



Regione Toscana



Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n. 77

MICROZONAZIONE SISMICA

Relazione indagini geofisiche

Regione Toscana
Comune di Rufina (FI)



<p>Regione</p> <p>Regione Toscana - Settore Sismica</p>	<p>Soggetto realizzatore:</p> <p>Comune di Rufina / Servizio Assetto del Territorio/RUP Dott.</p> <p>Professionisti incaricati:</p> <p>Dott. Geol. Eros Aiello Dott. Geol. Gabriele Grandini Dott. Geol. Cristian Pieroni Dott. Geol. Francesco Puccetti</p> <p>GEOECO PROGETTI</p> <p><small>Via Andrea del Castagno, 8 - 50132 Firenze tel.055/11393, 055/17924, fax.055/622329 E: info@ggeocoprogetti.com</small></p>	<p>Data</p> <p>Aprile 2021</p>
---------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------

SDH Contea



0 - 5m



5m - 10m



10m - 15m



15m - 20m



20m - 25m



25m - 30m

INDICE RELAZIONE

1 – PREMESSA	3
1.1 UBICAZIONE AREA DI STUDIO	3
1.2 INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE	3
1.3 STRUTTURA DELLA RELAZIONE	3
2 – LE ONDE DI SUPERFICIE	4
2.1 DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE	4
2.2 CENNI TEORICI	5
2.3 PROPRIETA' RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI	8
3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE	10
3.1 PROCEDURE DI CAMPAGNA	10
3.2 METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE	11
4 – INDAGINE SISMICA MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves)	13
4.1 ACQUISIZIONE DEI DATI MASW	15
4.1.1 PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI	16
4.1.2 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	19
4.1.3 ESECUZIONE INDAGINE MASW	19
4.2 ELABORAZIONE (PROCESSING) ED INVERSIONE DEI DATI MASW	21
5 – INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio)	25
5.1 ACQUISIZIONE DEI DATI DI RUMORE A STAZIONE SINGOLA	26
5.2 ANALISI DEI DATI	27
5.3 IL PROGETTO SESAME	27
5.3.1 CRITERI DI AFFIDABILITA' DEL PICCO	27
5.3.2 CRITERI DI CHIAREZZA DEL PICCO	29
5.3.3 INFORMAZIONI AGGIUNTIVE AI CRITERI SESAME	30
5.4 VALUTAZIONE DELLA QUALITA' DELLE MISURE HVSR	32
5.5 CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA	34
6 – INDAGINE SISMICA DOWN – HOLE	36
5.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE	36
5.2 METODO INTERVALLO	37
8 – BIBLIOGRAFIA	38

ALLEGATI

- ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE DOWN – HOLE
- ALLEGATO GRAFICO: COLONNA STRATIGRAFICA DEL SONDAGGIO
- ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI

1 – PREMESSA

Il presente documento riguarda la descrizione, l'elaborazione e i risultati delle indagini geofisiche, di tipo sismico attivo-passivo, condotte a supporto degli studi di microzonazione sismica di livello 3 del Comune di Rufina (FI).

Lo studio di microzonazione sismica (MS) di livello 3 rappresenta un il livello di maggior dettaglio tra gli studi di MS e consiste in un approfondimento di indagini al fine di determinare il l'amplificazione di ciascuna area individuata nello studio mediante risposta sismica locale RSL2D.

Tale approfondimento quindi ha come intento quello di perseguire gli studi pregressi effettuati ed assicurare la riduzione del rischio sismico, evidenziando le criticità ed indagando le aree per le quali sono stati richiesti studi di approfondimento (MS3).

1.1 – UBICAZIONE AREA DI STUDIO

Le indagini geofisiche integrate, sono state eseguite all'interno del territorio del Comune di Rufina sia in aree urbane sia in aree limitrofe per meglio correlare ed interpretare i dati ottenuti.

Per la visualizzazione dell'ubicazione di ciascuna indagine geofisica svolta si rimanda alla cartografia tematica realizzata.

1.2 – INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE

La caratterizzazione dal punto vista sismico del terreno è stata condotta mediante la realizzazione delle seguenti tipologie di prove geofisiche sia attive che passive:

n. 3 indagini sismiche attive P/SH, per la determinazione dei profili sismostratigrafici;

n. 1 indagine sismica attiva MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la determinazione dei profili di velocità V_s nel sottosuolo;

n. 1 indagine sismica attiva congiunta MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves), per la determinazione dei profili di velocità V_s nel sottosuolo;

n. 15 indagini sismiche passive HVSR per determinare la frequenza di risonanza di sito.

n. 1 indagine sismica attiva Down-Hole per la determinazione dei profili di velocità V_p e V_s nel sottosuolo svolte all'interno dei fori di sondaggio;

1.3 – STRUTTURA DELLA RELAZIONE

La presente relazione descriverà i metodi di indagine utilizzati, illustrerà la metodologia di acquisizione, la strumentazione utilizzata, le tecniche e modalità di inversione/interpretazione, e verranno mostrati, in allegato, i risultati ottenuti con la campagna di prospezione geofisica sismica ed elettrica integrata, a supporto della caratterizzazione sismica del sottosuolo relativamente alle diverse aree di indagine.

Verranno quindi in un primo momento illustrate e descritte le varie tecniche di acquisizione dei dati geofisiche, successivamente verranno riportate le modalità di elaborazione dei dati ed infine mostrati i risultati ottenuti.

2 – LE ONDE DI SUPERFICIE

2.1 – DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE

Le onde superficiali si generano ogni qual volta esiste una superficie libera.

Vengono a crearsi quindi a causa dell'interazione delle onde di corpo con una superficie di discontinuità fisica, la più studiata delle quali è la superficie libera della Terra.

Queste onde si propagano solo lungo la superficie o nell'interfaccia tra due strati con proprietà fisiche diverse.

La velocità delle onde di superficie è inferiore alla velocità delle onde di volume, per cui il loro arrivo è successivo all'arrivo delle Onde P ed S.

Esistono due tipi di onde di superficie, chiamate coi nomi dei due fisici che per primi le studiarono: Onde di Rayleigh e Onde di Love.

- Onde di Rayleigh

Quando un'onda S (componente SV) assieme ad un'onda P incide sulla superficie libera dalla componente vettoriale delle due si generano onde superficiali che si propagano lungo la superficie stessa.

Queste onde esistono sia in semispazi omogenei (in questo caso la loro velocità è circa 0,92 volte la velocità delle onde S) che disomogenei (in cui risulta essere un'onda dispersa, ossia la sua velocità è anche funzione della sua frequenza).

Il loro moto è vincolato in uno spazio verticale contenente la direzione di propagazione dell'onda.

Si dimostra che una particella investita da questo tipo di onda vicina alla superficie, percorre un moto ellittico retrogrado lungo la direzione di propagazione (Fig. 1).

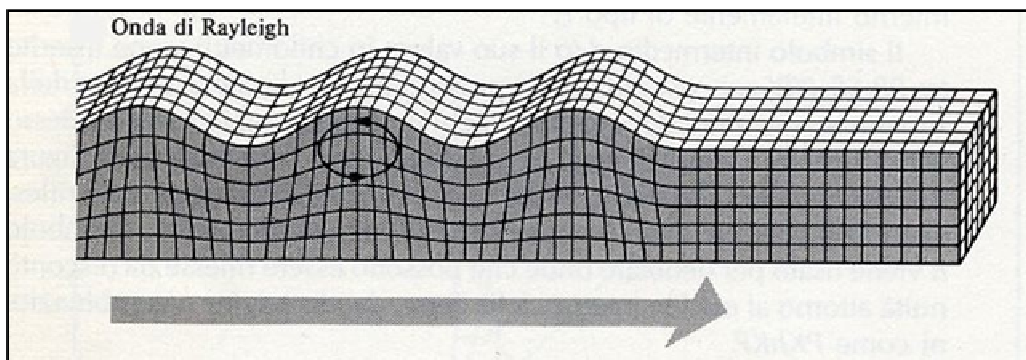


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine www.ingv.it)

- Onde di Love

Le onde di Love sono onde superficiali, anch'esse generate dall'incontro delle Onde S (componente SH) con la superficie libera del terreno, ma vengono generate solo nei mezzi in cui la velocità delle Onde S aumenta con la profondità (un mezzo quindi disomogeneo) di conseguenza sono onde sempre disperse.

Le Onde di Love fanno vibrare il terreno sul piano orizzontale in direzione ortogonale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda (Fig. 2).

La velocità delle onde di Love è maggiore di quella delle onde S negli strati più superficiali della crosta, ma minore della stessa negli strati più bassi.

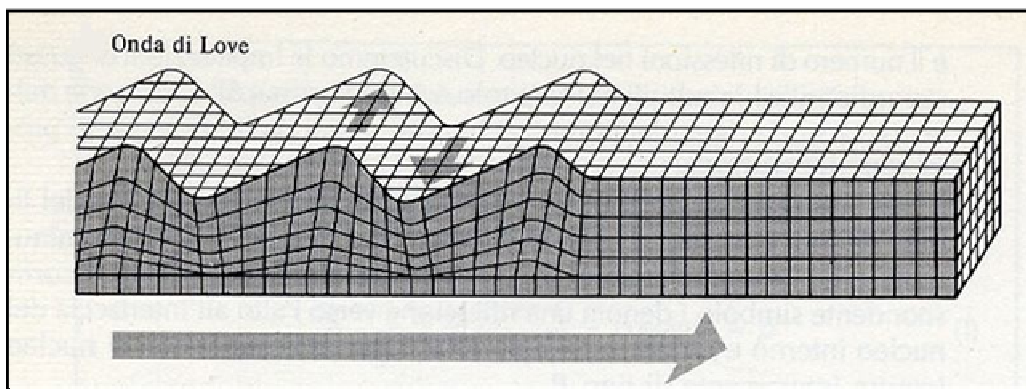


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine www.ingv.it)

2.2 – CENNI TEORICI

Nella maggior parte delle indagini sismiche di superficie, quando viene utilizzata una sorgente di onde di compressione, oltre due terzi del totale di energia sismica complessivamente generata è trasmessa mediante onde di Rayleigh.

Se consideriamo la variazione di velocità verticale in mezzi eterogenei noteremo che le onde di Rayleigh hanno un comportamento dispersivo, vale a dire che la velocità di gruppo non coincide con la velocità di fase di ciascuna frequenza.

Detto questo all'aumentare della lunghezza d'onda λ aumenta la profondità della parte interessata dalla perturbazione.

Sapendo che la lunghezza d'onda è legata al periodo T dell'onda mediante la relazione:

$$\lambda = V \cdot T$$

se ne deduce che, a parità di velocità (V), la profondità cresce all'aumentare del periodo e al diminuire della frequenza (si ricorda che $T = 1/f$ dove f è la frequenza).

In pratica, al crescere del periodo, aumenta la sensibilità dell'onda a caratteristiche del terreno sempre più profonde.

Il terreno inoltre agisce da filtro passa basso quindi le frequenze più alte possono essere indicative soltanto per gli strati più superficiali.

Nel caso delle onde Rayleigh, lo strato coinvolto nella perturbazione ha uno spessore dell'ordine di circa 0.5λ (Choon B.Park et al, 1997).

L'immagine sottostante (Fig. 3) riassume il concetto per cui considerando due componenti una ad alta frequenza e corta lunghezza d'onda (a sinistra) e una a bassa frequenza e quindi grande lunghezza d'onda (a destra), la velocità di propagazione della prima dipende dal materiale più superficiale (quindi dalle caratteristiche ad esempio del primo strato) mentre la seconda viaggerà ad una velocità che dipende da tutto il materiale fino in profondità (quindi dalle caratteristiche di tutti gli strati che compongono questo ipotetico modello).

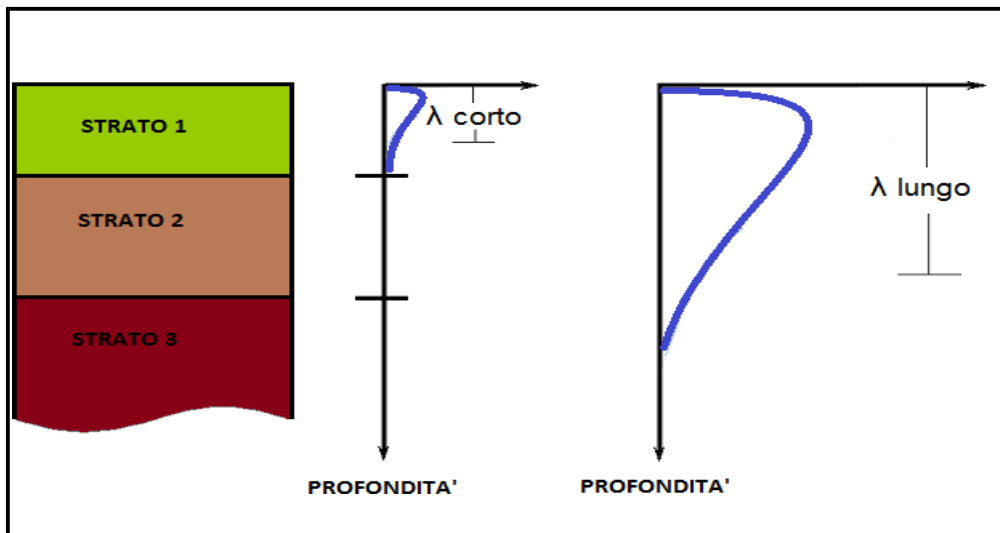


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

La distribuzione della velocità di fase in funzione della frequenza prende il nome di curva di dispersione.

E' chiaro quindi che più un modello di terreno è eterogeneo e maggiore sarà il grado di dispersione delle onde superficiali (Fig. 4).

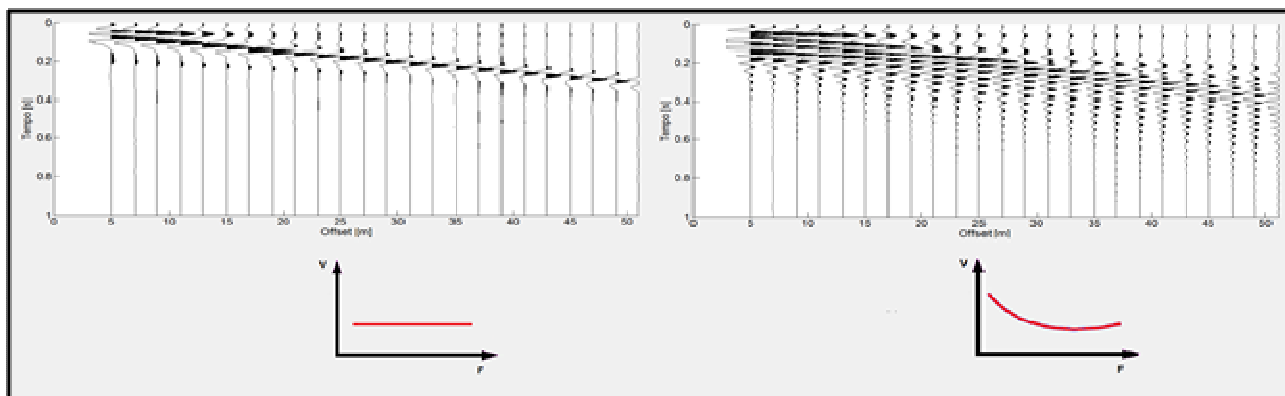


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

Un altro importante aspetto è connesso con la possibilità che questo tipo di onde, in presenza di eterogeneità verticali, manifestino anche una natura multimodale, vale a dire che la loro propagazione può avvenire, per una data frequenza, solo a determinate velocità (modi di propagazione).

Il modo che presenta la velocità di propagazione più bassa è detto modo fondamentale, mentre i restanti costituiscono i modi superiori.

In caso di strati eterogenei e con velocità crescenti il modo fondamentale è quello più energetico.

E' stato osservato che i modi superiori hanno origine in presenza di inversioni di velocità (Fig. 5) o di contrasti di velocità molto forti tra due strati (Cercato, 2008).

In questo caso i modi superiori sono caratterizzati da energia superiore rispetto al modo fondamentale.

Molto spesso può accadere che ci siano dei "salti di modo" tra il fondamentale e i superiori e viceversa quindi il solo basarsi sul modo fondamentale implica in alcuni casi una scorretta inversione dei dati.

I modi superiori vengono sempre più usati infatti il loro utilizzo nelle elaborazioni unitamente al modo fondamentale, può aiutare a vincolare meglio il modello Vs del sottosuolo, soprattutto in profondità. I più comuni software in commercio ne prevedono l'uso.

La dispersione delle onde superficiali quindi, elemento di disturbo negli altri tipi di indagini (sismica a rifrazione e a riflessione), risulta invece, grazie a questa sua proprietà, estremamente utile per calcolare le proprietà elastiche dei mezzi presenti in superficie.

Dalla curva di dispersione, in particolare dallo studio del modo fondamentale, infatti si può ricavare, attraverso l'operazione di inversione dei dati, il profilo di Velocità Vs e gli spessori degli strati indagati, parametri fondamentali sia in ingegneria sia in geofisica di esplorazione.

La stessa curva di dispersione inoltre può essere calcolata a partire dal sismogramma iniziale $x-t$ (offset-tempi) sia in forma generale in un diagramma $F-V$ (frequenze-velocità), sia in un diagramma $F-L$ (frequenze-lentezze dal momento che $L = 1/V$), sia in un diagramma $F-K$ (frequenze-energie dal momento che $f=1/T$ quindi $V = \lambda f = 2\pi f / K$) sia in un diagramma $T-V$ o $T-L$ (tempi-velocità o tempi-lentezze).

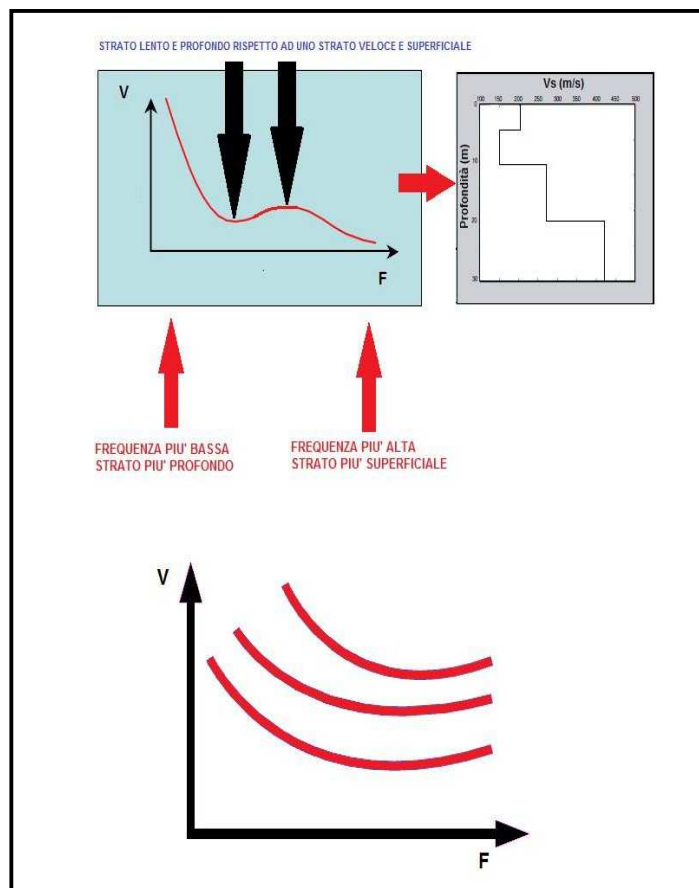


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

2.3 – PROPRIETÀ RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI

1. Circa il 67% dell'energia rilasciata da un qualsiasi tipo di sorgente genera onde di superficie.
2. L'ampiezza delle onde superficiali caratterizzate da un fronte d'onda cilindrico, la cui area risulta $2\pi xz$, è notevolmente maggiore rispetto alle onde di corpo che invece presentano fronte d'onda sferico.

Questo significa che per conservare l'energia (dal momento che l'energia è proporzionale al quadrato dell'ampiezza dell'onda) l'ampiezza dell'onda di superficie alla distanza X deve essere proporzionale a $1/X$. Il fronte d'onda delle onde di corpo invece è sferico (area relativa $4\pi x^2$) quindi

l'ampiezza alla distanza X è proporzionale a X^{-2} il che significa che decade molto più velocemente delle onde superficiali.

3. Lo studio delle onde superficiali non è limitato, a differenza del metodo a rifrazione, dalla presenza di inversioni di velocità in profondità.

4. La propagazione delle onde di Rayleigh è influenzata prevalentemente da V_s e dallo spessore h degli strati mentre le velocità V_p e la densità possono essere trascurate. La velocità delle onde di Rayleigh è circa il 90 % della velocità delle V_s .

5. La proprietà della dispersività permette il calcolo della curva di dispersione dalla quale è possibile ricavare i parametri fondamentali del modello di terreno in superficie. Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente relazione sono state svolte utilizzando un sismografo DOREMI prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6 μ V @ 27dB; 0.076 μ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

3.1 – PROCEDURE DI CAMPAGNA

I cavi sismici sono stati stesi lungo la zona di interesse e ad essi sono stati collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

Per quanto riguarda invece l'energizzazione delle onde SH è stata utilizzata sempre una mazza da 8 Kg e la battuta è stata eseguita all'interno di buche con pareti a 90° colpendo su ambo i lati in maniera trasversale allo stendimento dei geofoni.

Al fine di ottenere una migliore risoluzione della sismo-stratigrafia, i punti di energizzazione, detti punti di scoppio (shot points), sono stati disposti simmetricamente rispetto al profilo: ai suoi estremi, esternamente ed a distanze variabili entro il profilo stesso (in questo caso solo in posizione centrale).

La profondità di investigazione è, in linea teorica direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

3.2 – METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE

La procedura d'elaborazione dati consiste di due fasi: la lettura dei tempi d'arrivo ai vari geofoni dello stendimento per ciascuna energizzazione effettuata e la loro successiva elaborazione mediante metodi di calcolo.

I tempi di primo arrivo delle onde sismiche vengono riportati su diagrammi spazio-tempo (dromocrone) nei quali l'asse dei tempi ha l'origine coincidente con l'istante in cui viene prodotta l'onda sismica (to), mentre nelle ascisse si hanno le distanze relative fra i geofoni dello stendimento.

Tali diagrammi consentono di determinare, nei punti di flesso, le variazioni di velocità fra i vari strati attraversati dai raggi sismici e, tramite elaborazioni, le profondità a cui si verificano tali variazioni.

Il procedimento di elaborazione dei tempi d'arrivo per ottenere le profondità dei rifrattori, utilizza più metodi: il Metodo del tempo di ritardo (delay time), il Metodo del tempo di intercetta, il Metodo reciproco generalizzato (G.R.M.) proposto da Palmer (1980) ed il Metodo Tomografico.

Il G.R.M. è un metodo interpretativo che si basa su tempi d'arrivo da energizzazioni coniugate, effettuate cioè da parti opposte del profilo sismico: tramite la determinazione di due funzioni (analisi della velocità e tempo-profondità) si determinano le velocità e quindi le profondità dei rifrattori individuati sulle dromocrone.

La funzione di analisi della velocità corrisponde al tempo necessario al raggio sismico a percorrere un tratto di lunghezza nota sul rifrattore (distanza intergeofonica), per cui la sua determinazione permette di ottenere una precisa stima della velocità delle onde sismiche sul rifrattore stesso.

Tramite un procedimento di migrazione dei dati, sia la funzione tempo-profondità che quella di analisi della velocità vengono calcolate per distanze intergeofoniche crescenti (da 0 a multipli interi dell'equidistanza dei geofoni): viene scelta poi quella distanza per la quale le curve presentano il miglior andamento rettilineo.

Il G.R.M., a differenza del metodo del tempo d'intercetta, permette anche di verificare e di individuare, con metodi di calcoli indiretti, la presenza di eventuali strati nascosti (di limitato spessore e/o basso contrasto di velocità) e strati a bassa velocità nella serie stratigrafica.

Negli strati nascosti si ha sempre un aumento di velocità con la profondità, ma il loro spessore è sottile e/o il contrasto di velocità con lo strato sottostante è piccolo, per cui i raggi sismici che partono da questi strati vengono oscurati dai raggi che partono dallo strato sottostante. Gli strati a bassa velocità presentano invece una velocità sismica minore rispetto allo strato sovrastante (inversione di velocità), per cui alla loro interfaccia non si verifica una rifrazione critica e così non vengono evidenziati sul grafico tempo-distanza.

L'individuazione di eventuali strati nascosti e/o inversioni di velocità viene effettuata attraverso il confronto fra i valori delle funzioni tempo-velocità misurate e quelle ricalcolate in base al valore di XY utilizzata per l'elaborazione (Palmer 1980).

Il Metodo tomografico permette di intervenire sui parametri del modello e di "controllare" le iterazioni successive, al fine di ridurre l'errore quadratico medio (indice della differenza tra i percorsi delle onde sismiche calcolati e quelli misurati).

A partire dal modello con parametri predefiniti dall'operatore (numero di iterazioni da effettuare, intervallo delle velocità sismiche di riferimento, posizione delle celle, dimensione delle celle e forma delle celle), i valori iniziali di velocità sismica relativi alle singole celle vengono modificati mediante iterazioni successive allo scopo di "fittare" i segmenti dei percorsi sismici e renderli compatibili con le misure sperimentali.

L'obiettivo è quindi il calcolo del tempo di transito dell'onda attraverso le celle del modello ed il confronto di tale tempo con quello sperimentale.

Attraverso successivi processi iterativi si determina un modello di velocità sismica finale che permette di soddisfare contemporaneamente le caratteristiche dei vari raggi sismici.

4 – INDAGINE SISMICA MASW-ESAC (Multichannel Analysis of Surface Waves)

Per le proprietà descritte precedentemente può risultare quindi conveniente l'utilizzo delle onde superficiali per la caratterizzazione di un determinato sito di indagine per stimare il profilo di Vs dalla velocità delle onde superficiali.

E' stato dimostrato ampiamente che la curva di dispersione delle onde superficiali è influenzata soprattutto dalla velocità delle onde S ma anche dallo spessore di ciascuno strato mentre risultano poco influenti le velocità delle onde P (totalmente nel caso delle onde di Love) e la densità di ciascuno strato.

E' quindi possibile stimare oltre al profilo di velocità delle onde S anche i diversi spessori degli strati.

La registrazione di tali forme d'onda viene effettuata mediante la tecnica MASW, l'acronimo sta per Multichannel Analysis of Surface Waves.

Bisogna precisare subito che la tecnica MASW non si basa solo ed esclusivamente sullo studio delle onde di Rayleigh in quanto anche le onde di Love sono onde superficiali anch'esse soggette al fenomeno della dispersione.

In questa specifica tecnica verranno però prese in considerazione solo le onde di Rayleigh.

Come è stato descritto in precedenza le onde di Rayleigh sono caratterizzate da una polarizzazione sul piano verticale e sono quindi registrabili lungo le due componenti verticale e radiale quindi possono essere registrate sia tramite geofoni verticali (per quanto riguarda la componente verticale) sia tramite geofoni orizzontali posti parallelamente allo stendimento (per quanto riguarda la registrazione della componente radiale).

Il tipo di sorgente dovrà comunque essere di tipo verticale per entrambe le componenti.

Questa precisazione è stata fatta perché molto spesso il solo utilizzo della componente verticale e/o orizzontale delle onde di Rayleigh, come unica tecnica MASW, senza avere dati geologici di base su un determinato sito, può non essere sufficiente per una corretta interpretazione dei diversi modi e la successiva inversione dei dati potrebbe dare qualche problematica.

LIMITAZIONI DEL METODO MASW

In generale è bene precisare che il metodo MASW presenta alcune limitazioni tra le quali:

1. Il modello di terreno deve essere a strati piani e paralleli viceversa la prova MASW perderebbe di attendibilità.
2. In riferimento a quanto previsto al precedente punto 1, non ci devono essere significative variazioni laterali del terreno.
3. La quota topografica dello stendimento dei geofoni non deve avere variazioni consistenti.

4. Le caratteristiche elastiche del terreno possono in alcuni casi attenuare completamente le onde superficiali rendendo quindi il metodo MASW inutilizzabile.

5. La profondità di investigazione è dipendente anche dalla lunghezza dello stendimento.

6. Poiché il profilo V_s finale viene calcolato mediante un processo di inversione, è possibile pervenire ad una curva di dispersione non univoca, ovvero quest'ultima soddisfa più modelli differenti di terreno (vedere seguito).

I metodi di prospezione sismica **MASW** (Multichannel Analysis of Surface Waves) quindi, consentono di ottenere un modello verticale delle VS a partire dalle modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare le onde di Rayleigh, e non attraverso quelle di volume come invece accade per i metodi propri della sismica più tradizionale.

In particolare osservando le caratteristiche dispersive del sito e applicando opportune tecniche di inversione è possibile stimare alcune proprietà meccaniche del sottosuolo in condizioni di sollecitazione sismica.

È noto che la propagazione delle onde, nel caso di mezzi stratificati avviene in maniera diversa rispetto al caso di mezzi omogenei; non esiste più una unica velocità, ma ogni frequenza è caratterizzata da una diversa velocità di propagazione a sua volta legata alle varie lunghezze d'onda.

Queste interessano il terreno a diverse profondità e risultano influenzate dalle caratteristiche elastiche, appunto variabili con la profondità.

Questo comportamento viene definito dispersione in frequenza ed è fondamentale nello sviluppo dei metodi sismici che utilizzano le onde di superficie.

Ovviamente le lunghezze d'onda più grandi corrispondono alle frequenze più basse e vanno ad interessare il terreno più in profondità; al contrario le lunghezze d'onda più piccole, poiché sono associate alle frequenze più alte rimangono nelle immediate vicinanze della superficie.

I metodi di prospezione sismica che utilizzano le onde di superficie si basano su modelli fisico-matematici nei quali il sottosuolo viene schematizzato come una serie di strati sovrapposti con caratteristiche elastiche lineari.

Per ogni strato si devono definire quattro parametri: lo spessore H dello strato, ad esclusione dell'ultimo considerato infinito; la densità ρ dello strato; la velocità di propagazione delle onde di taglio V_s all'interno dello strato; il coefficiente di Poisson.

A partire dai parametri del sottosuolo è quindi possibile ricavare le proprietà dispersive delle onde di Rayleigh, per il sito in esame.

Quanto detto rappresenta il problema diretto: quello cioè che a partire dalla conoscenza delle caratteristiche del terreno permette di descrivere la dispersione delle onde di Rayleigh.

Nella prospezione occorre invece affrontare il problema inverso: a partire dalla curva di dispersione rilevata, si arriva al modello di stratificazione del terreno con i relativi parametri meccanici e sismici.

La procedura utilizzata può essere suddivisa in tre fasi di seguito descritte in maniera semplificata:

Acquisizione: registrazione e osservazione dei dati sismici “grezzi” contenenti le onde di Rayleigh per un intervallo sufficientemente ampio di frequenze;

Processing: trattamento dei dati attraverso filtraggio e altre tecniche finalizzate all'estrazione delle caratteristiche di dispersione, in particolare espresse come velocità di fase in funzione della frequenza (Spettro FP) e operazione di *Picking* della Curva di dispersione ottenuta;

Inversione: uso di un modello del terreno che permette di ricavare un profilo monodimensionale della velocità delle onde S ed altri parametri in funzione della profondità riconducibile col minor scarto di errore possibile al *Picking* della Curva di dispersione sperimentale ottenuta.

4.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI MASW

Le analisi della dispersione delle onde superficiali partono dall'acquisizione dei dati con una geometria di tipo off-end ovvero lo stendimento dei geofoni si trova allineato da una stessa parte rispetto alla sorgente (Fig. 6) oppure split-spread quando invece la sorgente è posta all'interno dello stendimento di geofoni.

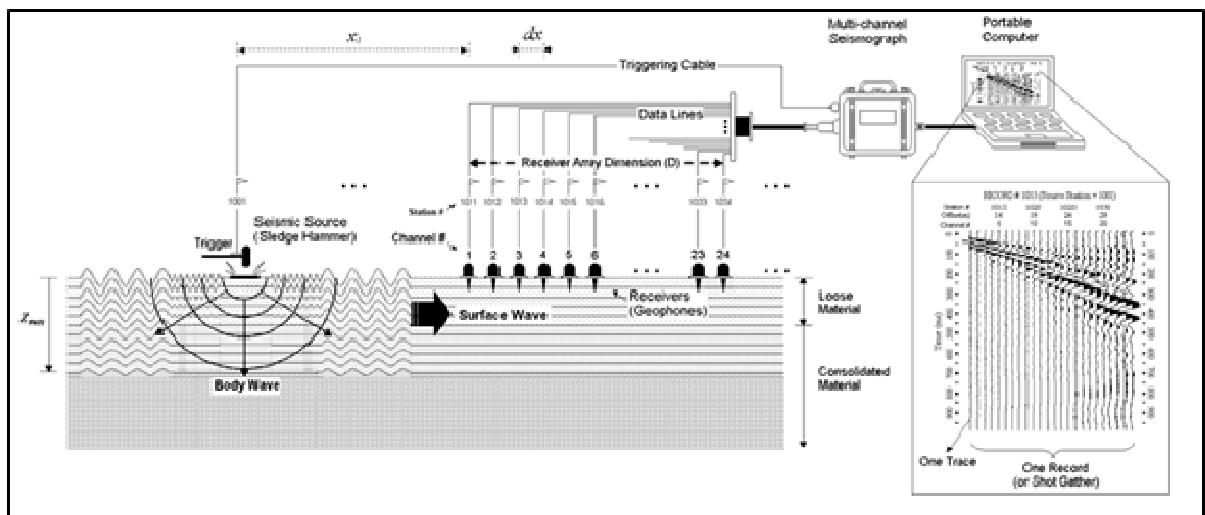


Fig. 6 - Schema di acquisizione delle Onde Superficiali (Fonte immagine www.kgs.ku.edu).

La strumentazione necessaria deve comprendere:

- Sismografo e suoi componenti (Cavi, Trigger, Sistema di acquisizione dati e inversione)
- Geofoni verticali e orizzontali
- Sorgente: martello, grave in caduta libera o fucile sismico
- Piastra per la battuta o traversina
- Appositi supporti per ciascun geofono in caso di presenza di asfalto o roccia

4.1.1 – PARAMETRI DI ACQUISIZIONE TEORICI ED UTILIZZATI

Ecco nel dettaglio i vari parametri necessari per un'acquisizione dati MASW:

1- Sorgente

Il tipo di sorgente utilizzata è stato di tipo verticale (martellata).

Qualora la registrazione fosse risultata problematica a causa della distanza e/o dell'attenuazione intrinseca del terreno è stato aumentato il numero di stack (ovvero il numero di colpi per registrazione). Ciò in generale tende a migliorare il rapporto segnale/rumore, la qualità delle registrazioni e quindi degli spettri di velocità su cui si andrà a fare il picking.

2 - Lunghezza dello stendimento Array Dimension (D)

Lo stendimento, in teoria, deve avere la lunghezza (D) maggiore possibile (in base alla disponibilità di spazio e di geofoni) in quanto dalla sua lunghezza derivano le frequenze più basse registrabili (λ max) e quindi di conseguenza, come descritto in precedenza, una maggiore profondità di investigazione (Z).

La sua lunghezza non deve comunque essere superiore a 46 m (la distanza tra geofoni deve essere pari a 2 m per un array di 24 geofoni). In caso di utilizzo di più geofoni possono essere comunque possibili anche lunghezze superiori.

Dalla lunghezza dello stendimento dipende inoltre la risoluzione dei vari spettri, maggiore è la lunghezza e maggiore è la risoluzione. Di conseguenza sarà più facile effettuare l'operazione di picking.

In prima approssimazione quindi, sempre in via teorica, $D \approx Z \approx \lambda$ max dove λ max è la lunghezza d'onda massima misurata (corrispondente alla minima frequenza).

3 – Distanza tra i geofoni (dx)

Dipende molto dal numero di geofoni (in questo caso 24), dalla lunghezza dello stendimento e quindi dalla disponibilità di spazio. Utilizzando 24 geofoni la dx deve essere massimo di 2 m.

A maggior ragione se venisse utilizzato lo spettro f-k per l'individuazione dei modi delle onde superficiali deve essere comunque sempre utilizzata una dx piccola (2 m massimo).

Questo a causa del problema dell'*aliasing spaziale* ovvero la non sufficientemente ridotta distanza tra geofoni non consente di campionare a sufficienza i segnali a più alta frequenza.

Tale problema si presenta qualsiasi spettro si utilizzi, ma nel caso $f - v$ è più facilmente individuabile e non compromette l'interpretazione del dato rispetto allo spettro $f - k$.

Dalla distanza tra i geofoni dipendono inoltre le frequenze più alte registrabili quindi le informazioni inerenti gli strati più superficiali.

Una dx troppo grande inoltre (utilizzando 24 geofoni) ridurrebbe la "ridondanza", cioè quel fenomeno che permette di registrare la stessa frequenza da più stazioni e consente di avere un migliore rapporto segnale/rumore e quindi una migliore definizione della curva di dispersione ottimale.

In prima approssimazione quindi, in questo caso, la profondità minima di esplorazione $z \approx dx \approx \lambda_{\min}$, dove λ_{\min} è la lunghezza d'onda minima (massima frequenza).

4 - Distanza sorgente-primario ricevitore (offset minimo X_1)

Per quanto riguarda l'offset minimo bisogna tenere in considerazione il fatto che una sorgente troppo vicina causa problemi di *near offset* e non si rispetta la condizione di onda piana in quanto l'onda generata ha un fronte sferico.

La teoria prevede che un'onda può considerarsi piana ad una distanza circa la metà della massima lunghezza d'onda desiderata (se vogliamo ad esempio avere un profilo che interessa i primi 30 metri di profondità si deve considerare una lunghezza d'onda di circa 60-70 metri, quindi un offset minimo di 30-40 m).

In pratica molto spesso ciò non è possibile, ma buoni risultati si possono ottenere anche ad offset minimi inferiori.

E' necessario quindi effettuare registrazioni con diversi offset in modo da poter valutare, nella fase di elaborazione dati, diversi spettri di velocità derivanti da diverse configurazioni sorgente-ricevitori ed ottenere dal loro confronto un quadro più completo che agevoli il riconoscimento dei modi delle onde di Rayleigh effettivamente presenti, non essendo possibile stabilire a priori, in campagna, quale sia la migliore configurazione.

In questo modo si può avere inoltre un riscontro sulla conformazione 1D del sottosuolo (presenza o meno di variazioni laterali) ma anche risultati che interessino porzioni di terreno sempre più profonde.

5 - Tipo di geofoni

E' raccomandato per questo tipo di registrazioni l'utilizzo di geofoni in grado di registrare basse frequenze (4.5 Hz o inferiore).

I geofoni verticali vengono utilizzati per la misura della componente verticale delle onde di Rayleigh mentre quelli orizzontali, eventualmente, per la componente radiale delle onde di Rayleigh.

I geofoni vengono posizionati in maniera ben solidale al terreno; in presenza di roccia o di asfalto si utilizzano gli appositi supporti. Il numero di geofoni utilizzati in questa campagna è di 24.

6 – Intervallo di campionamento (dt)

Per quanto riguarda le onde superficiali si parla di onde che hanno un range di frequenze teoricamente <100 Hz per questo motivo è sufficiente utilizzare un passo di campionamento molto ampio (anche 4 ms).

7 – Tempo di registrazione

Il tempo di registrazione dipende molto dal tipo di terreno. Se omogeneo o quasi il fenomeno della dispersione non è molto accentuato, se invece è molto eterogeneo il “ventaglio” della dispersione è molto ampio.

Pertanto la lunghezza della registrazione deve essere di almeno 1-2 secondi.

Nella tabella successiva vengono riassunti i parametri utilizzati appena descritti:

SORGENTE	Onde di Rayleigh: verticale (martellata)
LUNGHEZZA DELLO STENDIMENTO (D)	46 metri
DISTANZA TRA GEOFONI (dx)	2 m
OFFSET MINIMO (X ₁)	≈ dx e ≈ D/2
NUMERO DI SCOPPI	2
TIPO DI GEOFONI	4.5 Hz (verticali per la componente verticale delle onde di Rayleigh)
NUMERO DI GEOFONI	24
TEMPO DI REGISTRAZIONE	1-2 secondi
INTERVALLO DI CAMPIONAMENTO (dt)	0.5 – 2 ms
NOTE	Le tracce non sono state filtrate e è stato aggiunto AGC (Automatic Gain Control)

4.1.2 – STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le indagini geofisiche nell'ambito della seguente campagna geofisica sono state svolte utilizzando un sismografo *DOREMI* prodotto dall'azienda SARA Electronic Instruments s.r.l.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

Classe strumentale: sismografo multicanale per geofisica

Topologia: rete differenziale RS485 half-duplex multipunto

Lunghezza max rete: virtualmente illimitata con l'uso di ripetitori

N. max canali per tratta: 255

Dimensioni elemento: 80x55x18 mm

Peso: 250 g (per elemento con cavo di 5 metri)

Cavo: per geofisica 1x2x0.5 + 1x2x0.25 twisted pair schermato

Memoria: 60 kBytes (30000 campioni)

Frequenze selezionabili: da 500 a 20000 Hz (passi di campionamento da 2 a 0.05 ms)

Convertitore: tipo SAR a 16 bit (96 dB)

Amplificatore: ultra-low noise con ingresso differenziale

Banda passante: 2Hz - 200Hz

Reiezione modo comune: >80dB

Diafonia (crosstalk): zero, la trasmissione è digitale

Dinamica del sistema Risoluzione: 7.6 μ V @ 27dB; 0.076 μ V @ 60dB

Dinamica di base: 96dB (16 bit) S/N ratio fra 0.5 e 30Hz: >94dB (> 150dB con l'uso del PGA)

Alimentazione: batteria ricaricabile interna operativa 10-15Vdc

Consumo di energia: Interfaccia 80 mA, canale 30mA per una stringa da 12 canali: < 500mA

4.1.3 – ESECUZIONE INDAGINE MASW

La geometria di acquisizione utilizzata è indicata nello schema sottostante.

E' bene precisare che una geometria di acquisizione "fissa" non esiste, poiché questa dipende dalle singole caratteristiche fisiche di ciascun sito indagato.

La geometria proposta, compatibilmente con le condizioni logistico-morfologiche, rappresenta il giusto compromesso tra pratica e teoria.

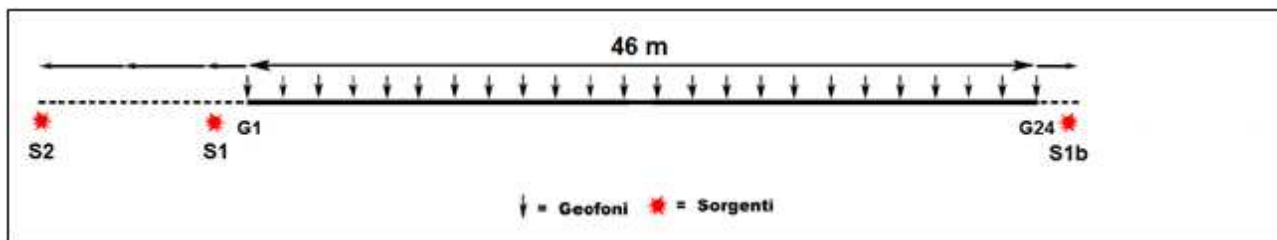


Fig. 7 - Geometria di acquisizione massima per le onde superficiali utilizzando 24 geofoni e $dx=2$.

S1: a distanza adeguata da G1.

S2: a distanza $D/2$ da G1 pari alla semi lunghezza dell'array di geofoni (D).

S1b: a distanza da G24 speculare rispetto a S1

La scelta di utilizzare due scoppi S1 e S2 di cui quest'ultimo a distanza, ove possibile, pari a $D/2$ è stata fatta per i seguenti motivi:

- Scoppi posti a distanza considerevole permettono di mettere in evidenza tutto il range di frequenze ottenibile dalla sorgente utilizzata, dalle più alte (S1) a quelle più basse (S2);
- I modi superiori, se presenti, sono maggiormente individuabili e discriminabili da quello fondamentale, il che in caso contrario porterebbe ad una interpretazione errata a seguito della fase di inversione dei dati;
- La similarità tra i due spettri F-V ricavabili dai due scoppi permette di stabilire se siamo in condizione di piani paralleli e/o assenza di variazioni laterali significative;
- In aggiunta al punto precedente, per verificare il parallelismo e l'omogeneità degli strati, in caso non ci sia lo spazio necessario per lo scoppio S2, eventualmente, ove possibile, è buona norma ricorrere ad uno scoppio (S1b) posto nella parte opposta dello stendimento in posizione geometricamente speculare allo scoppio S1.

Una volta stabilita la geometria di acquisizione si passa alla fase di montaggio della strumentazione in campagna.

I cavi sismici vengono stesi lungo la zona di interesse e ad essi vengono collegati i geofoni precedentemente infissi nel terreno alle equidistanze prestabilite.

L'energizzazione del terreno per generare onde elastiche di tipo P è stata effettuata mediante massa battente da 8 Kg: l'impatto rende operativo, tramite un accelerometro posto in prossimità della piastra di battuta (trigger), il sistema di acquisizione dati, permettendo così la registrazione ai geofoni della forma d'onda rappresentativa della velocità di spostamento del suolo.

La profondità di investigazione è, in linea teorica come descritto precedentemente, direttamente correlata alla lunghezza del profilo, alla distanza dei punti di energizzazione esterni e soprattutto al contrasto di velocità dei mezzi attraversati.

I tempi di arrivo delle onde sismiche nel terreno sono funzione della distanza tra i geofoni, delle caratteristiche meccaniche dei litotipi attraversati e della loro profondità.

4.2 – ELABORAZIONE (PROCESSING) E INVERSIONE DEI DATI MASW

L'analisi della dispersione delle onde superficiali (qualsiasi tipo esse siano) al fine di determinare il profilo delle Vs di un determinato sito è composta da due fasi fondamentali:

1 – Determinazione dello spettro di velocità (generalmente nel dominio $f - v$) dal quale vengono determinate le caratteristiche delle onde superficiali quindi le curve di dispersione.

2 – l'inversione, ovvero il passaggio dalle curve di dispersioni al modello di terreno, dei diversi modi precedentemente individuati (in particolare il modo fondamentale). Una volta registrate le tracce seguendo la metodologia precedentemente descritta si ottiene il dataset dei dati nel dominio $x - t$ ovvero spazio - tempo. E' chiaramente impossibile lavorare in questo dominio quindi si deve passare al dominio $f - k$ (frequenze - numeri d'onda) oppure al dominio $f - v$ (frequenze - velocità) (Fig. 8).

Alcuni punti chiave da tenere in considerazione per il controllo di qualità dei dati sono:

1 – La registrazione corretta ben visibile in tutte le tracce.

2 – Spettro di velocità chiaro ed interpretabile.

3 – Attenzione ai modi superiori se presenti.

4 – Utilizzare come modello iniziale i dati geologici e/o i dati forniti dalla sismica a rifrazione. Trattandosi infatti di un problema inverso, la parametrizzazione del modello di riferimento deve essere adeguata rispetto all'informazione effettivamente disponibile (Foti, 2008).

5 - La corrispondenza tra curva di dispersione sperimentale e curva di dispersione numerica relativa all'ultima iterazione del processo di inversione, minimizzando gli scarti, deve essere adeguata per tutto il campo di frequenza per il quale sono disponibili informazioni sperimentali (Foti, 2008).

6 – In caso di incertezze legate alla NON UNIVOCITA' DELLA SOLUZIONE è necessaria quindi una taratura mediante dati diretti di esplorazione del sottosuolo.

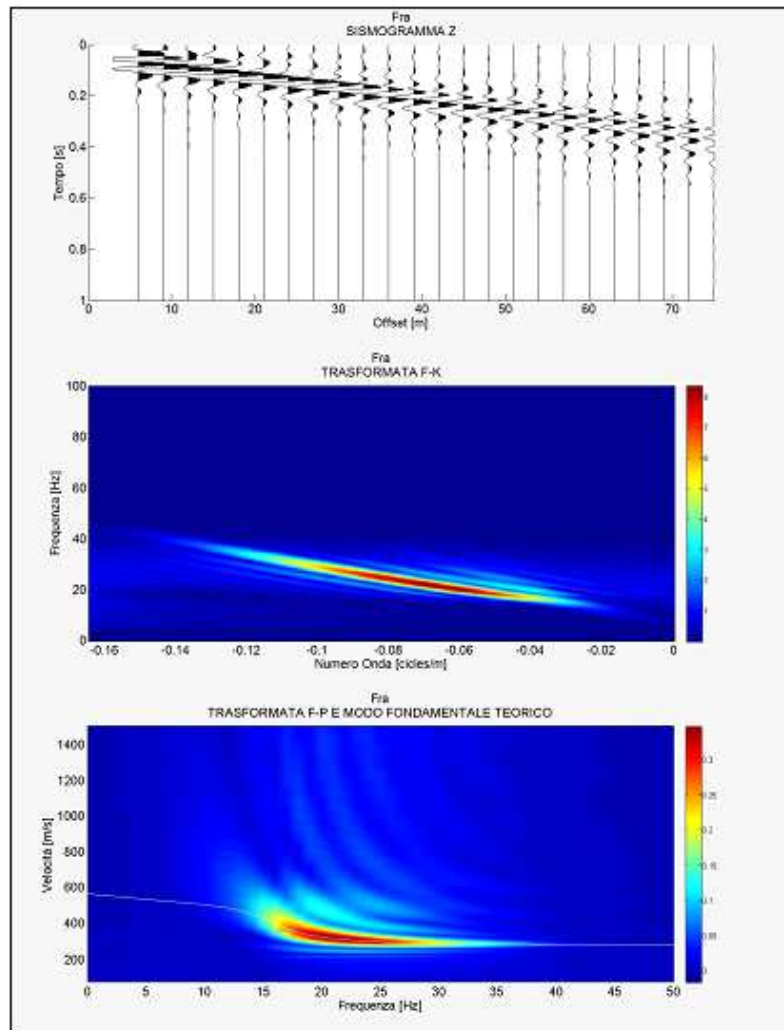


Fig. 8 - Semplice modello preso dalla letteratura composto da due strati a velocità crescente ($V_p = 650$ e 1400 m/sVs = 300 e 600 m/s spessore h fino al semispazio di 8 m). Dall'alto al basso si può vedere il sismogramma sintetico (componente verticale), lo spettro f-k e lo spettro f-v (con modo fondamentale teorico).

Una volta calcolato lo spettro f-v è buona norma verificare la profondità massima raggiunta dall'indagine (Fig. 9) in modo da meglio vincolare il modello da utilizzare nella fase di inversione, dopo di che si entra nella parte più delicata, ovvero il picking, l'individuazione cioè dei diversi modi.

La loro individuazione è quindi soggettiva (di contro all'oggettività dello spettro calcolato) e le scelte che si fanno devono essere ponderate con cura per non inficiare in maniera determinante il processo di inversione.

