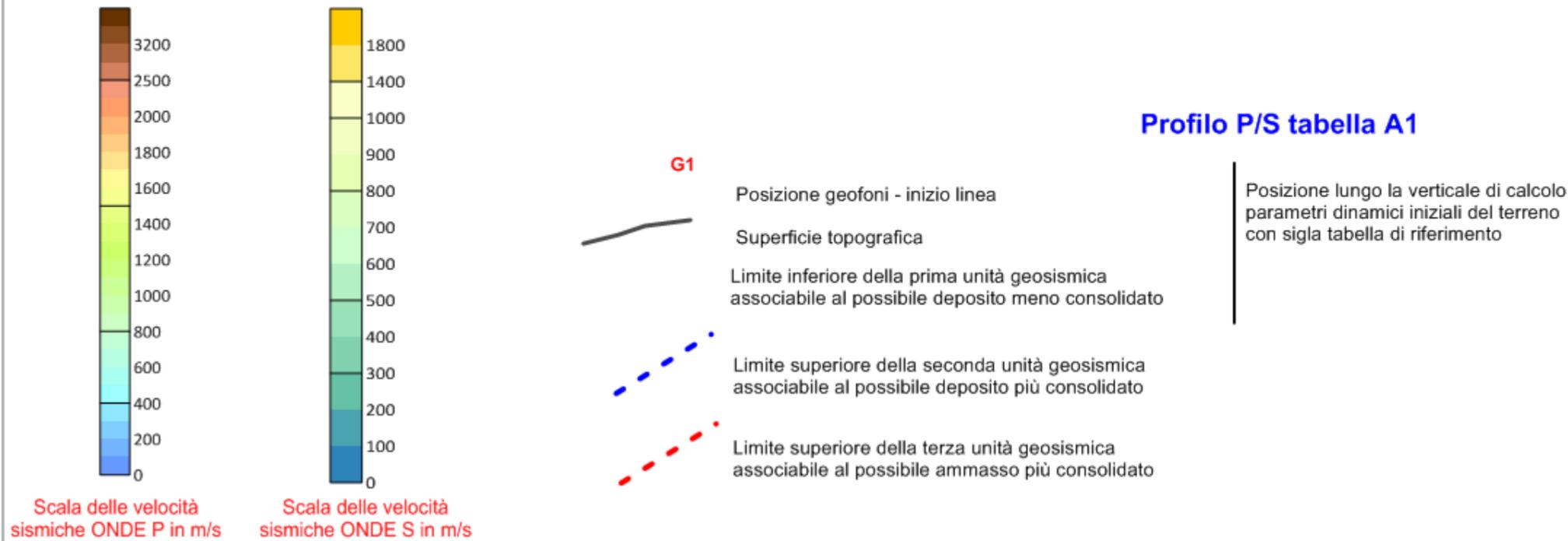
Elaborazione tomografica in onde P



Elaborazione tomografica in onde S



LEGENDA



INDAGINE GEOFISICA

Ricostruzione stratigrafica e valutazione parametri dinamici

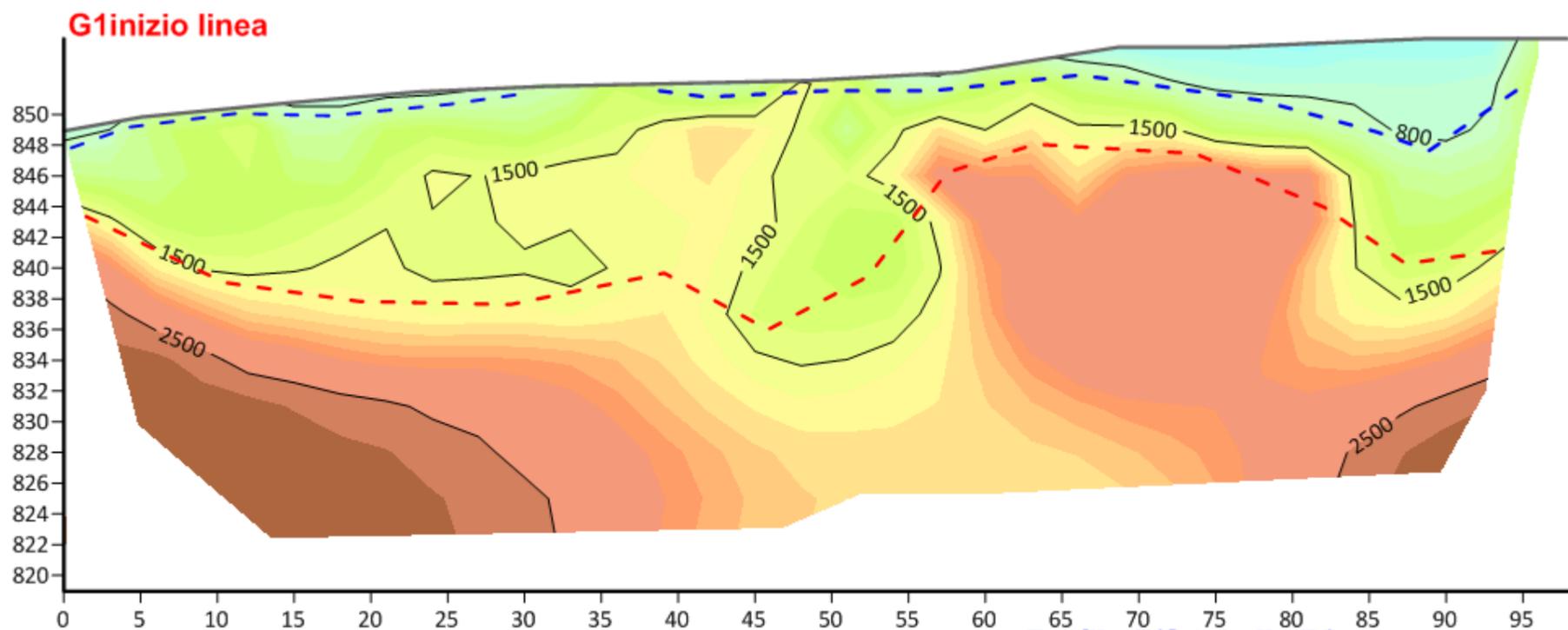
**Comune di Amatrice (Ri)
Frazione Saletta**