E' di uso comune interpretare il modo fondamentale come quello a più alta energia.

Questo non è sempre vero. In base infatti alla complessità del sito geologico i modi superiori potrebbero essere molto più energetici o addirittura talmente energetici che nello spettro il modo fondamentale non è visibile.

Non bisogna in maniera categorica basarsi sul picking e inversione automatica che molti software consentono di fare.

E' necessario quindi fare riferimento a prove invasive presenti nelle vicinanze (penetrometrie, carotaggi ecc.). Più dati si hanno a disposizione e maggiore è la probabilità di ricostruire, dalla curva di dispersione, il modello di terreno più veritiero che l'ha determinata, riducendo al minimo così i problemi di non univocità.

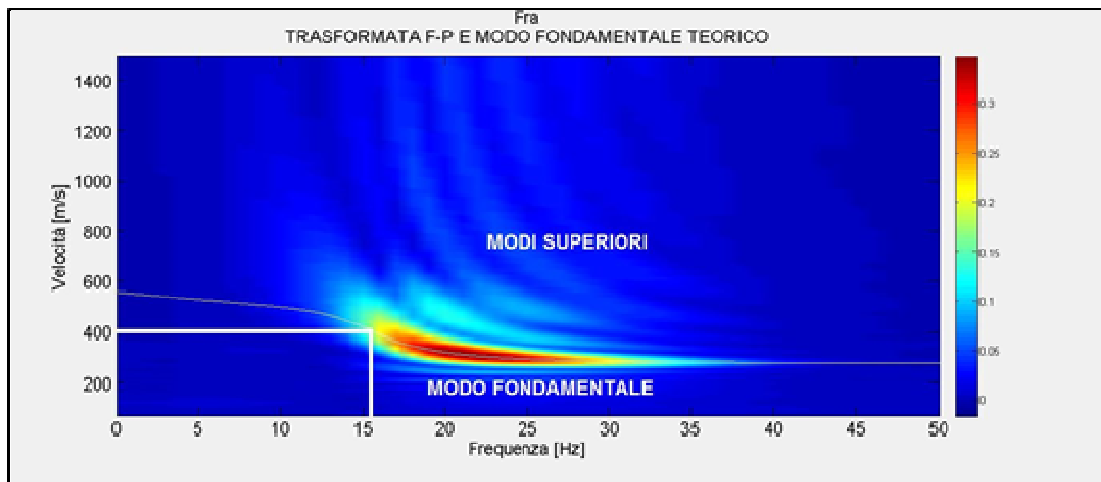


Fig. 9 - Calcolato lo spettro f-v per determinare in maniera approssimata la profondità massima raggiunta dalla prova si prendono le coordinate f-v dell'ultimo punto chiaramente visibile del modo fondamentale e si esegue la seguente formula: $Z = v / 2f$. In questo caso $v = 400$ m/s, $f = 15.5$ Hz quindi $Z = 400 / 31 = 12.9$ m

Il metodo di prospezione **ESAC** (Extended Spatial Autocorrelation Method) invece avviene tramite la registrazione dei microtremori come sorgenti sismiche con stendimenti bidimensionali e attraverso il processo di inversione della curva di dispersione effettiva (anziché modale come nel caso dell'indagine MASW).

Nel metodo ESAC si registra il segnale relativo a microtremori spontaneamente presenti nell'ambiente, cioè sollecitazioni di qualsiasi origine, provenienti da sorgenti ignote e isotropiche (disposte in tutte le direzioni) rispetto ad uno stendimento sismico non lineare.

In assenza di spazi sufficientemente lunghi e in presenza di ambienti urbanizzati, acquisizioni con stendimenti 2D (a "L", croci o cerchi) e di breve durata, consentono in maniera speditiva l'analisi del microtremore sismico.

L'acquisizione secondo una geometria bidimensionale risolve alcuni problemi legati alle velocità apparenti, presenti nei dati acquisiti mediante array unidirezionali (ReMi).

Uno stendimento ESAC è realizzato mediante l'utilizzo della classica strumentazione per l'esecuzione di una prospezione sismica MASW con geofoni a componenti verticale da 4,5 Hz disposti secondo una geometria 2D (a "L", croci o cerchi).

Al contrario di ciò che avviene con le tecniche attive, il metodo ESAC, consente una rapida ed agevole acquisizione dei dati senza dover operare con una sorgente attiva e l'acquisizione può essere eseguita, al limite, anche da un solo operatore.

Con la metodologia ESAC viene studiata la direzionalità del microtremore e valutata la velocità di fase alle diverse frequenze.

Il metodo consente di definire la cosiddetta **curva di dispersione effettiva**, che rappresenta una combinazione delle diverse curve modali "pesate" in base al loro specifico contenuto energetico nel sito.

Nel caso di profili normalmente dispersivi, la curva di dispersione effettiva coincide con la curva relativa al modo fondamentale.

In altri casi, per esempio in presenza di inversioni di velocità o di forti contrasti di impedenza sismica, la curva di dispersione effettiva risulta frutto di una combinazione dei diversi modi in funzione della relativa energia.

Un vantaggio quindi della tecnica ESAC è quello di non dovere identificare (come in altre metodologie) i vari modi di vibrazione, che sono invece trattati, più semplicemente, in modo unitario.

Mediante software dedicato viene calcolata automaticamente la curva di dispersione effettiva, dalla quale può essere eseguita la **modellazione delle velocità di taglio (Vs)**.

Le analisi ESAC sono mirate ed utili a definire le basse frequenze, ma non risultano altrettanto efficaci alle alte (ove invece le analisi di sismica attiva si rivelano decisamente superiori).

Per questo motivo si utilizzano tecniche passive con **analisi congiunta** con dati provenienti da sismica attiva (**ESAC+MASW**) al fine di risalire ad un modello sismostratigrafico affidabile lungo tutta la profondità di indagine.

La geometria dello stendimento **MASW** utilizzata è stata di **24 geofoni** intervallati da una distanza di **5 m** (Lunghezza stendimento pari quindi a **115 m**) mentre i parametri di acquisizione sono stati settati in maniera consona a questo tipo di indagine (tempo di registrazione più lungo e bassa frequenza di campionamento).

La geometria dello stendimento **ESAC** è stata invece di tipo a **L** utilizzando spaziature variabili in base alla logistica dei luoghi.

In base alle indagini sismiche effettuata quindi, è stato possibile ricavare più sequenze sismo-stratigrafiche relativamente all'area d'indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche della velocità di propagazione delle onde sismiche trasversali, nei primi 30 metri di profondità ed oltre (**Vs30/Vseq**).

5 – INDAGINE SISMICA PASSIVA HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio)

Il metodo reso popolare da Nakamura nel 1989 è una valutazione di tipo sperimentale dei rapporti di ampiezza spettrale fra le componenti orizzontali (H) e la componente verticale (V) delle vibrazioni ambientali sulla superficie terrestre misurati puntualmente mediante l'utilizzo di un apposito sismometro a tre componenti (due orizzontali ortogonali tra di loro ed una verticale).

Proprio dal fatto che tale metodo si basa su di un rapporto viene anche denominato indagine HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Noise Ratio) o più semplicemente prova "di Nakamura".

Rumore al di sotto degli 0.5 Hz è generato prevalentemente da onde marine e perturbazioni atmosferiche mentre al di sopra degli 0.5 Hz il contributo prevalente è dato da vento, traffico veicolare e attività industriali.

Il risultato di tale misura viene mostrato in un grafico in cui il rapporto H/V (in ordinata) è messo in relazione con la frequenza (in ascissa).

Le frequenze alle quali la curva H/V mostra dei picchi sono le frequenze di risonanza del terreno al di sotto del punto di misura.

La risonanza è un fenomeno che si viene a creare quando si hanno forti contrasti di impedenza sismica tra uno strato e il sottostante.

In caso quindi di misura effettuata al di sopra di una roccia la curva H/V non presenterà picchi significativi ma avrà un andamento piano con ampiezza pari ad 1. Maggiore quindi è il contrasto sismico e maggiore sarà la precisione della misura H/V.

Geologicamente quindi una copertura soffice al di sopra di un basamento rigido rappresenta la condizione ottimale per questa metodologia di misurazione.

In questa configurazione molto semplice è possibile quindi mettere in relazione la frequenza di risonanza (f) con la velocità media delle onde S (Vs) e lo spessore della copertura soffice (h) mediante la seguente relazione:

$$f = V_s/4h$$

Data quindi la frequenza di risonanza calcolata tramite il metodo H/V e la velocità media delle Vs delle coperture è quindi possibile ricavare la profondità dello strato a forte impedenza sismica e quindi fare successivamente una valutazione sulla possibile amplificazione sismica del sito in esame.

E' importante però che questo metodo (data la sua natura stocastica) sia utilizzato assieme ad una conoscenza generale dell'area di studio dal punto di vista geologico ed a prove di sismica quali MASW e/o rifrazione in modo da avere una conoscenza a priori della natura del sito e della velocità delle coperture.

In assenza di qualsiasi vincolo infatti esistono infiniti modelli (cioè combinazioni Vs-H) che soddisfano la stessa curva H/V.

5.1 – ACQUISIZIONE DEI DATI DI RUMORE A STAZIONE SINGOLA

Le misure di rumore a stazione singola si effettuano mediante l'utilizzo di sismometri a tre componenti (chiamati anche tromografi) con una sensibilità tra 0.1 e 20 Hz (corrispondenti ai modi di vibrare della maggior parte delle strutture).

Per quanto riguarda l'acquisizione in campagna bisogna prestare molta cura ed attenzione al posizionamento dello strumento.

L'accoppiamento dello strumento con il terreno deve essere fatto il più solidale possibile evitando interfacce intermedie (ad esempio cemento, fondo stradale ecc.) le quali causano grossi problemi dovuti all'inversione di velocità la cui conseguenza in molti casi è il non corretto risultato della curva H/V.

Importante è la messa in bolla dello strumento, se questo non fosse verificato le misure sarebbero completamente errate. Evitare la misura in giornate particolarmente avverse dal punto di vista meteorologico.

E' sempre consigliabile posizionare lo strumento all'interno di una piccola buca nel terreno in modo da mantenerlo oltre che perfettamente solidale anche al riparo da possibili agenti di disturbo.

Dal momento che le frequenze di interesse ingegneristico non superano i 25 Hz la frequenza di campionamento non deve essere inferiore ai 50 Hz.

Particolarmente importante è la durata della registrazione. Come accennato in precedenza, la misura di rumore è un fenomeno detto stocastico quindi per avere una validità dal punto di vista statistico è necessaria una consistente quantità di dati i quali si ottengono registrando il rumore per una durata commisurata alla frequenza di risonanza di interesse.

In generale quindi per avere un dato concreto riguardante un bedrock sismico profondo (basse frequenze di risonanza) sarà necessario un tempo di registrazione più lungo rispetto ad un bedrock sismico superficiale (alte frequenze di risonanza).

L'orientamento dello strumento in via convenzionale deve essere rivolto verso il Nord geografico.

In presenza di elementi topografici o morfologici lo strumento dovrebbe essere allineato secondo gli assi di questi in modo da cogliere eventuali effetti di direttività. Quest'ultima può essere causata o da una non omogenea distribuzione delle sorgenti attorno allo strumento di misura o da cause derivanti dalla natura del sottosuolo sia per motivi topografici (misure a bordo di una scarpata ad esempio) sia per motivi stratigrafici (valli sepolte, stratificazioni inclinate ecc.). Le misure quindi in cui è presente questa problematica vanno interpretate con cautela.

5.2 – ANALISI DEI DATI

Una volta registrate le serie temporali di ciascuna componente il calcolo della curva H/V avviene passando al dominio delle frequenze e facendo il rapporto tra la componente H e la componente V. La componente H è la media delle due componenti orizzontali.

Per quanto riguarda le fasi dettagliate del processing si fa riferimento alle linee guide fornite dal progetto SESAME (2004).

La fase di interpretazione successiva deve essere fatta con alcuni accorgimenti fondamentali:

- 1- La curva H/V deve essere statisticamente significativa, ovvero deve avere una deviazione standard sia in ampiezza che in frequenza ridotta. Se questo non fosse verificato, premesso che la prova è stata acquisita tenendo presente tutti gli accorgimenti descritti nel precedente paragrafo, è necessario “pulire” la curva H/V. SESAME (2004) propone la rimozione nella serie temporale di quelle finestre in cui la deviazione standard del segnale STA (media a breve termine) è maggiore della media a lungo termine (LTA). Si tratta quindi dell’eliminazione di quelle finestre in cui è evidente la presenza di segnali di disturbo (detti transienti).
- 2- La curva H/V deve essere SEMPRE osservata insieme agli spettri di ciascuna componente in modo da poter effettivamente individuare quei picchi di natura stratigrafica. In condizioni normali infatti le tre componenti hanno ampiezze simili. Alla frequenza di risonanza si ha un picco del rapporto H/V in quanto diminuisce la componente verticale determinando una forma a “occhio” o “ogiva” indice di una risonanza stratigrafica. I picchi di forma differente non sono attribuibili a cause stratigrafiche.

5.3 – IL PROGETTO SESAME

Il progetto SESAME ha stabilito delle direttive per garantire la riproducibilità delle misure H/V, indispensabile per ottenere dei dati rappresentativi e poco influenzati dal contesto di misura ed ambientale.

Le direttive fornite dal progetto SESAME descrivono diversi criteri da seguire mediante i quali è possibile valutare l’attendibilità della curva H/V.

5.3.1 – CRITERI DI AFFIDABILITÀ DEL PICCO

Le seguenti condizioni di affidabilità sono state stabilite grazie al progetto SESAME (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations), a seguito dei numerosi studi condotti (SESAME 2004).

La prima condizione necessaria per ritenere una curva H/V affidabile, è la sua riproducibilità nello stesso sito con altre sorgenti e tipologie di rumore ambientale, e mediante una differente selezione di finestre.

In sintesi i primi tre criteri tutti da soddisfare sono i seguenti:

1. $f_0 > 10 / l_w$, ovvero che alla frequenza di interesse devono trovarsi almeno 10 cicli significativi nella finestra selezionata.; l_w è la lunghezza della finestra.
2. $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0 > 200$, ossia che il numero di cicli significativi sia maggiore di 200; n_w è il numero di finestre selezionate per condurre l'analisi.
3. un basso livello di scattering tra le finestre. Deviazioni standard troppo elevate sono riportabili a situazioni di scarsa stazionarietà ed alta perturbazione del segnale, quindi ad una bassa rappresentatività. In particolare la deviazione standard deve essere minore di 2 (se $f_0 > 0.5$) nell'intervallo $0.5f_0 < f < 2f_0$ e minore di 3 (se $f_0 < 0.5$) sempre nel solito intervallo.

Per quanto detto nei punti I e II quindi un picco ad 1 Hz per la sua corretta affidabilità devono esserci almeno 20 finestre di 10 s ognuna, o per un picco a 0,5 Hz, 10 finestre a 40s.

Nella tabella sottostante vengono indicati parametri di affidabilità a seconda del picco di interesse.

f_0 [Hz]	Minimum value for l_w [s]	Minimum number of significant cycles (n_c)	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Poiché i transienti eventualmente presenti nella registrazione vanno eliminati in fase di processing, è opportuno allungare il tempo di registrazione.

La tabella sopra indicata, fornita dal progetto SESAME deve comunque essere utilizzata in maniera molto indicativa.

Nella realtà infatti bisogna tenere presente che per la registrazione corretta di un picco a basse frequenze (bedrock sismico profondo quindi) a seconda delle caratteristiche geologiche del sito sono necessari tempi di registrazione superiori (anche nell'ordine delle ore).

E' quindi buona norma prima di effettuare misure di rumore conoscere la geologia della zona da investigare e fare riferimento a tutte le prove pregresse effettuate nel sito.

5.3.2 – CRITERI DI CHIAREZZA DEL PICCO

Nel migliore dei casi, la curva mostra un singolo picco 'netto', definibile in termini di ampiezza, deviazione standard relativa ed assoluta. In termini di ampiezza deve soddisfare le seguenti condizioni:

1. Esistenza di una frequenza f^- tra $f_0/4$ ed f_0 tale che $A_0 / A_{H/V}(f^-) > 2$; dove A_0 rappresenta l'ampiezza media del picco e $A_{H/V}(f^-)$ l'ampiezza della frequenza f^- .
2. Esistenza di un'altra frequenza f^+ , compresa tra f_0 e $4f_0$, tale che $A_0 / A_{H/V}(f^+) > 2$;
3. $A_0 > 2$.

Viceversa le condizioni di **stabilità** sono che:

1. Il picco deve apparire alla stessa frequenza sulle curve H/V corrispondenti alla somma e differenza della deviazione standard, con una percentuale del 5%;
2. La deviazione standard del picco in frequenza σ_f , deve essere inferiore ad una soglia massima $\varepsilon(f_0)$;
3. La deviazione standard del picco in ampiezza $\sigma_A(f_0)$, deve essere inferiore ad una soglia massima $\theta(f_0)$; Il valore $\sigma_A(f_0)$ rappresenta il numero con cui moltiplicare e dividere la curva media H/V per ottenere le curve relative alla deviazione standard.

Di seguito sono inseriti i valori massimi accettabili per le deviazioni standard a diversi range di frequenza del picco.

Frequency range [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	$0.25 f_0$	$0.20 f_0$	$0.15 f_0$	$0.10 f_0$	$0.05 f_0$
$\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
Log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

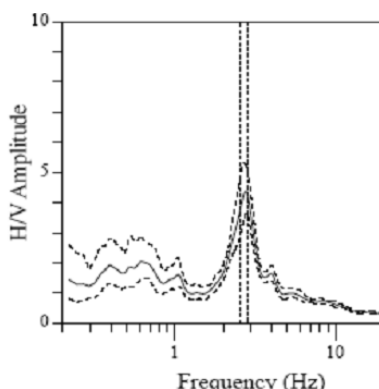
Quindi se la curva H/V per un dato sito soddisfa almeno 5 di queste 6 condizioni, il valore di f_0 è da considerarsi rappresentativo della frequenza fondamentale; se l'ampiezza di picco A_0 è

maggiore di 4 o 5, si può affermare con certezza che esiste una discontinuità ed un contrasto di velocità ad una qualche profondità.

Bisogna infine verificare che:

1. la frequenza f_0 è consistente con la frequenza di cut-off del sensore e con la sensibilità;
2. il picco non ha origine industriale.

In basso si riporta un esempio di curva H/V, con picco ‘netto’ che soddisfa le condizioni di stabilità.



Window length t_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_o	Frequency statistics from individual windows			
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_{A_0}(f_0)$
41	14	1561	2.72	0.11	4.4	1.2

Fig. 10 - Esempio di picco netto da SESAME (2004)

Non sempre la curva H/V mostra dei picchi netti. Talora sono poco chiari o allargati, e non soddisfano le condizioni sopra citate.

In questi casi sono imputabili a diversi fattori quali: un contrasto di impedenza moderato o alla bassa frequenza delle vibrazioni ambientali; condizioni di misura ventose e perturbate; un disaccoppiamento suolo-sensore; disturbi a bassa frequenza (camion, macchine a grande distanza); parametri di smoothing inadeguati; sensore a frequenza e sensibilità troppo basse.

5.3.3 – INFORMAZIONI AGGIUNTIVE AI CRITERI SESAME

A questo punto verificati i punti sopra elencati occorre allegare a tali risultati altre informazioni non descritte nel progetto SESAME per dare maggiore stabilità all'indagine.

Di seguito l'elenco completo:

1. Stazionarietà temporale dei rapporti spettrali.

In pratica una volta effettuata la registrazione, il dato viene diviso dall'operatore in finestre temporali, per ciascuna di esse il software calcola la curva H/V e come output restituisce un diagramma FT in cui al variare del tempo viene mostrato l'andamento del segnale.

Il segnale è stazionario se la forma dell'H/V nell'intervallo di frequenze di interesse rimane stazionaria per almeno il 30% circa della durata della misura.

2. Direttività del segnale (azimuth).

Il software calcola una volta selezionate le finestre la direttività del segnale ovvero la sua provenienza rispetto all'orientazione degli assi dei sensori dello strumento (di norma la componente orizzontale NS deve essere rivolta verso Nord).

La direttività corretta si ha quando il picco H/V (nel caso sia presente uno solo altrimenti tutti i picchi) è presente da 0 a 180° (da 180° a 360° è superfluo poiché la distribuzione del segnale è speculare) ovvero le sorgenti intorno allo strumento sono uniformi in tutte le direzioni.

Viceversa in caso di segnali direttivi in un range ridotto di frequenze le cause possono essere varie tra cui sorgenti non uniformi (es. rumori industriali).

In questo caso il risultato della registrazione non è attendibile. le variazioni azimuthali di ampiezza non devono superare il 30% del massimo.

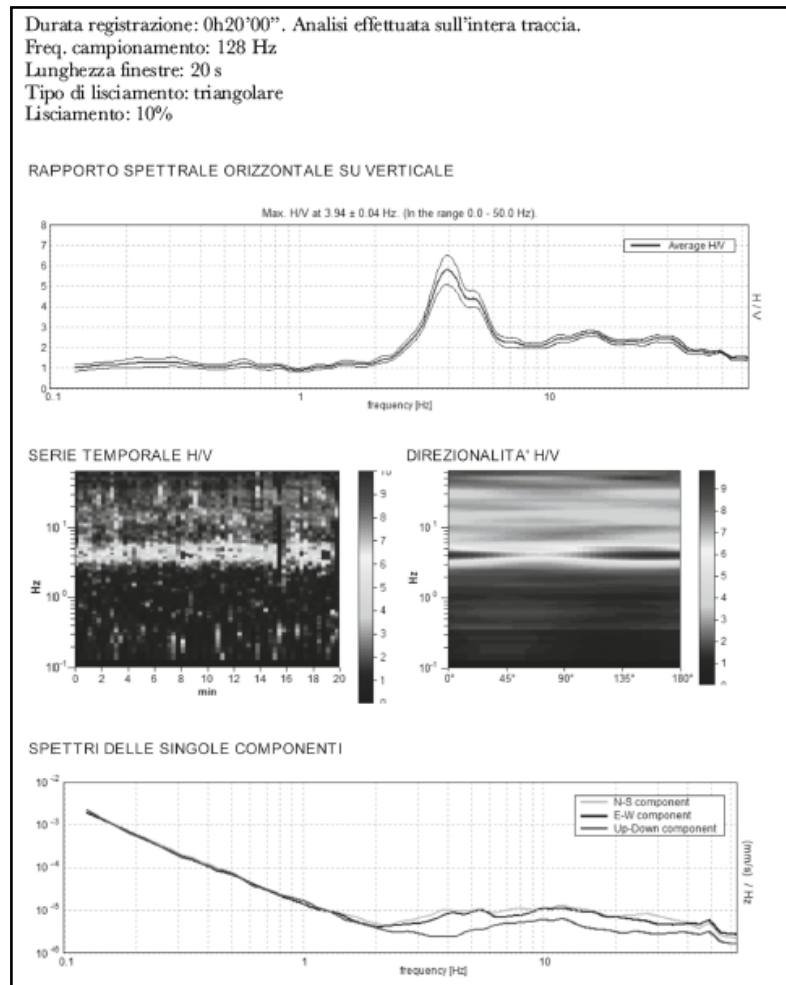
Questo deriva dal fatto che, nonostante la natura stocastica del fenomeno, in presenza di un campo d'onda diffuso, ovvero caratterizzato da sorgenti posizionate in maniera statisticamente omogenea attorno al sito di misura che si attivano in maniera non coordinata, l'andamento medio del segnale risulterà statisticamente indipendente dalla loro natura e posizione e sarà condizionato soprattutto dalla struttura del sottosuolo.

3. Si deve inoltre allegare l'andamento complessivo del rapporto H/V e gli spettri di ciascuna componente.

Ciò è utile per verificare che in corrispondenza del picco ci sia un effettivo abbassamento della componente verticale rispetto alle componenti orizzontali (plausibilità fisica).

Inoltre mediante il confronto dei vari spettri è possibile verificare se lo strumento è bene in bolla e l'eventuale presenza di inversioni di velocità caratterizzate contrariamente da quanto detto in precedenza da un abbassamento delle componenti orizzontali rispetto alla componente verticale.

4. Bisogna verificare l'assenza di rumore elettromagnetico caratterizzato da una forte direttività e da picchi molto stretti nella curva H/V.



Picco H/V a 3.94 ± 0.04 Hz (nell'intervallo 0.0 - 50.0 Hz).			
Criteri per una curva H/V affidabile [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]			
$f_0 > 10 / L_w$	3.94 > 0.50	OK	
$n_s(f_0) > 200$	4725.0 > 200	OK	
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$	Superato 0 volte su 190	OK	
Criteri per un picco H/V chiaro [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]			
Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	3.031 Hz	OK	
Esiste f^* in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0 / 2$	5.938 Hz	OK	
$A_0 > 2$	5.79 > 2	OK	
$f_{\text{max}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$	0.00462 < 0.05	OK	
$\sigma_f < g(f_0)$	0.01818 < 0.19688	OK	
$\sigma_A(f_0) < 0.7f_0$	0.3534 < 1.58	OK	

Fig. 11 - Esempio di acquisizione corretta e presentazione dei risultati (D.Albarello,S.Castellaro, 2011)

5.4 – VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ DELLE MISURE HVSR

E' proposta, quale metodo di valutazione della qualità tecnica delle misure HVSR acquisite, la classificazione proposta da Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro,2011.

L'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.

La classificazione di Albarello et alii, 2010 e Albarello & Castellaro, 2011 si divide in 3 classi principali: Classe A, Classe B e Classe C.

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 azimuthali 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 per la Classe A: 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.

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 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.

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

5.5 – CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le misure di rumore HVSR sono state tutte registrate mediante l’utilizzo del tromografo *THEREMINO*, costituito da geofoni con frequenza di 4.5 Hz

La sua particolare forma e utilizzo è il risultato di alcune considerazioni sperimentali e non per motivi estetici o di designer:

- 1- Forma circolare per avere la minima resistenza al vento;
- 2- Cupola emisferica ribassata per avere la minima resistenza al vento;
- 3- Baricentro molto ribassato per avere la massima stabilità;
- 4- Peso aumentato da una zavorra in piombo;
- 5- Diametro sufficientemente largo per avere una maggiore stabilità;
- 6- Materiale in policarbonato per isolare acusticamente i geofoni dai rumori antropici ed ambientali;
- 7- I cavi non devono essere posizionati verticalmente rispetto allo strumento perché causano vibrazioni dovute al vento, il cavo ha l'effetto " bandiera " generando frequenze orizzontali che non hanno nulla a che fare con i microtremori;
- 8- Aumento della larghezza della base di appoggio, in questo modo i tre puntali che poggiano sul terreno aumentano la stabilità dello strumento e garantiscono una riduzione della rumorosità strumentale indotta da vento e rumori antropici;
- 9- Distanza identica tra i vari puntali, in questo modo si ha una eguale distribuzione a 360° delle vibrazioni indotte dal terreno;
- 10- Con il piombo di zavorra si è aumentata la pressione sul terreno evitando così saltellamenti verticali e garantendo una maggiore aderenza e continuità tra terreno e strumento;
- 11- La zavorra in piombo posizionata nella parte medio bassa della piastra e l'alleggerimento della cupola hanno spostato il baricentro strumentale a pochi cm dal piano di appoggio sul terreno, ciò va a favore della stabilità;
- 12- La forma rotondeggiante della piastra e la forma emisferica della cupola permette di avere un alto grado di permeabilità al vento, possibile affondare la piastra di 4- 5 cm nel terreno estirpando la cortina erbosa superficiale, in questo modo dal piano si campagna spunta solo la cupola riducendo ulteriormente l'effetto vento;

-
- 13- Isolamento acustico del geofono grazie allo spessore della cupola, in questo modo di riduce l'effetto "microfono" dei geofoni che trasformano i rumori acustici in fastidiosi disturbi e rumori random;
 - 14- Spessori centimetrici delle pareti dell'ufo per evitare vibrazioni dannose dovute a spessori millimetrici dei contenitori spesso in plastica della scatola utilizzata;
 - 15- Minima superficie laterale per ridurre l'impatto con il vento;
 - 16- La forma tondeggiante e emisferica della piastra e della cupola permette di avere la medesima disposta al vento in tutti i 360 gradi;
 - 17- Contenitore basso e largo, e pesante al contrario di molti strumenti stretti alti e leggeri con pareti di lamierino sottile (vere casse acustiche), il contrario di come dovrebbero essere;
 - 18- Molta cura nel posizionamento all'interno dello strumento dell'elettronica e dei geofoni, riduzione al massimo di componenti inutili che hanno lo scopo di sporcare il segnale e una cura per schermare il segnale da inquinamento elettromagnetico.

6 - INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

In sismica non esistono soltanto le metodologie di indagine della rifrazione e della riflessione, esistono altre che prendono il nome di “sismica in foro”.

Una di esse, che è stata affrontata in questo lavoro, è la sismica Down-Hole. In questa tecnica viene fatto un foro nel terreno (di solito si utilizza il foro fatto per un carotaggio) opportunamente rivestito in cui viene fatto calare un sensore a tre componenti, in grado quindi di registrare sia le onde P che le S (SH e SV), a intervalli di 1-2 metri fissandolo alle pareti del foro tramite un sistema ad aria compressa o idraulico.

La sorgente viene posta in superficie ad una distanza d dal foro.

L'impulso alla sorgente produce lungo la direzione di propagazione verticale prevalentemente onde longitudinali P se la battuta è effettuata verticalmente (ad esempio una colpo di mazza su di una piastra) mentre produce impulsi prevalentemente orizzontali e quindi onde di taglio polarizzate orizzontalmente (onde SH) se vengono effettuate battute parallele al terreno di superficie (ad esempio lateralmente ad una trave di legno opportunamente fissata al terreno).

L'acquisizione dei dati può avvenire in due modi differenti:

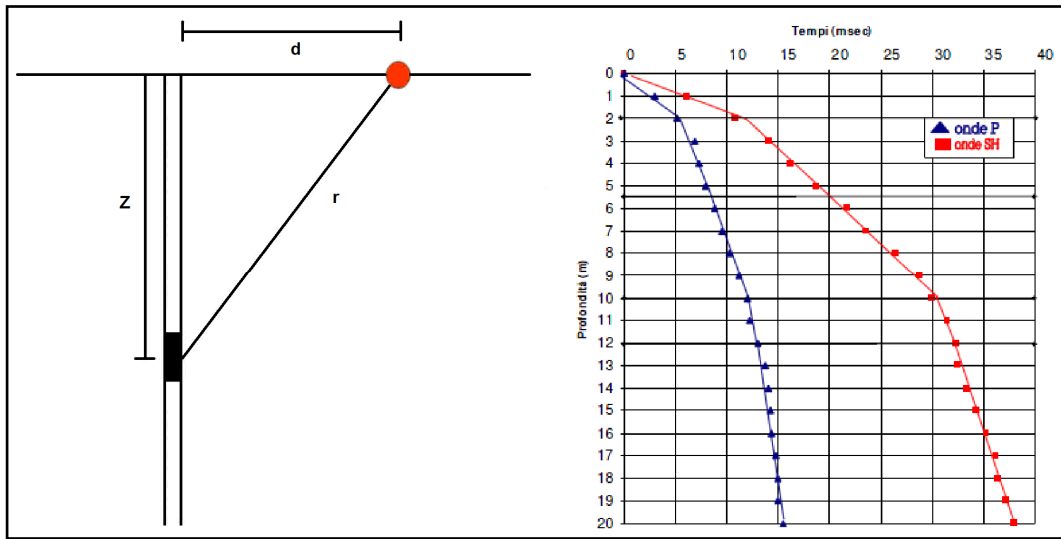
6.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE

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

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

$$t_{corr} = (Z / r) t$$

Calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde S si realizza il grafico $t_{corr} - z$ in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dal coefficiente angolare (come nella sismica a rifrazione) dei segmenti di retta lungo i quali si interpolano i dati sperimentali.



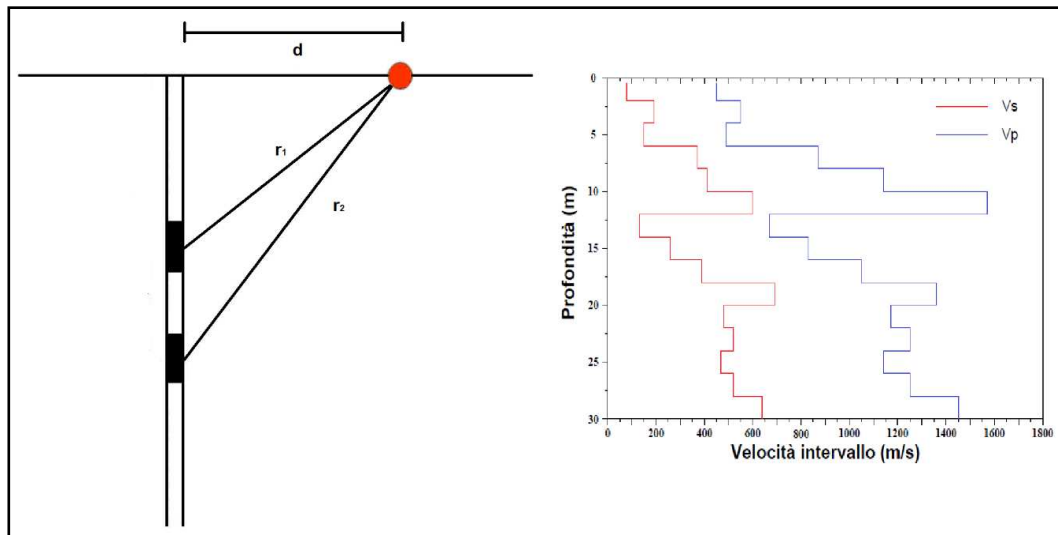
Schema di acquisizione con un ricevitore e a destra il relativo risultato

6.2 METODO INTERVALLO

Questo metodo risulta migliore del primo in quanto i tempi di tragitto dell'onda sismica si misurano fra due ricevitori consecutivi posti a differente profondità consentendo una migliore definizione del profilo di velocità.

Ottenute le misure è possibile calcolare i tempi corretti con la formula vista in precedenza e la "velocità di intervallo" delle onde P e S con la formula seguente:

$$V_{p,s} = (Z_2 - Z_1) / (t_{2corr} - t_{1corr})$$



Schema di acquisizione con doppio ricevitore e a destra il relativo risultato.

Il metodo intervallo presenta però dei limiti infatti non tiene conto della velocità degli strati sovrastanti e non è applicabile nel caso in cui $t_{2corr} < t_{1corr}$.

8 – BIBLIOGRAFIA

C. Park, R. Miller, J. Xia. Multichannel Analysis of Surface Waves, *Geophysics*, 64(3), 800-808, 1999.

C. Park, R. Miller, J. Xia and J. Ivanov. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) – active and passive methods, *The Leading Edge* (January 2007).

M. Cercato. Addressing non-uniqueness in linearized multichannel surface wave inversion, *Geophysical Prospecting*, 00, 1-21, 2008.

S. Foti, F. Santucci de Magistris, F. Silvestri, C. Eva. Valutazione degli standard di esecuzione e dell'efficacia delle indagini di sismica attiva e passiva, 2008.

D. Albarello, S. Castellaro. Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola *Ingegneria Sismica Anno XXVIII – n. 2 – 2011*.

M. Bour*, D. Fouissac, P. Dominique & C. Martin. On the use of microtremor recordings in seismic microzonation (1998).

SESAME European research project. Guidelines for implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations, measurements, processing and interpretation (2004).

ALLEGATI

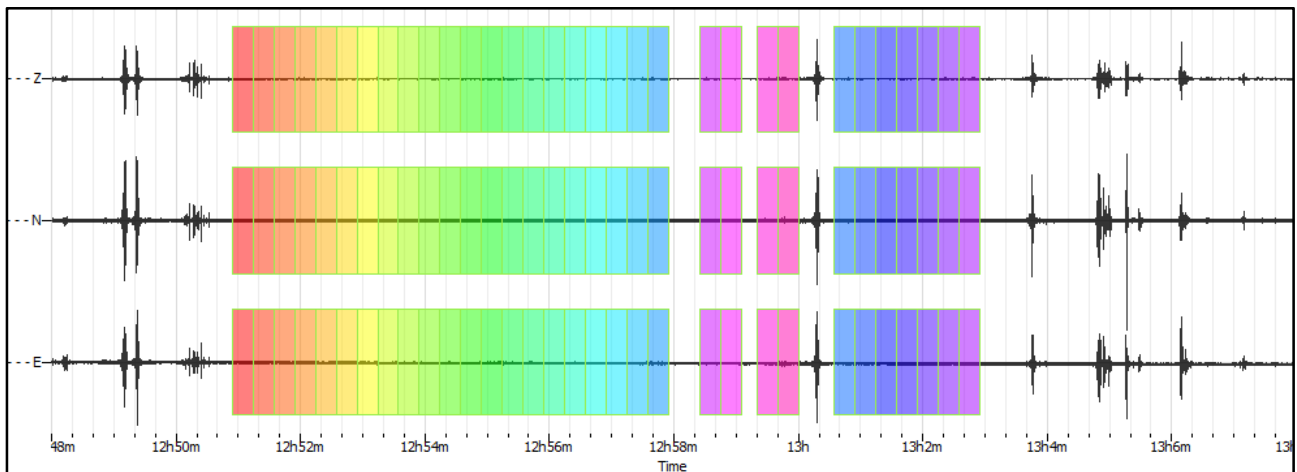
- **ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE DOWN – HOLE**
- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNA STRATIGRAFICA DEL SONDAGGIO**
- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

- **ALLEGATO GRAFICO: ACQUISIZIONI MICROTREMORI – RAPPORTO SPETTRALE H/V – SPETTRO DELLE SINGOLE COMPONENTI – CRITERI DI AFFIDABILITÀ SESAME – CLASSIFICAZIONE PROPOSTA DA ALBARELLO ET ALII**

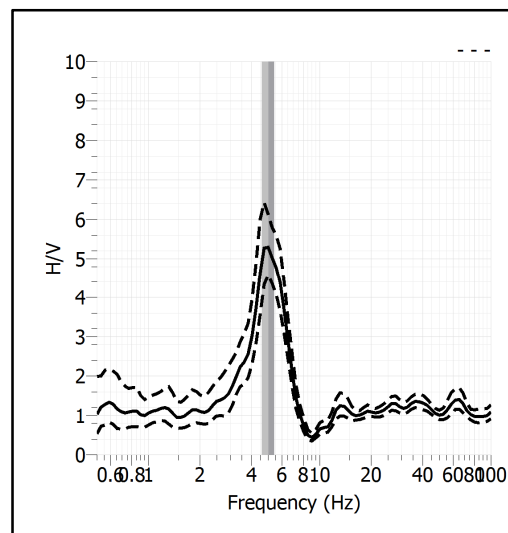
Stazione	1
Strumento	Theremino
Data acquisizione	Aprile 2021
Durata registrazione	20 minuti
Freq. Campionamento	500 Hz
Lunghezza finestre	20 s
Numero di finestre analizzate	32 (55% del tracciato)
Tipo di lisciamiento	Konno & Ohmachi
Lisciamiento	40
Orientamento strumentazione	0° N
Terreno di misura	Suolo naturale
Meteo	Sereno

Frequenza del picco H/V	5.02 Hz
Ampiezza Media della frequenza	5.27

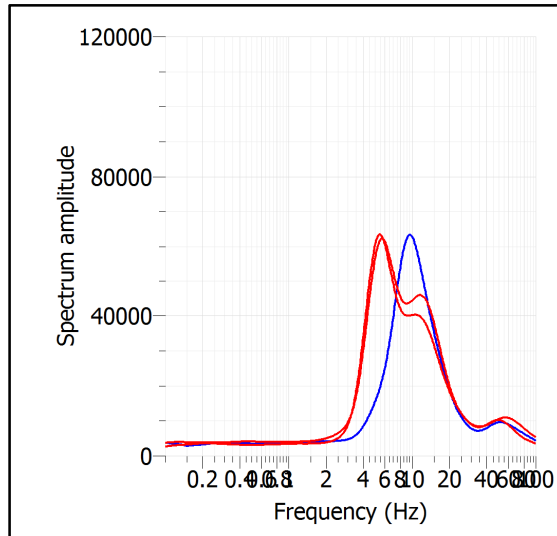
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



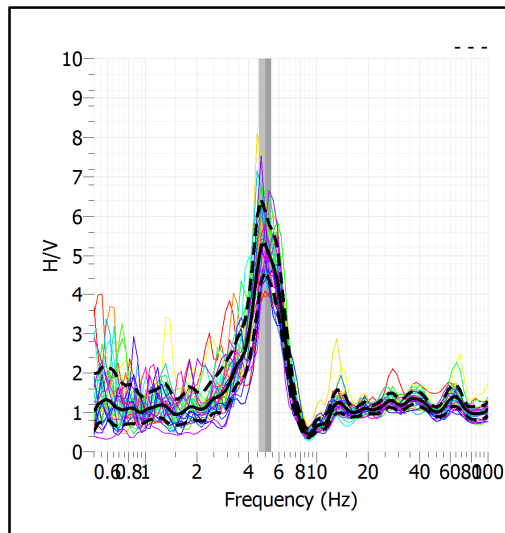
RAPPORTO SPETTRALE H/V



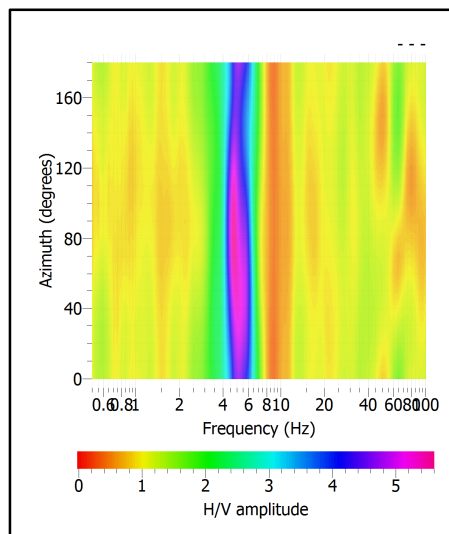
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	32	3213	5.020	0.43	5.27	1.15	ALTO
Criteria per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/Lw$			5.020	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			3213	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 27				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteria per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$						OK
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			5.2667	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.4284	>	0.2510	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.1538	<	1.5800	OK

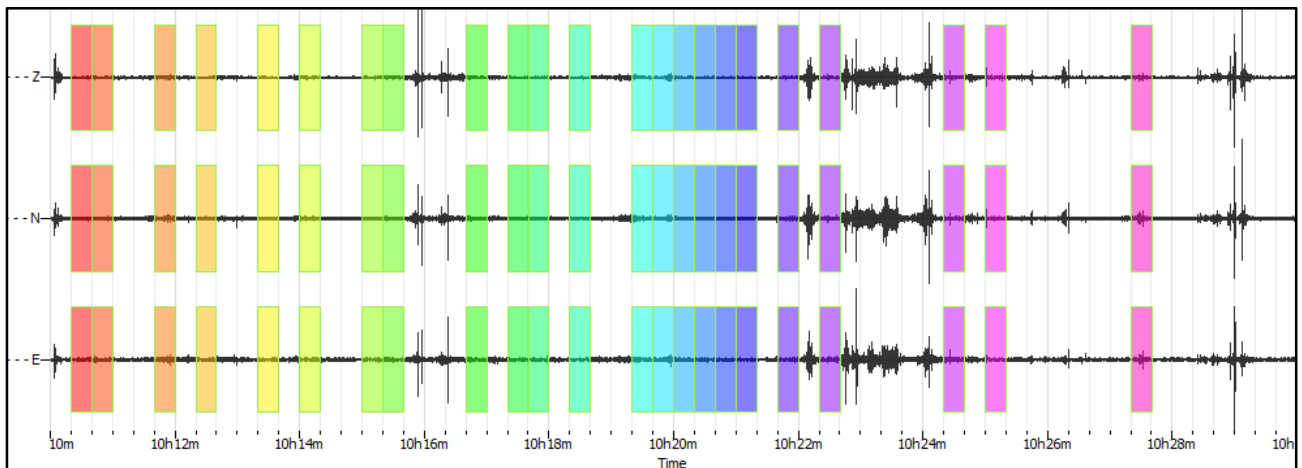
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum Lw$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

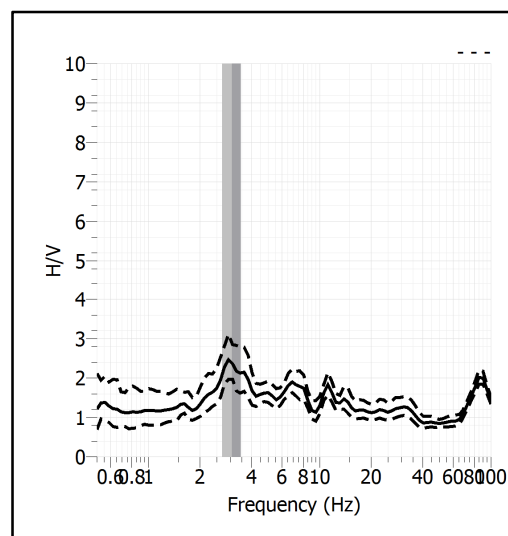
Stazione	10	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	23 (40% del tracciato)	
Tipo di lisciamento	Konno & Ohmachi	
Lisciamento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	3.08 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.37

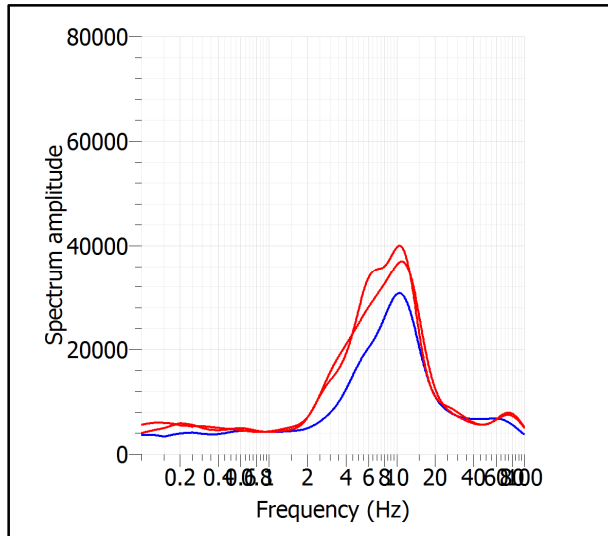
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



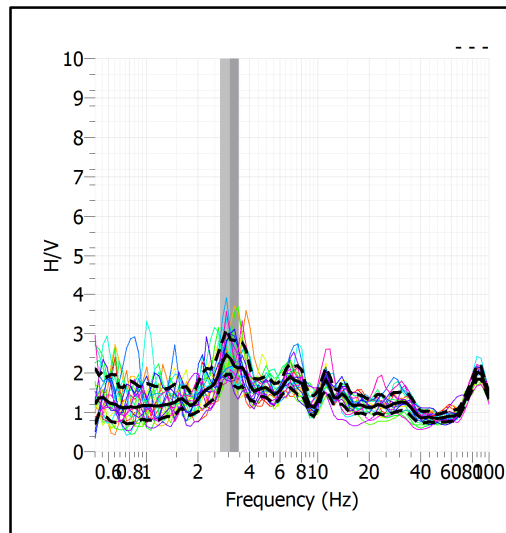
RAPPORTO SPETTRALE H/V



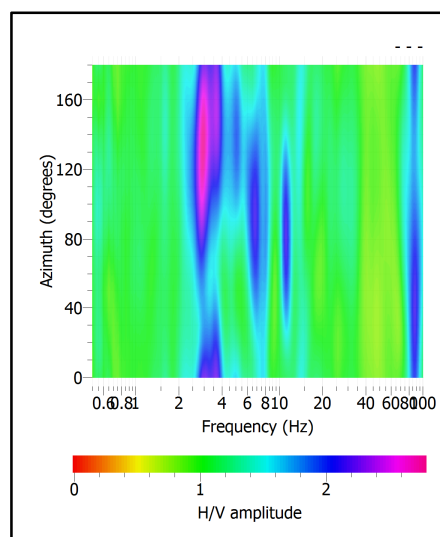
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	23	1417	3.080	0.39	2.37	1.25	BASSO
Criteria per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/Lw$			3.080	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			1417	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 26				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteria per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$						OK
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2.3714	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.3940	>	0.1540	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.2550	<	1.5800	OK

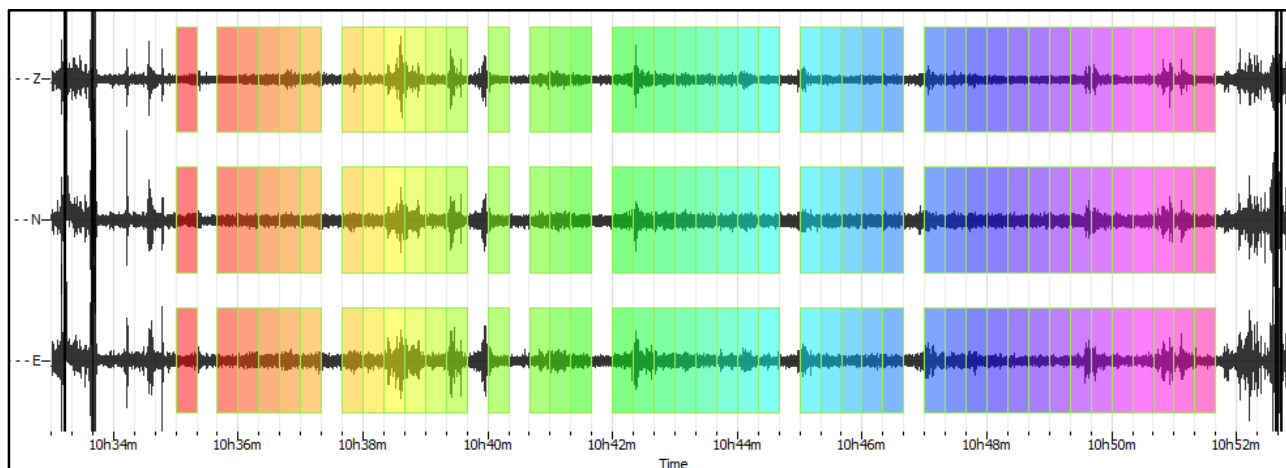
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum Lw$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

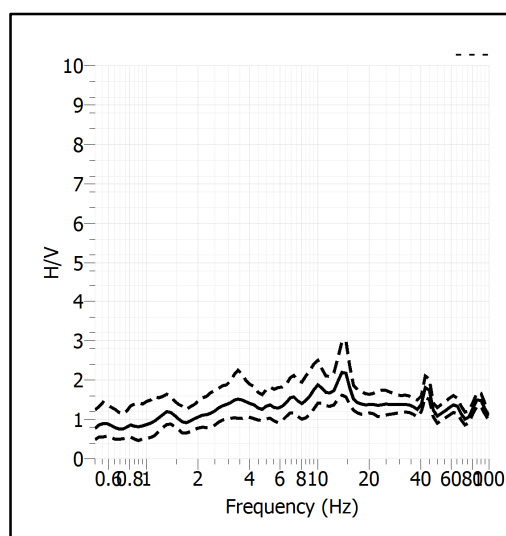
Stazione	11	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	43 (72% del tracciato)	
Tipo di lisciamto	Konno & Ohmachi	
Lisciamto	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

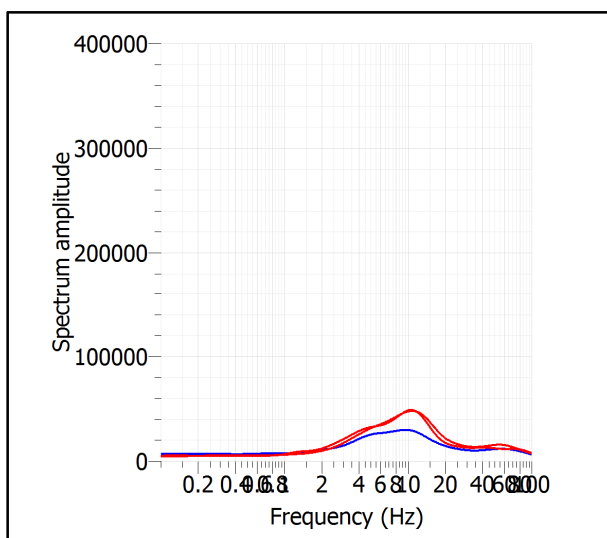
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



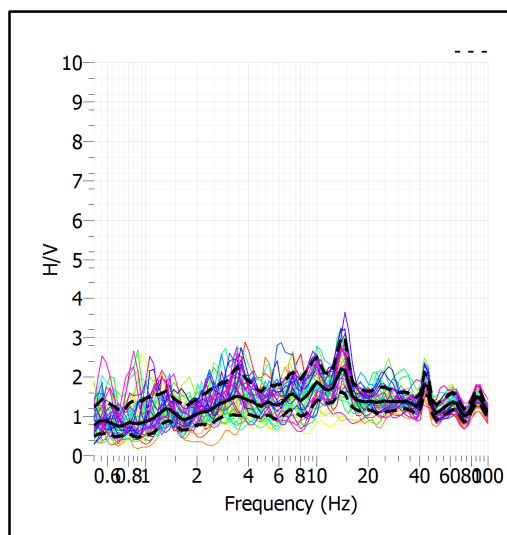
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

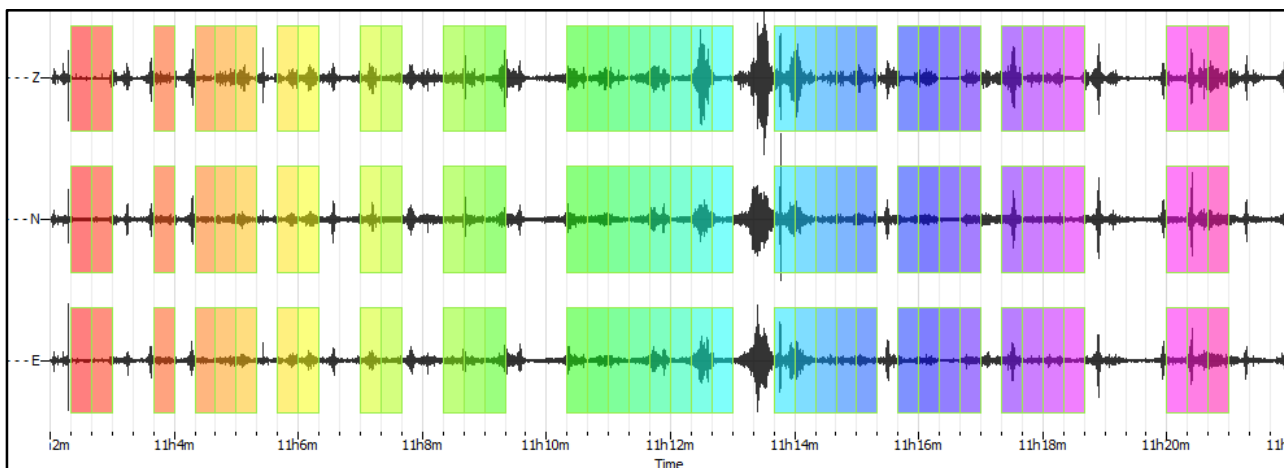
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

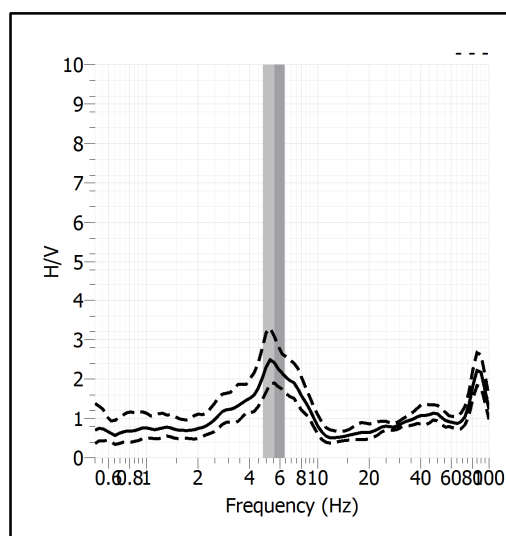
Stazione	12	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	37 (62% del tracciato)	
Tipo di lisciamento	Konno & Ohmachi	
Lisciamento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	5.59 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.40

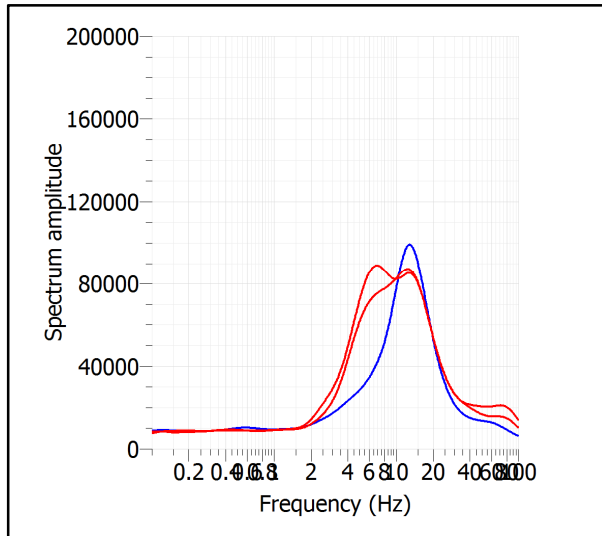
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



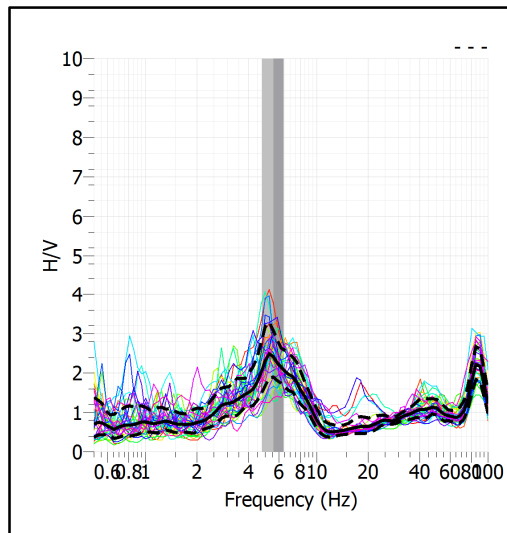
RAPPORTO SPETTRALE H/V



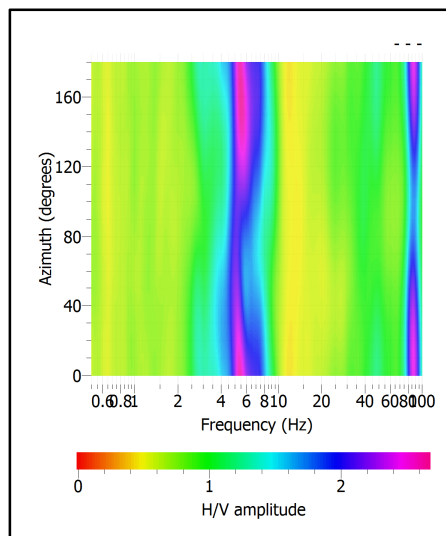
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	37	4137	5.591	0.82	2.40	1.26	BASSO
Criteri per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/Lw$			5.591	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			4137	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 27				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteri per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f' in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f') < A_0/2$						OK
	Esiste f'' in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f'') < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2.4045	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.8153	>	0.2795	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.2564	<	1.5800	OK

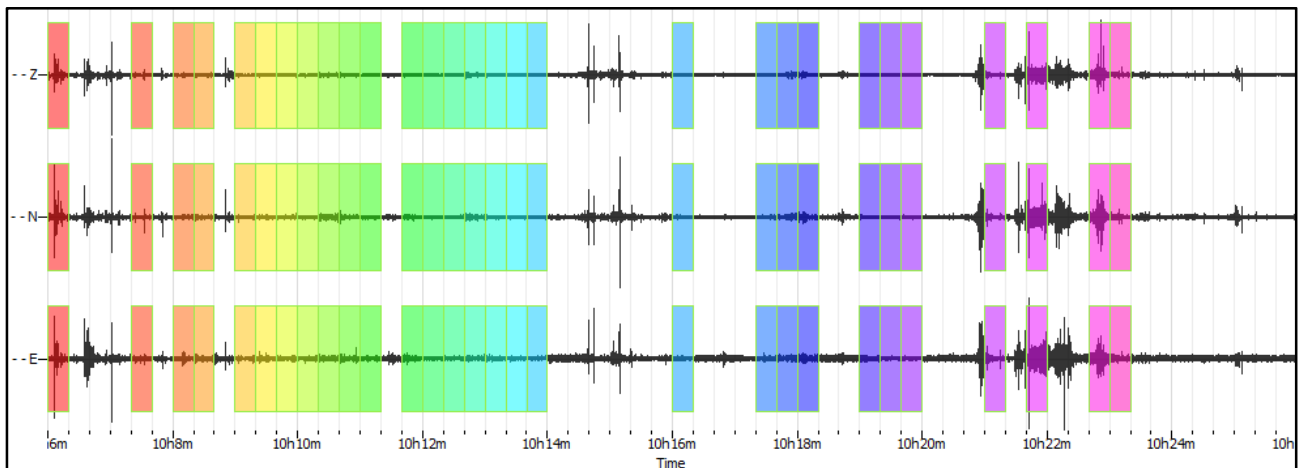
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum Lw$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

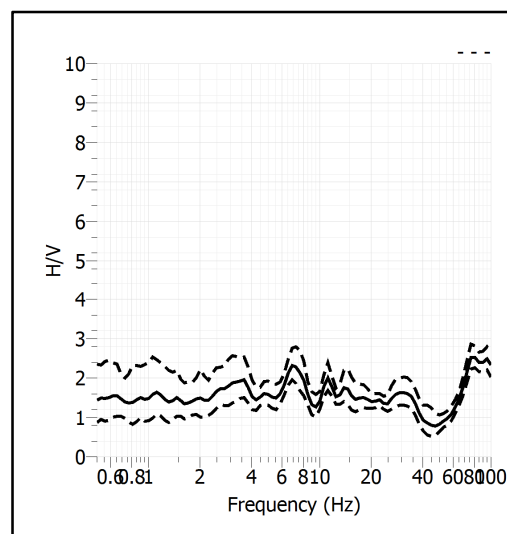
Stazione	13	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	29 (48% del tracciato)	
Tipo di lisciamiento	Konno & Ohmachi	
Lisciamiento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

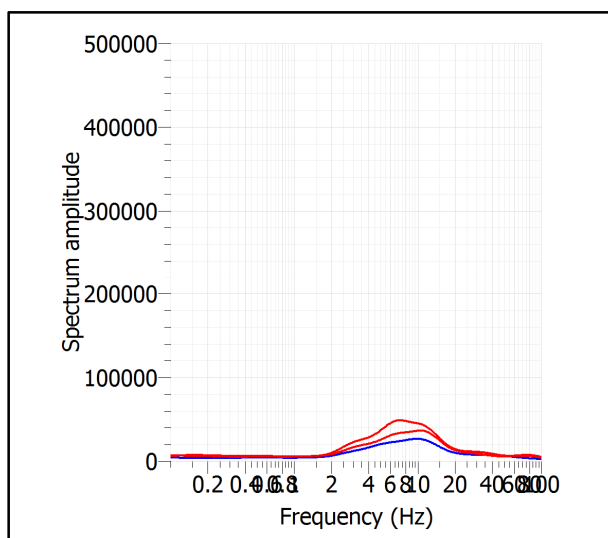
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



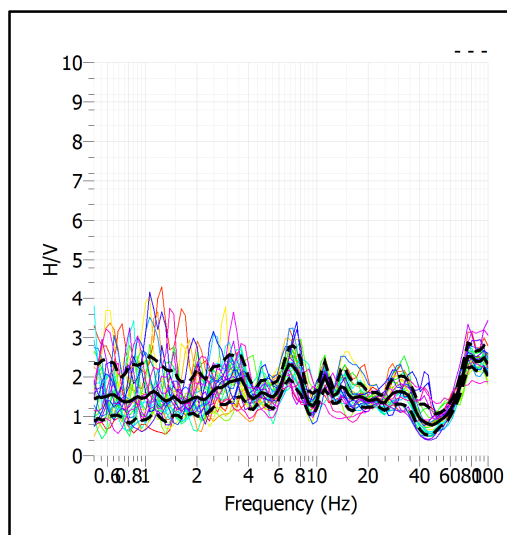
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	NO
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

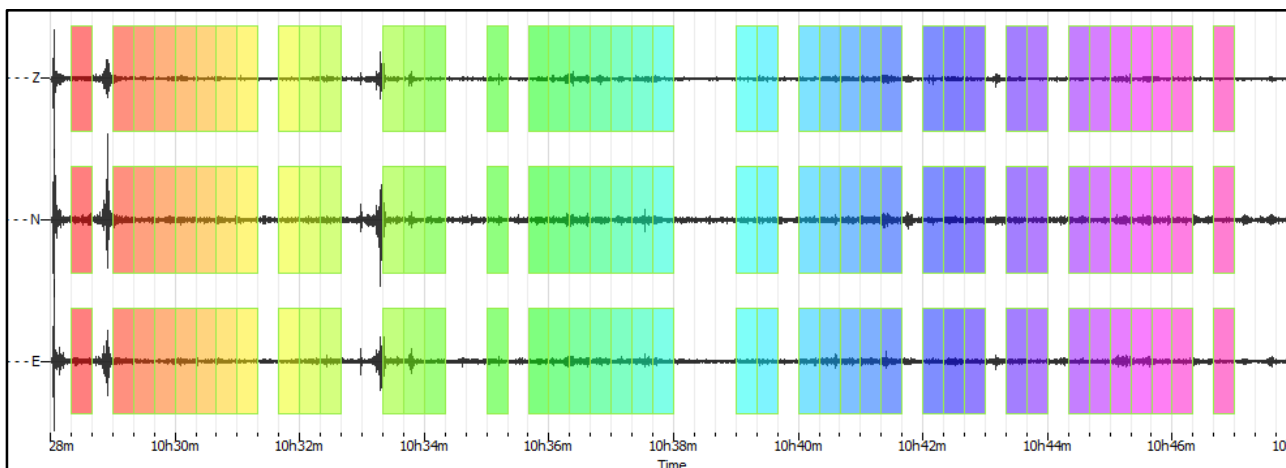
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

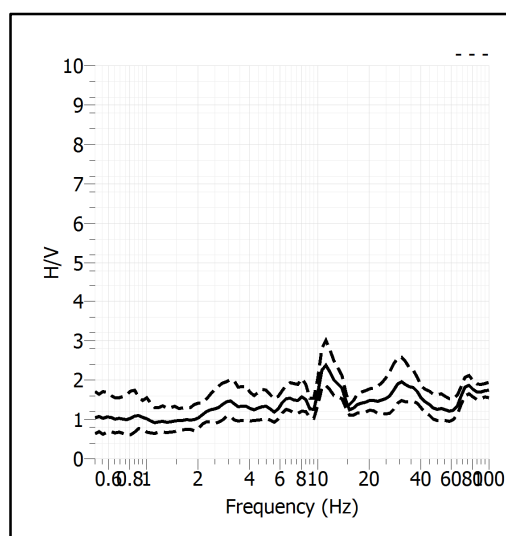
Stazione	14	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	56 (93% del tracciato)	
Tipo di lisciamento	Konno & Ohmachi	
Lisciamento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

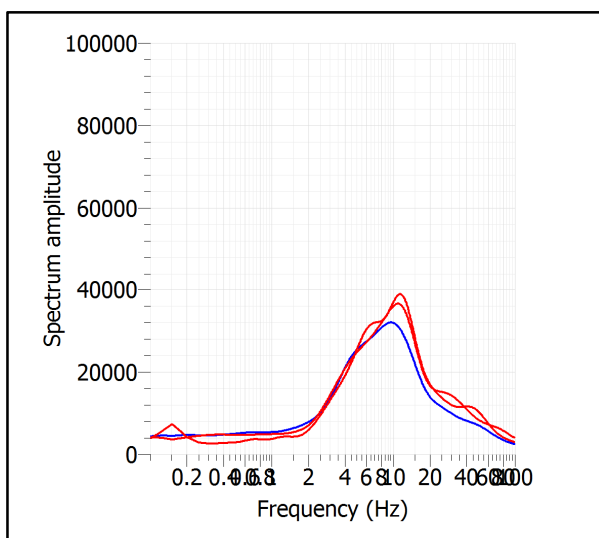
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



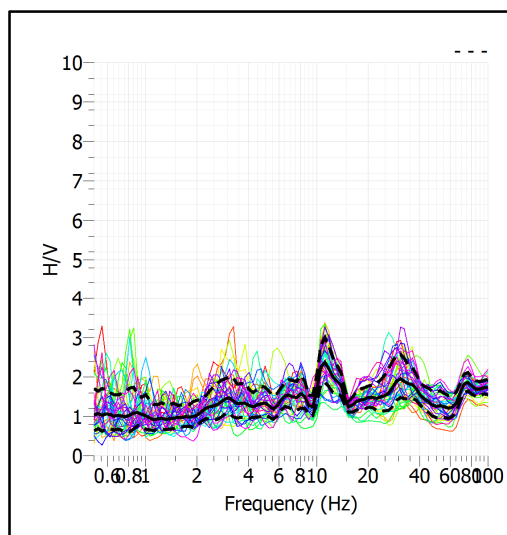
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	NO
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

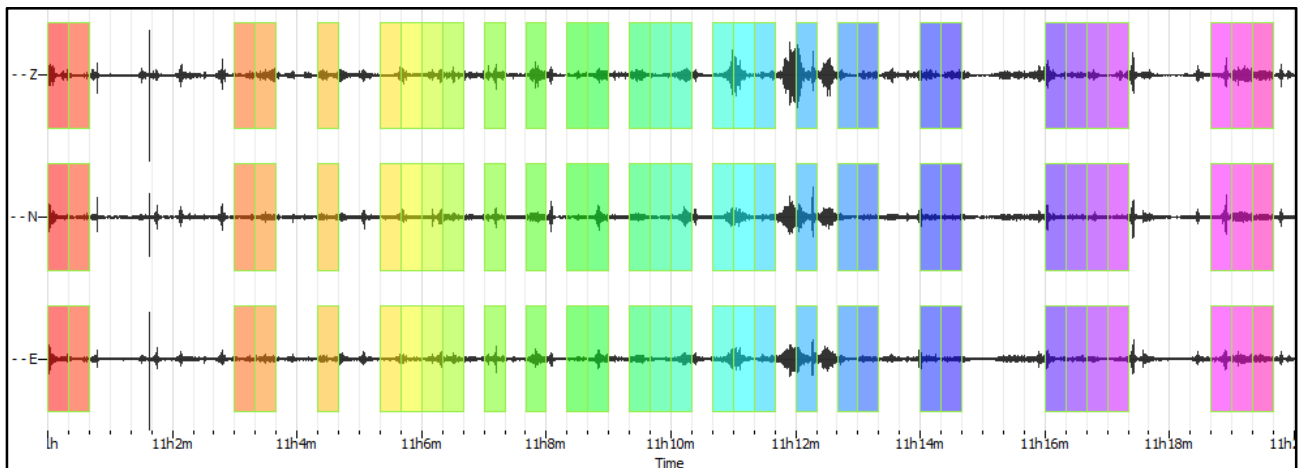
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

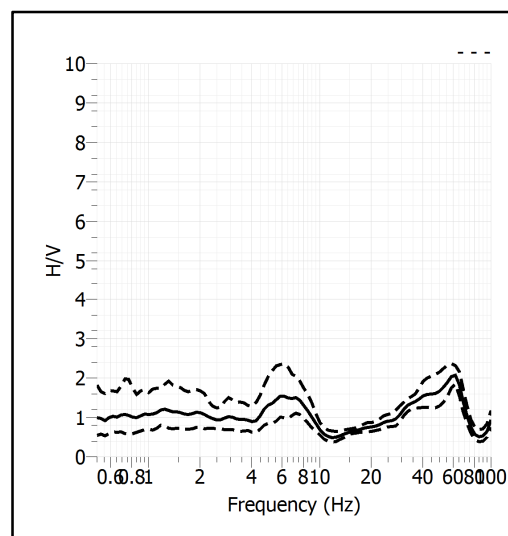
Stazione	15	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	31 (52% del tracciato)	
Tipo di lisciamento	Konno & Ohmachi	
Lisciamento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

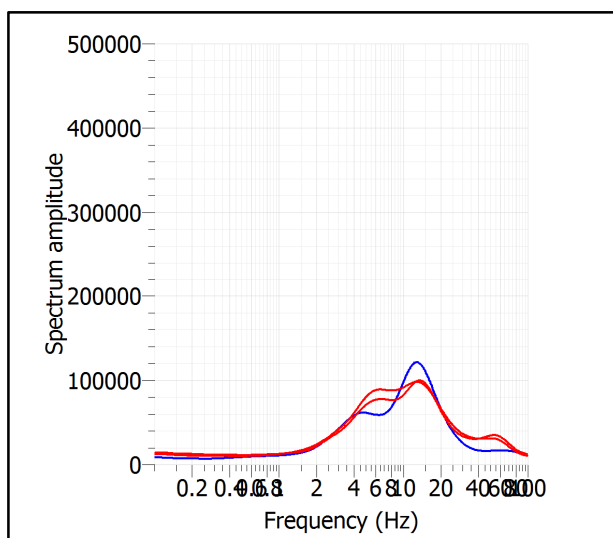
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



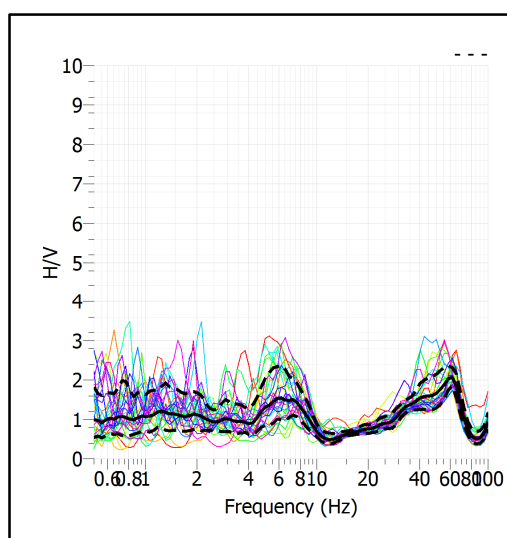
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum Lw$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	NO
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

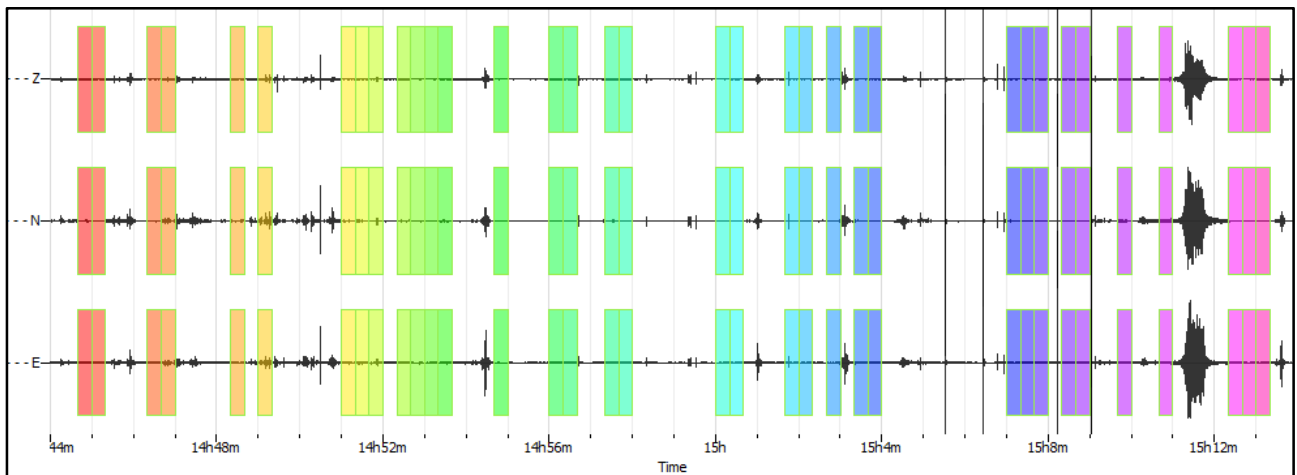
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

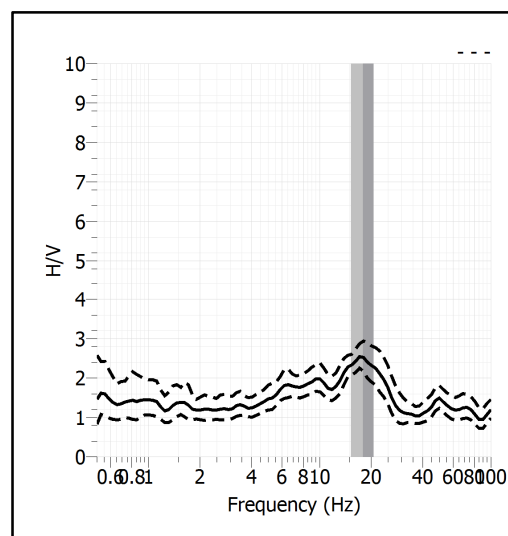
Stazione	2
Strumento	Theremino
Data acquisizione	Aprile 2021
Durata registrazione	30 minuti
Freq. Campionamento	500 Hz
Lunghezza finestre	20 s
Numero di finestre analizzate	35 (39% del tracciato)
Tipo di lisciamo	Konno & Ohmachi
Lisciamo	40
Orientamento strumentazione	0° N
Terreno di misura	Suolo naturale
Meteo	Sereno

Frequenza del picco H/V	17.95 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.53

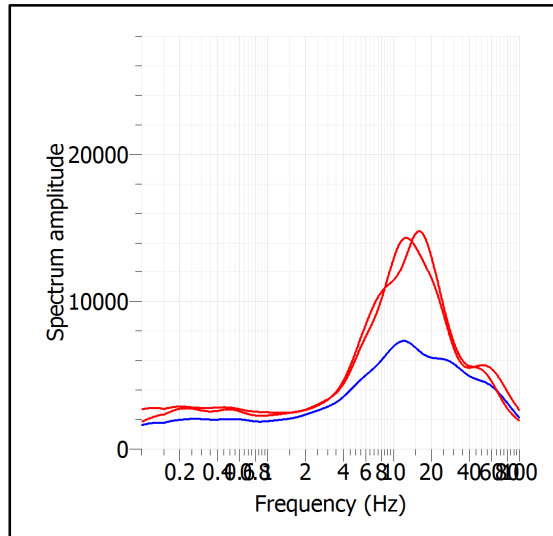
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



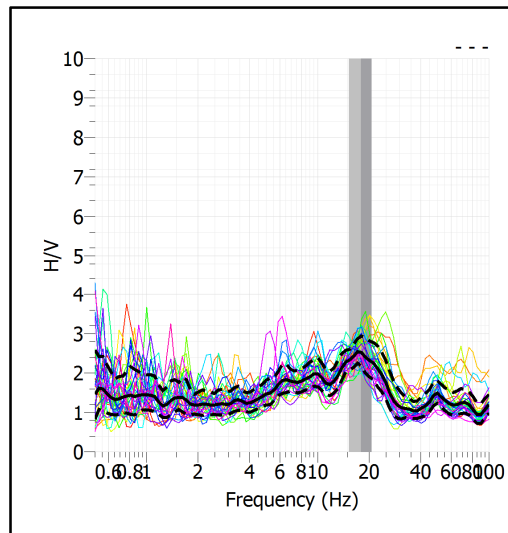
RAPPORTO SPETTRALE H/V



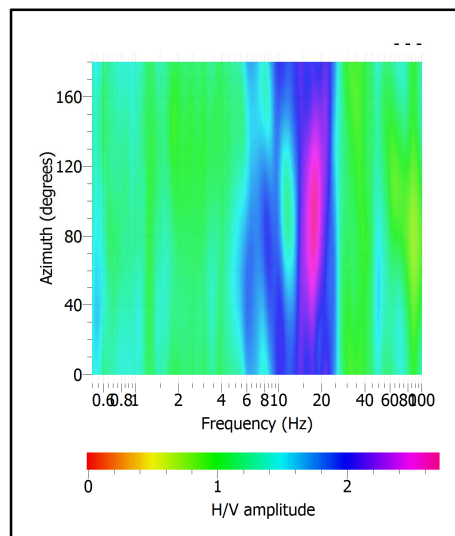
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	35	12566	17.951	2.69	2.53	1.14	BASSO
Criteri per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/L_w$			17.951	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			12566	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 27				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteri per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$						NO
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2.5277	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						OK
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			2.6912	>	0.8975	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.1437	<	1.5800	OK

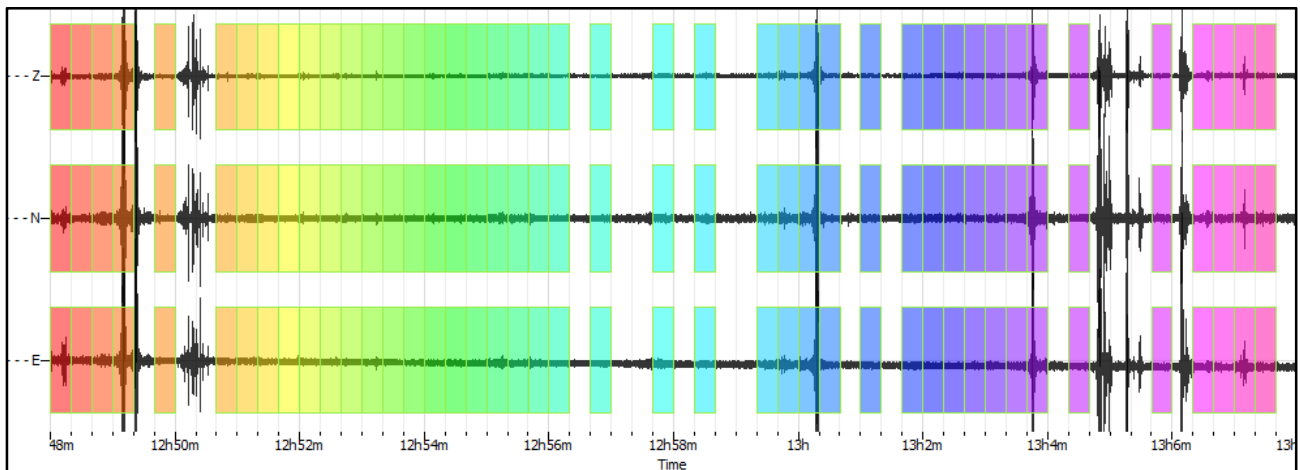
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

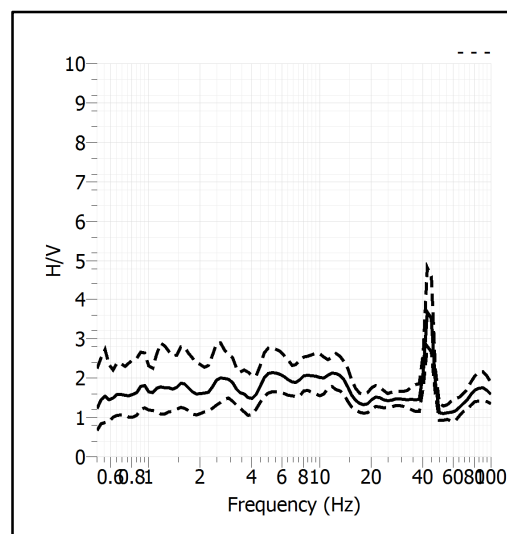
Stazione	3	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	43 (72% del tracciato)	
Tipo di lisciamiento	Konno & Ohmachi	
Lisciamiento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

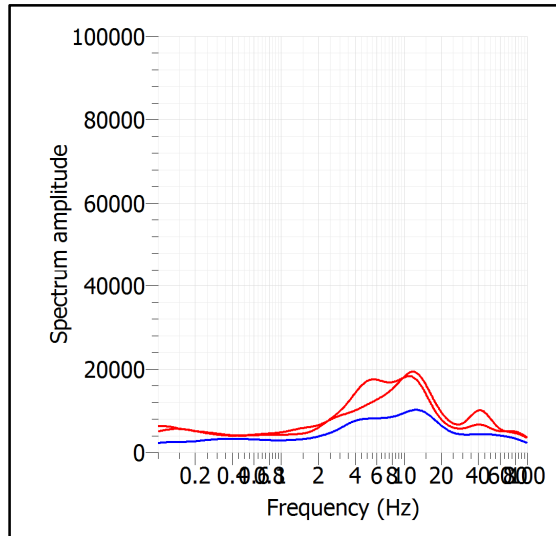
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



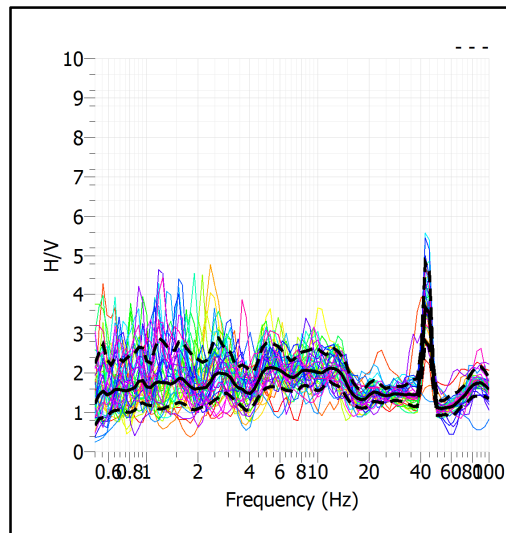
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarelo, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	NO
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

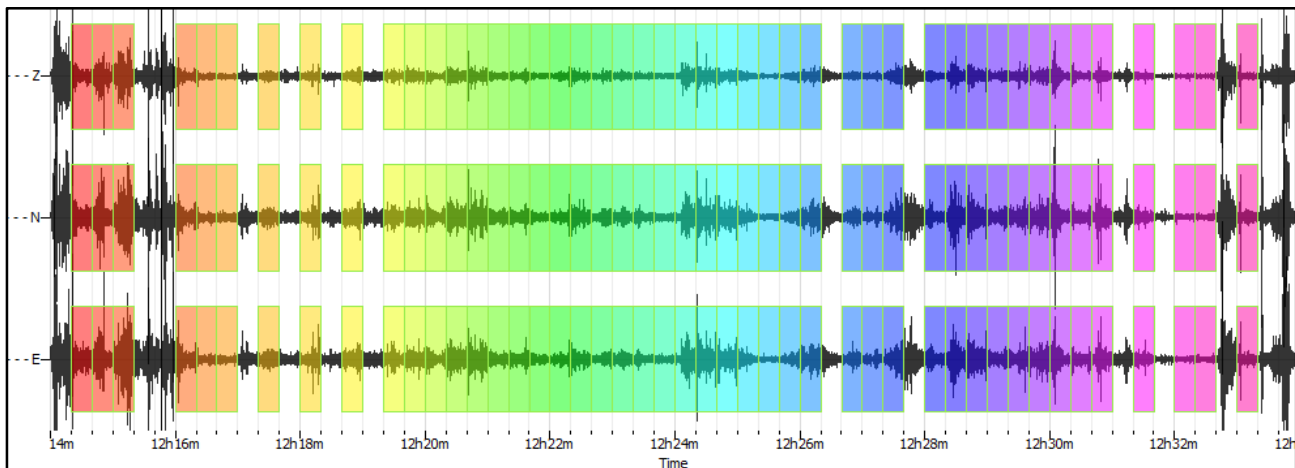
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

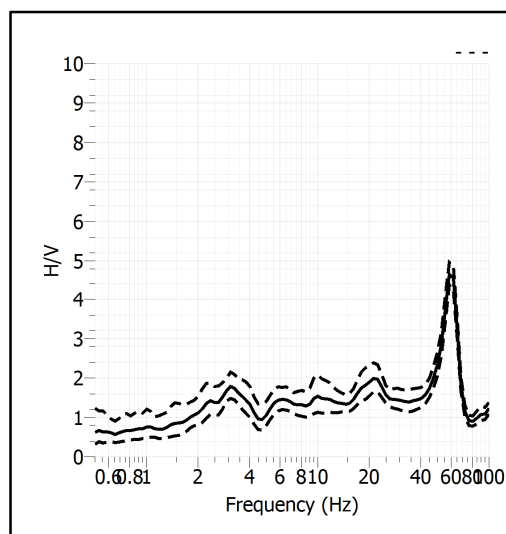
Stazione	4	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	46 (77% del tracciato)	
Tipo di lisciamento	Konno & Ohmachi	
Lisciamento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

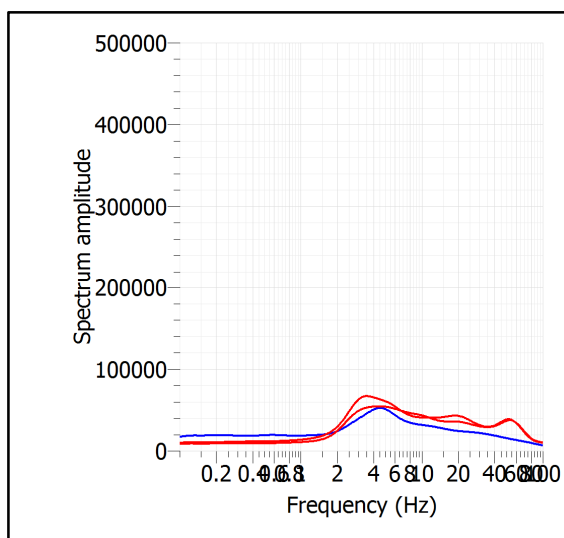
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



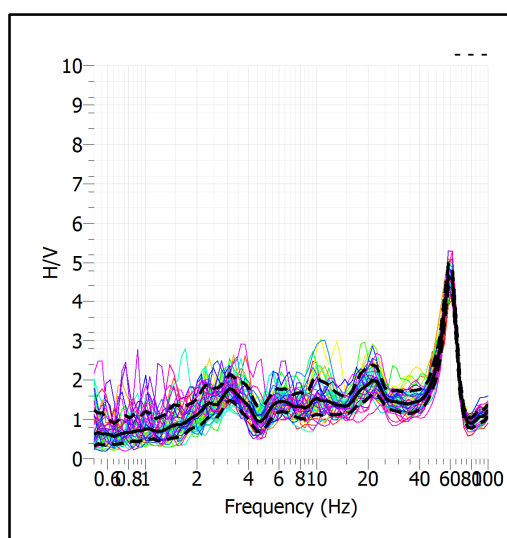
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	NO
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

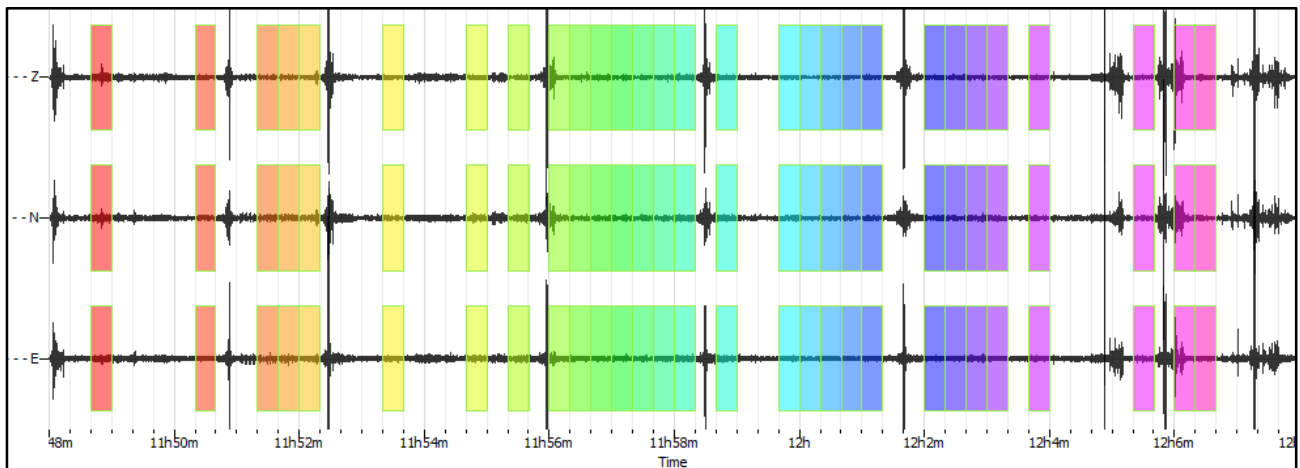
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

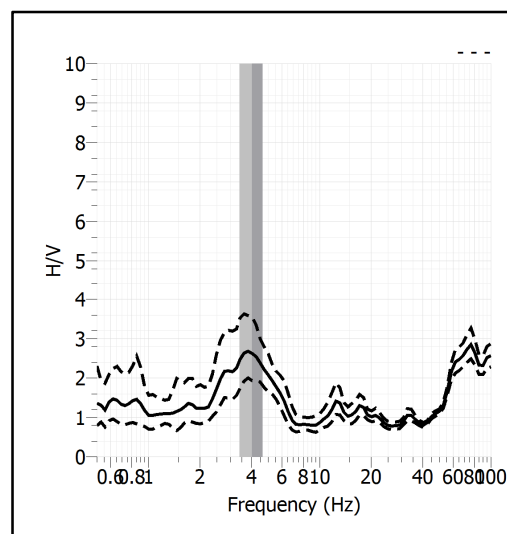
Stazione	5
Strumento	Theremino
Data acquisizione	Aprile 2021
Durata registrazione	20 minuti
Freq. Campionamento	500 Hz
Lunghezza finestre	20 s
Numero di finestre analizzate	29 (48% del tracciato)
Tipo di lisciamento	Konno & Ohmachi
Lisciamento	40
Orientamento strumentazione	0° N
Terreno di misura	Suolo naturale
Meteo	Sereno

Frequenza del picco H/V	4.03 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.62

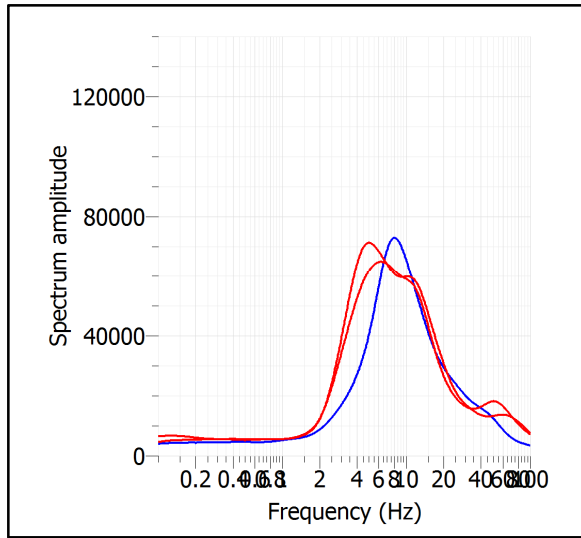
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



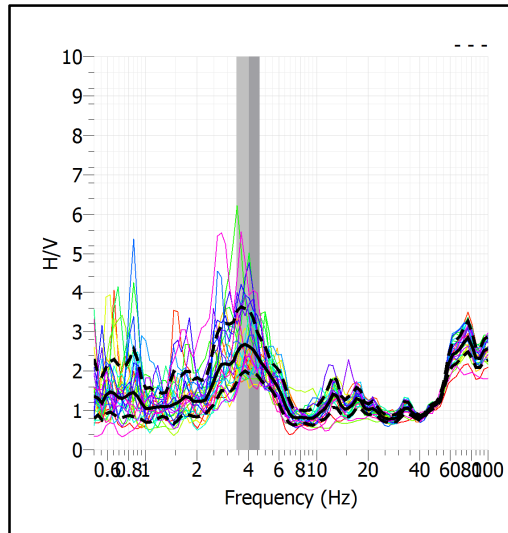
RAPPORTO SPETTRALE H/V



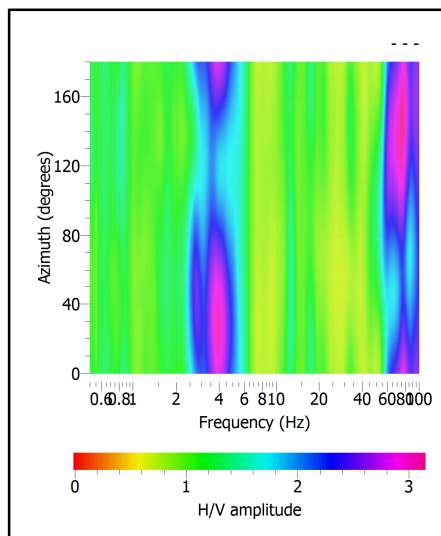
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	29	2338	4.030	0.63	2.62	1.34	BASSO
Criteri per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/L_w$			4.030	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			2338	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 26				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteri per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$						OK
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2.6209	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.6304	>	0.2015	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.3409	<	1.5800	OK

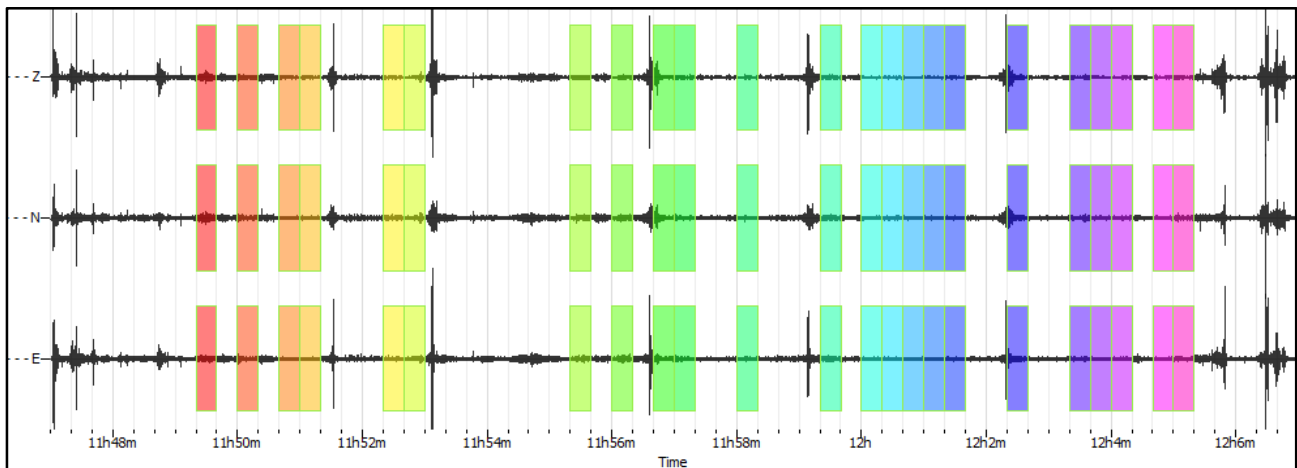
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

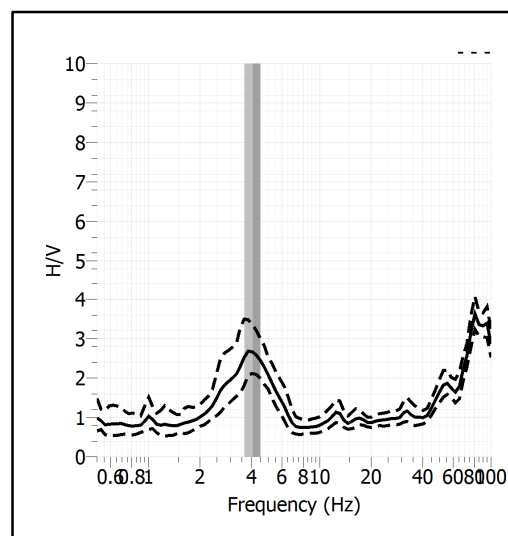
Stazione	6
Strumento	Theremino
Data acquisizione	Aprile 2021
Durata registrazione	20 minuti
Freq. Campionamento	500 Hz
Lunghezza finestre	20 s
Numero di finestre analizzate	23 (38% del tracciato)
Tipo di lisciamo	Konno & Ohmachi
Lisciamo	40
Orientamento strumentazione	0° N
Terreno di misura	Suolo naturale
Meteo	Sereno

Frequenza del picco H/V	4.08 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.66

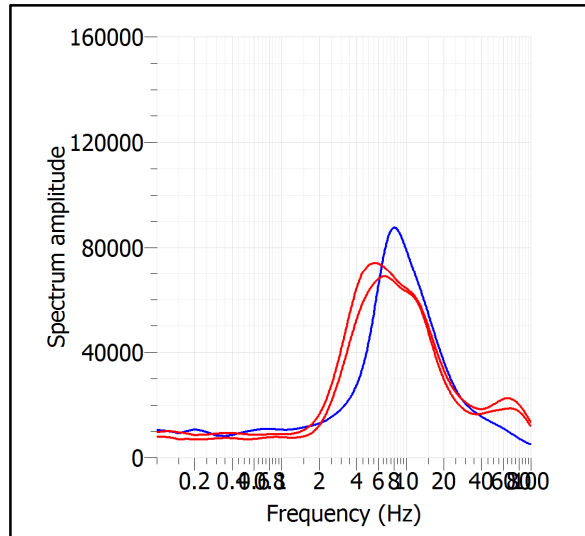
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