**Sezione sismica A-R
tratto 1-2-3**

All.1a

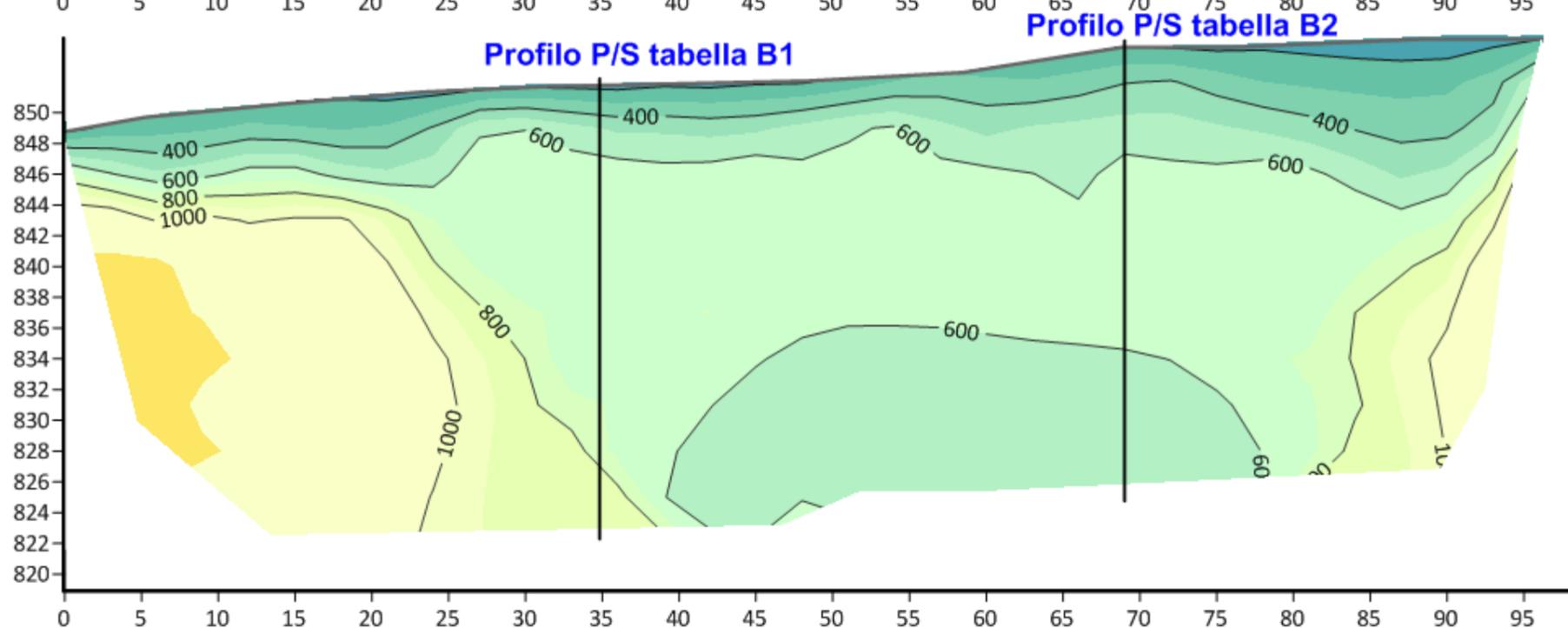
Gennaio 2021

Elaborazione tomografica in onde P



Scala delle velocità sismiche ONDE P in m/s

Elaborazione tomografica in onde S



Scala delle velocità sismiche ONDE S in m/s

LEGENDA

- G1** Posizione geofoni - inizio linea
- Superficie topografica
- Limite inferiore della prima unità geosismica associabile al possibile deposito meno consolidato
- Limite superiore della seconda unità geosismica associabile al possibile deposito più consolidato
- Limite superiore della terza unità geosismica associabile al possibile ammasso più consolidato

Profilo P/S tabella B1

Posizione lungo la verticale di calcolo parametri dinamici iniziali del terreno con sigla tabella di riferimento

INDAGINE GEOFISICA

Ricostruzione stratigrafica e valutazione parametri dinamici

**Comune di Amatrice (Ri)
Frazione Saletta**

Sezione sismica B-R

All.1b

Gennaio 2021