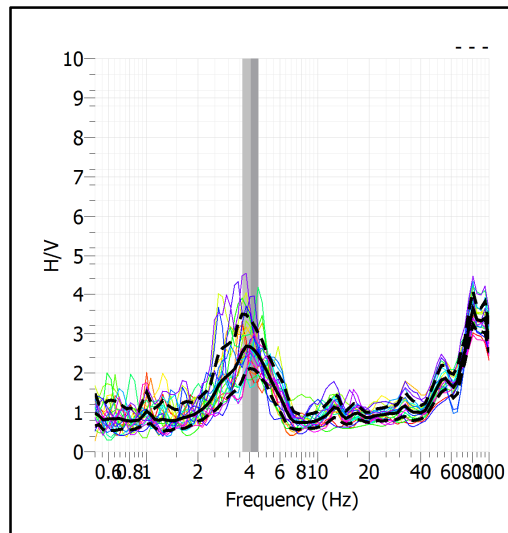
RAPPORTO SPETTRALE H/V



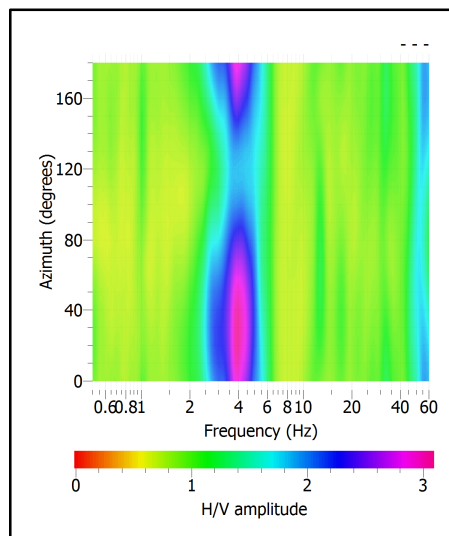
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	23	1877	4.081	0.44	2.66	1.25	BASSO
Criteria per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/L_w$			4.081	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			1877	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 27				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteria per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^* in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^*) < A_0/2$						OK
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2.6562	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.4430	>	0.2041	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.2457	<	1.5800	OK

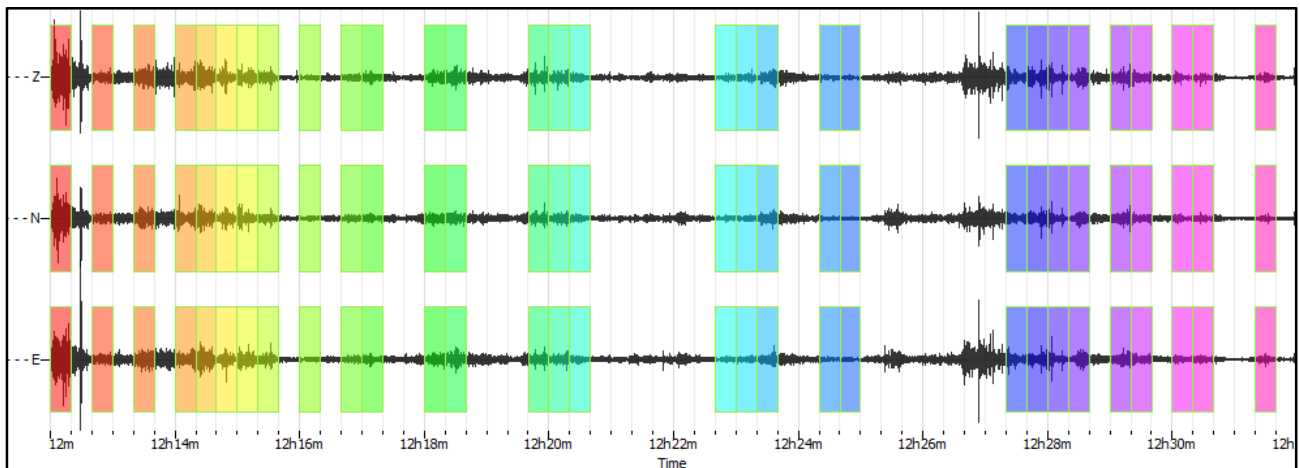
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

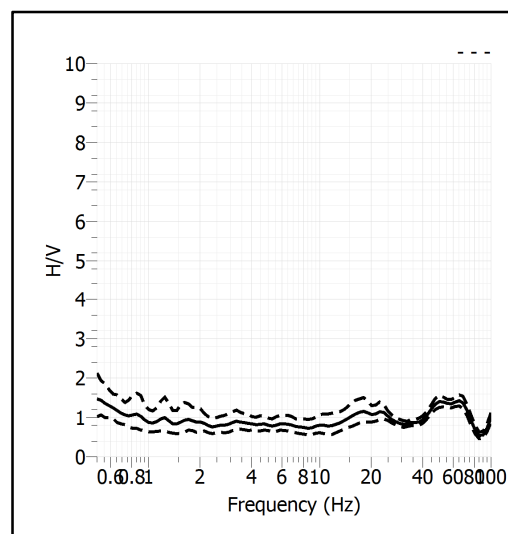
Stazione	7	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	30 (50% del tracciato)	
Tipo di lisciamiento	Konno & Ohmachi	
Lisciamiento	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	NP
Ampiezza Media della frequenza	-

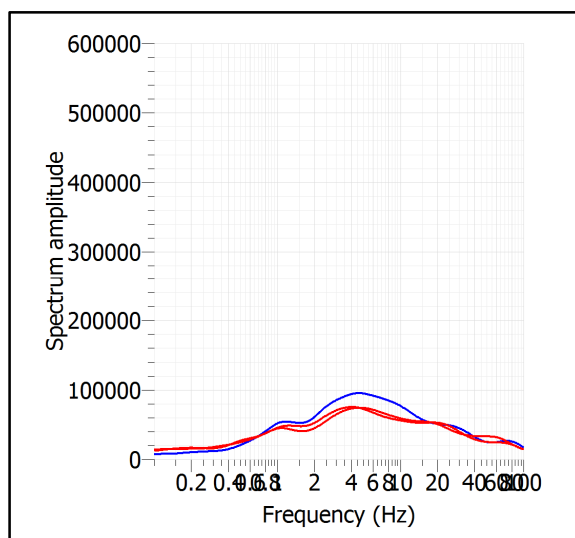
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



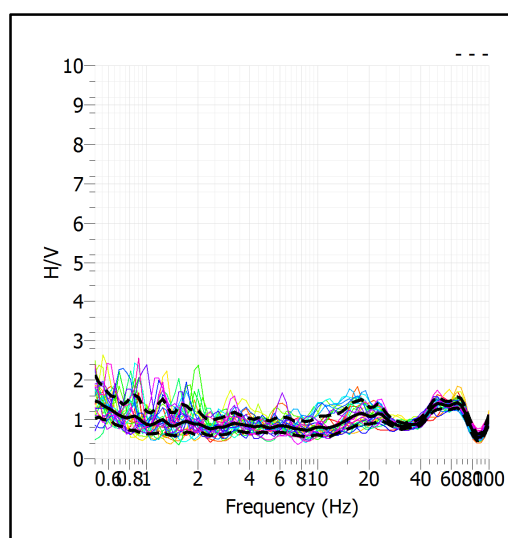
RAPPORTO SPETTRALE H/V



SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



CRITERI SESAME

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	NO
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	NO
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	NO
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	NO

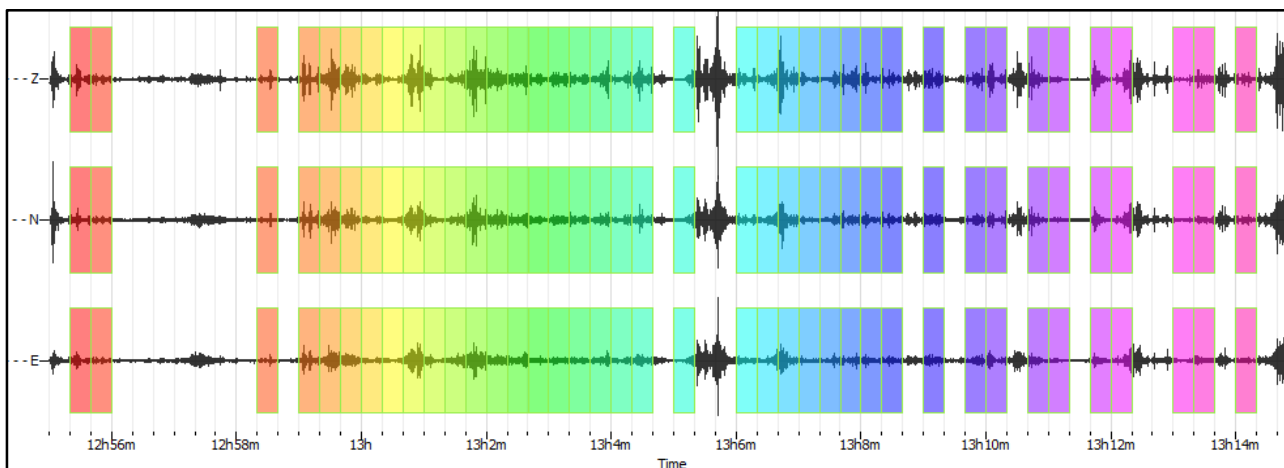
CLASSE | A2

Non ci sono picchi significativi nel range di frequenze utile (0.5 – 20 Hz)

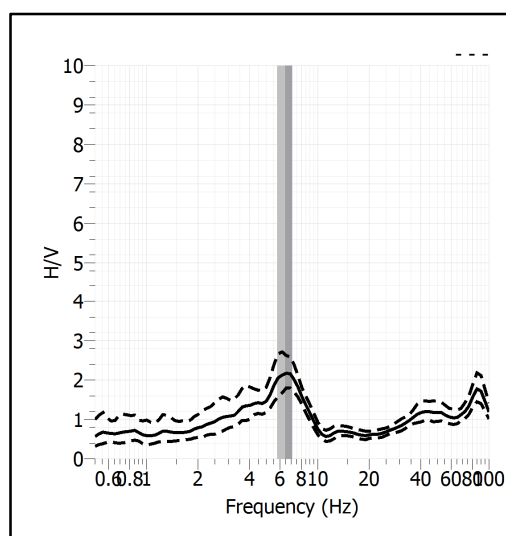
Stazione	8
Strumento	Theremino
Data acquisizione	Aprile 2021
Durata registrazione	20 minuti
Freq. Campionamento	500 Hz
Lunghezza finestre	20 s
Numero di finestre analizzate	39 (65% del tracciato)
Tipo di lisciamo	Konno & Ohmachi
Lisciamo	40
Orientamento strumentazione	0° N
Terreno di misura	Suolo naturale
Meteo	Sereno

Frequenza del picco H/V	6.46 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.16

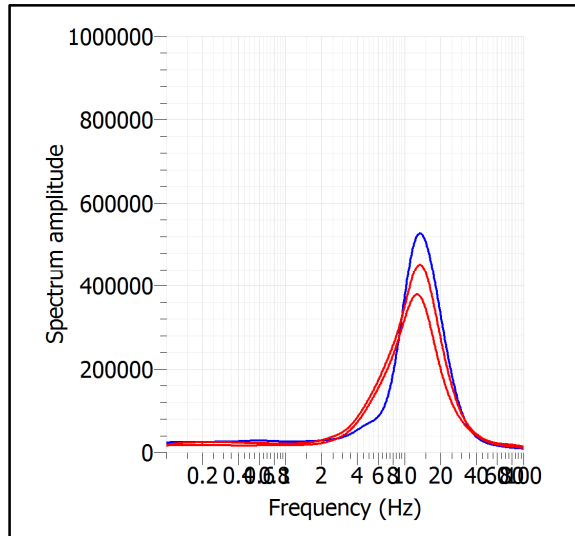
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



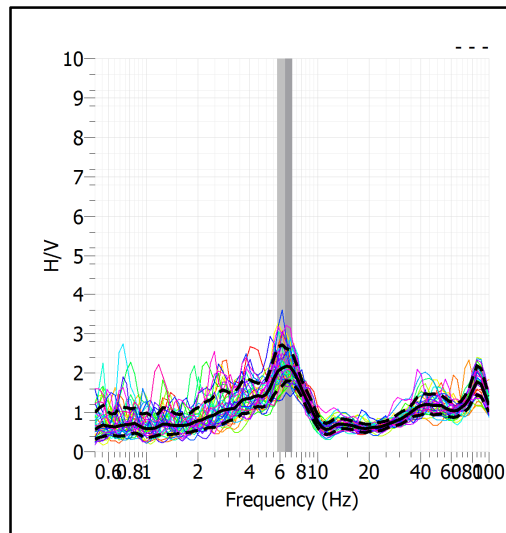
RAPPORTO SPETTRALE H/V



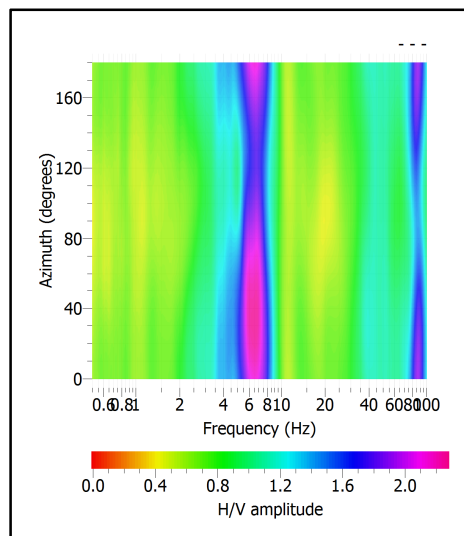
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	39	5039	6.460	0.66	2.16	1.23	BASSO
Criteria per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/L_w$			6.460	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			5039	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 27				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteria per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$						OK
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2.1635	>	2	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.6557	>	0.3230	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.2332	<	1.5800	OK

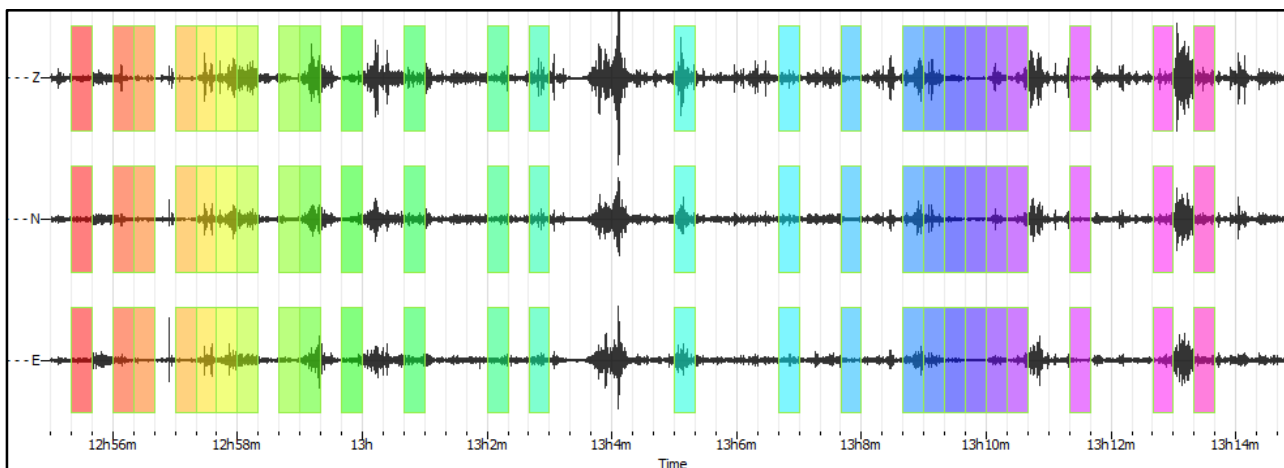
ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

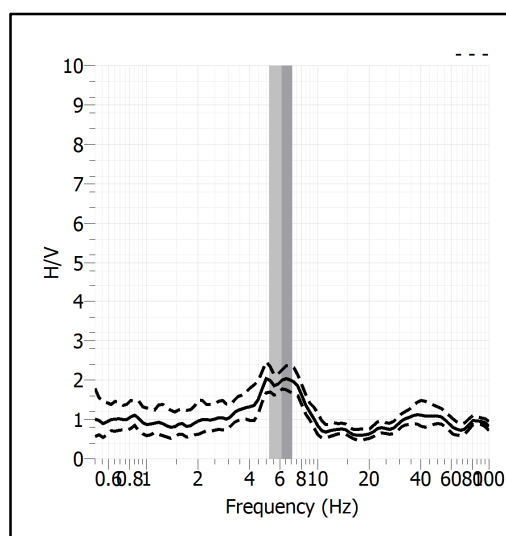
Stazione	9	
Strumento	Theremino	
Data acquisizione	Aprile 2021	
Durata registrazione	20 minuti	
Freq. Campionamento	500 Hz	
Lunghezza finestre	20 s	
Numero di finestre analizzate	25 (42% del tracciato)	
Tipo di lisciamo	Konno & Ohmachi	
Lisciamo	40	
Orientamento strumentazione	0° N	
Terreno di misura	Suolo naturale	
Meteo	Sereno	

Frequenza del picco H/V	6.17 Hz
Ampiezza Media della frequenza	2.01

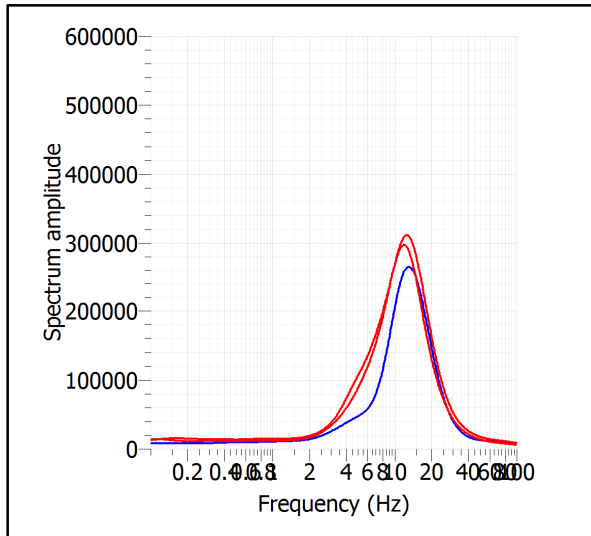
ACQUISIZIONE E FINESTRE DI ELABORAZIONE



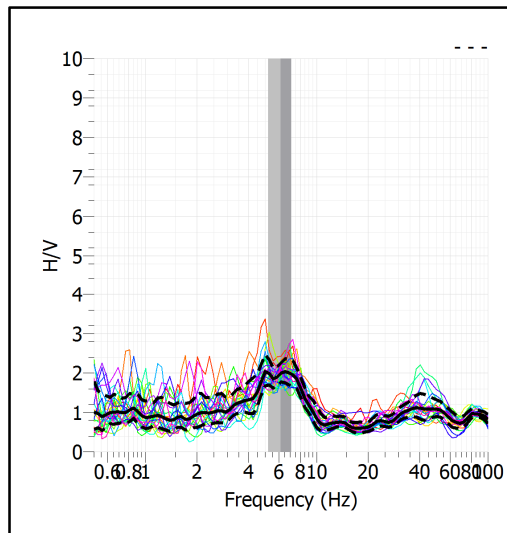
RAPPORTO SPETTRALE H/V



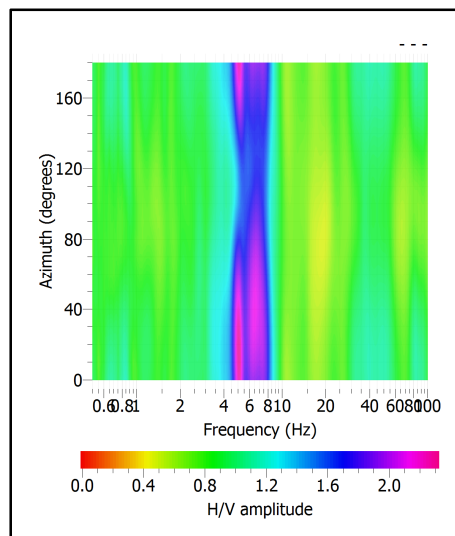
SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI



SERIE TEMPORALE H/V



DIREZIONALITA' H/V



CRITERI SESAME

Window length l_w [s]	Number of windows n_w	Number of significant cycles n_c	Frequency statistics from individual windows				Grado del contrasto di impedenza sismica
			f_0 [Hz]	σ_f [Hz]	A_0	$\sigma_A(f_0)$	
20.00	25	3087	6.173	0.95	2.00	1.13	BASSO
Criteria per una curva H/V affidabile							
[Tutti i tre requisiti dovrebbero essere soddisfatti]							
$f_0 > 10/L_w$			6.173	>	0.500		OK
$n_c(f_0) > 200$			3087	>	200		OK
$\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$			Superato 0 volte su 26				OK
$\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$							OK
Criteria per un picco H/V chiaro							
[Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]							
Amplitude conditions	Esiste f^- in $[f_0/4, f_0]$ $A_{H/V}(f^-) < A_0/2$						OK
	Esiste f^+ in $[f_0, 4f_0]$ $A_{H/V}(f^+) < A_0/2$						OK
	$A_0 > 2$			2	<	2.01	OK
Stability conditions	$f_{\text{picco}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$						NO
	$\sigma_f < \varepsilon(f_0)$			0.9516	>	0.3087	OK
	$\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$			1.1285	<	1.5800	OK

ULTERIORI CRITERI (D.Albarello, S.Castellaro, 2011)		
DURATA	Durata minima registrazione 20 minuti	SI
STAZIONARIETA'	% ($\sum L_w$ /durata registrazione) almeno 30%	SI
ISOTROPIA	Le variazioni azimutali di ampiezza non superano il 30% del massimo	SI
ASSENZA DISTURBI	Non ci sono indizi di rumore elettromagnetico nella banda di frequenza di interesse	SI
PLAUSIBILITA' FISICA	I massimi sono caratterizzati da una diminuzione localizzata di ampiezza dello spettro verticale	SI
ROBUSTEZZA STATISTICA	Verificati i tre Criteri SESAME per curva affidabile	SI

CLASSE | A1

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH – MASW/ESAC**

SR_1: SISMICA A RIFRAZIONE P-SH

Easy Refract

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.

La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

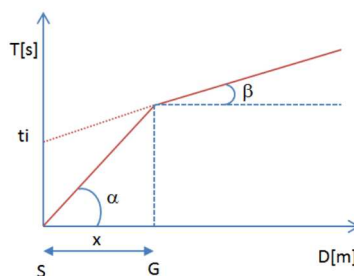
$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

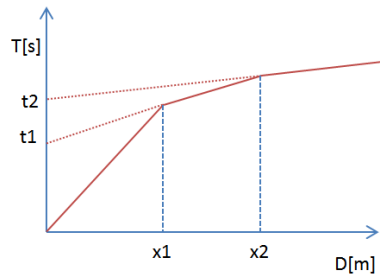
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

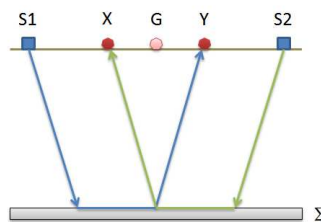


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

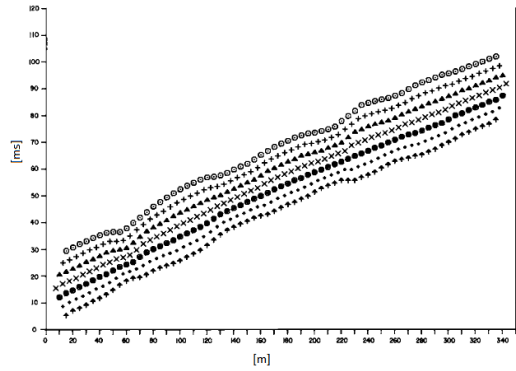
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare **la funzione velocità** secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



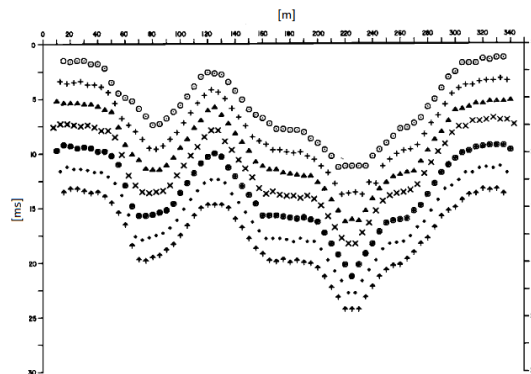
dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_V è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_V viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.



Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

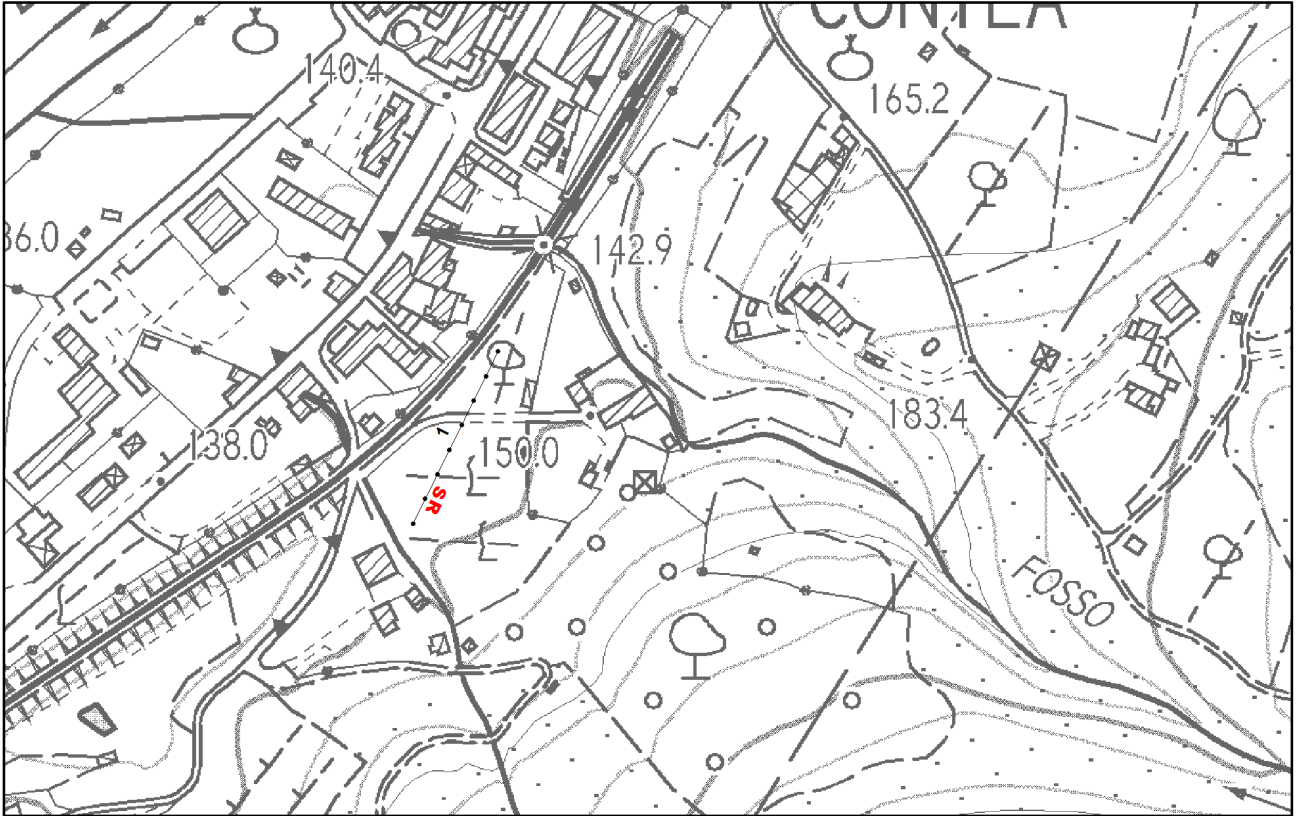
Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

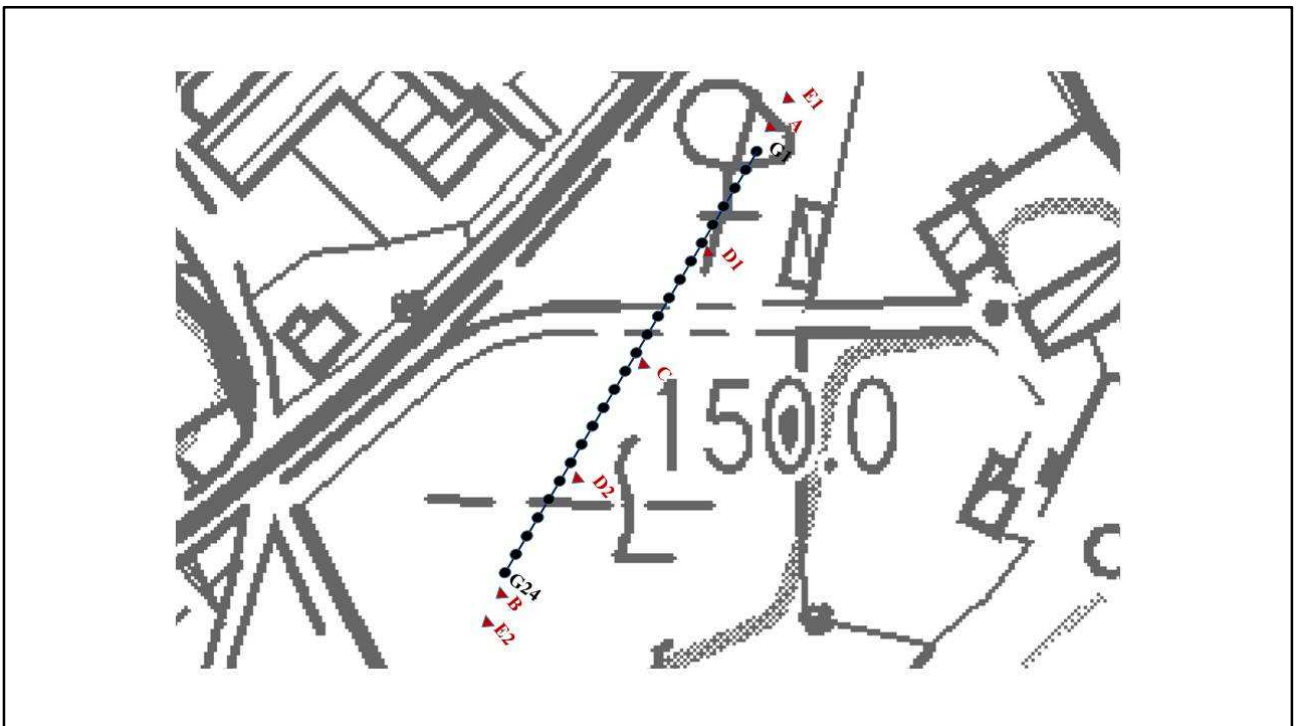
h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°

Planimetria Scala 1:5000



Planimetria Scala 1:1000



Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24

Intervallo (m): 4 m

Lunghezza Stendimento (m): 92 m

Quota (m.s.l.m.): 150

Punti di energizzazione

	E1 Esterno SX	A Estremo SX	D1 Intermedio SX	C Centrale	D2 Intermedio DX	B Estremo DX	E2 Esterno DX
Posizione da Geofono G1 (m)	-4	-2.0	22	46	70	94	96

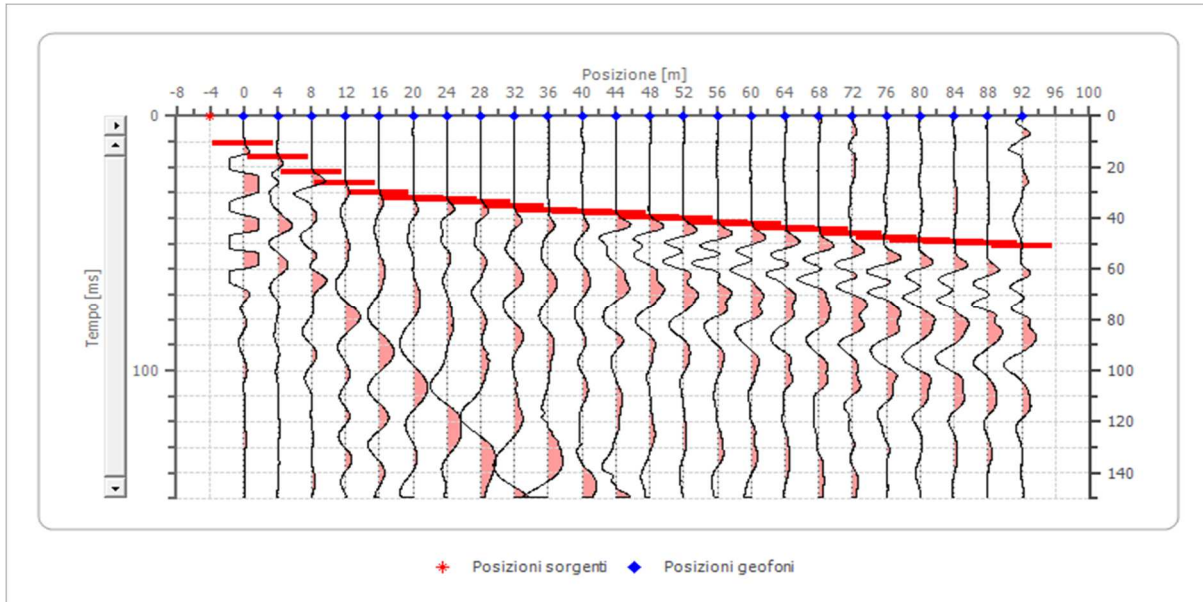
Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	4.0	0.6
3	8.0	1.1
4	12.0	1.7
5	16.0	2.3
6	20.0	2.8
7	24.0	3.4
8	28.0	3.9
9	32.0	4.5
10	36.0	5.0
11	40.0	5.6
12	44.0	6.2
13	48.0	6.8
14	52.0	7.3
15	56.0	7.9
16	60.0	8.5
17	64.0	9.0
18	68.0	9.6
19	72.0	10.2
20	76.0	10.7
21	80.0	11.3
22	84.0	11.8
23	88.0	12.4
24	92.0	13.0

Dati battute – ONDE P

Battuta 1

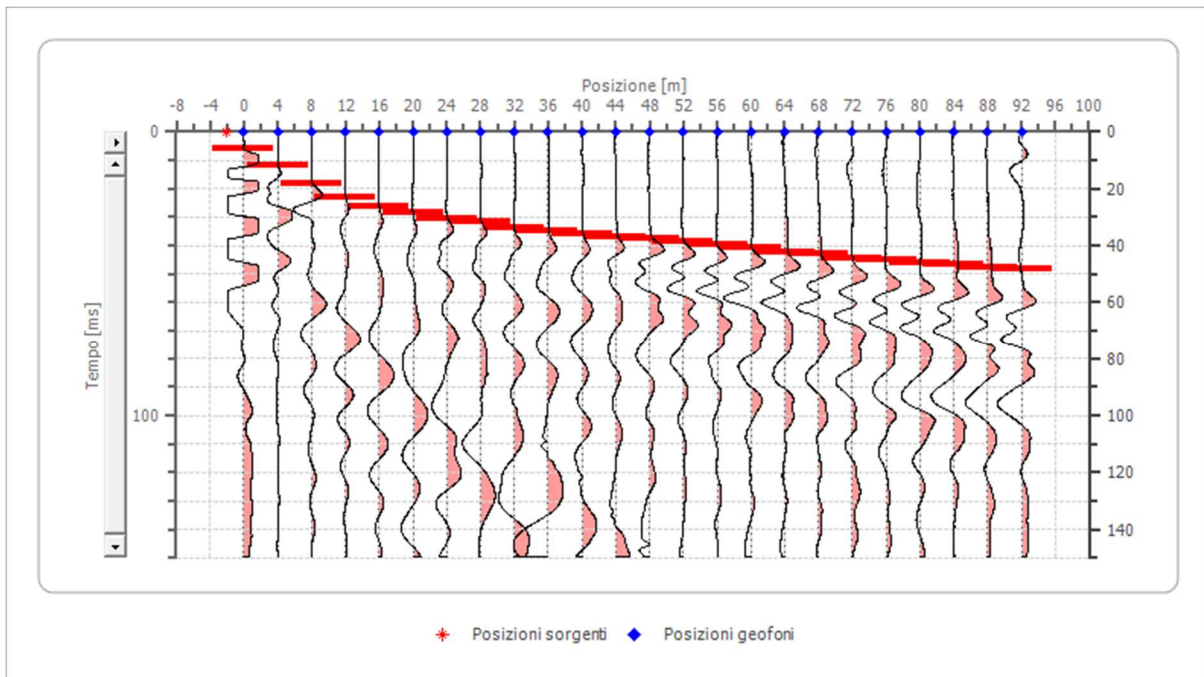
Posizione sorgente X -4 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	10.7143
4.0	16.0714
8.0	21.9643
12.0	26.2500
16.0	30.0000
20.0	32.1429
24.0	32.6786
28.0	33.7500
32.0	35.3571
36.0	36.9643
40.0	37.5000
44.0	38.0357
48.0	39.6429
52.0	40.1786
56.0	41.7857
60.0	42.3214
64.0	43.9286
68.0	44.4643
72.0	46.0714
76.0	47.6786
80.0	48.7500
84.0	49.2857
88.0	49.8214
92.0	50.8929

Battuta 2

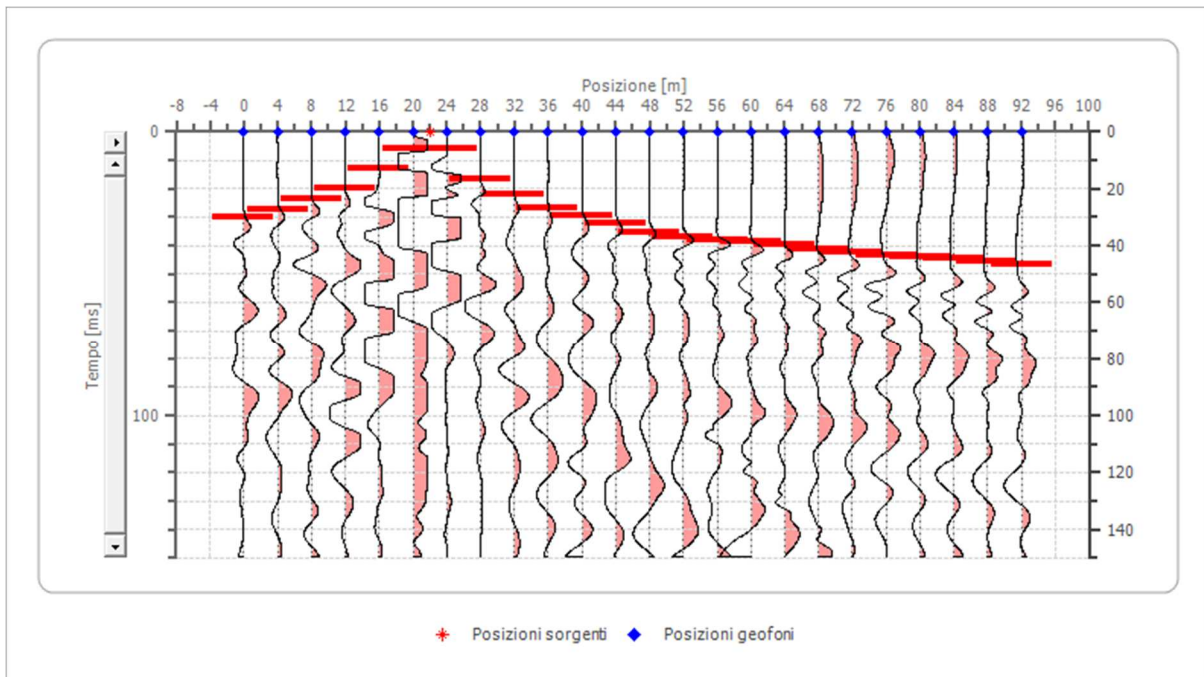
Posizione sorgente X -2 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	5.8929
4.0	11.7857
8.0	18.2143
12.0	23.0357
16.0	26.2500
20.0	28.3929
24.0	30.5357
28.0	31.6071
32.0	33.7500
36.0	34.8214
40.0	35.8929
44.0	36.9643
48.0	37.5000
52.0	38.5714
56.0	39.6429
60.0	40.7143
64.0	42.3214
68.0	42.8571
72.0	44.4643
76.0	45.0000
80.0	46.0714
84.0	46.6071
88.0	47.6786
92.0	48.2143

Battuta 3

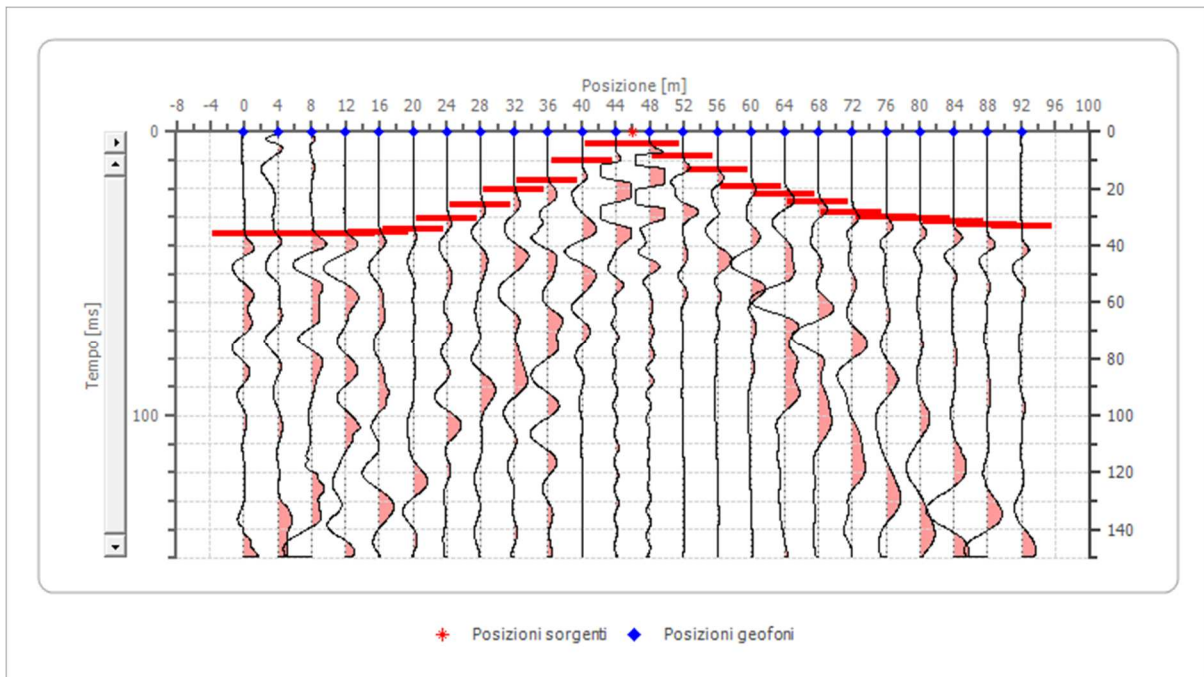
Posizione sorgente X 22 [m]
 Posizione sorgente Z 3 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	30.0000
4.0	27.3214
8.0	23.5714
12.0	19.8214
16.0	12.8571
20.0	5.8929
24.0	5.8929
28.0	16.6071
32.0	21.9643
36.0	26.7857
40.0	29.4643
44.0	32.1429
48.0	35.3571
52.0	36.9643
56.0	38.0357
60.0	38.5714
64.0	39.6429
68.0	41.2500
72.0	42.3214
76.0	43.3929
80.0	43.9286
84.0	44.4643
88.0	45.5357
92.0	46.6071

Battuta 4

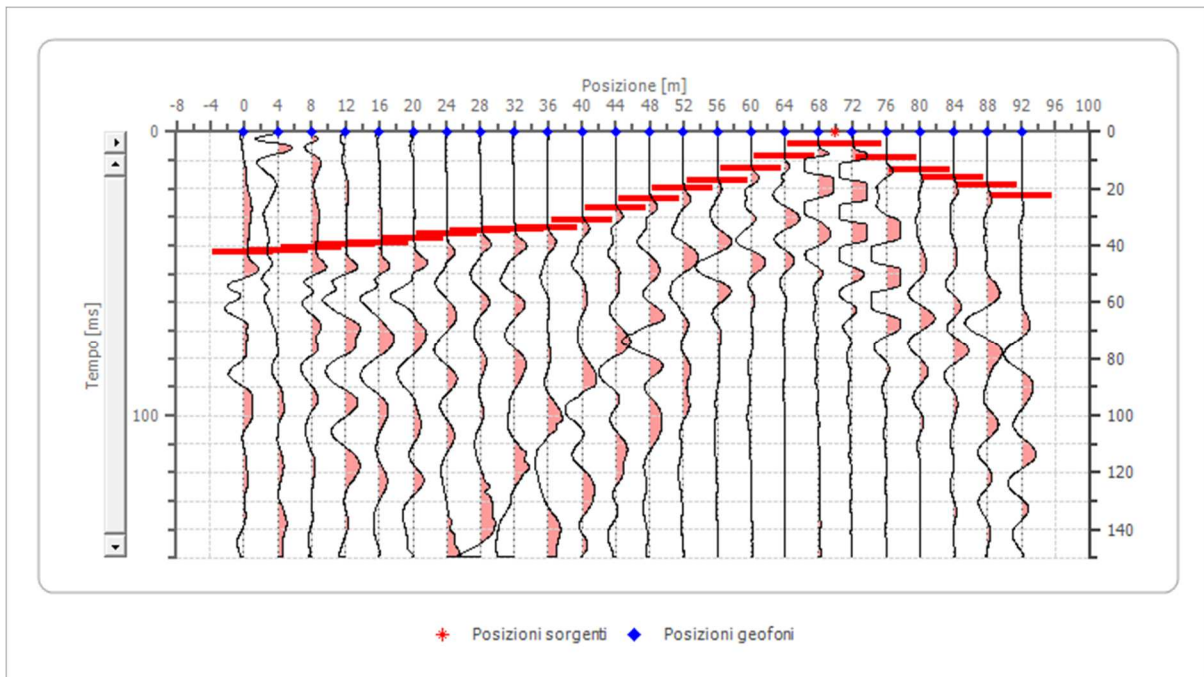
Posizione sorgente X 46 [m]
 Posizione sorgente Z 7 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	35.8929
4.0	35.8929
8.0	35.8929
12.0	35.8929
16.0	35.3571
20.0	34.2857
24.0	30.5357
28.0	25.7143
32.0	20.3571
36.0	17.1429
40.0	10.1786
44.0	4.2857
48.0	4.2857
52.0	8.5714
56.0	13.3929
60.0	19.2857
64.0	21.9643
68.0	24.6429
72.0	28.3929
76.0	30.0000
80.0	30.5357
84.0	31.6071
88.0	32.6786
92.0	33.2143

Battuta 5

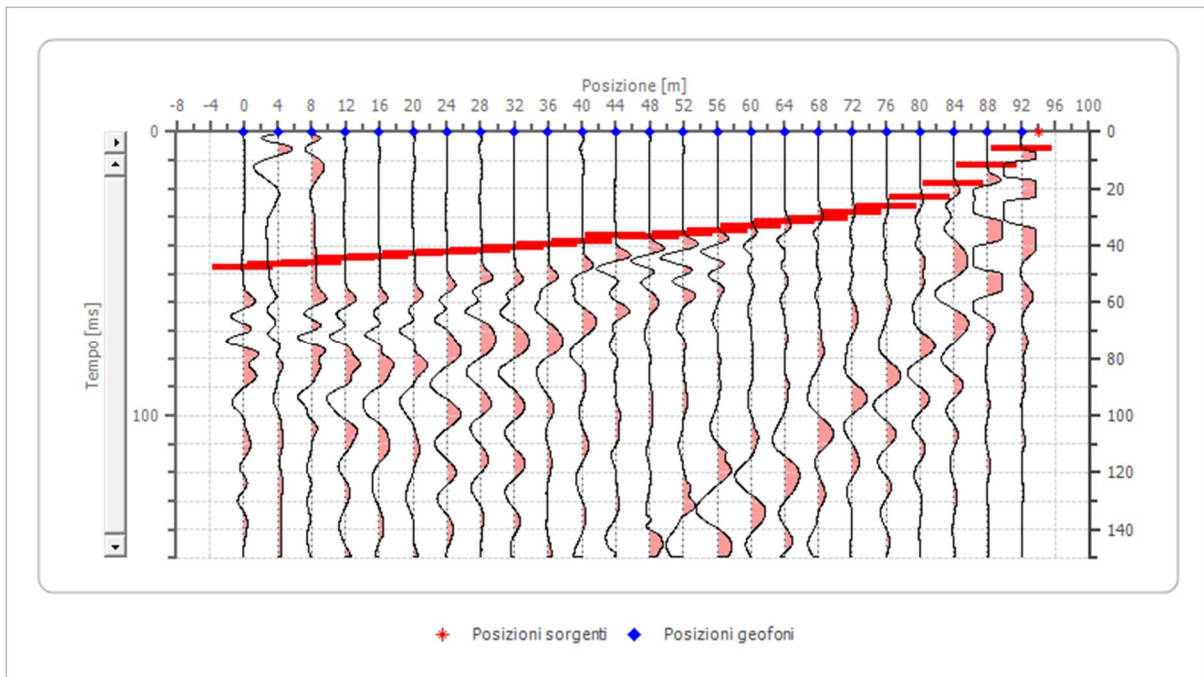
Posizione sorgente X 70 [m]
 Posizione sorgente Z 10 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	42.3214
4.0	41.7857
8.0	40.7143
12.0	39.6429
16.0	39.1071
20.0	37.5000
24.0	35.8929
28.0	34.8214
32.0	34.2857
36.0	33.7500
40.0	31.0714
44.0	26.7857
48.0	23.5714
52.0	19.8214
56.0	17.1429
60.0	12.8571
64.0	8.5714
68.0	4.2857
72.0	4.2857
76.0	9.1071
80.0	13.3929
84.0	16.0714
88.0	18.7500
92.0	22.5000

Battuta 6

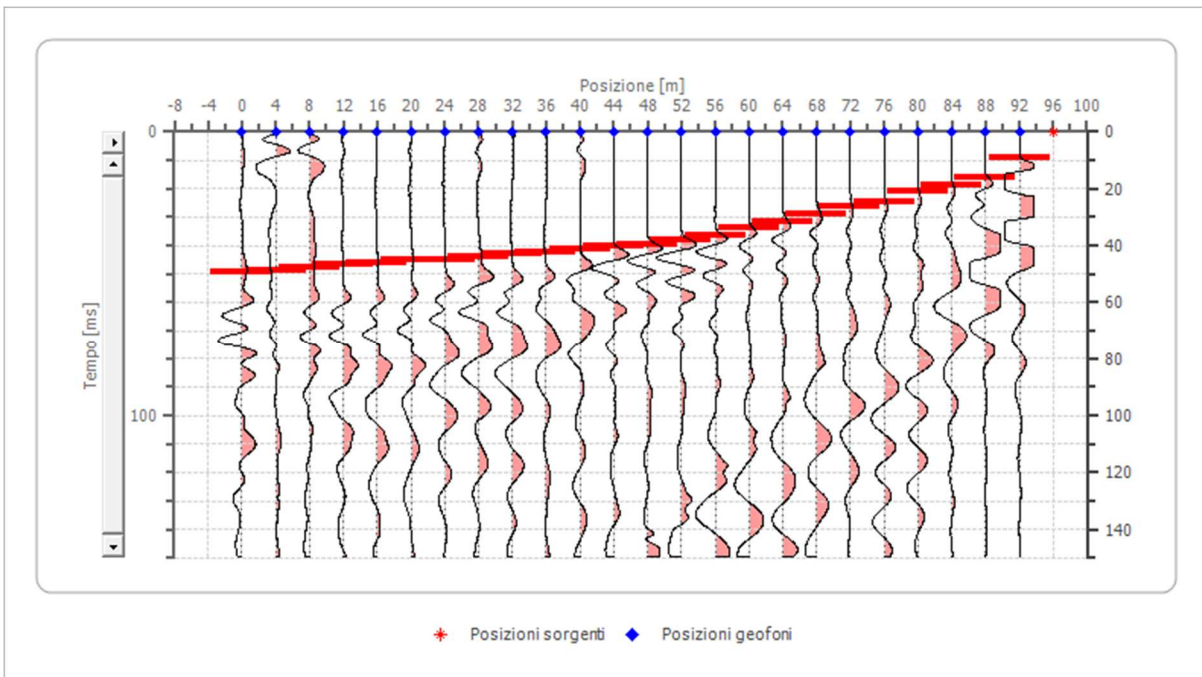
Posizione sorgente X 94 [m]
 Posizione sorgente Z 13 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	47.6786
4.0	46.6071
8.0	46.0714
12.0	44.4643
16.0	43.9286
20.0	42.8571
24.0	42.3214
28.0	41.7857
32.0	40.7143
36.0	39.6429
40.0	38.5714
44.0	36.4286
48.0	36.9643
52.0	35.8929
56.0	34.8214
60.0	33.2143
64.0	31.6071
68.0	30.5357
72.0	28.3929
76.0	26.2500
80.0	23.0357
84.0	18.2143
88.0	11.7857
92.0	5.8929

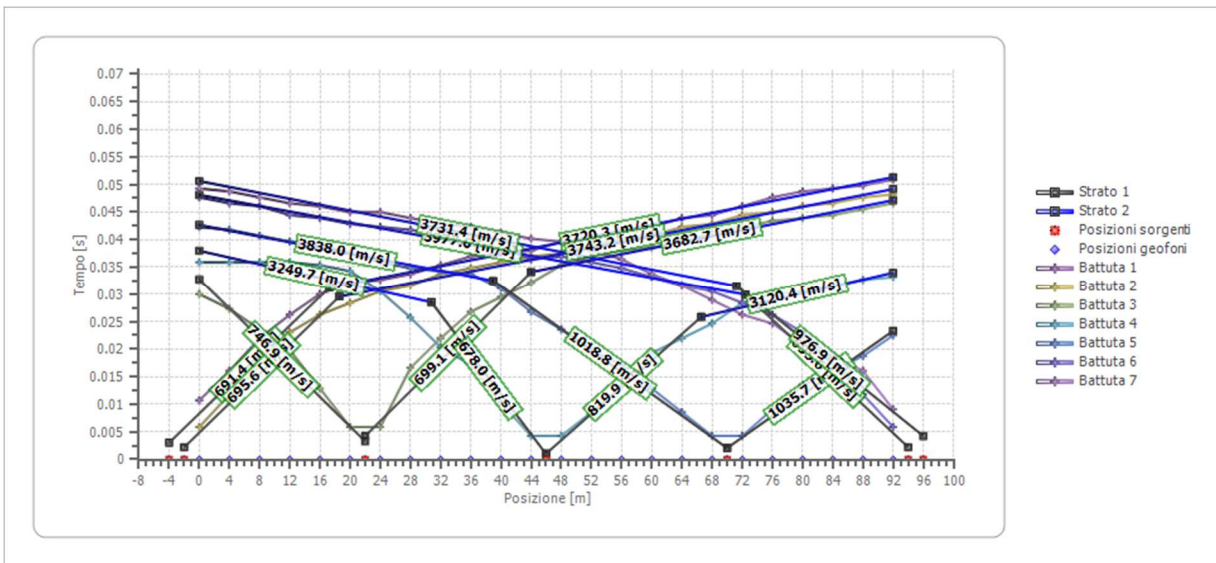
Battuta 7

Posizione sorgente X 96 [m]
 Posizione sorgente Z 13 [m]

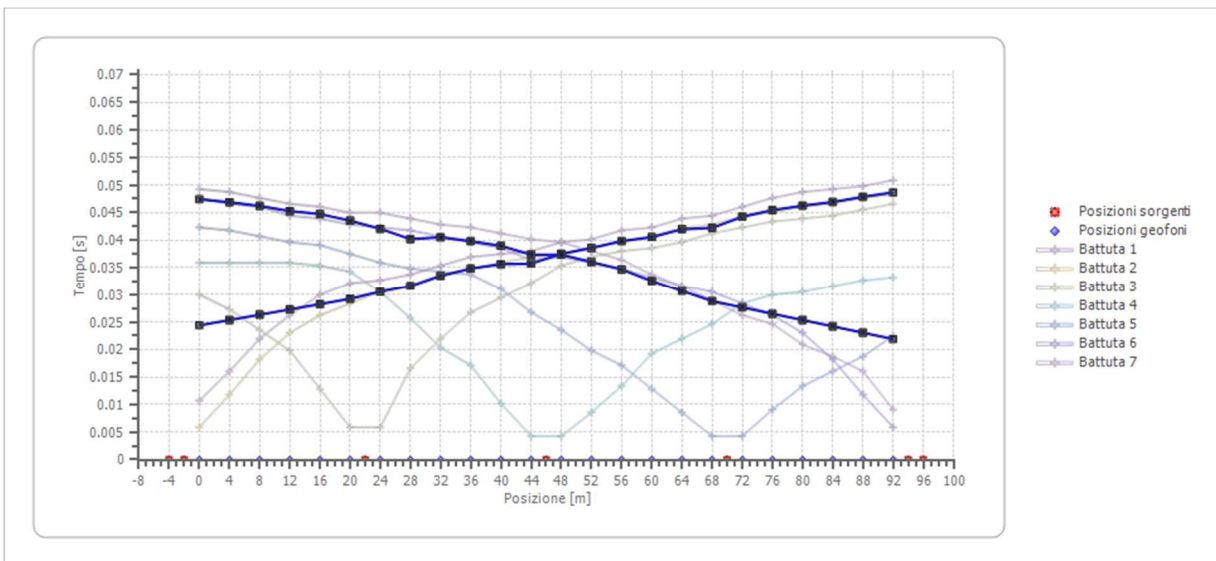


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	49.2857
4.0	48.7500
8.0	47.6786
12.0	46.6071
16.0	46.0714
20.0	45.0000
24.0	45.0000
28.0	43.9286
32.0	42.8571
36.0	42.3214
40.0	41.2500
44.0	40.1786
48.0	39.6429
52.0	38.0357
56.0	36.4286
60.0	33.7500
64.0	31.6071
68.0	28.9286
72.0	26.2500
76.0	24.6429
80.0	20.8929
84.0	18.7500
88.0	16.0714
92.0	9.1071

Dromocrone



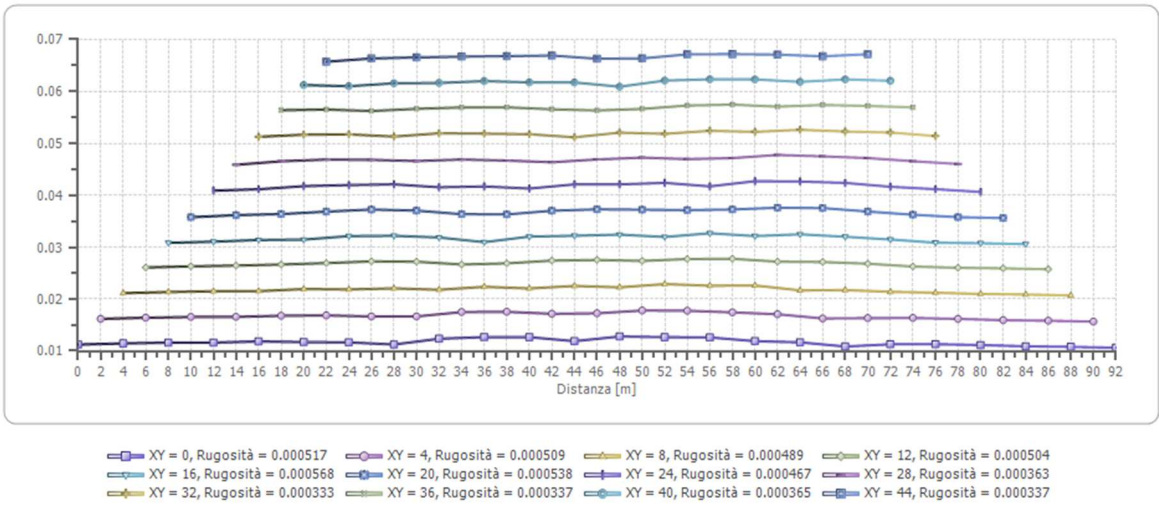
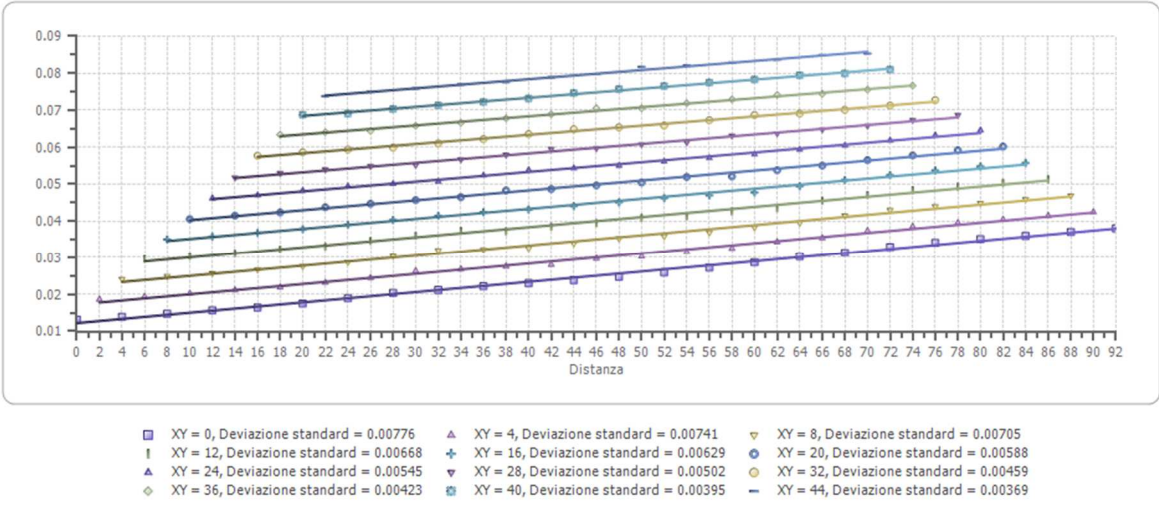
Dromocrone traslate



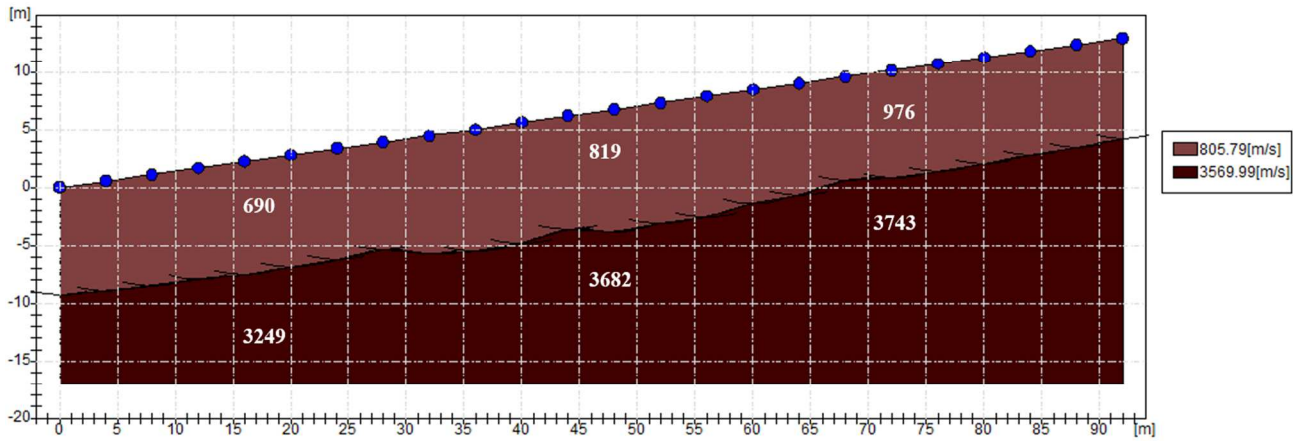
Interpretazione col metodo G.,R.M.

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	9.3	25.3
G= 4.0 [m]	9.5	23.3
G= 8.0 [m]	9.6	23.3
G= 12.0 [m]	9.6	21.3
G= 16.0 [m]	9.8	11.3
G= 20.0 [m]	9.7	9.7
G= 24.0 [m]	9.6	15.9
G= 28.0 [m]	9.3	26.6
G= 32.0 [m]	10.2	31.6
G= 36.0 [m]	10.5	33.1
G= 40.0 [m]	10.4	34.4
G= 44.0 [m]	9.8	32.1
G= 48.0 [m]	10.6	26.2
G= 52.0 [m]	10.4	23.3
G= 56.0 [m]	10.4	21.4
G= 60.0 [m]	9.8	21.0
G= 64.0 [m]	9.6	18.1
G= 68.0 [m]	9.0	17.1
G= 72.0 [m]	9.3	17.6
G= 76.0 [m]	9.3	20.8
G= 80.0 [m]	9.2	22.8
G= 84.0 [m]	9.0	22.2
G= 88.0 [m]	8.9	21.8
G= 92.0 [m]	8.8	22.2
Velocità [m/sec]	805.8	3570.0
Descrizione		



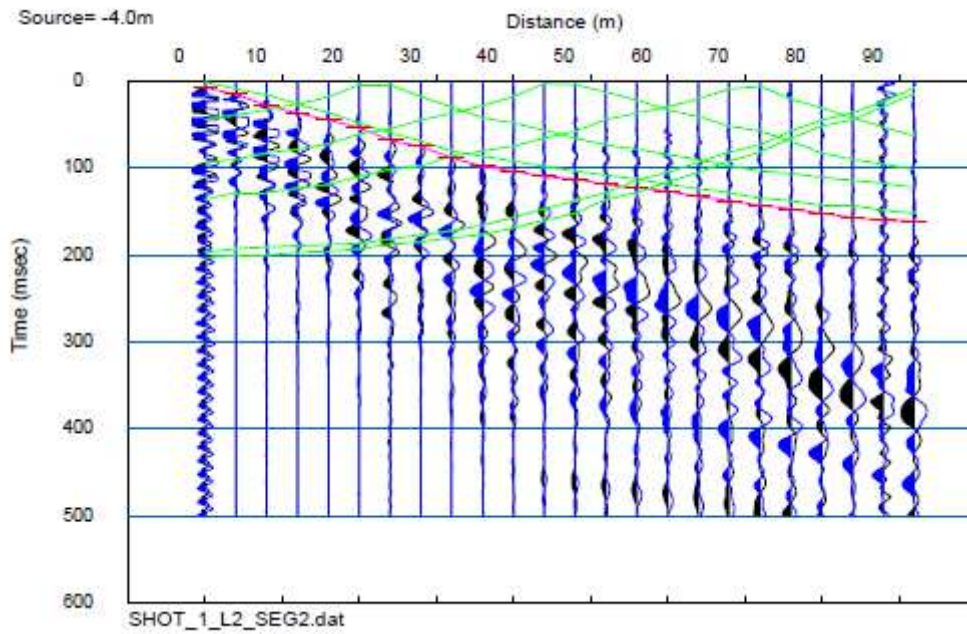
SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P



Dati battute – ONDE SH

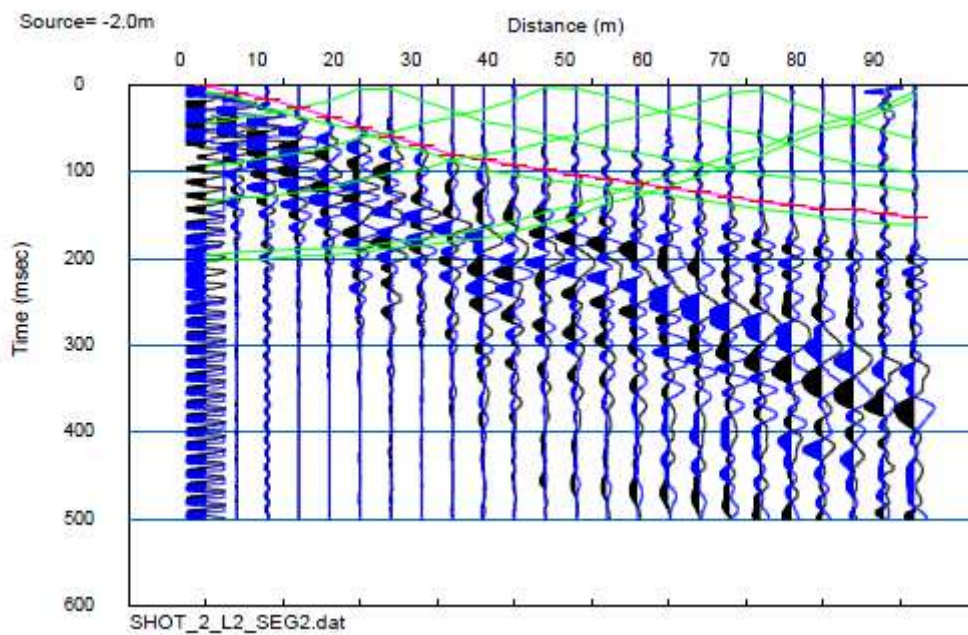
Battuta 1

Posizione sorgente X -4 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



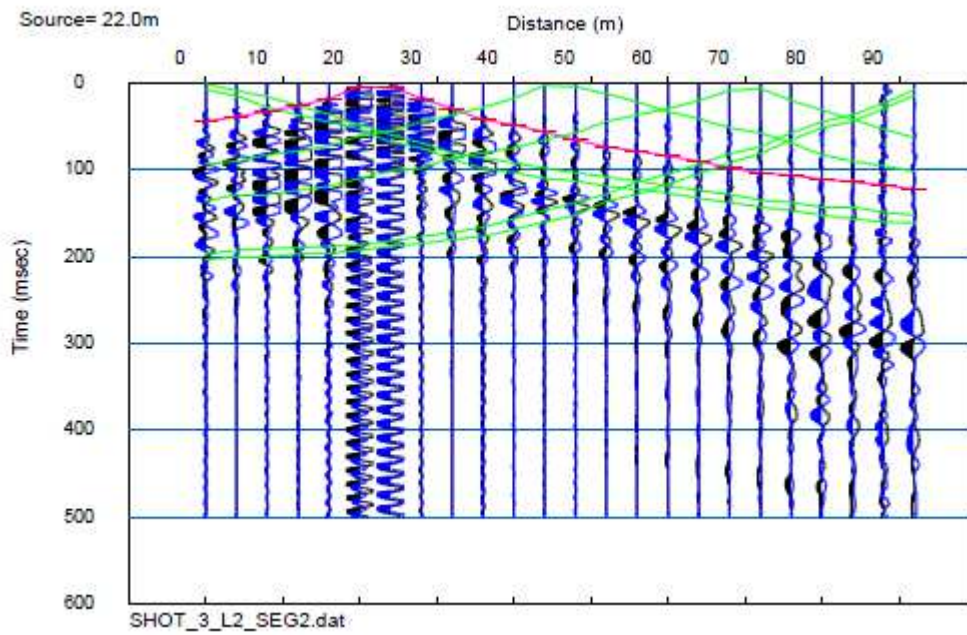
Battuta 2

Posizione sorgente X -2 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



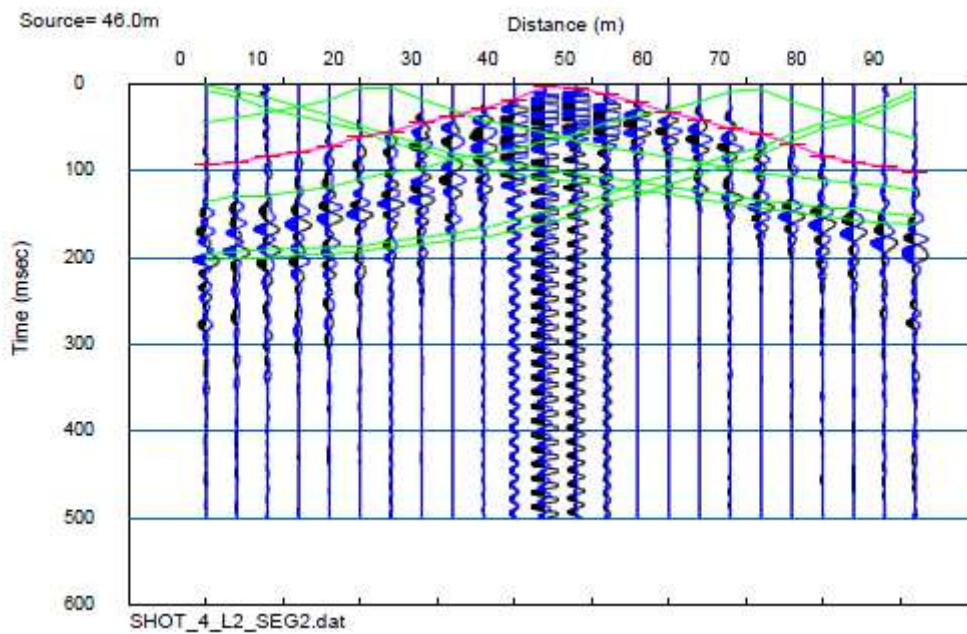
Battuta 3

Posizione sorgente X 22 [m]
Posizione sorgente Z 3 [m]



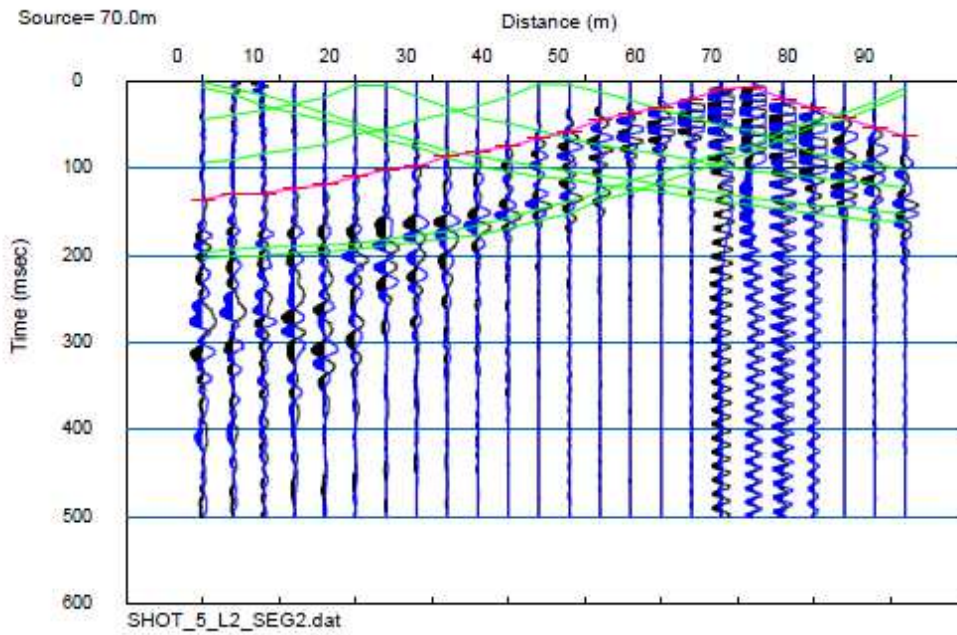
Battuta 4

Posizione sorgente X 46 [m]
Posizione sorgente Z 7 [m]



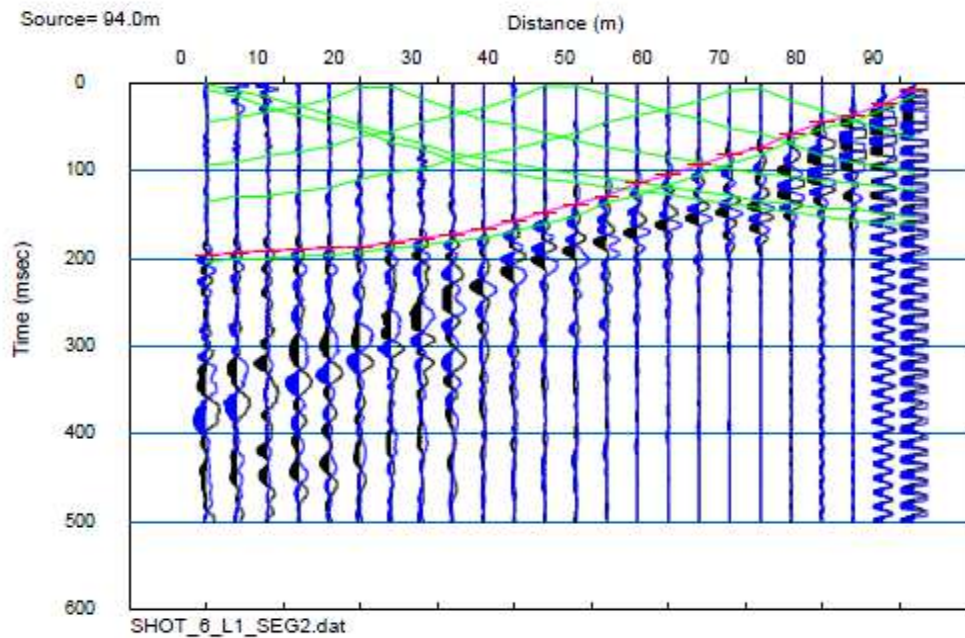
Battuta 5

Posizione sorgente X 70 [m]
Posizione sorgente Z 10 [m]



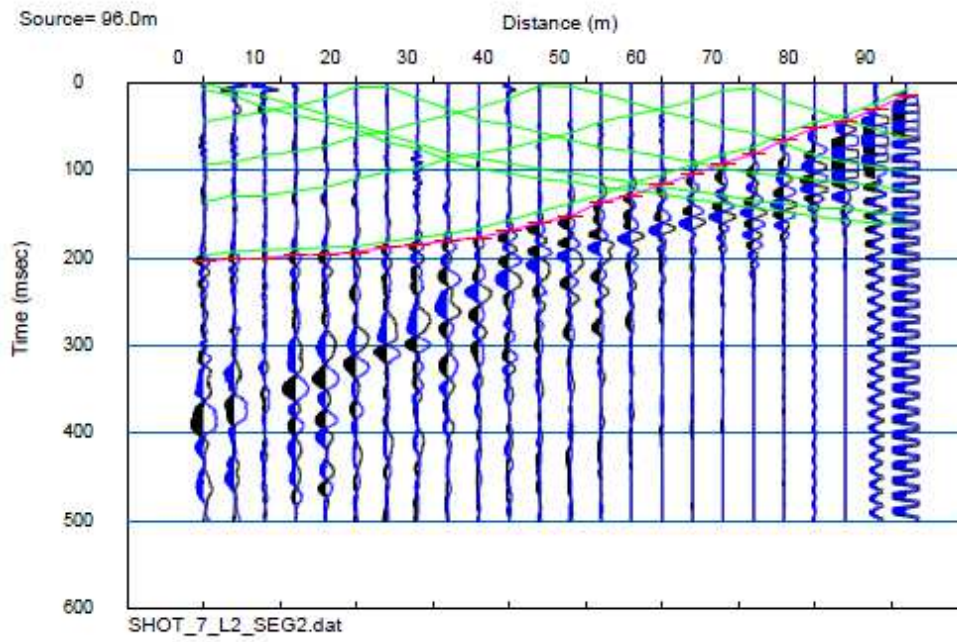
Battuta 6

Posizione sorgente X 94 [m]
Posizione sorgente Z 13 [m]



Battuta 7

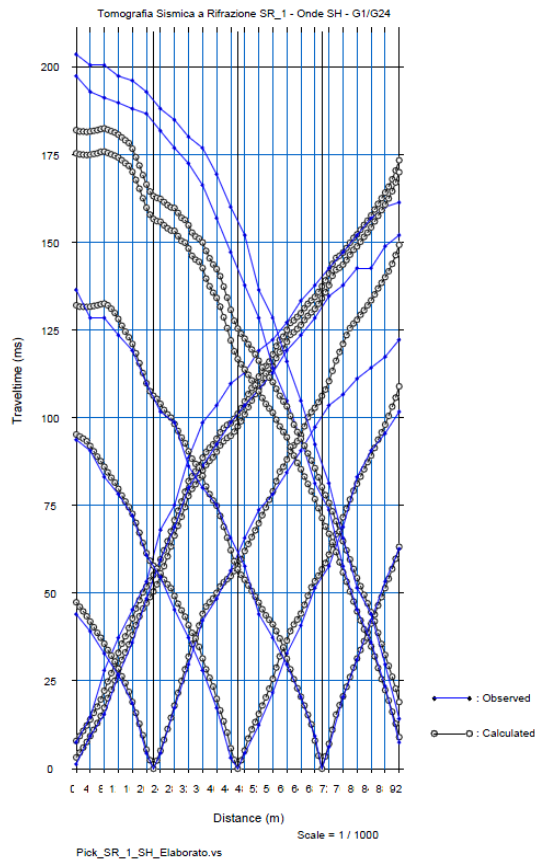
Posizione sorgente X 96 [m]
Posizione sorgente Z 13 [m]



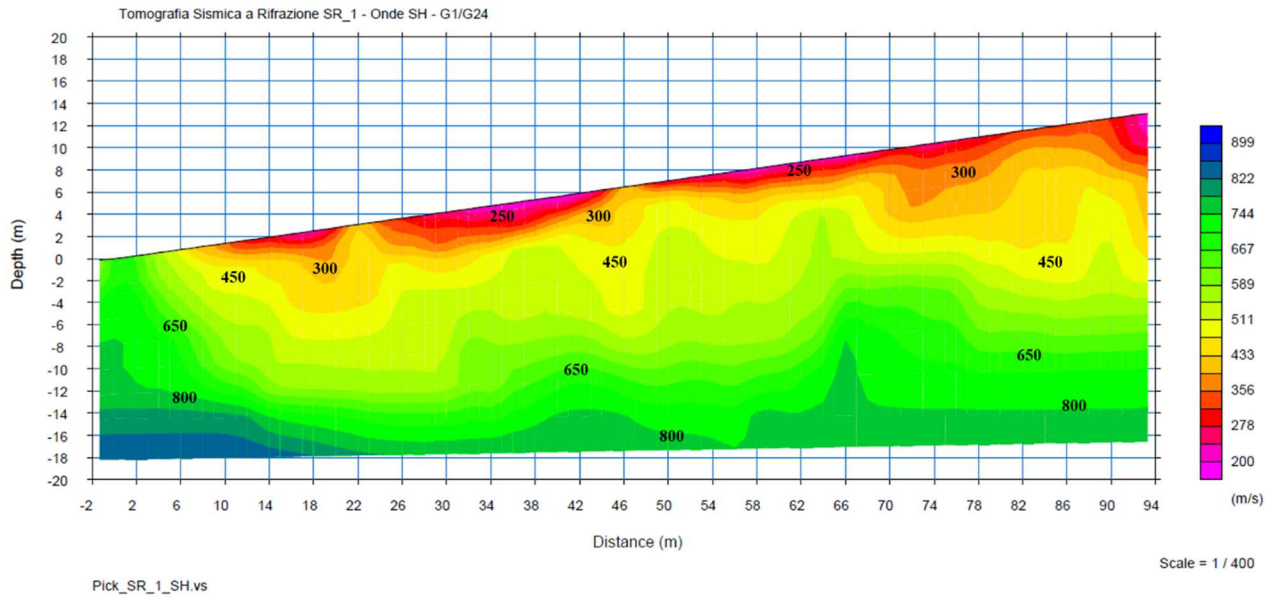
Tempi di arrivo

Posizione Geofono (m)	Tempi di arrivo (ms)						
	SHOT 1	SHOT 2	SHOT 3	SHOT 4	SHOT 5	SHOT 6	SHOT 7
0	7.555555	1.333333	44	93.77778	136.4444	197.3333	203.5556
4	14.75	9.333333	39.11111	90.66666	128.4444	192.8889	200.4444
8	28	15.55556	32.88889	83.11112	128.4444	191.1111	200.4444
12	37.33333	26.66667	26.66667	78.22222	123.5556	189.7778	197.3333
16	45.33333	36	18.66667	72	119.1111	188	196
20	53.33333	48.44444	4.444445	60.88889	109.7778	186.6667	192.8889
24	68.00002	59.55556	4.444445	54.66667	101.7778	181.7778	188
28	75.11112	68.88889	17.33333	45.33333	98.66666	176.8889	184.8889
32	88.50001	80	29.77778	37.33333	86.22222	172.4444	180
36	98.66666	86.22222	42.22222	28	80	166.2222	176.8889
40	103.5556	92.44444	48.44444	17.33333	75.11112	156.8889	169.3333
44	109.7778	98.66666	56.44444	3.111111	65.77778	147.1111	160
48	112.8889	103.5556	65.77778	4.444445	57.77778	137.7778	152
52	119.1111	108	73.77778	12.44445	44	128.4444	136.4444
56	122.2222	112.8889	78.22222	21.77778	37.33333	114.2222	128.4444
60	127.1111	119.1111	84.44444	32.88889	29.77778	104.8889	116
64	133.3333	123.5556	90.66666	40.88889	20.44445	93.77778	104.8889
68	137.7778	128.4444	97.33334	51.55556	9.333333	81.33334	92.44444
72	142.6667	134.6667	103.5556	57.77778	6.222222	73.77778	81.33334
76	147.1111	137.7778	106.6667	68.88889	20.44445	57.77778	65.77778
80	152	142.6667	111.1111	83.11112	31.11111	45.33333	51.55556
84	156.8889	142.6667	114.2222	90.66666	42.22222	36	44
88	160	148.8889	117.3333	95.55556	53.33333	23.55556	29.77778
92	161.3333	152	122.2222	101.7778	62.66667	7.555555	14.22222

Dromocroni teorici e sperimentali



ELABORAZIONE TOMOGRAFICA – ONDE SH



La logistica del posto non ha permesso di svolgere la stesa sismica a rifrazione secondo gli standard previsti dal programma VEL, in particolare per quanto riguarda la distanza degli scoppi esterni, maggiormente idonei alla risoluzione dell'eventuale presenza di un bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s) se profondo.

In fase di acquisizione in campagna è stato comunque verificato preliminarmente se tale substrato venisse intercettato come è effettivamente risultato.

La scelta di elaborare in tecnica tomografica deriva dal fatto che si hanno evidenti variazioni di velocità laterali per le quali le onde SH, più lente delle onde P, risultano essere maggiormente sensibili e per questo la tecnica GRM è risultata impraticabile.

Nei risultati ottenuti si denota una risalita di quello che potrebbe essere il substrato alterato (600-750 m/s) intorno alla distanza tra 10-20 m riconducibile probabilmente alla presenza di una faglia cartografata.

FOTO



Foto – Stesa Sismica a Rifrazione SR_1

SR_2: SISMICA A RIFRAZIONE P-SH

Easy Refract

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.

La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

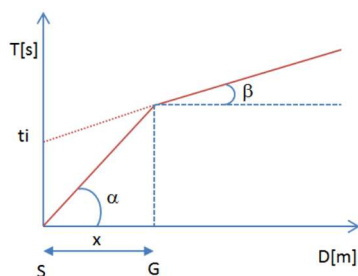
$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

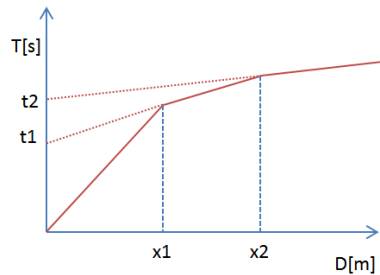
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

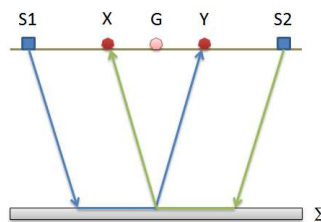


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

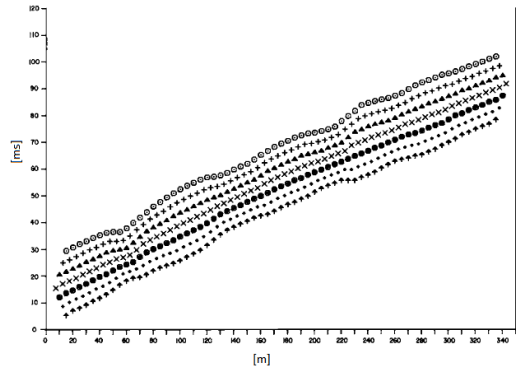
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare **la funzione velocità** secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



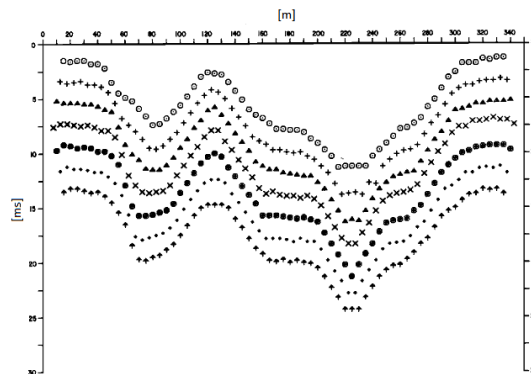
dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_V è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_V viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.



Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

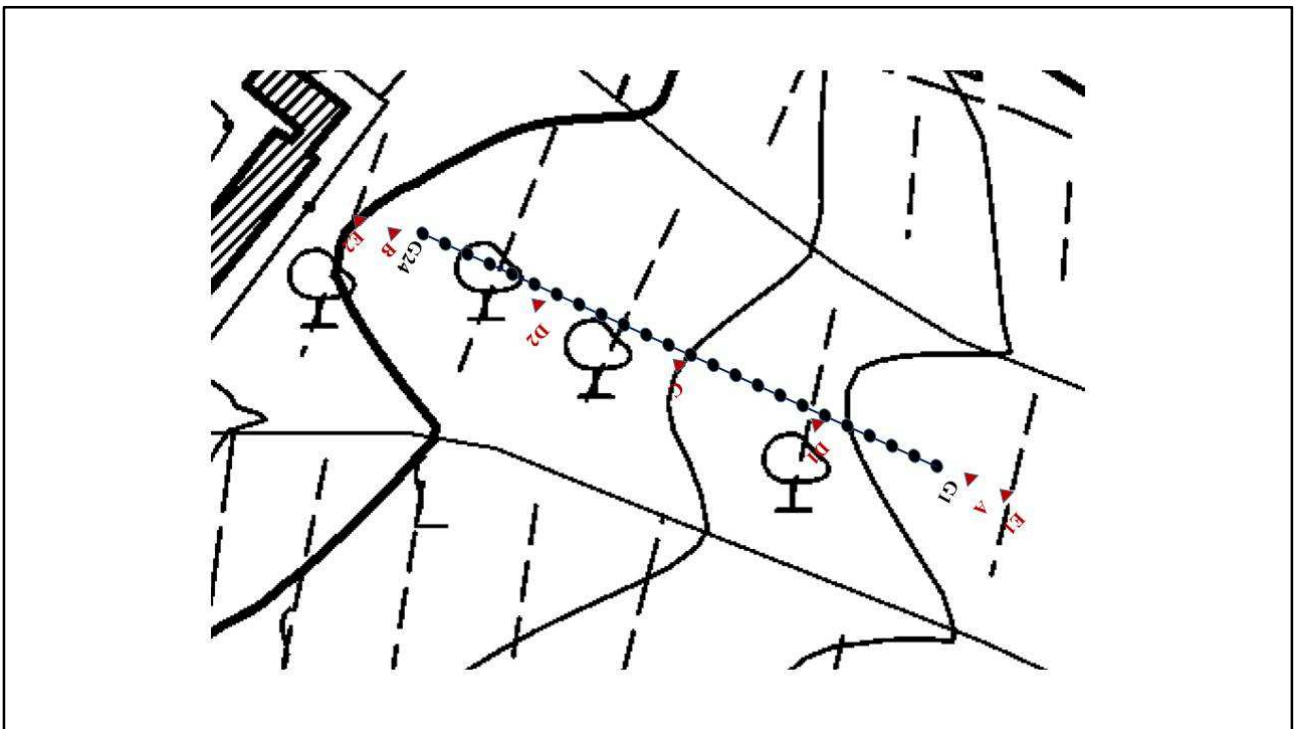
h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°

Planimetria Scala 1:5000



Planimetria Scala 1:1000



Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24

Intervallo (m): 5 m

Lunghezza Stendimento (m): 115 m

Quota (m.s.l.m.): 175

Punti di energizzazione

	E1 Esterno SX	A Estremo SX	D1 Intermedio SX	C Centrale	D2 Intermedio DX	B Estremo DX	E2 Esterno DX
Posizione da Geofono G1 (m)	-10	-2.5	27.5	57.5	87.5	11.7	125

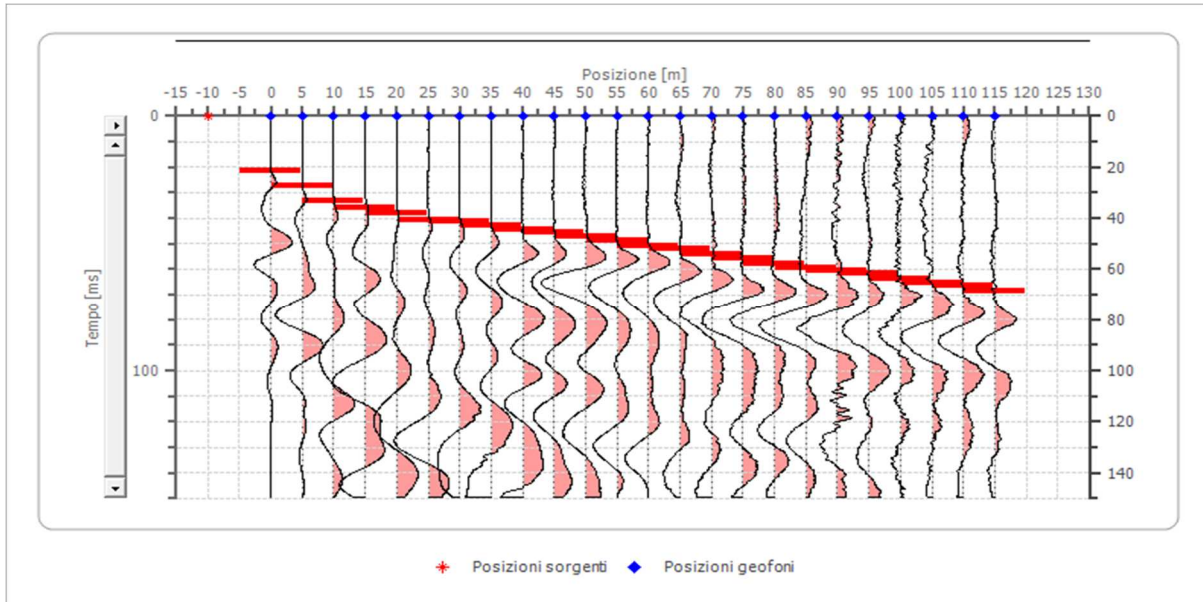
Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	5.0	0.7
3	10.0	1.3
4	15.0	2.0
5	20.0	2.6
6	25.0	3.3
7	30.0	3.9
8	35.0	4.6
9	40.0	5.2
10	45.0	5.9
11	50.0	6.5
12	55.0	7.2
13	60.0	7.8
14	65.0	8.5
15	70.0	9.2
16	75.0	9.8
17	80.0	10.5
18	85.0	11.1
19	90.0	11.8
20	95.0	12.4
21	100.0	13.1
22	105.0	13.8
23	110.0	14.4
24	115.0	15.0

Dati battute – ONDE P

Battuta 1

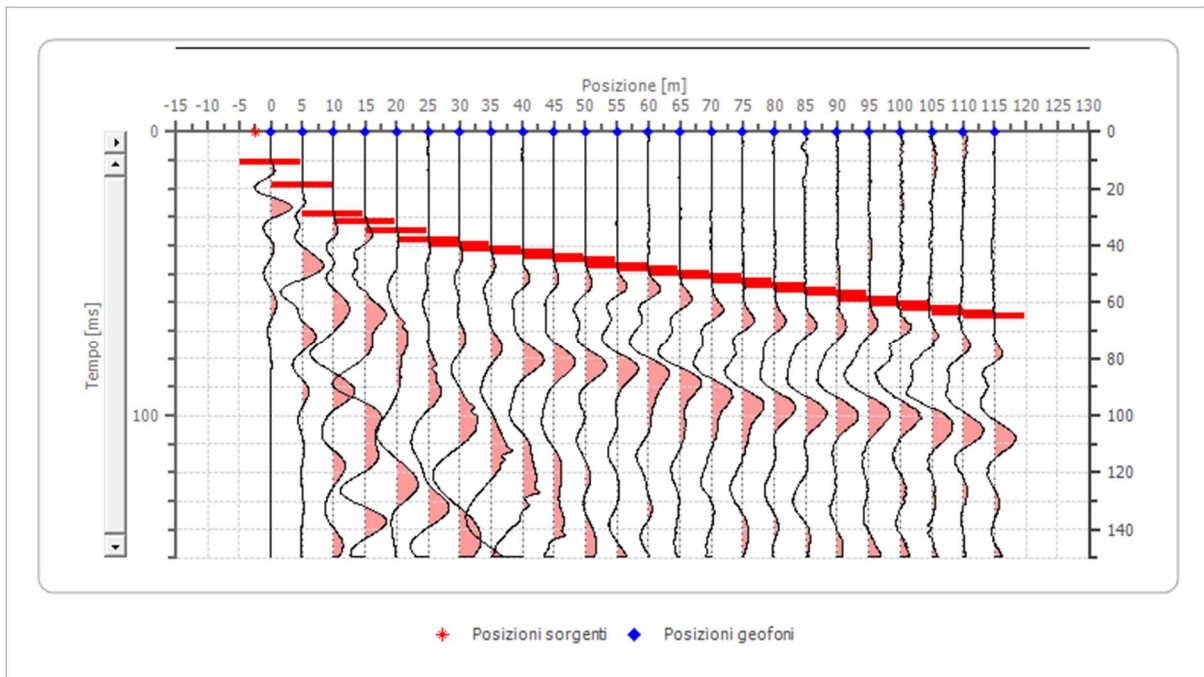
Posizione sorgente X -10 [m]
Posizione sorgente Z -1 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	21.4286
5.0	27.5194
10.0	33.3333
15.0	35.8929
20.0	38.0357
25.0	40.7143
30.0	41.2500
35.0	42.8571
40.0	44.4643
45.0	45.5357
50.0	47.1429
55.0	48.7500
60.0	50.8929
65.0	51.9643
70.0	54.1071
75.0	55.7143
80.0	57.8571
85.0	59.4643
90.0	60.5357
95.0	61.6071
100.0	63.7500
105.0	65.3571
110.0	66.4286
115.0	68.5714

Battuta 2

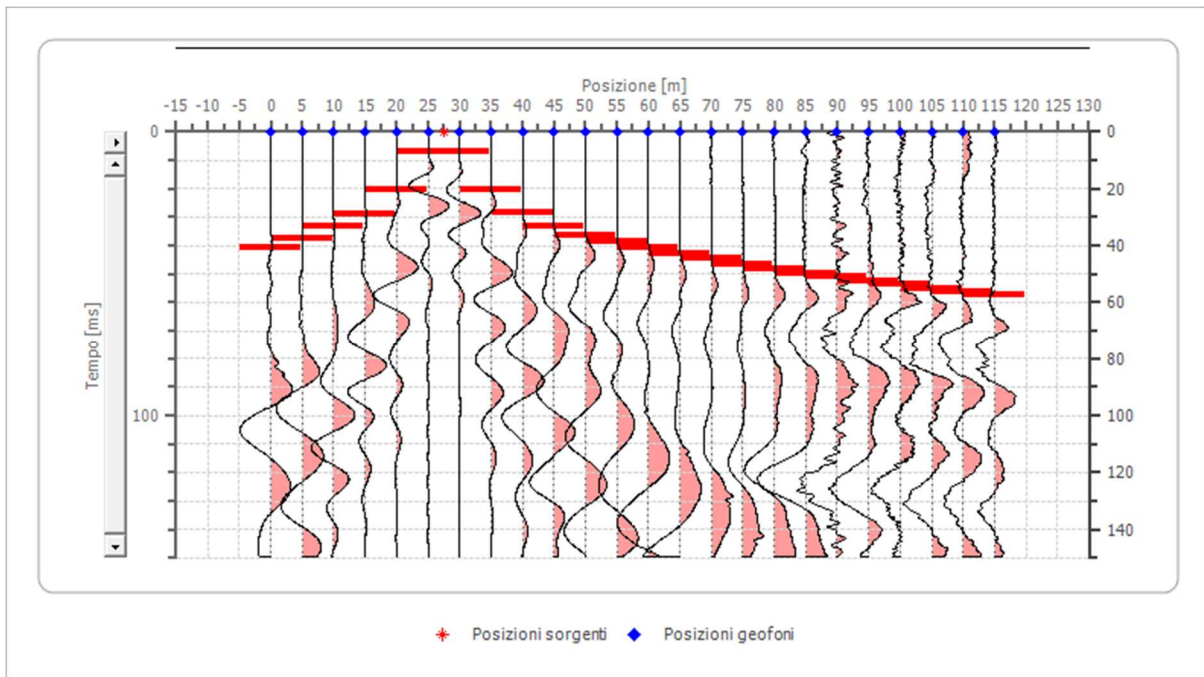
Posizione sorgente X -2.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	10.7143
5.0	18.7500
10.0	28.9286
15.0	31.6071
20.0	34.8214
25.0	38.0357
30.0	39.6429
35.0	41.2500
40.0	42.3214
45.0	43.9286
50.0	45.0000
55.0	47.1429
60.0	48.2143
65.0	49.8214
70.0	50.8929
75.0	52.5000
80.0	54.1071
85.0	55.7143
90.0	56.7857
95.0	58.9286
100.0	60.5357
105.0	62.1429
110.0	63.7500
115.0	64.8214

Battuta 3

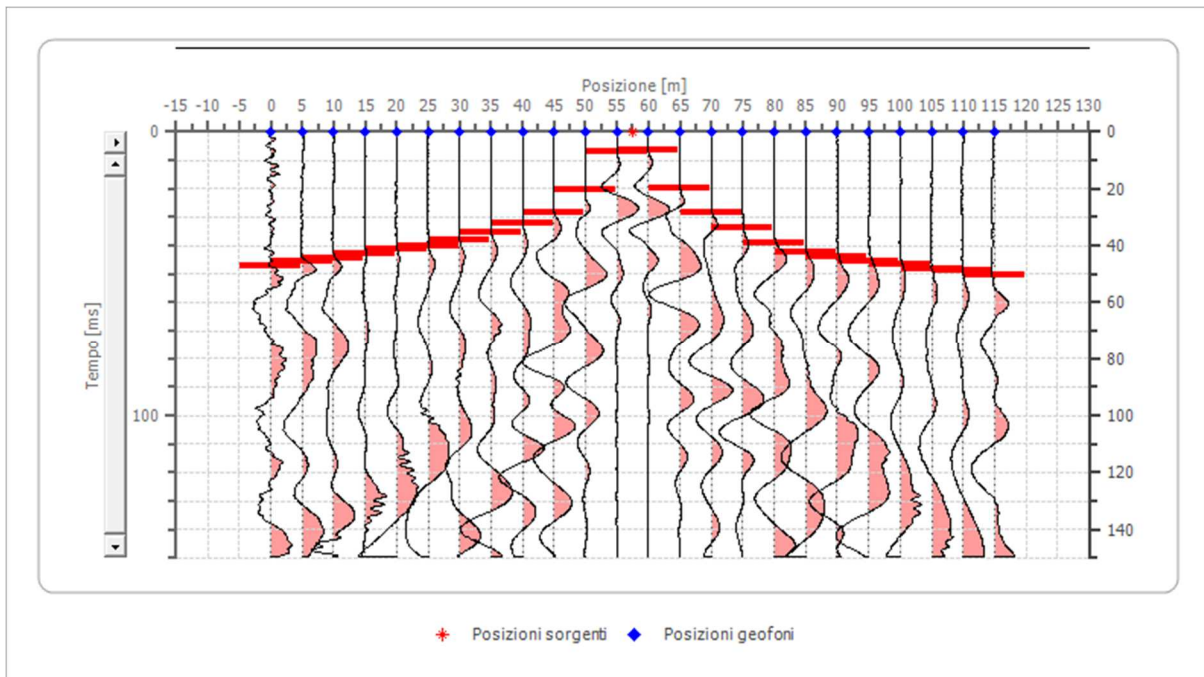
Posizione sorgente X 27.5 [m]
 Posizione sorgente Z 4 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	40.7143
5.0	37.5000
10.0	33.2143
15.0	28.9286
20.0	20.3571
25.0	6.9643
30.0	6.9643
35.0	20.3571
40.0	28.3929
45.0	33.2143
50.0	36.4286
55.0	38.5714
60.0	40.7143
65.0	42.8571
70.0	44.4643
75.0	46.6071
80.0	48.2143
85.0	49.8214
90.0	50.8929
95.0	52.5000
100.0	53.5714
105.0	55.1786
110.0	56.2500
115.0	57.3214

Battuta 4

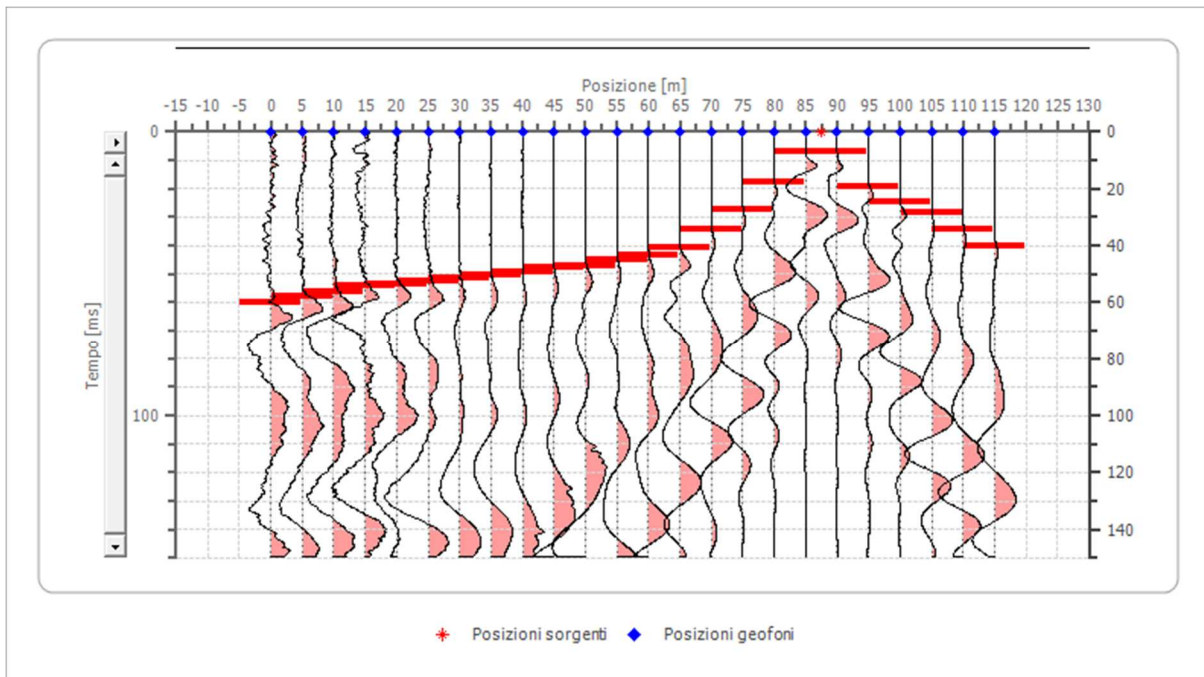
Posizione sorgente X 57.5 [m]
Posizione sorgente Z 8 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	47.1429
5.0	45.5357
10.0	44.4643
15.0	42.8571
20.0	41.2500
25.0	40.1786
30.0	38.0357
35.0	35.3571
40.0	32.1429
45.0	28.3929
50.0	20.3571
55.0	6.9643
60.0	6.4286
65.0	19.8214
70.0	28.3929
75.0	33.7500
80.0	39.1071
85.0	42.3214
90.0	43.9286
95.0	45.5357
100.0	46.6071
105.0	48.2143
110.0	48.7500
115.0	50.3571

Battuta 5

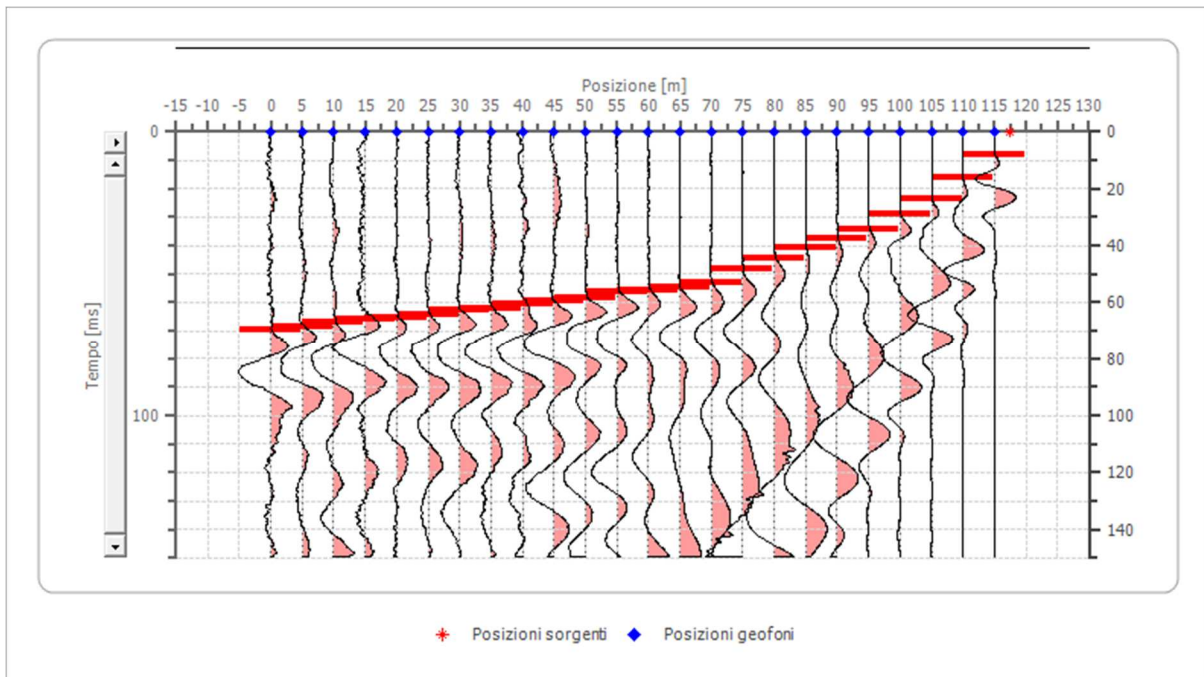
Posizione sorgente X 87.5 [m]
 Posizione sorgente Z 11 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	60.0000
5.0	57.8571
10.0	56.2500
15.0	54.1071
20.0	53.5714
25.0	52.5000
30.0	51.4286
35.0	50.3571
40.0	49.2857
45.0	47.6786
50.0	47.1429
55.0	45.0000
60.0	43.3929
65.0	40.7143
70.0	34.2857
75.0	27.3214
80.0	17.6786
85.0	6.9643
90.0	6.9643
95.0	19.2857
100.0	24.6429
105.0	28.3929
110.0	34.2857
115.0	40.1786

Battuta 6

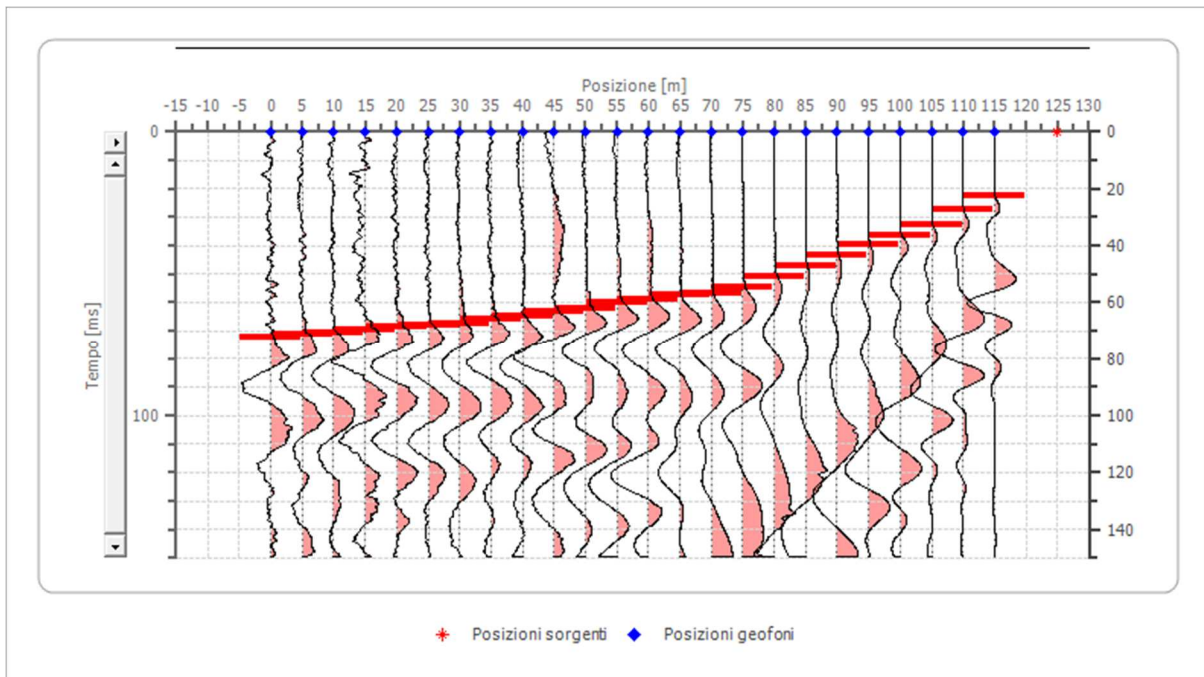
Posizione sorgente X 117.5 [m]
 Posizione sorgente Z 15 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	69.6429
5.0	68.5714
10.0	66.9643
15.0	65.8929
20.0	65.3571
25.0	64.2857
30.0	62.6786
35.0	62.1429
40.0	60.5357
45.0	59.4643
50.0	58.3929
55.0	56.2500
60.0	55.7143
65.0	54.6429
70.0	53.0357
75.0	48.2143
80.0	44.4643
85.0	40.7143
90.0	37.5000
95.0	34.2857
100.0	28.9286
105.0	23.5714
110.0	16.0714
115.0	8.0357

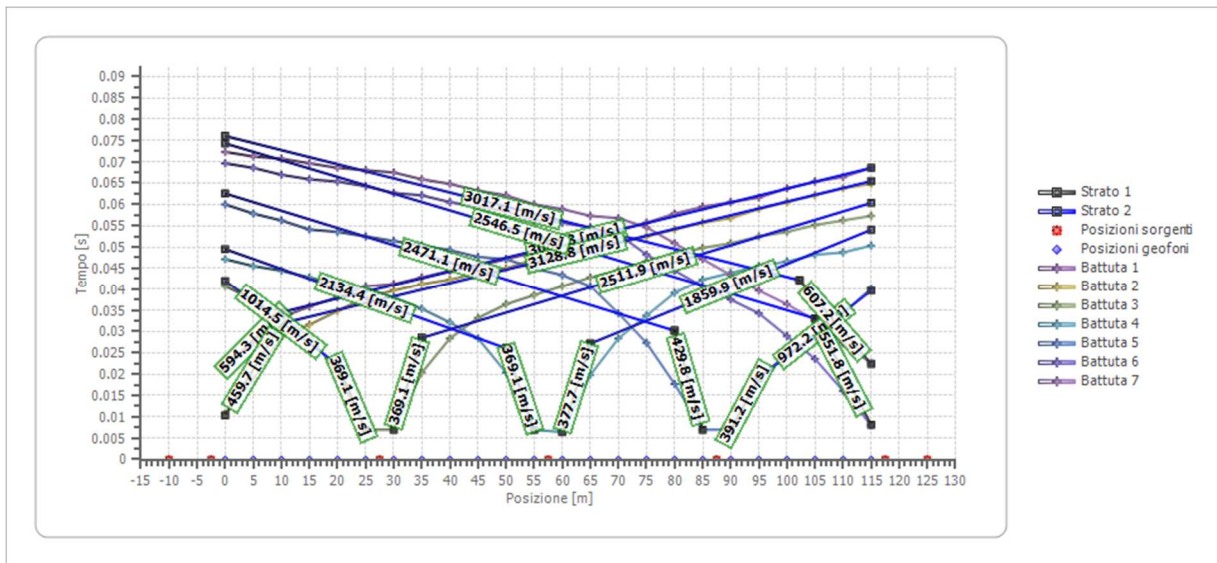
Battuta 7

Posizione sorgente X 125 [m]
 Posizione sorgente Z 16 [m]

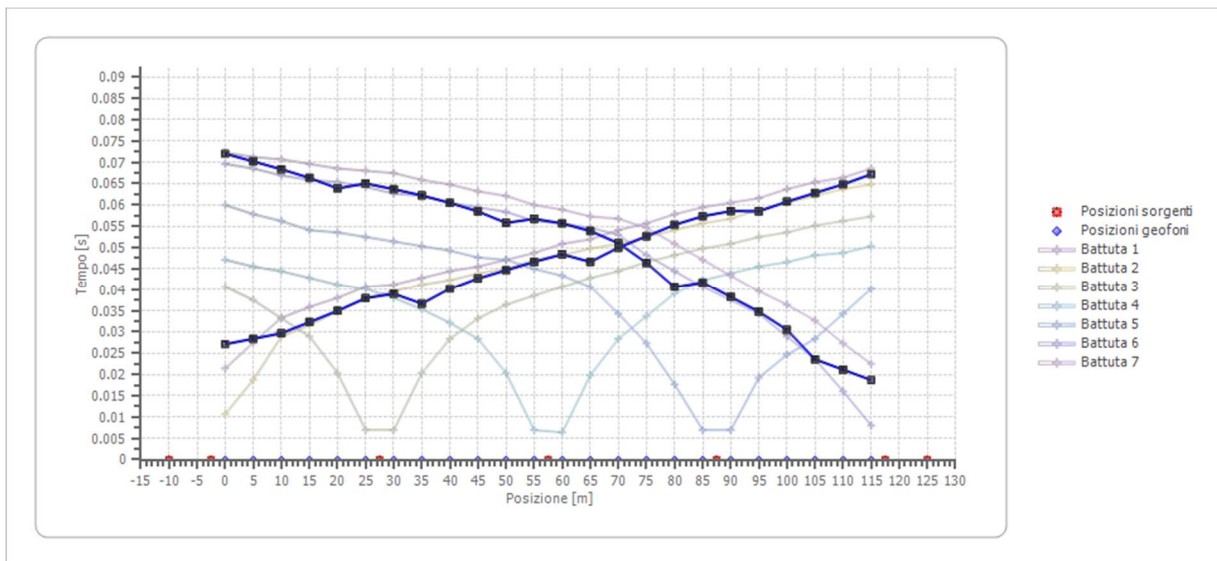


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	72.3214
5.0	71.2500
10.0	70.7143
15.0	69.6429
20.0	68.5714
25.0	68.0357
30.0	67.5000
35.0	65.8929
40.0	64.8214
45.0	63.2143
50.0	62.1429
55.0	60.0000
60.0	58.9286
65.0	57.3214
70.0	56.7857
75.0	54.6429
80.0	50.8929
85.0	47.1429
90.0	43.3929
95.0	39.6429
100.0	36.4286
105.0	32.6786
110.0	27.3214
115.0	22.5000

Dromocrone



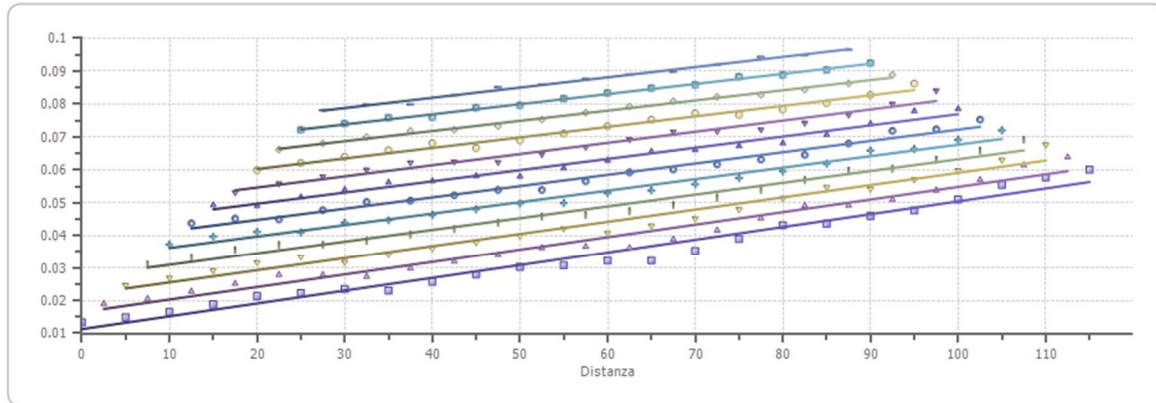
Dromocrone traslate



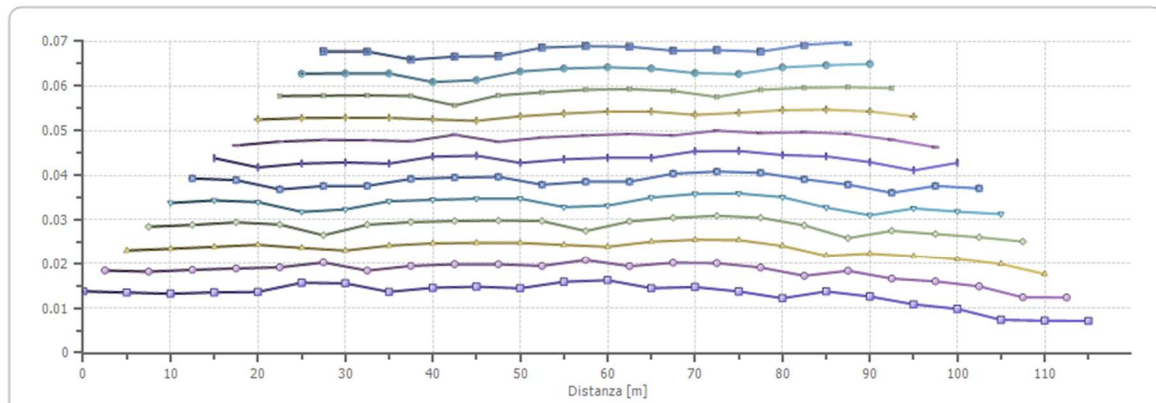
Interpretazione col metodo G.,R.M.

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	6.3	--
G= 5.0 [m]	6.2	--
G= 10.0 [m]	6.1	--
G= 15.0 [m]	6.2	--
G= 20.0 [m]	6.3	--
G= 25.0 [m]	7.2	--
G= 30.0 [m]	7.1	--
G= 35.0 [m]	6.3	--
G= 40.0 [m]	6.7	--
G= 45.0 [m]	6.8	--
G= 50.0 [m]	6.6	--
G= 55.0 [m]	7.3	--
G= 60.0 [m]	7.5	--
G= 65.0 [m]	6.6	--
G= 70.0 [m]	6.8	--
G= 75.0 [m]	6.3	--
G= 80.0 [m]	5.6	--
G= 85.0 [m]	6.3	--
G= 90.0 [m]	5.8	--
G= 95.0 [m]	5.0	--
G= 100.0 [m]	4.5	--
G= 105.0 [m]	3.4	--
G= 110.0 [m]	3.3	--
G= 115.0 [m]	3.3	--
Velocità [m/sec]	451.9	2553.5
Descrizione		

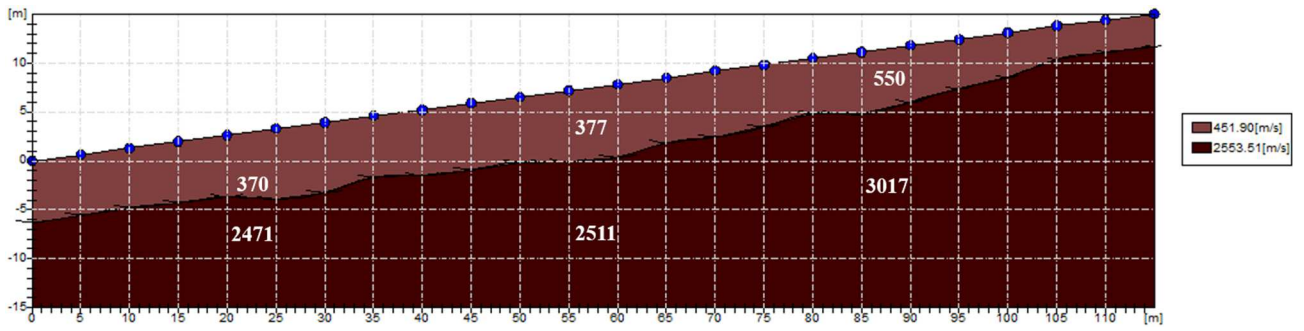


- XY = 0, Deviazione standard = 0.01355
- △ XY = 5, Deviazione standard = 0.01272
- ▽ XY = 10, Deviazione standard = 0.01183
- XY = 15, Deviazione standard = 0.01087
- ◆ XY = 20, Deviazione standard = 0.01008
- XY = 25, Deviazione standard = 0.00941
- ▲ XY = 30, Deviazione standard = 0.00884
- ▼ XY = 35, Deviazione standard = 0.00831
- XY = 40, Deviazione standard = 0.00738
- ◇ XY = 45, Deviazione standard = 0.00669
- XY = 50, Deviazione standard = 0.0062
- XY = 55, Deviazione standard = 0.00582



- XY = 0, Rugosità = 0.00199
- XY = 5, Rugosità = 0.001691
- ▲ XY = 10, Rugosità = 0.001444
- ◇ XY = 15, Rugosità = 0.001363
- ◆ XY = 20, Rugosità = 0.001264
- XY = 25, Rugosità = 0.001068
- ▲ XY = 30, Rugosità = 0.000943
- ▼ XY = 35, Rugosità = 0.0009
- XY = 40, Rugosità = 0.000711
- ◇ XY = 45, Rugosità = 0.000881
- XY = 50, Rugosità = 0.00092
- XY = 55, Rugosità = 0.000857

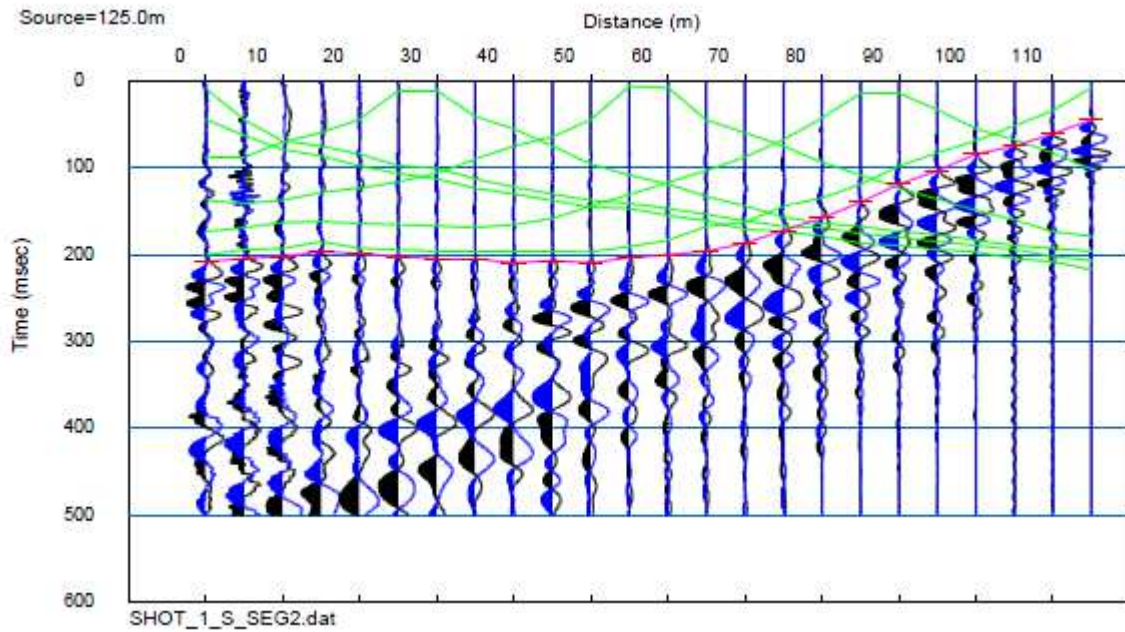
SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P



Dati battute – ONDE SH

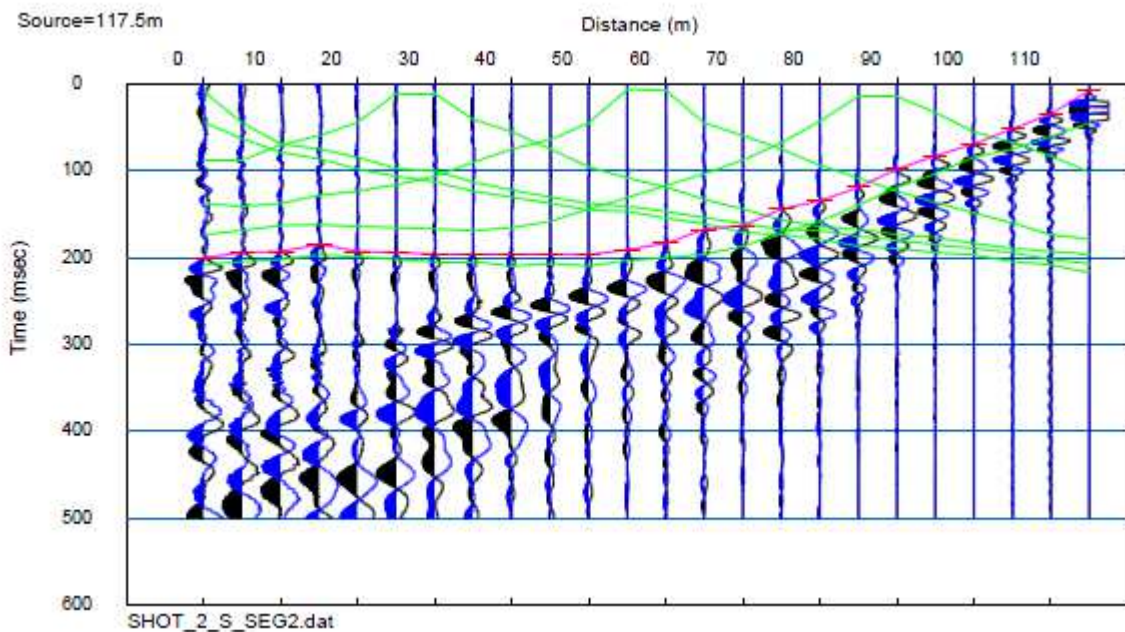
Battuta 7

Posizione sorgente X 125 [m]
Posizione sorgente Z -1 [m]



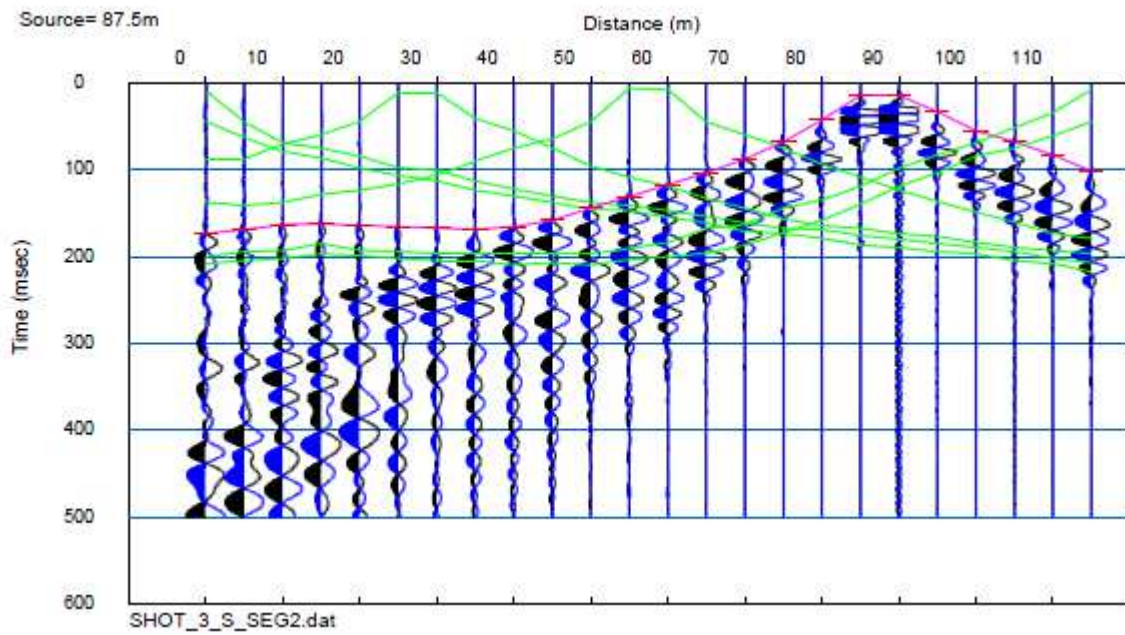
Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]

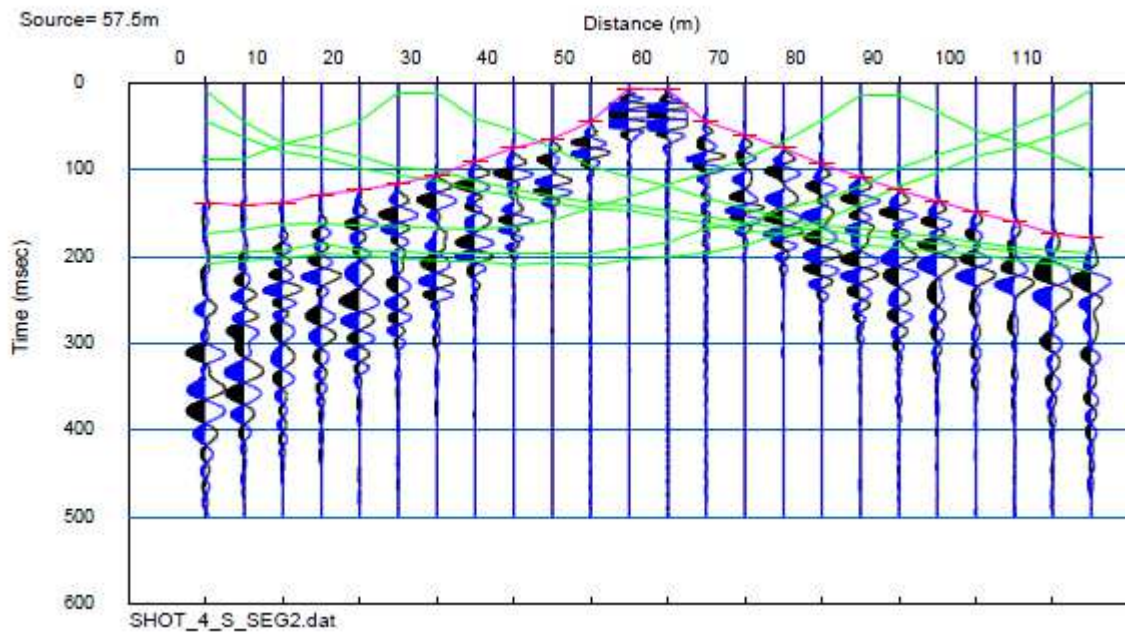


Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]
Posizione sorgente Z 4 [m]

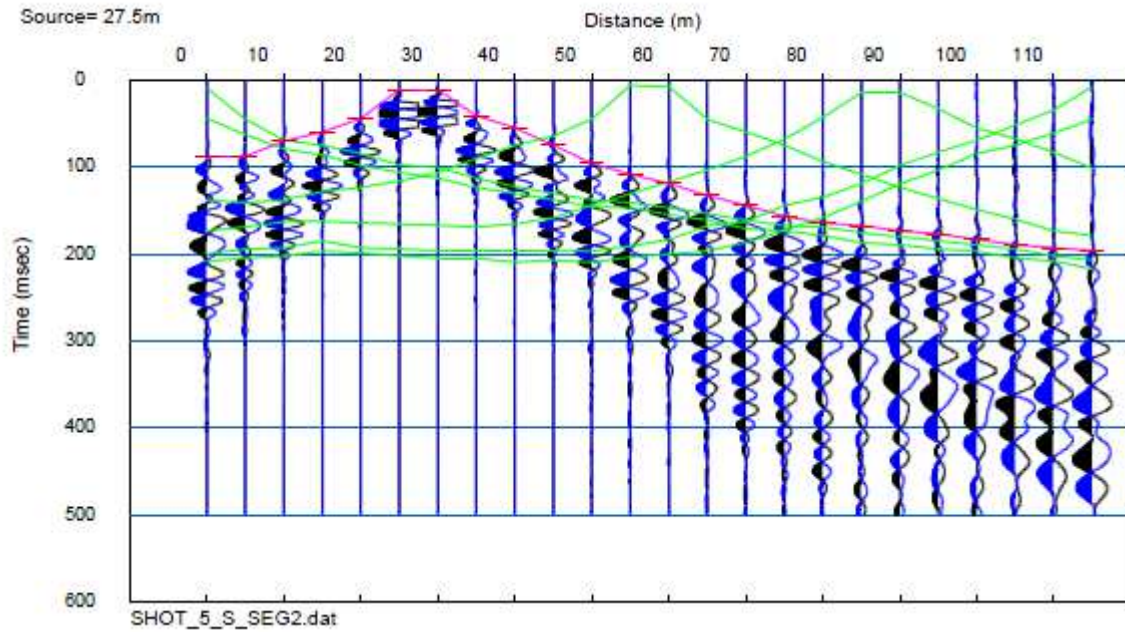
**Battuta 4**

Posizione sorgente X 57.5 [m]
Posizione sorgente Z 8 [m]



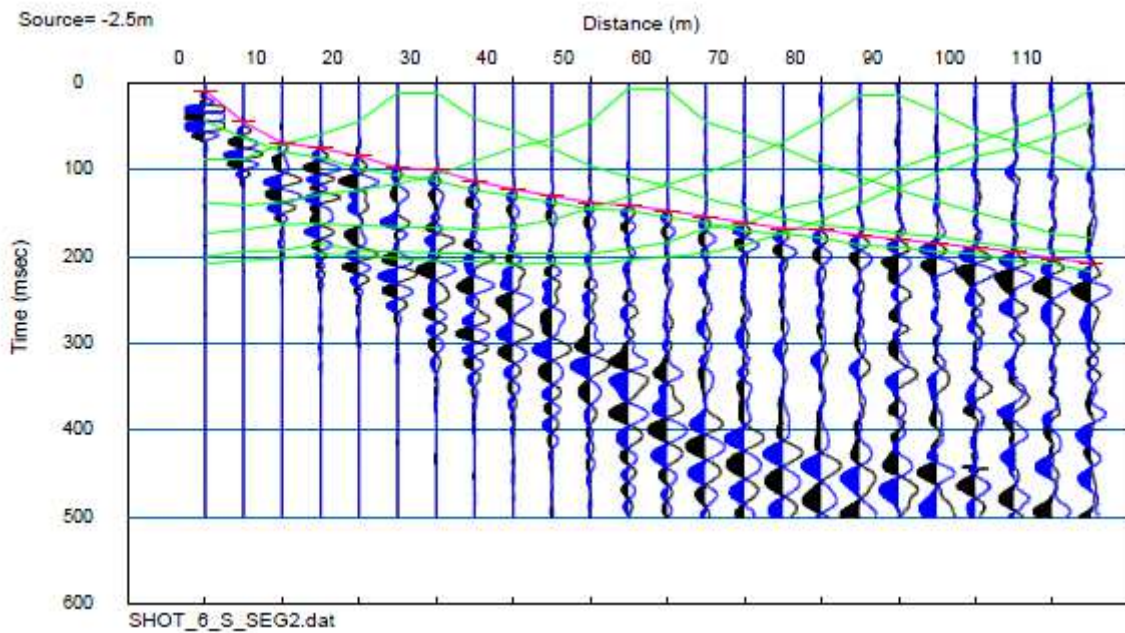
Battuta 3

Posizione sorgente X 27.5 [m]
Posizione sorgente Z 11 [m]



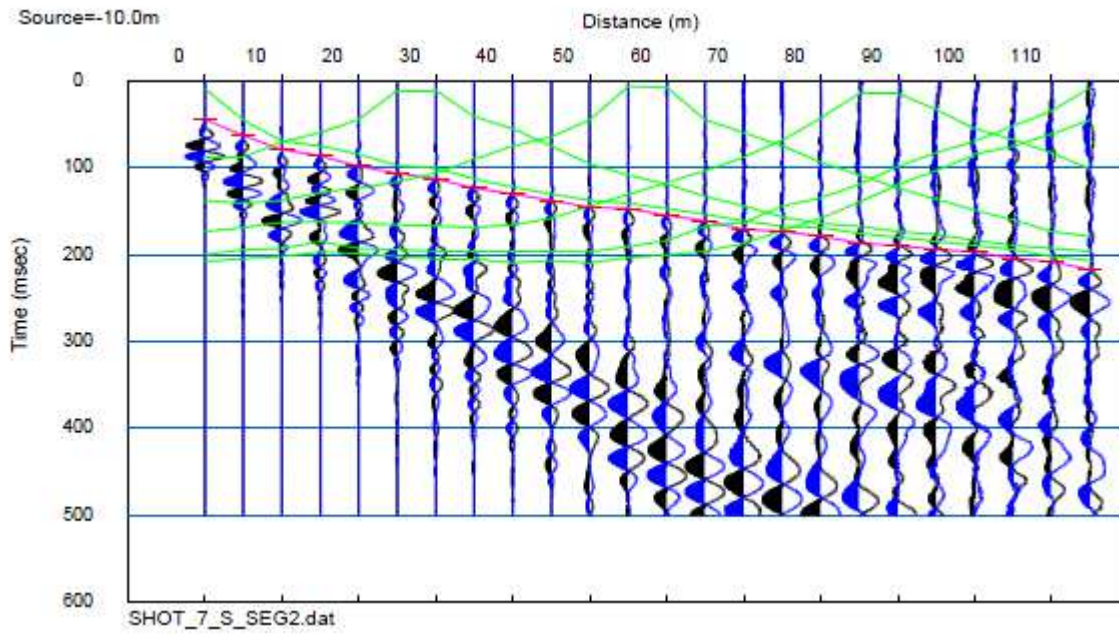
Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]
Posizione sorgente Z 15 [m]



Battuta 1

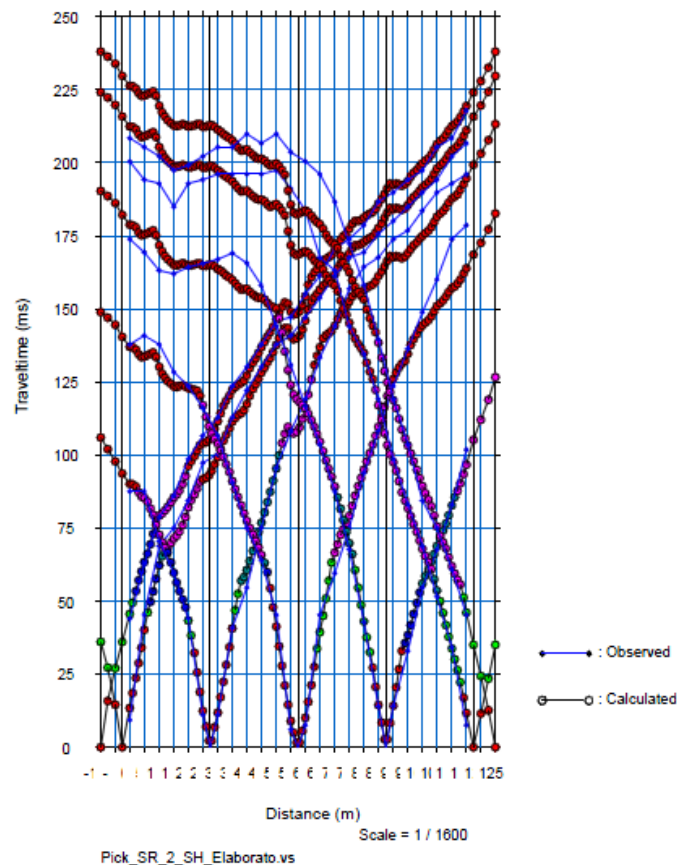
Posizione sorgente X -10 [m]
Posizione sorgente Z 16 [m]



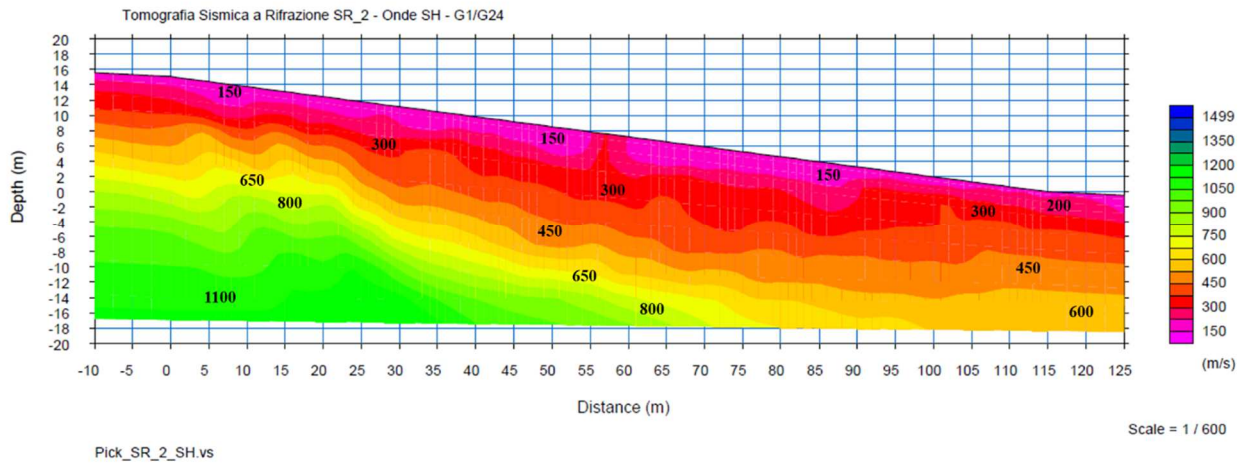
Tempi di arrivo

Posizione Geofono (m)	Tempi di arrivo (ms)						
	SHOT 1	SHOT 2	SHOT 3	SHOT 4	SHOT 5	SHOT 6	SHOT 7
0	44	9.333333	87.55556	137.7778	173.7778	200.4444	208.4444
5	62.66667	45.33333	87.55556	140.8889	169.3333	194.2222	205.3333
10	78.81482	68.88889	70.66666	137.7778	163.1111	192.8889	202.2222
15	86.22222	75.11112	59.55556	128.4444	162	184.8889	197.3333
20	98.66666	84.44444	44	123.5556	164.25	192.8889	199.1111
25	106.6667	97.33334	11.11111	116	165.5	194.2222	202.2222
30	112.8889	100.4444	11.11111	106.6667	167	196	205.3333
35	123.5556	112.8889	40.88889	90.66666	169	196	205.3333
40	130.2222	122.2222	54.66667	75.11112	165.75	196	209.7778
45	137.7778	130.2222	75.11112	64	158	196	206.6667
50	145.7778	137.7778	95.55556	45.33333	144	197.3333	209.7778
55	147.1111	140.8889	108	6.222222	130.75	191.1111	203.5556
60	155.1111	147.1111	119.1111	7.555555	116.75	183.5556	200.4444
65	161.3333	153.7778	133.3333	45.33333	103.5556	167.5556	196
70	170.6667	161.3333	144	59.55556	87.55556	163.1111	186.6667
75	173.7778	167.5556	156.8889	75.11112	67.75001	144	172.4444
80	178.6667	169.3333	164.4444	93.77778	43	134.6667	158.2222
85	186.6667	175.5556	167.5556	108	14.22222	119.1111	139.5556
90	189.7778	180	173.7778	123.5556	14.22222	98.66666	119.1111
95	194.2222	184.8889	176.8889	136.4444	33	83.11112	103.5556
100	197.3333	189.7778	183.5556	148.8889	54.66667	68.88889	84.44444
105	205.3333	194.2222	189.7778	160	67.55556	51.55556	75.11112
110	208.4444	202.2222	192.8889	173.7778	83.00001	34.22222	60.88889
115	217.7778	206.6667	196	178.6667	101.7778	7.555555	45.33333

Dromocroni teorici e sperimentali



ELABORAZIONE TOMOGRAFICA – ONDE SH



La logistica del posto non ha permesso di svolgere la stesa sismica a rifrazione secondo gli standard previsti dal programma VEL, in particolare per quanto riguarda la distanza degli scoppi esterni, maggiormente idonei alla risoluzione dell'eventuale presenza di un bedrock sismico ($V_s > 800$ m/s) se profondo.

In fase di acquisizione in campagna è stato comunque verificato preliminarmente se tale substrato venisse intercettato come è effettivamente risultato.

La scelta di elaborare in tecnica tomografica deriva dal fatto che si hanno evidenti variazioni di velocità laterali per le quali le onde SH, più lente delle onde P, risultano essere maggiormente sensibili e per questo la tecnica GRM è risultata impraticabile.

FOTO



Foto – Stesa Sismica a Rifrazione SR_2

SR_3: SISMICA A RIFRAZIONE P-SH

Easy Refract

Le indagini di sismica a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio). La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

Le prove si basano sulla misura dei tempi di percorso delle onde elastiche per le quali, ipotizzando le superfici di discontinuità estese rispetto alla lunghezza d'onda o, comunque, con deboli curvature, i fronti d'onda sono rappresentati mediante i relativi raggi sismici. L'analisi si avvale, poi, del principio di Fermat e della legge di Snell.

Il principio di Fermat stabilisce che il raggio sismico percorre la distanza tra sorgente e rilevatore seguendo il percorso per cui il tempo di tragitto è minimo. Per tale principio, dato un piano che separa due mezzi con caratteristiche elastiche diverse, il raggio sismico è quello che si estende lungo un piano perpendicolare alla discontinuità contenente sia la sorgente che il ricevitore.

La legge di Snell è una formula che descrive le modalità di rifrazione di un raggio sismico nella transizione tra due mezzi caratterizzati da diversa velocità di propagazione delle onde o, equivalentemente, da diversi indici di rifrazione. L'angolo formato tra la superficie di discontinuità e il raggio sismico è chiamato angolo di incidenza θ_i mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione θ_r . La formulazione matematica è:

$$v_2 \sin \theta_i = v_1 \sin \theta_r$$

Dove v_1 e v_2 sono le velocità dei due mezzi separati dalla superficie di discontinuità.

Per $v_1 > v_2$ si ha che $\theta_i > \theta_r$ e la sismica a rifrazione non è attuabile poiché il raggio rifratto andrebbe ad inclinarsi verso il basso. Per $v_1 < v_2$ si ha che $\theta_i < \theta_r$ ed esiste un angolo limite di incidenza per cui $\theta_r = 90^\circ$ ed il raggio rifratto viaggia parallelamente alla superficie di discontinuità. L'espressione che definisce l'angolo limite è:

$$\theta_i = \arcsin(v_1 / v_2)$$

Il modo più semplice per analizzare i dati di rifrazione è quello di costruire un diagramma tempi-distanze in cui l'origine del sistema di riferimento è posto in corrispondenza della sorgente di generazione delle onde elastiche. In ascissa sono rappresentate le posizioni dei geofoni ed in ordinata i tempi dei primi arrivi. Ai geofoni più vicini alla sorgente giungono per primi gli impulsi che hanno seguito il percorso diretto in un tempo T dato dalla relazione

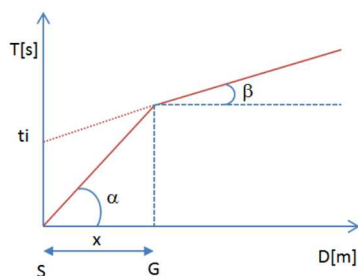
$$T = x_i / V_1$$

dove x_i è la distanza tra il punto di energizzazione e il punto di rilevazione.

L'equazione precedente rappresenta una retta che passa per l'origine degli assi tempi-distanze e il suo coefficiente angolare consente di calcolare la velocità V_1 del primo mezzo come

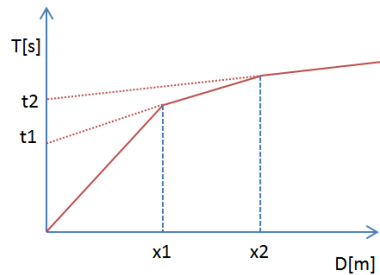
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

I tempi di arrivo dei raggi rifratti, nel diagramma tempi-distanze, si dispongono secondo una retta che avrà pendenza minore di quella delle onde dirette.



La curva tempi-distanze tende ad avere un andamento regolare secondo una spezzata i cui vertici sono i chiamati *punti di ginocchio* e rappresentano, fisicamente, la condizione in cui si verifica l'arrivo contemporaneo delle onde dirette e rifratte. Per ciascuno di segmenti individuati si determina, dunque, il tempo di ritardo t_i che rappresenta la differenza tra il tempo che il raggio sismico impiega a percorrere un tratto alla velocità propria dello strato in cui si trasmette ed il tempo che impiegherebbe a viaggiare lungo la componente orizzontale di quel tratto alla massima velocità raggiunta in tutto il percorso di rifrazione.

Graficamente il tempo di ritardo è dato dall'intersezione della retta che comprende un segmento della curva tempi-distanze con l'asse dei tempi.

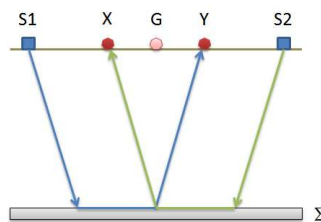


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

$$h_{(i-1)} = \frac{V_{(i-1)}V_i}{2\sqrt{V_i^2 - V_{(i-1)}^2}} \left(t_i - \frac{2h_1\sqrt{V_i^2 - V_1^2}}{V_1V_i} - \dots - \frac{2h_{(i-2)}\sqrt{V_i^2 - V_{(i-2)}^2}}{V_1V_{(i-2)}} \right)$$

In situazioni morfologiche complesse può essere utilizzato come metodo di elaborazione il Metodo Reciproco Generalizzato (Generalized Reciprocal Method) discusso da Palmer nel 1980.

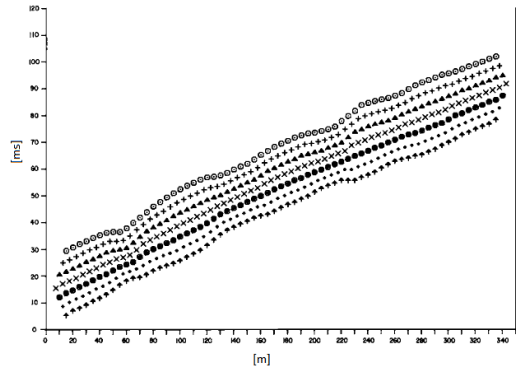
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno dello stendimento. Ciò permette di individuare con maggiore accuratezza i tempi relativi ad un medesimo rifrattore utili a caratterizzare le dromocrone, fondamentali all'interpretazione. Nelle interpretazioni multi strato, la generazione delle dromocrone può sfruttare tecniche di phantoming per sopperire alla mancanza dei dati per alcuni rifrattori.

Dalla costruzione delle dromocrone è possibile determinare **la funzione velocità** secondo l'equazione

$$T_v = \frac{T_{S_1Y} - T_{S_2X} + T_{S_1S_2}}{2}$$



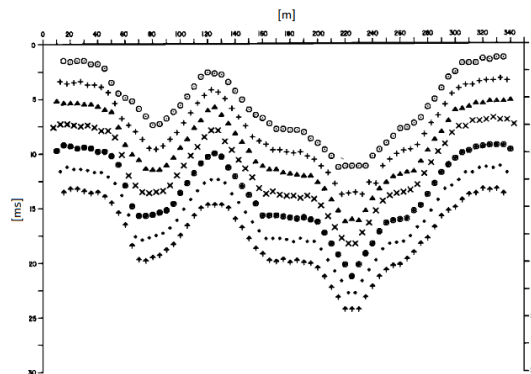
dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_V è il tempo calcolato su un geofono G posto tra X ed Y, non necessariamente coincidente con la posizione di un geofono dello stendimento.

Il calcolo della funzione T_V viene eseguito per ogni valore di XY compreso tra zero e metà dello stendimento con variazione pari alla distanza reale tra i geofoni dello stendimento. La migliore retta di regressione delle funzioni velocità ottenute, permette di determinare l'XY ottimo e la velocità del rifrattore che è ricavata dal coefficiente angolare.

Per mezzo della **funzione tempo-profondità** è possibile trovare la profondità del rifrattore espressa in unità di tempo. L'espressione di tale funzione è:

$$T_G = \frac{T_{S_1Y} + T_{S_2X} - \left(T_{S_1S_2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

Dove V_n è la velocità del rifrattore.



Analogamente a quanto avviene per la funzione velocità si determinano diverse funzioni tempo-profondità per l'insieme dei valori XY di studio. Tra le funzioni trovate, quella che presenta la maggiore articolazione compete al valore di XY ottimo.

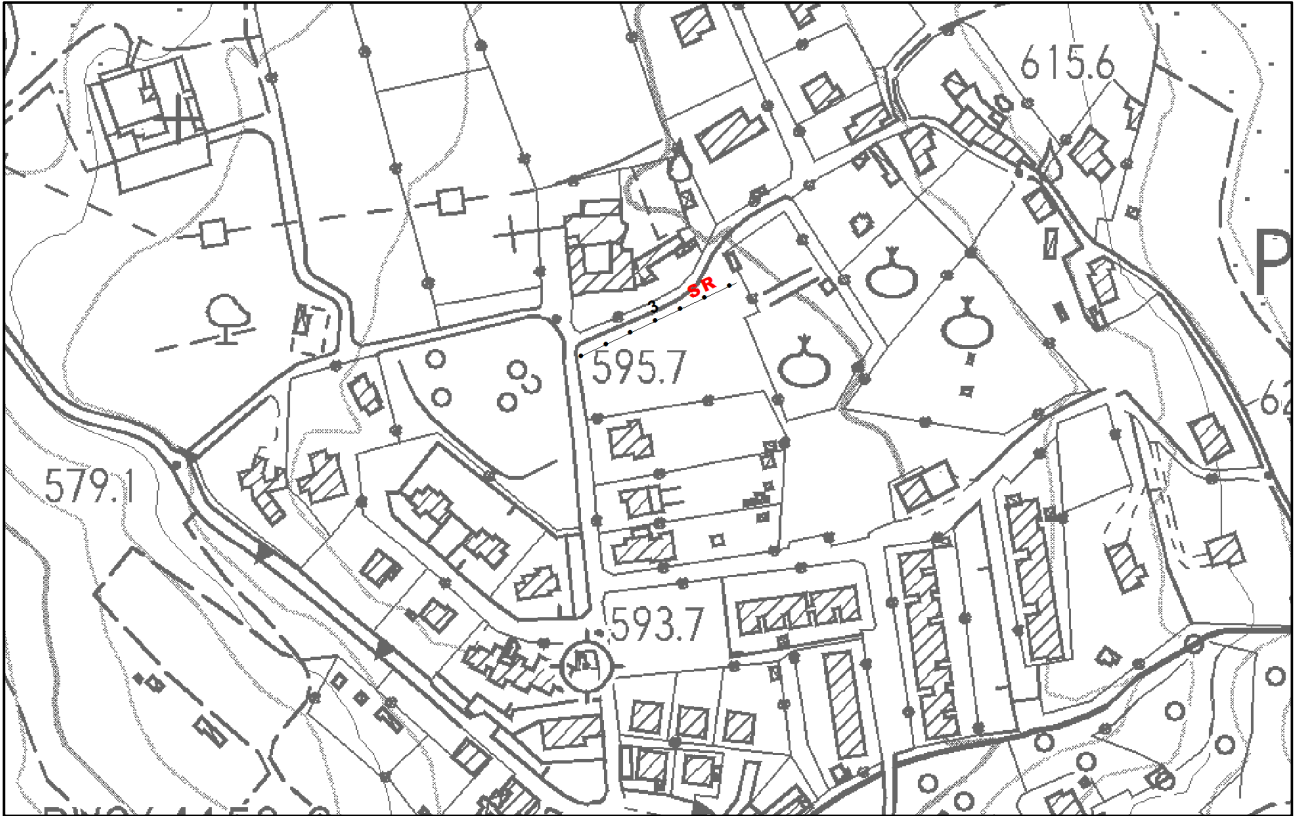
Infine, è possibile determinare lo spessore del rifrattore in corrispondenza delle posizioni dei geofoni G mediante la relazione:

$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

h rappresenta la profondità minima dal geofono G dunque la morfologia del rifratore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio h.

Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa 20°

Planimetria Scala 1:5000



Planimetria Scala 1:1000



Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24

Intervallo (m): 3 m

Lunghezza Stendimento (m): 69 m

Quota (m.s.l.m.): 596

Punti di energizzazione

	E1 Esterno SX	A Estremo SX	D1 Intermedio SX	C Centrale	D2 Intermedio DX	B Estremo DX	E2 Esterno DX
Posizione da Geofono G1 (m)	-3	-1.5	16.5	34.5	52.5	70.5	72

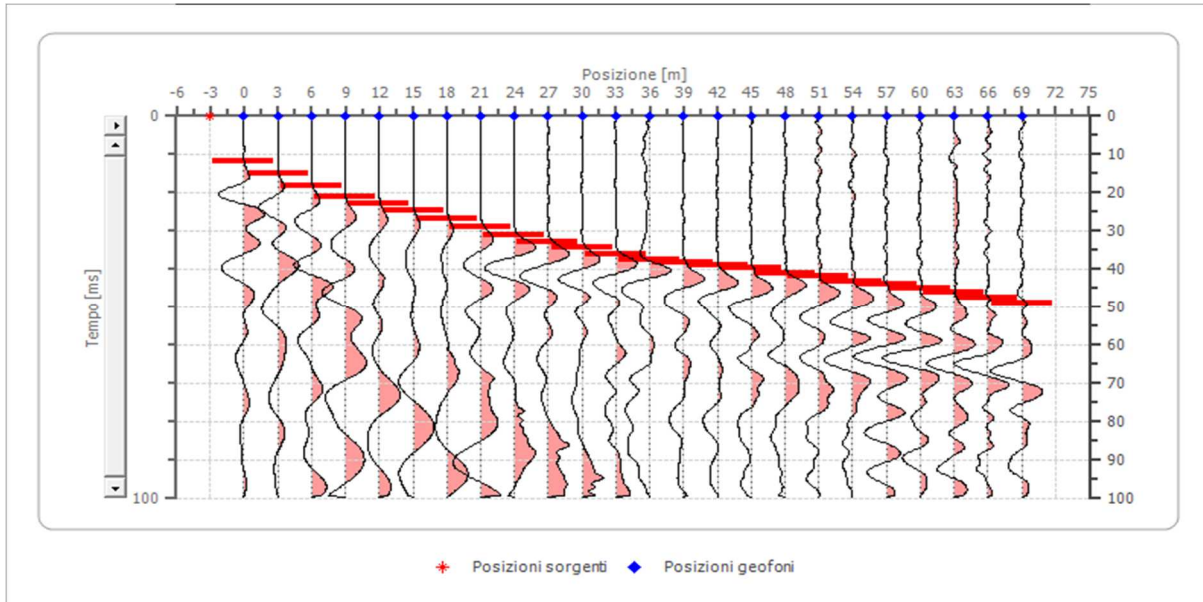
Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	3.0	0.1
3	6.0	0.2
4	9.0	0.3
5	12.0	0.4
6	15.0	0.4
7	18.0	0.5
8	21.0	0.6
9	24.0	0.7
10	27.0	0.8
11	30.0	0.9
12	33.0	1.0
13	36.0	1.0
14	39.0	1.1
15	42.0	1.2
16	45.0	1.3
17	48.0	1.4
18	51.0	1.5
19	54.0	1.6
20	57.0	1.7
21	60.0	1.7
22	63.0	1.8
23	66.0	1.9
24	69.0	2.0

Dati battute – ONDE P

Battuta 1

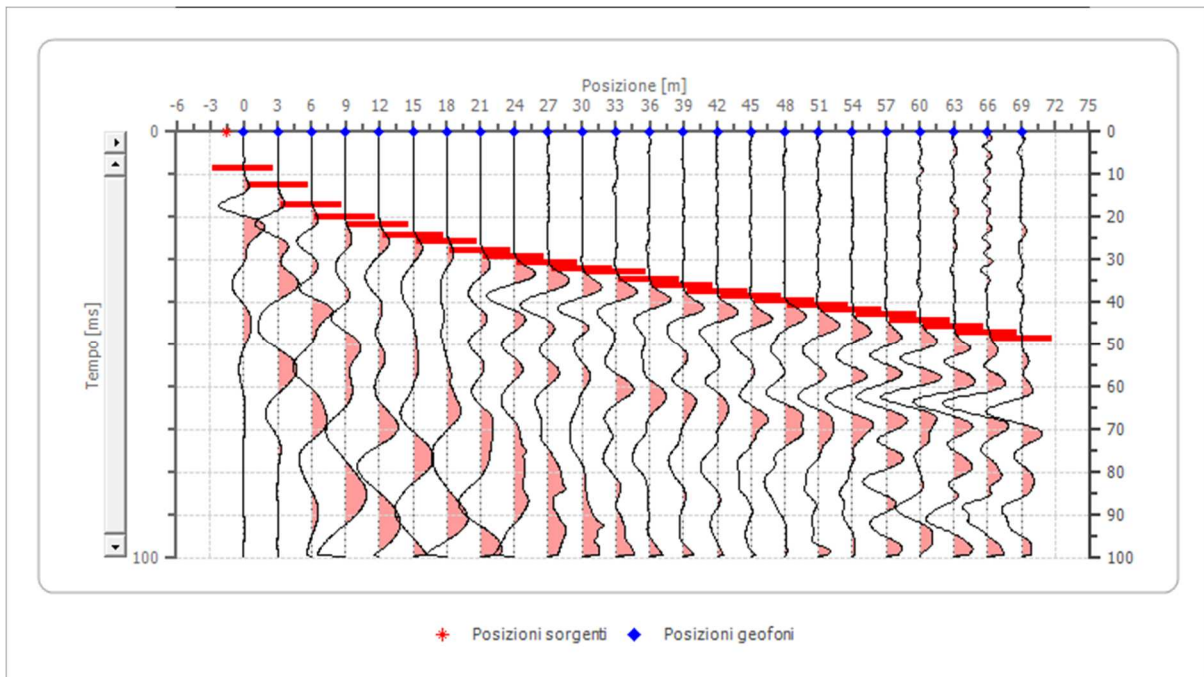
Posizione sorgente X -3 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	11.7857
3.0	15.0000
6.0	18.2143
9.0	21.0714
12.0	22.8571
15.0	24.6429
18.0	26.7857
21.0	28.9286
24.0	31.0714
27.0	32.8571
30.0	34.2857
33.0	36.0714
36.0	37.5000
39.0	38.2143
42.0	38.9286
45.0	39.6429
48.0	41.0714
51.0	41.7857
54.0	43.2143
57.0	43.9286
60.0	45.0000
63.0	46.0714
66.0	47.5000
69.0	48.9286

Battuta 2

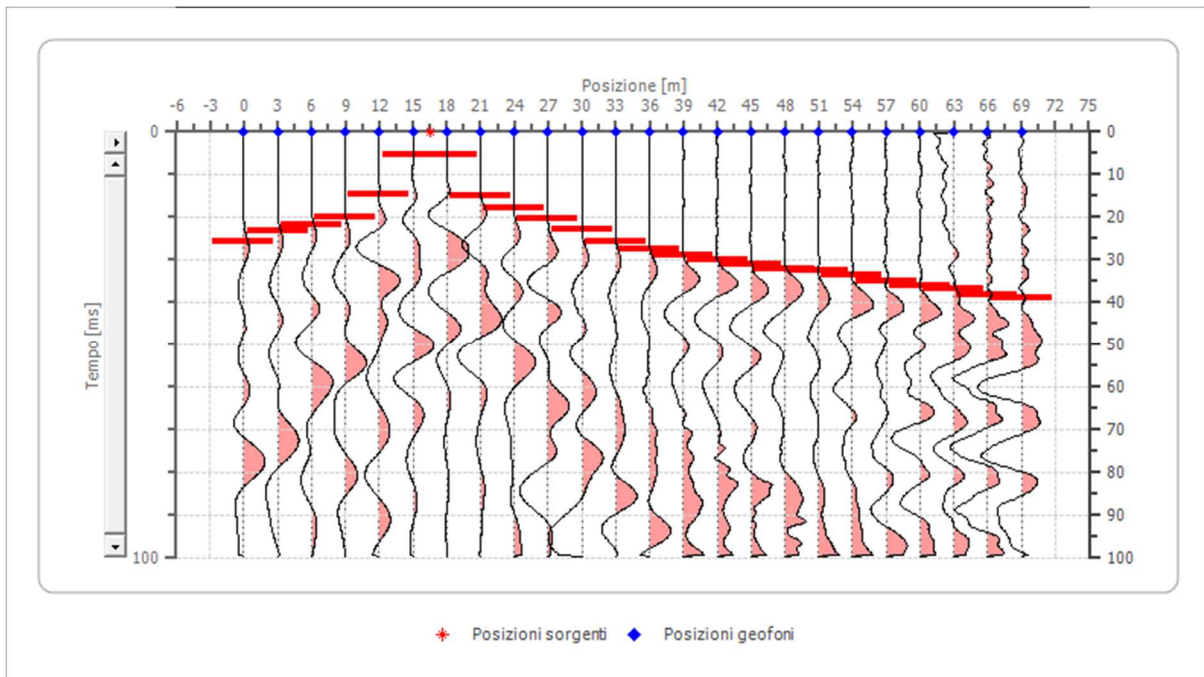
Posizione sorgente X -1.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	8.5714
3.0	12.5000
6.0	17.1429
9.0	20.0000
12.0	21.7857
15.0	24.2857
18.0	25.7143
21.0	27.8571
24.0	29.2857
27.0	30.7143
30.0	32.1429
33.0	32.8571
36.0	34.6429
39.0	36.0714
42.0	37.5000
45.0	38.5714
48.0	39.6429
51.0	40.7143
54.0	41.7857
57.0	42.8571
60.0	44.2857
63.0	45.7143
66.0	47.1429
69.0	48.5714

Battuta 3

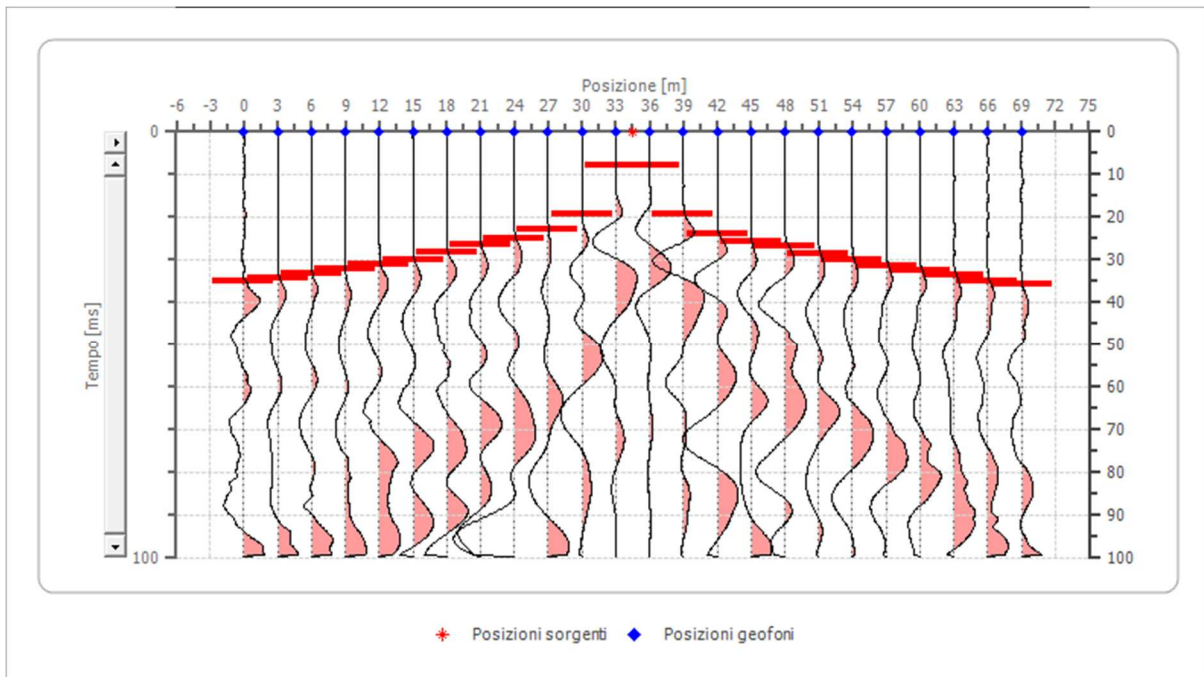
Posizione sorgente X 16.5 [m]
 Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	25.7143
3.0	23.2143
6.0	21.7857
9.0	20.0000
12.0	14.6429
15.0	5.3571
18.0	5.3571
21.0	15.0000
24.0	17.8571
27.0	20.3571
30.0	22.8571
33.0	25.7143
36.0	27.5000
39.0	28.9286
42.0	30.0000
45.0	31.0714
48.0	32.1429
51.0	32.5000
54.0	33.5714
57.0	35.0000
60.0	36.0714
63.0	36.7857
66.0	38.2143
69.0	38.9286

Battuta 4

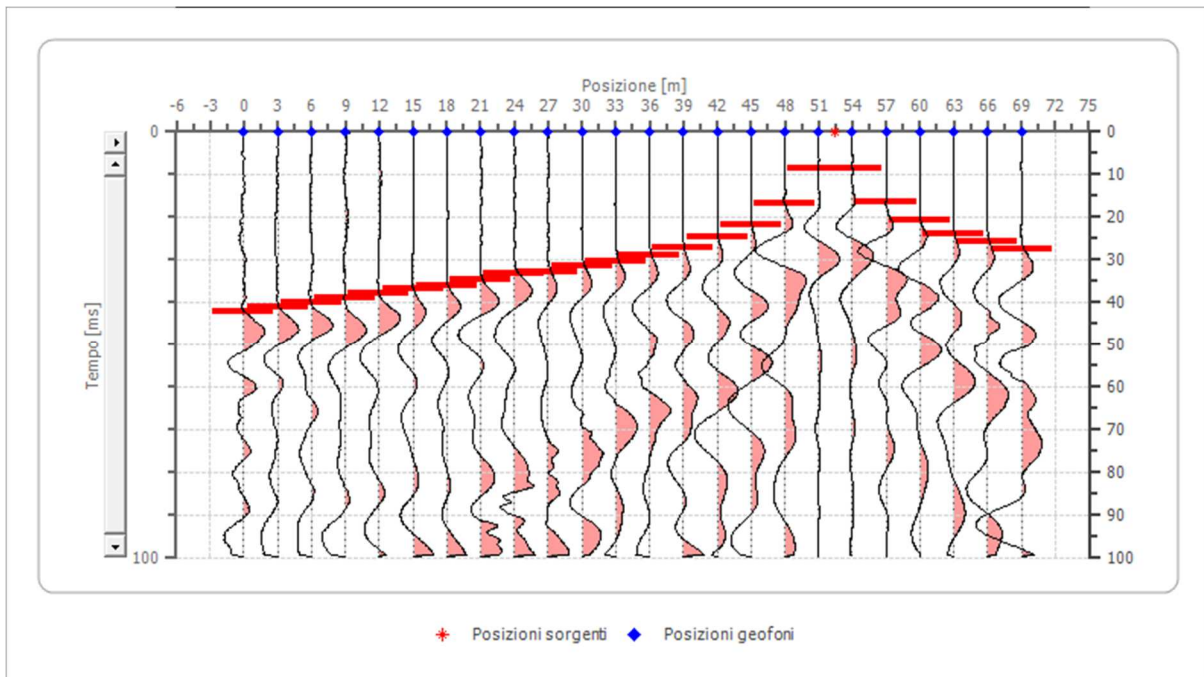
Posizione sorgente X 34.5 [m]
 Posizione sorgente Z 1 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	35.0000
3.0	34.2857
6.0	33.2143
9.0	32.1429
12.0	31.0714
15.0	30.0000
18.0	28.2143
21.0	26.4286
24.0	25.0000
27.0	22.8571
30.0	19.2857
33.0	7.8571
36.0	7.8571
39.0	19.2857
42.0	23.9286
45.0	25.7143
48.0	26.7857
51.0	28.5714
54.0	30.0000
57.0	31.4286
60.0	32.5000
63.0	33.5714
66.0	35.0000
69.0	35.7143

Battuta 5

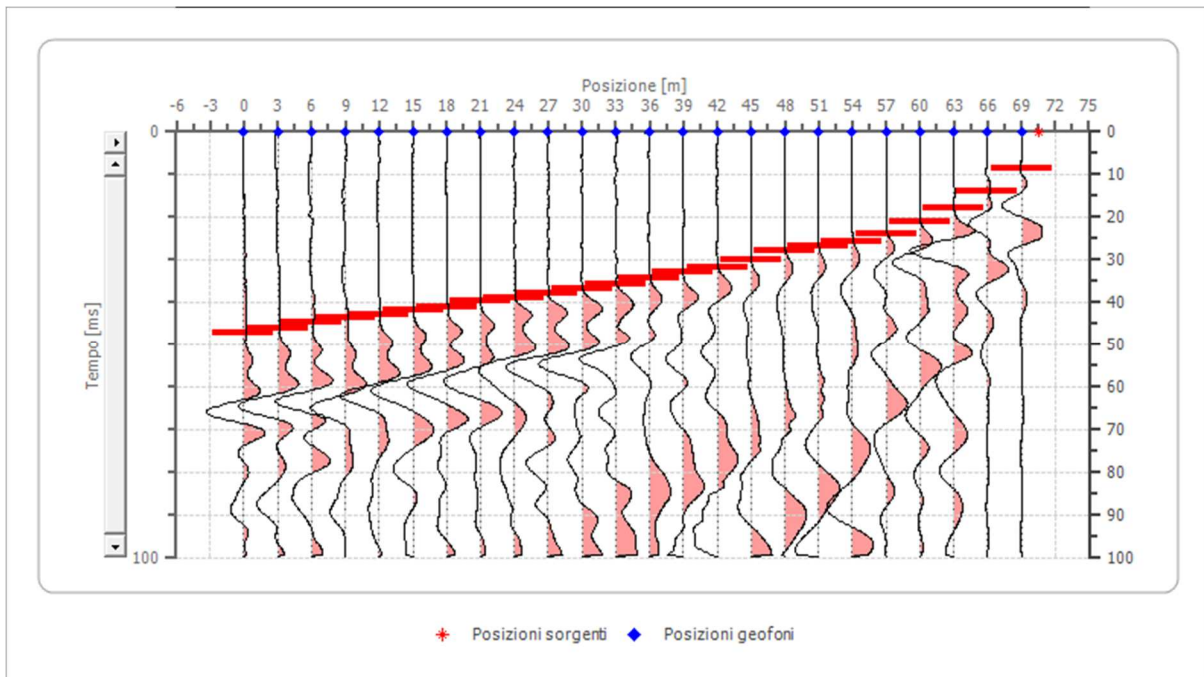
Posizione sorgente X 52.5 [m]
 Posizione sorgente Z 2 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	42.1429
3.0	41.0714
6.0	40.0000
9.0	38.9286
12.0	37.8571
15.0	36.7857
18.0	36.0714
21.0	34.6429
24.0	33.2143
27.0	32.8571
30.0	31.4286
33.0	30.3571
36.0	28.9286
39.0	27.1429
42.0	24.6429
45.0	21.7857
48.0	16.7857
51.0	8.5714
54.0	8.5714
57.0	16.4286
60.0	20.7143
63.0	23.9286
66.0	25.7143
69.0	27.5000

Battuta 6

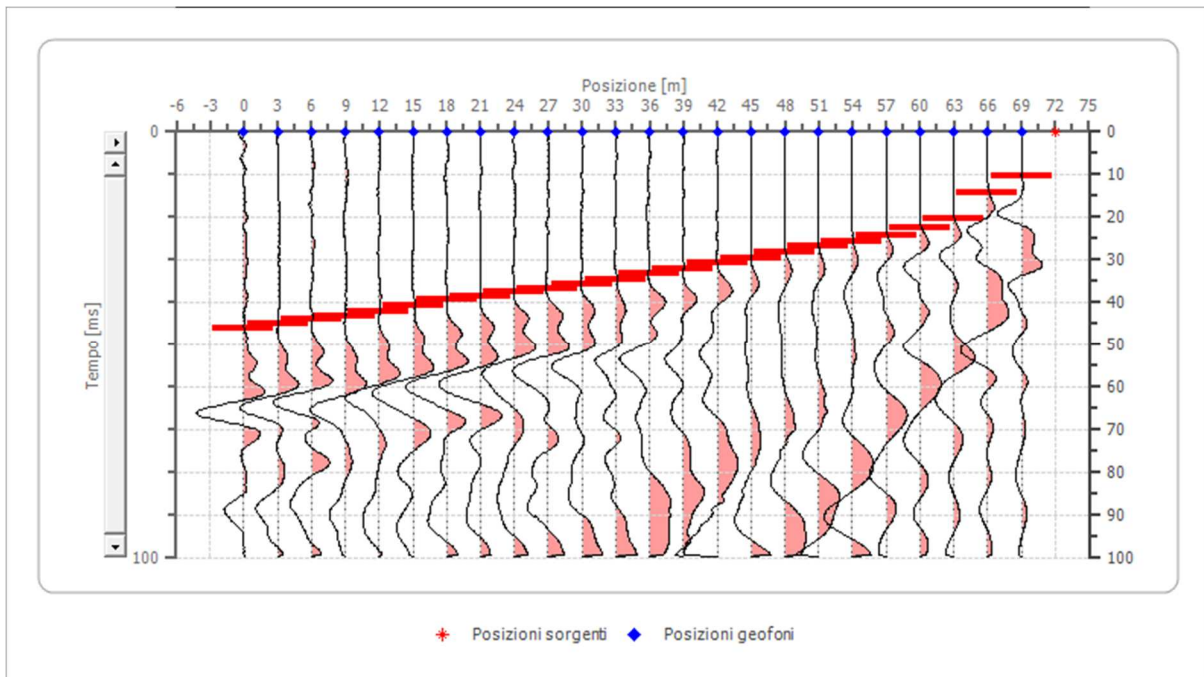
Posizione sorgente X 70.5 [m]
 Posizione sorgente Z 2 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	47.1429
3.0	46.0714
6.0	44.6429
9.0	43.5714
12.0	42.8571
15.0	41.7857
18.0	41.0714
21.0	39.6429
24.0	38.9286
27.0	37.8571
30.0	36.7857
33.0	35.7143
36.0	34.2857
39.0	32.8571
42.0	31.7857
45.0	30.0000
48.0	27.8571
51.0	26.7857
54.0	25.7143
57.0	23.9286
60.0	21.0714
63.0	17.8571
66.0	13.9286
69.0	8.5714

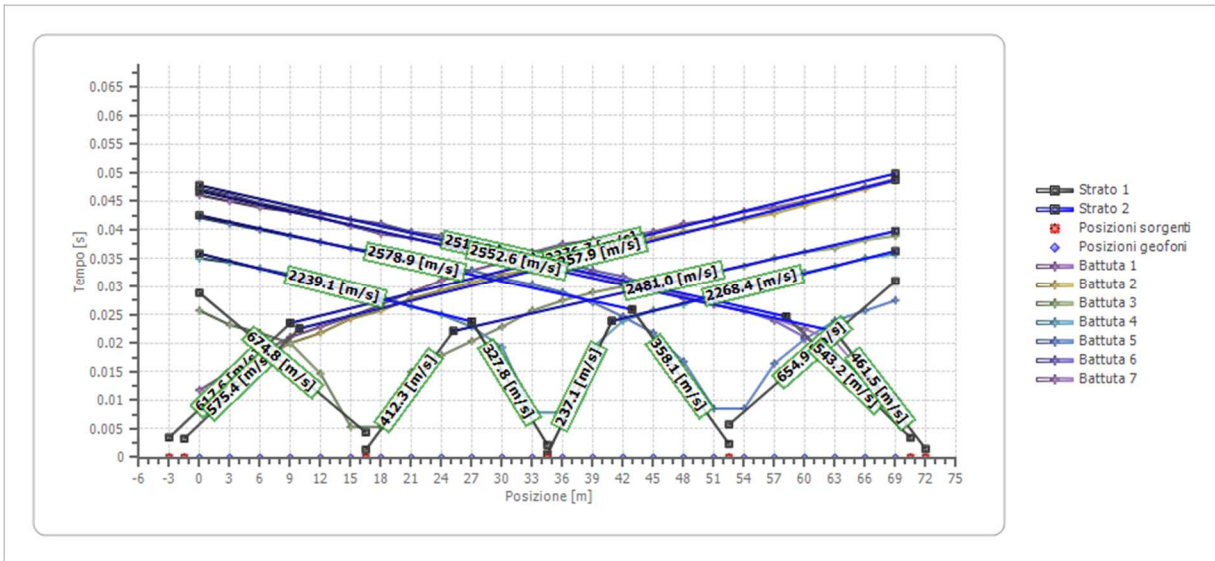
Battuta 7

Posizione sorgente X 72 [m]
 Posizione sorgente Z 2 [m]

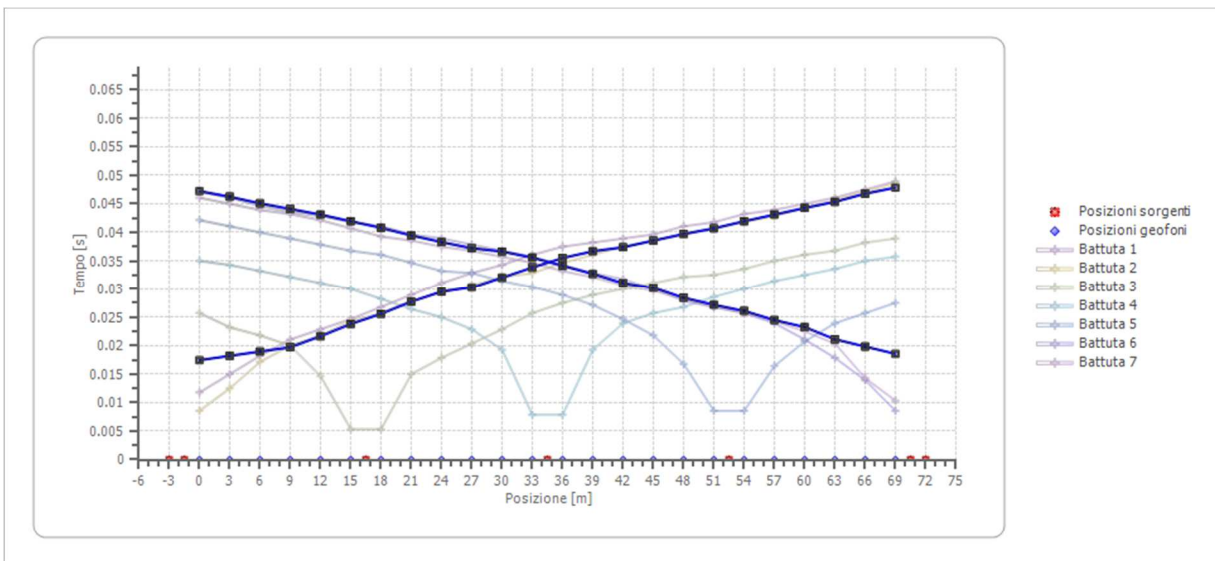


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	46.0714
3.0	45.0000
6.0	43.9286
9.0	43.2143
12.0	42.1429
15.0	40.7143
18.0	39.2857
21.0	38.5714
24.0	37.5000
27.0	36.7857
30.0	35.7143
33.0	34.6429
36.0	33.2143
39.0	32.1429
42.0	30.7143
45.0	29.6429
48.0	28.2143
51.0	26.7857
54.0	25.7143
57.0	24.2857
60.0	22.5000
63.0	20.3571
66.0	14.2857
69.0	10.3571

Dromocrone



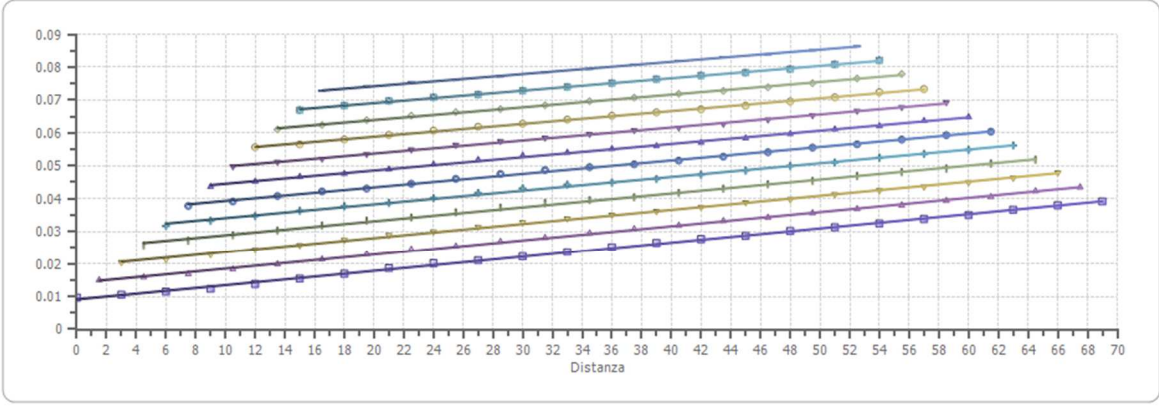
Dromocrone traslate



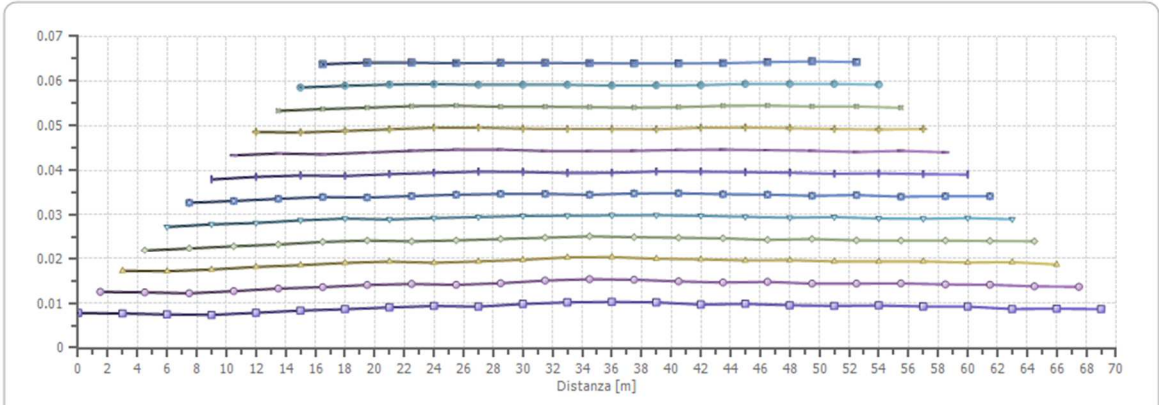
Interpretazione col metodo G.,R.M.

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	3.9	--
G= 3.0 [m]	3.8	--
G= 6.0 [m]	3.7	--
G= 9.0 [m]	3.7	--
G= 12.0 [m]	3.9	--
G= 15.0 [m]	4.2	--
G= 18.0 [m]	4.3	--
G= 21.0 [m]	4.5	--
G= 24.0 [m]	4.7	--
G= 27.0 [m]	4.6	--
G= 30.0 [m]	4.9	--
G= 33.0 [m]	5.1	--
G= 36.0 [m]	5.1	--
G= 39.0 [m]	5.1	--
G= 42.0 [m]	4.8	--
G= 45.0 [m]	4.9	--
G= 48.0 [m]	4.7	--
G= 51.0 [m]	4.7	--
G= 54.0 [m]	4.7	--
G= 57.0 [m]	4.6	--
G= 60.0 [m]	4.6	--
G= 63.0 [m]	4.3	--
G= 66.0 [m]	4.4	--
G= 69.0 [m]	4.3	--
Velocità [m/sec]	486.3	2290.2
Descrizione		

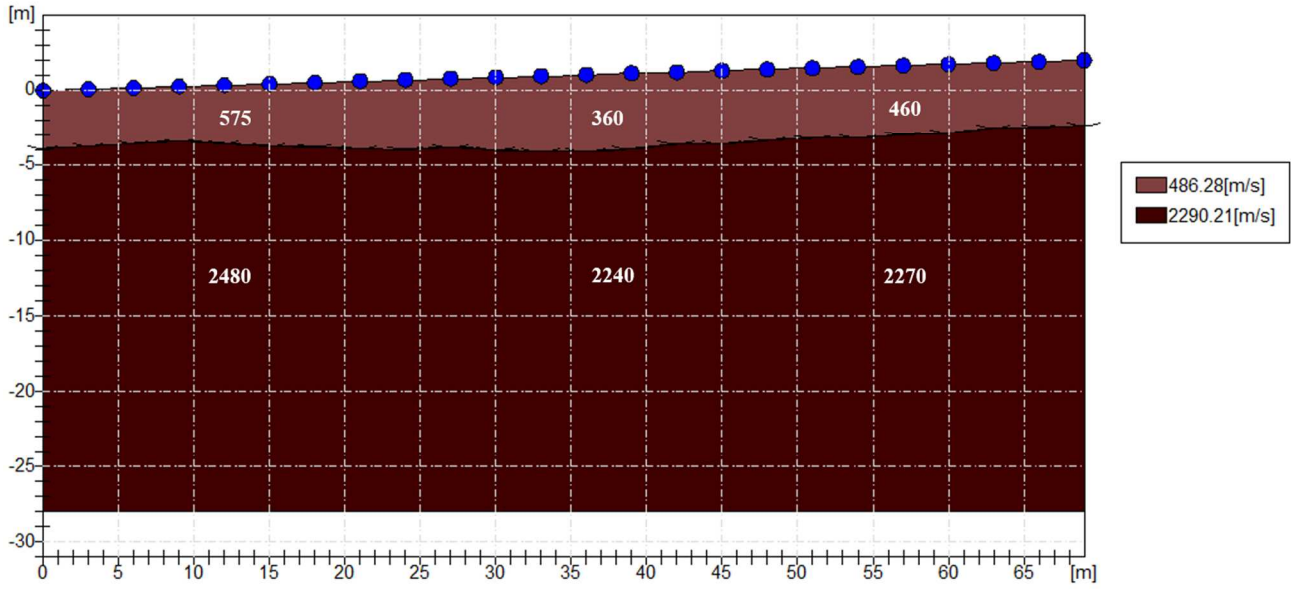


- XY = 0, Deviazione standard = 0.00907
- ▲ XY = 3, Deviazione standard = 0.00865
- ▼ XY = 6, Deviazione standard = 0.00821
- XY = 9, Deviazione standard = 0.00772
- ◆ XY = 12, Deviazione standard = 0.00723
- XY = 15, Deviazione standard = 0.00674
- ▲ XY = 18, Deviazione standard = 0.00628
- ▼ XY = 21, Deviazione standard = 0.00582
- XY = 24, Deviazione standard = 0.00539
- ◇ XY = 27, Deviazione standard = 0.00501
- XY = 30, Deviazione standard = 0.00456
- XY = 33, Deviazione standard = 0.00417



- XY = 0, Rugosità = 0.000719
- XY = 3, Rugosità = 0.000699
- ▲ XY = 6, Rugosità = 0.000659
- ◇ XY = 9, Rugosità = 0.000574
- ◆ XY = 12, Rugosità = 0.000493
- XY = 15, Rugosità = 0.000411
- ▲ XY = 18, Rugosità = 0.000355
- ▼ XY = 21, Rugosità = 0.000307
- XY = 24, Rugosità = 0.000231
- ◇ XY = 27, Rugosità = 0.000219
- XY = 30, Rugosità = 0.000155
- XY = 33, Rugosità = 0.000122

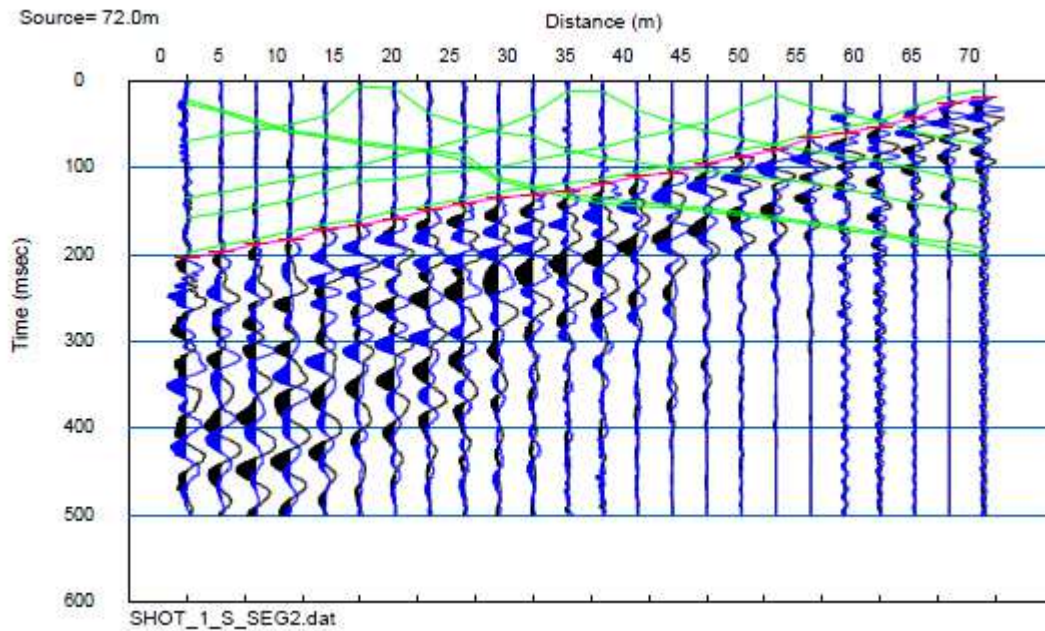
SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P



Dati battute – ONDE SH

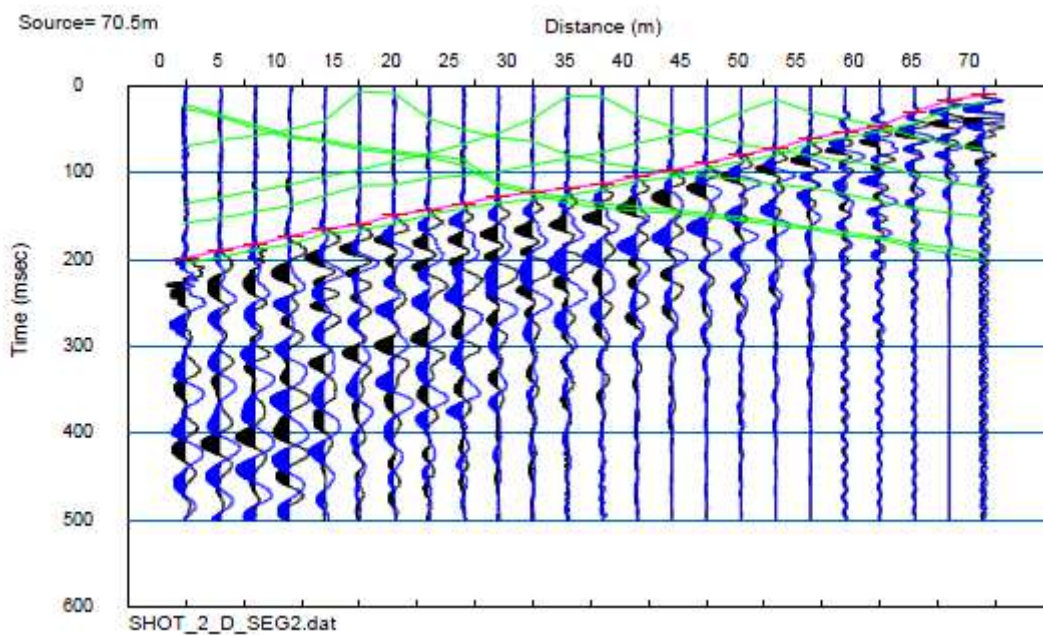
Battuta 7

Posizione sorgente X 72 [m]
Posizione sorgente Z 2 [m]



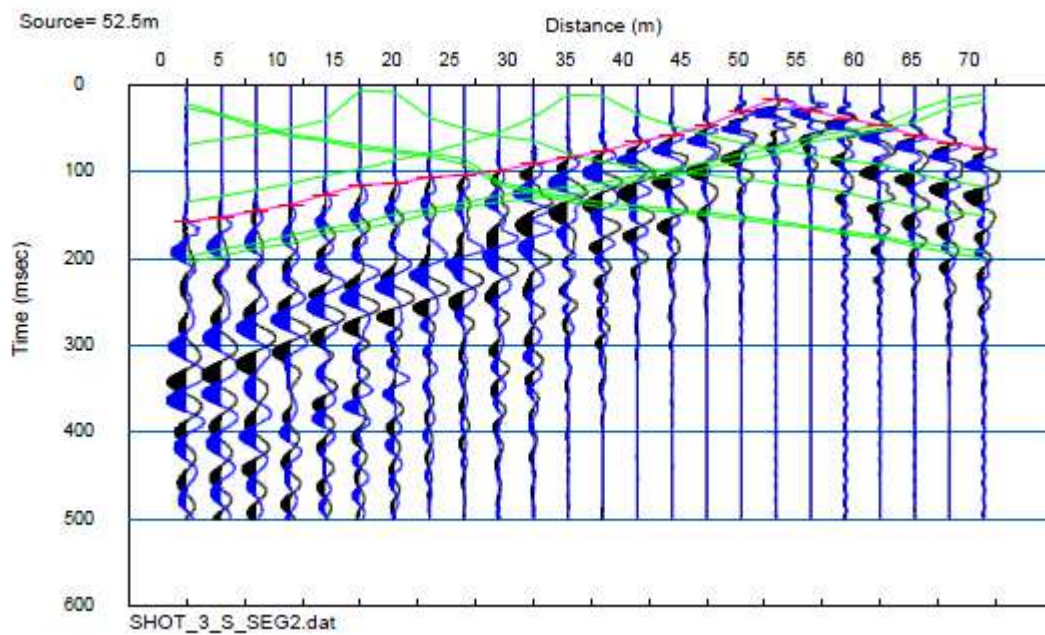
Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]
Posizione sorgente Z 2 [m]



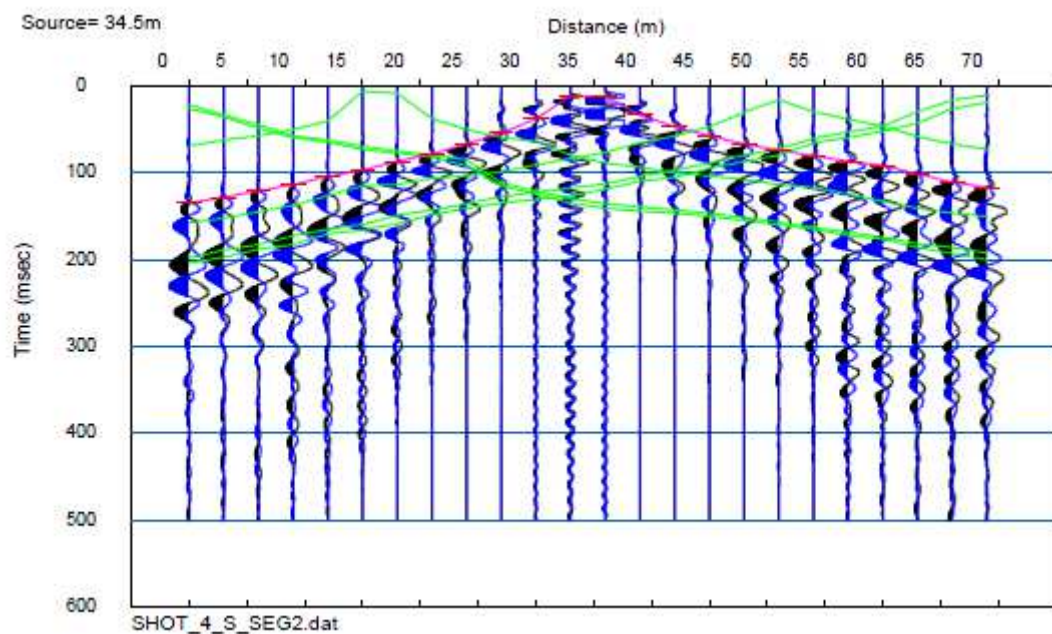
Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]
Posizione sorgente Z 2 [m]



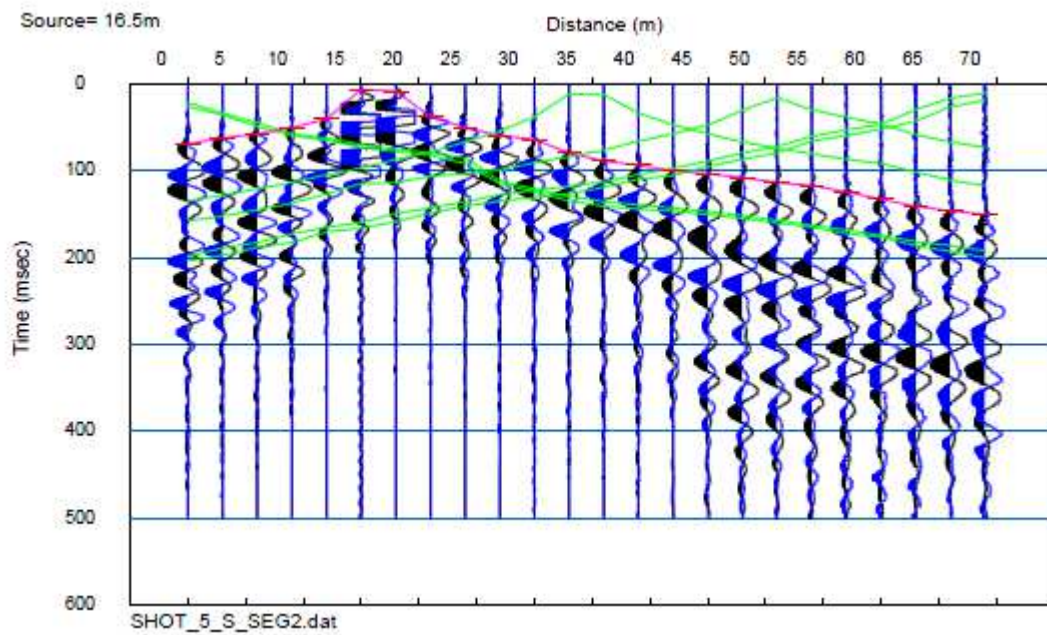
Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]
Posizione sorgente Z 1 [m]



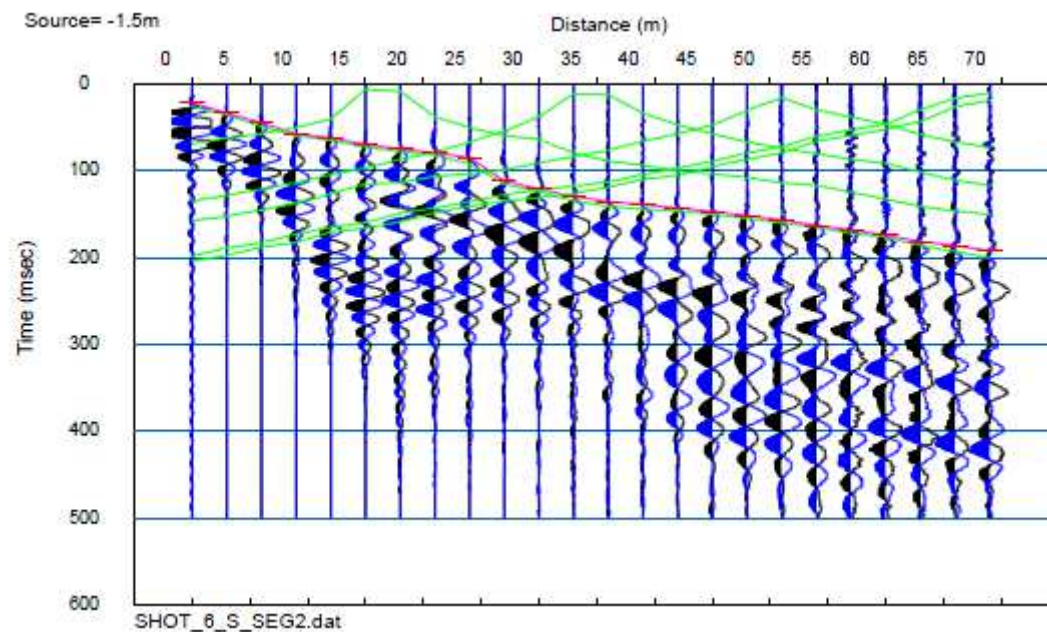
Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



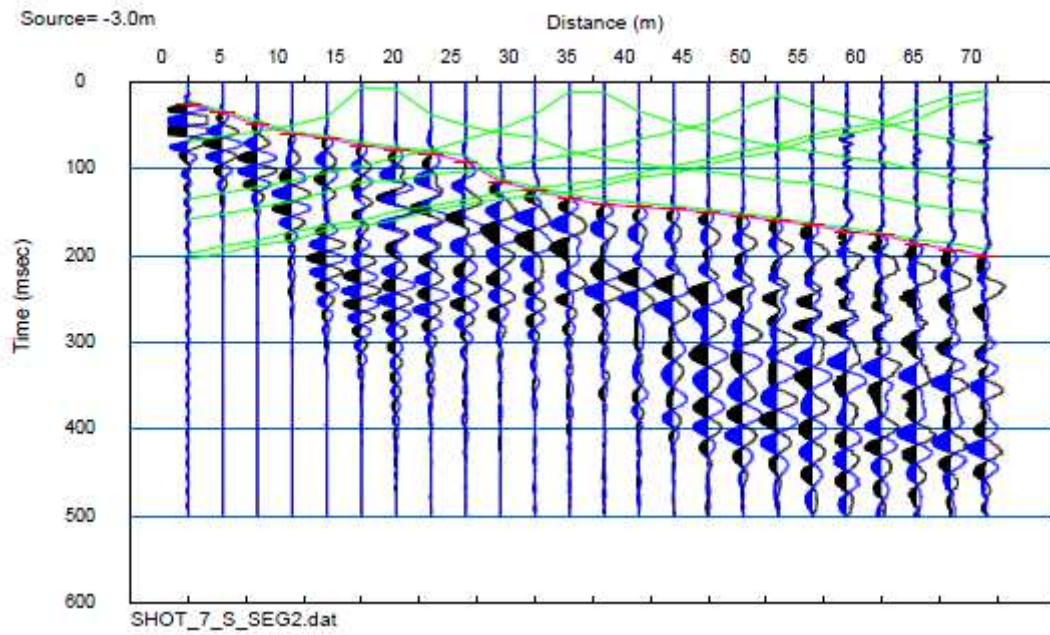
Battuta 2

Posizione sorgente X -1.5 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



Battuta 1

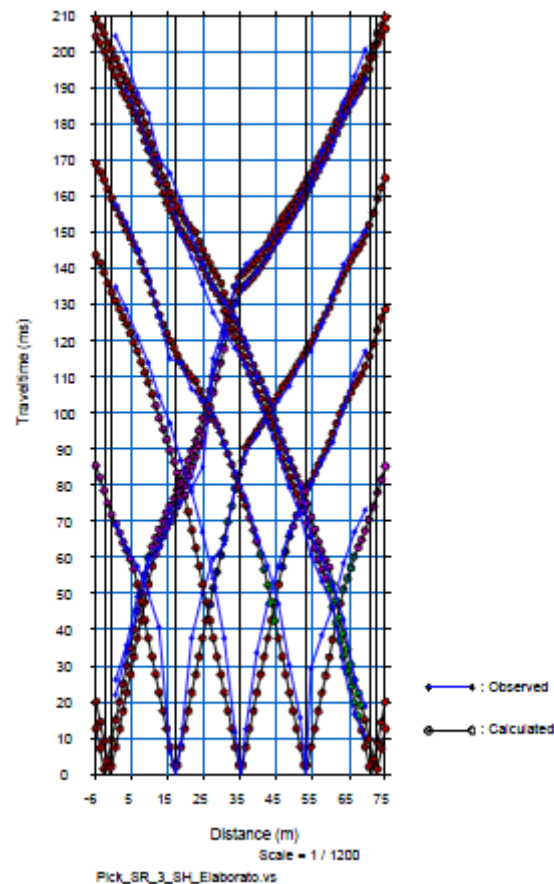
Posizione sorgente X -3 [m]
Posizione sorgente Z 0 [m]



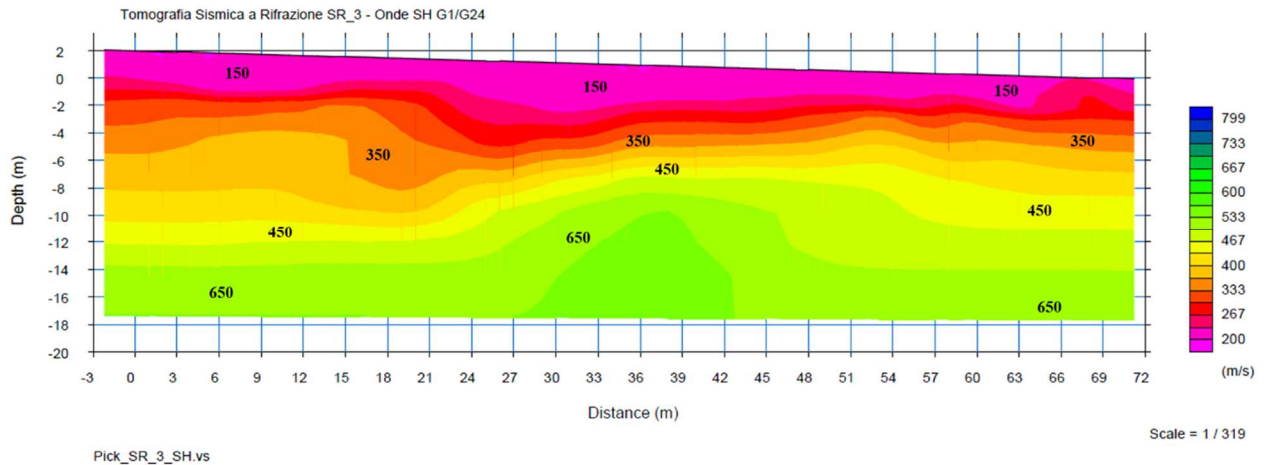
Tempi di arrivo

Posizione Geofono (m)	Tempi di arrivo (ms)						
	SHOT 1	SHOT 2	SHOT 3	SHOT 4	SHOT 5	SHOT 6	SHOT 7
0	26.07407	21.92593	69.03704	134.8148	157.6296	198.5185	204.25
3	35.55556	33.48148	62.51852	128.5926	152.5926	189.25	197.75
6	49.18518	45.03704	57.48148	121.1852	145.1852	183	188.5
9	59.55556	57.48148	50.07407	113.7778	137.7778	173.3333	183
12	64.88889	62.51852	40.59259	104.5926	126.5185	165.037	170.3704
15	73.18519	69.92593	6.222222	97.18519	114.963	159.5	166.2222
18	77.33334	75.25926	8.296296	86.81481	113.7778	149.25	158.75
21	82.37037	79.40741	37.62963	78.22222	106.6667	143.1111	148.4444
24	91.85185	84.74074	50.07407	66.96296	103.4074	135.7037	141.037
27	114.963	111.7037	59.55556	54.22222	99.25926	127.7037	134.8148
30	124.4444	121.1852	63.70371	37.62963	90.96296	122.3704	130.6667
33	134.8148	129.9048	79.40741	11.55556	83.55556	117.9259	126.5185
36	141.037	135.7037	88.88889	12.44445	76.14815	112.8889	119.1111
39	144.2963	138.963	93.92593	33.48148	65.77778	104.5926	109.9259
42	146.2896	143.1111	100.1481	47.11111	57.48148	97.18519	105.4815
45	150.5185	147.2593	103.4074	57.48148	47.11111	88.88889	95.11112
48	154.6667	151.4074	107.4403	66.96296	30.22222	79.40741	86.81481
51	160	156.7407	113.7778	74.07407	15.7037	72	79.40741
54	165.037	162.963	117.037	80.2963	29.33333	60.44444	65.77778
57	172.4444	168.2963	124.4444	86.81481	38.51852	53.33333	59.55556
60	176.5926	174	132.7407	91.85185	46.22226	46.22226	52.14815
63	186.0741	181.9259	141.037	101.3333	58.37037	29.33333	42.66667
66	193.1852	186.0741	146.3704	110.8148	66.96296	16.59259	26.07407
69	200.5926	192.2963	150.5185	117.037	73.18519	10.25	18.75

Dromocrone teoriche e sperimentali



ELABORAZIONE TOMOGRAFICA – ONDE SH



La logistica del posto non ha permesso di svolgere la stesa sismica a rifrazione secondo gli standard previsti dal programma VEL, in particolare per quanto riguarda la distanza degli scoppi esterni, maggiormente idonei alla risoluzione dell'eventuale presenza di un bedrock sismico se profondo.

I risultati della tomografia sismica elaborata non hanno infatti messo in evidenza la presenza di questo tipo di substrato ($V_s > 800$ m/s) e per questo motivo si è ritenuto necessario integrare tale indagine a Pomino con una elaborazione congiunta tra l'indagine **MASW** ricavata dallo SHOT 7 della stesa sismica SR_3 e la misura di microtremore ambientale **HVSR 6** svolta nelle immediate vicinanze.

I risultati sono mostrati di seguito:

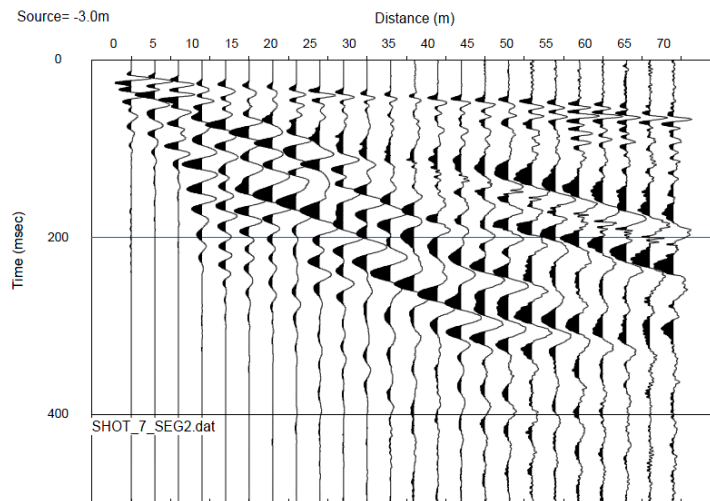
Geometria dello stendimento MASW_3

Numero Geofoni: 24

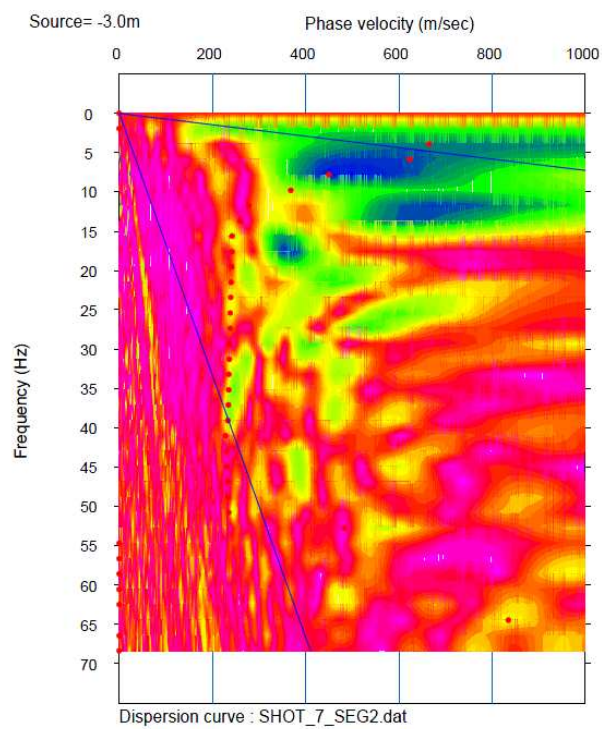
Intervallo (m): 3 m

Lunghezza Stendimento (m): 69 m

Sismogramma MASW 3

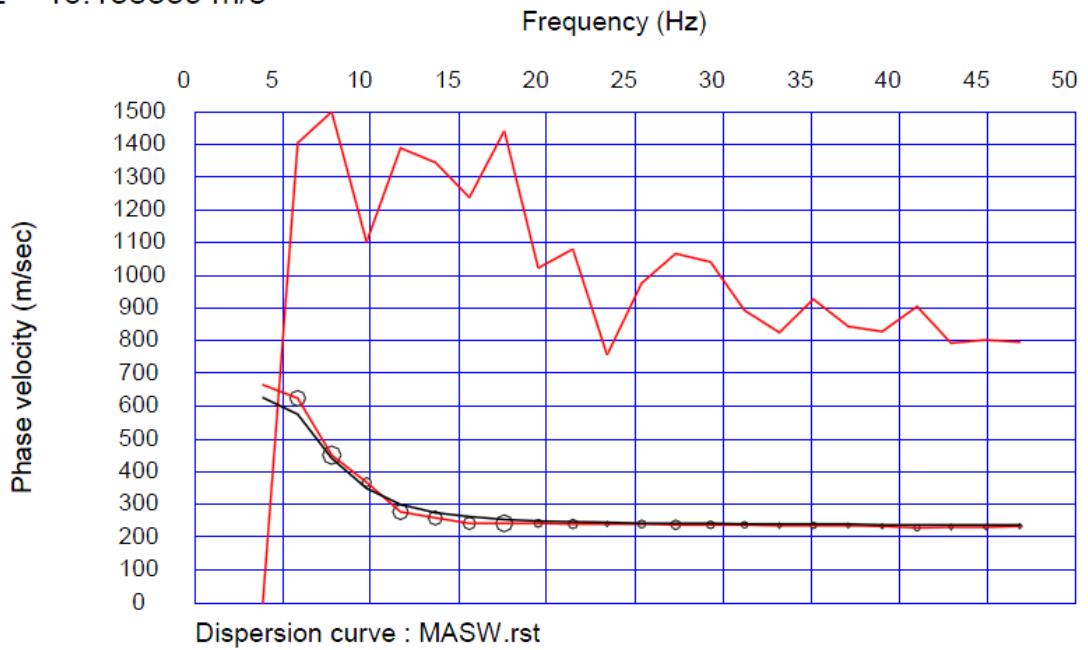


Curva Dispersione MASW 3

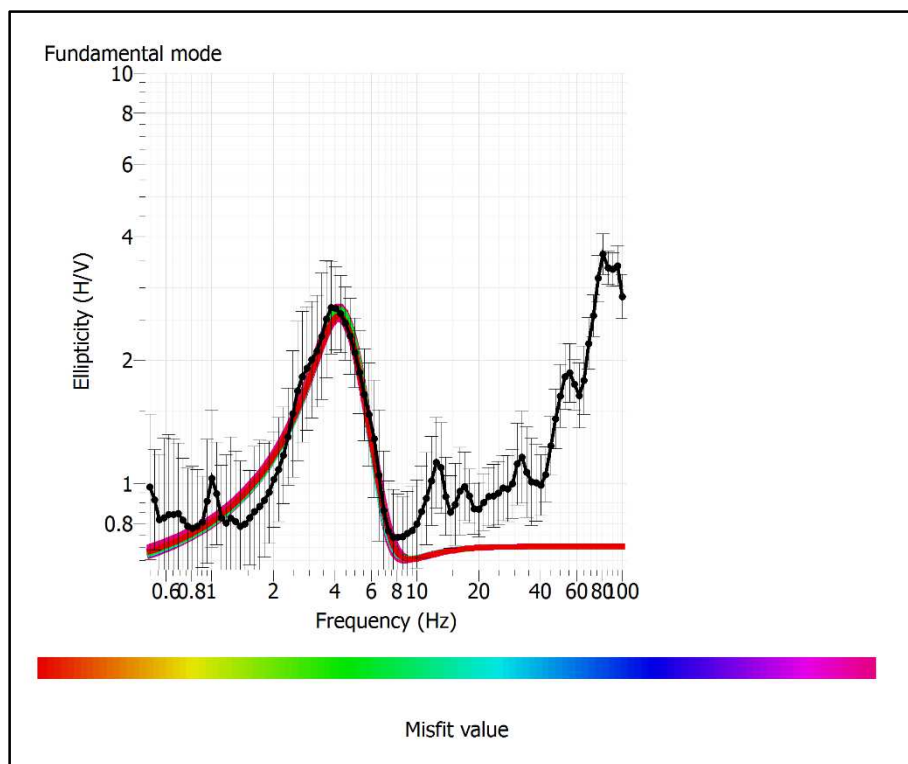


Curva Teorica e Sperimentale MASW 3

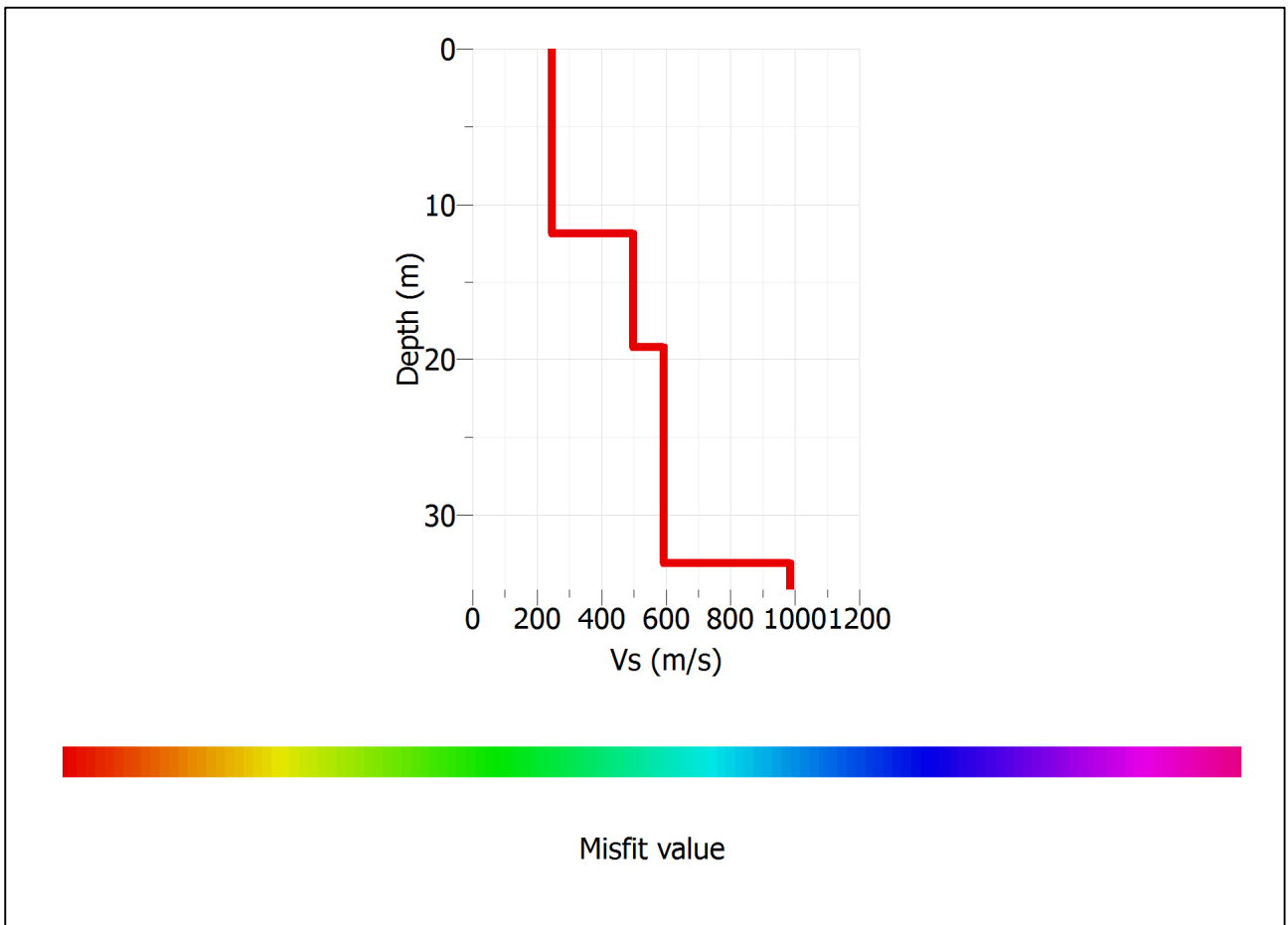
RMSE = 16.138339 m/s



Curva Teorica e Sperimentale HVSR 6



Profilo Vs MASW 3 + HVSr 6



FOTO

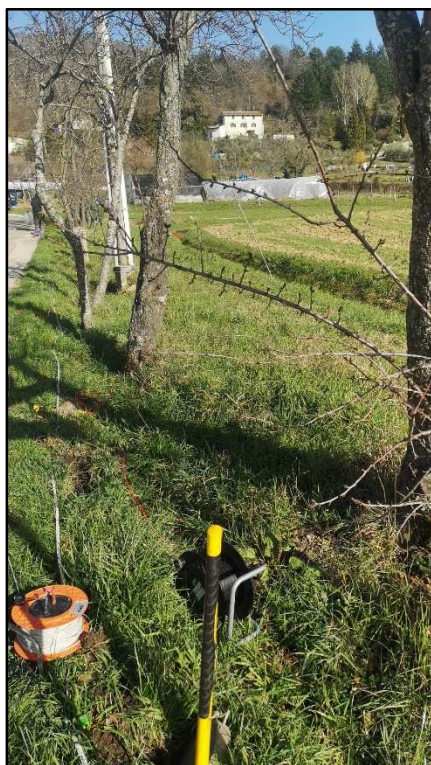


Foto – Stesa Sismica a Rifrazione SR_3

INDAGINE SISMICA CONGIUNTA MASW_1 + ESAC_1 + HVSr_2

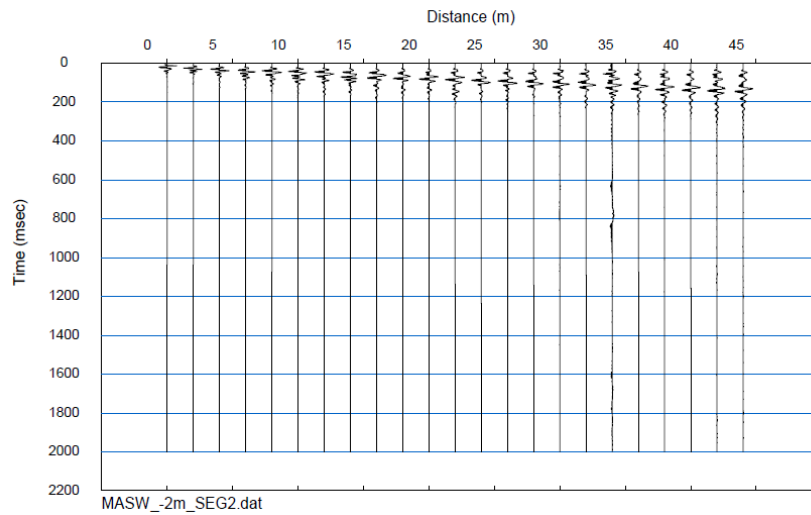
Geometria dello stendimento MASW_1

Numero Geofoni: 24

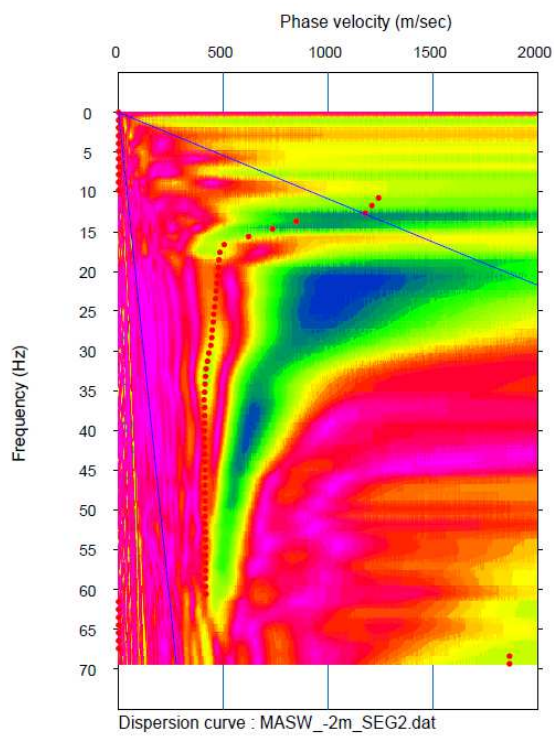
Intervallo (m): 2 m

Lunghezza Stendimento (m): 46 m

Sismogramma MASW 1



Curva Dispersione MASW 1



Geometria dello stendimento ESAC 1

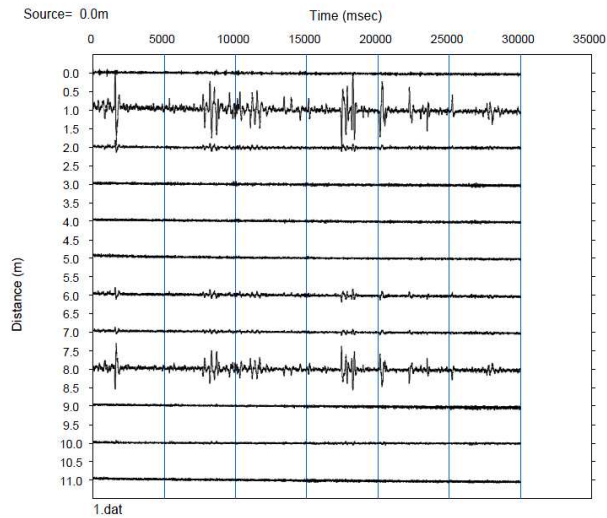
Geometria Stendimento: L

Numero Geofoni: 11

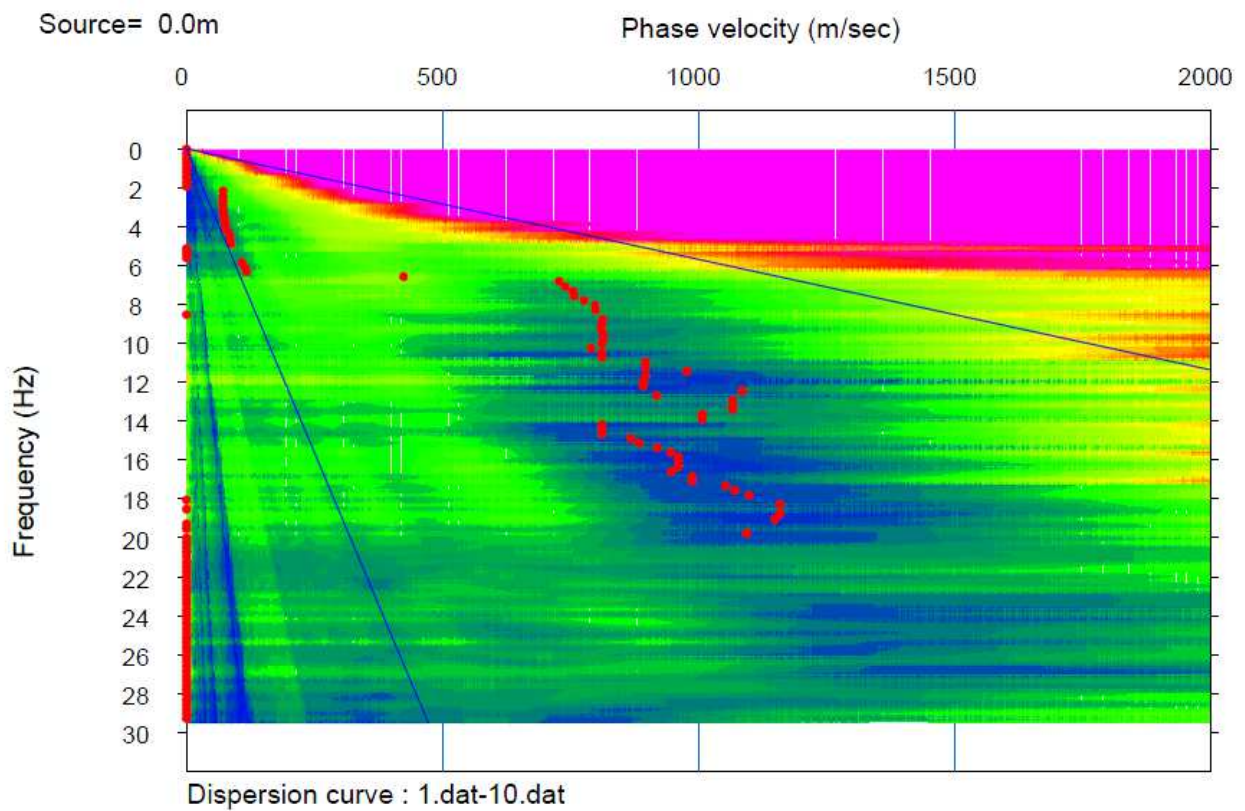
Intervallo (m): 4 m

Lunghezza Stendimento (m): 20 m

MAM 2D ESAC 1

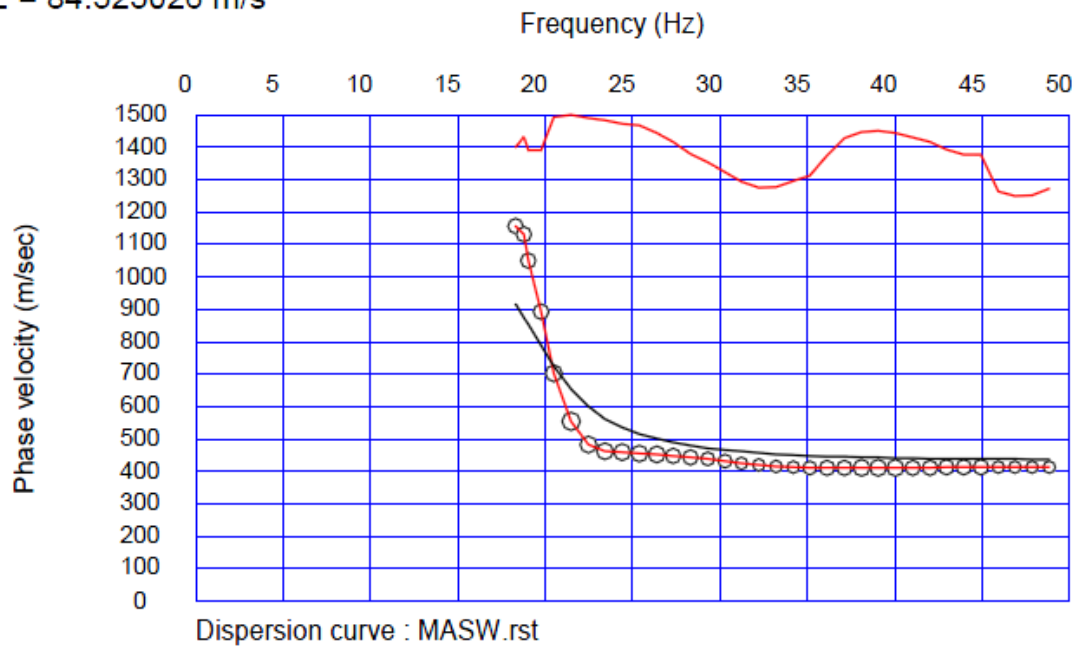


Curva Dispersione ESAC 1

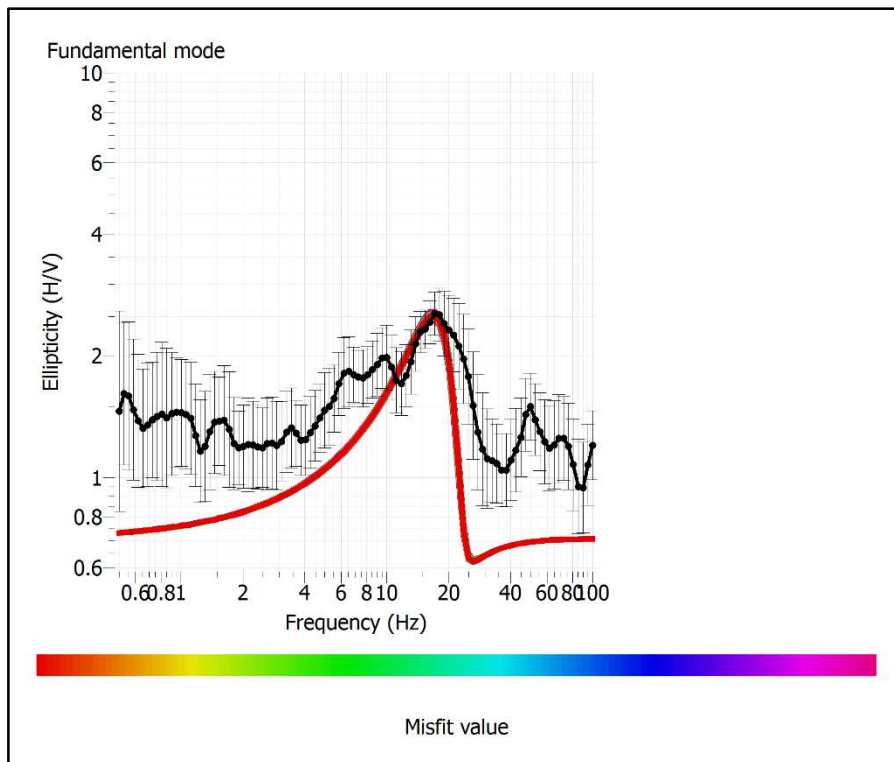


Curva Teorica e Sperimentale MASW 1 + ESAC 1

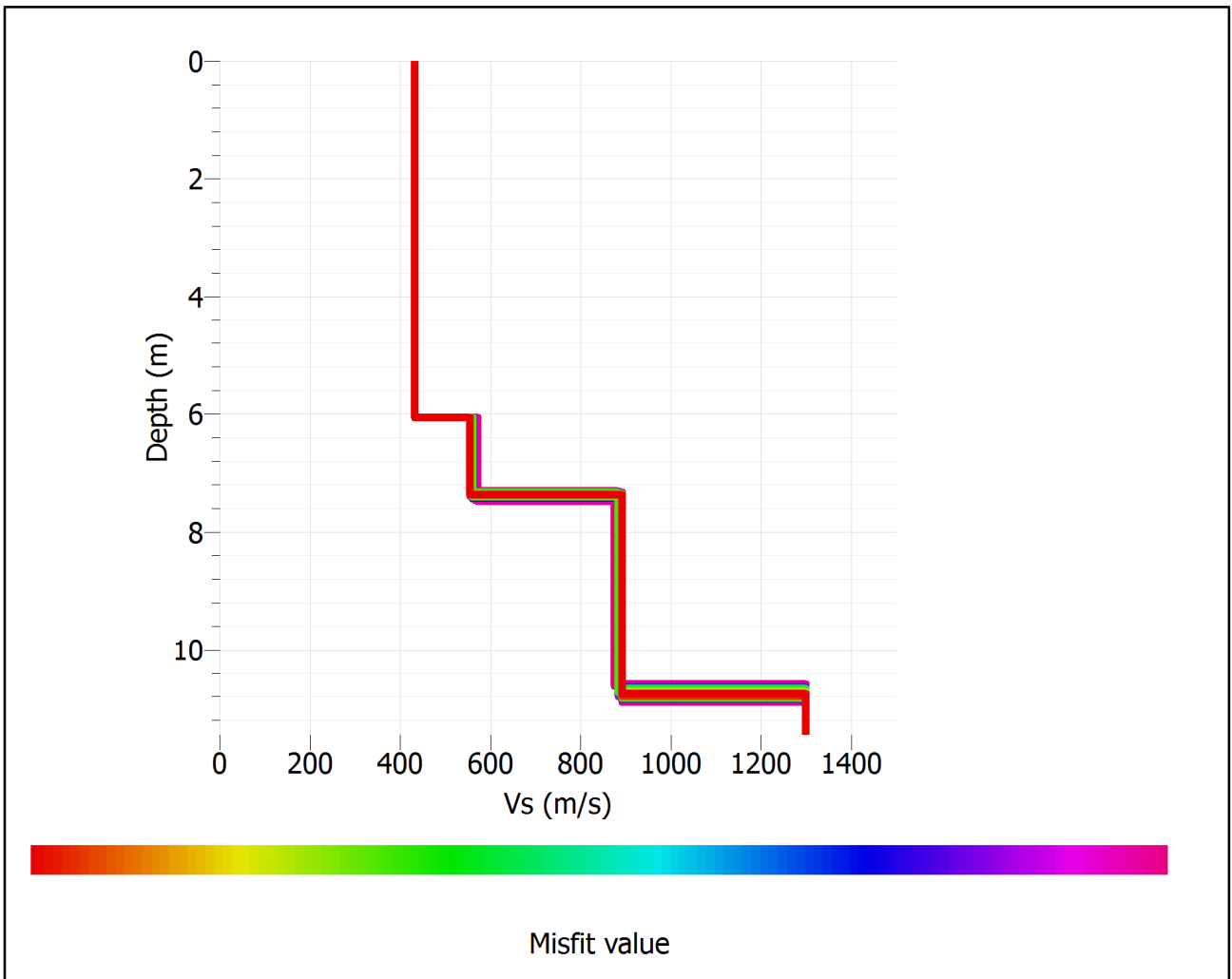
RMSE = 84.323026 m/s



Curva Teorica e Sperimentale HVSr 2



Profilo Vs MASW 1 + ESAC 1 + HVSR 2



FOTO



Foto – Stesa Sismica MASW_1_ESAC_1

INDAGINE SISMICA CONGIUNTA MASW_2 + HVSr_10

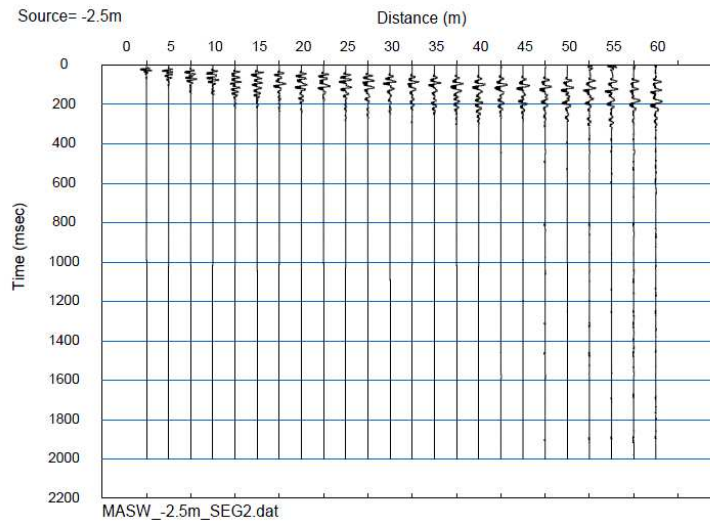
Geometria dello stendimento MASW_2

Numero Geofoni: 24

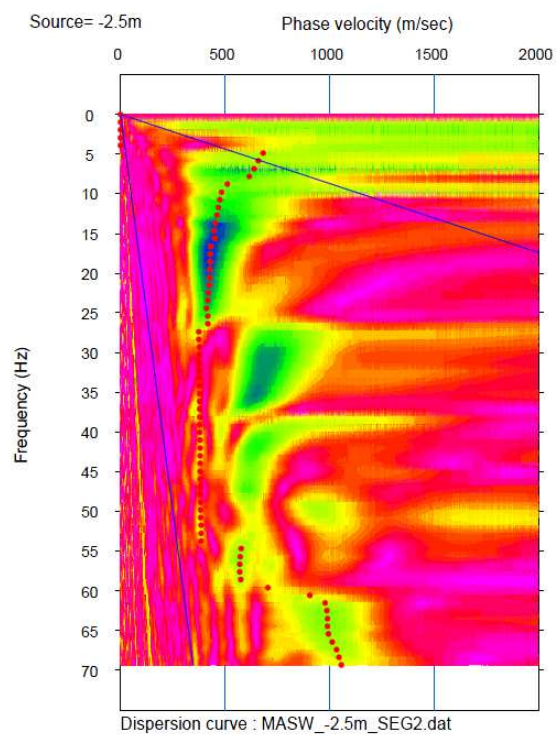
Intervallo (m): 2.5 m

Lunghezza Stendimento (m): 57.5 m

Sismogramma MASW 2

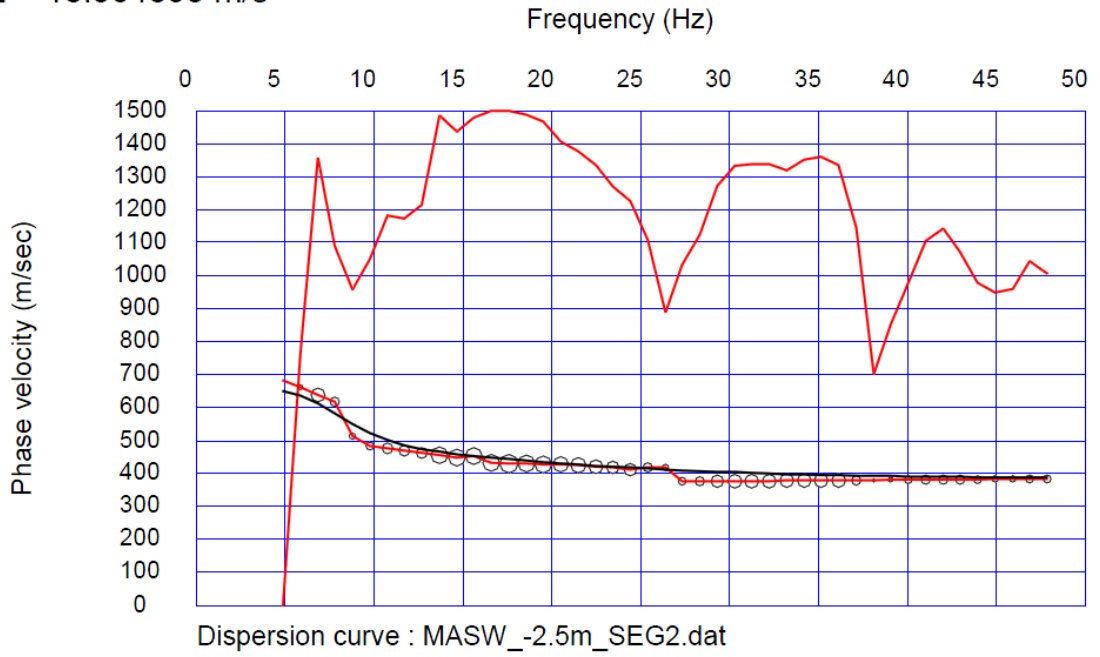


Curva Dispersione MASW 2

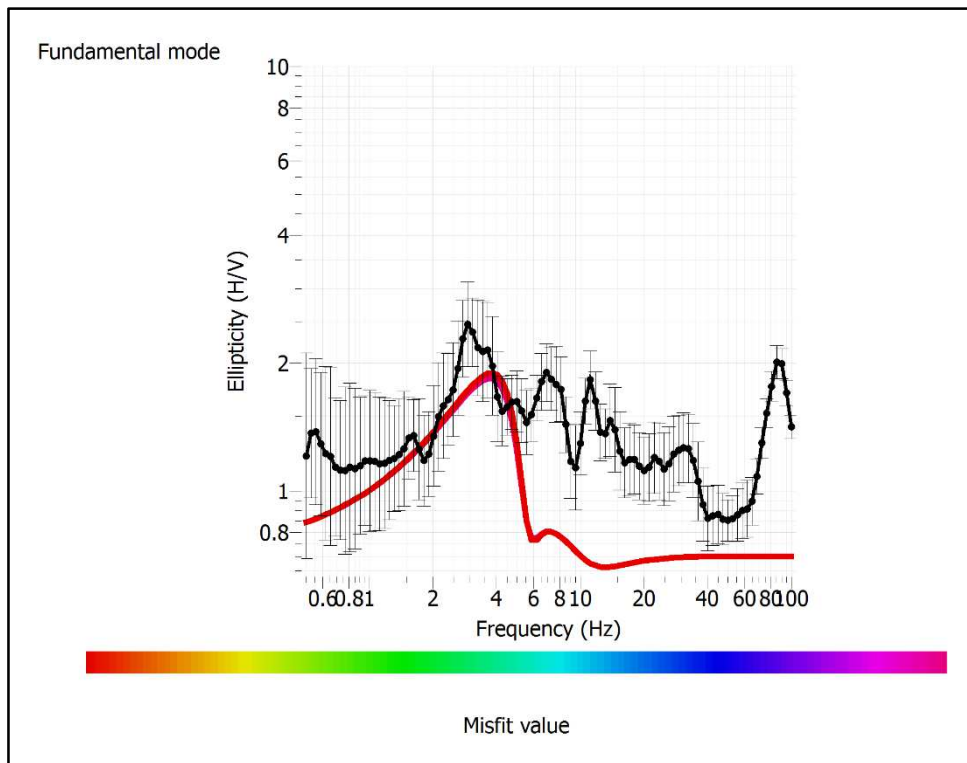


Curva Teorica e Sperimentale MASW 2

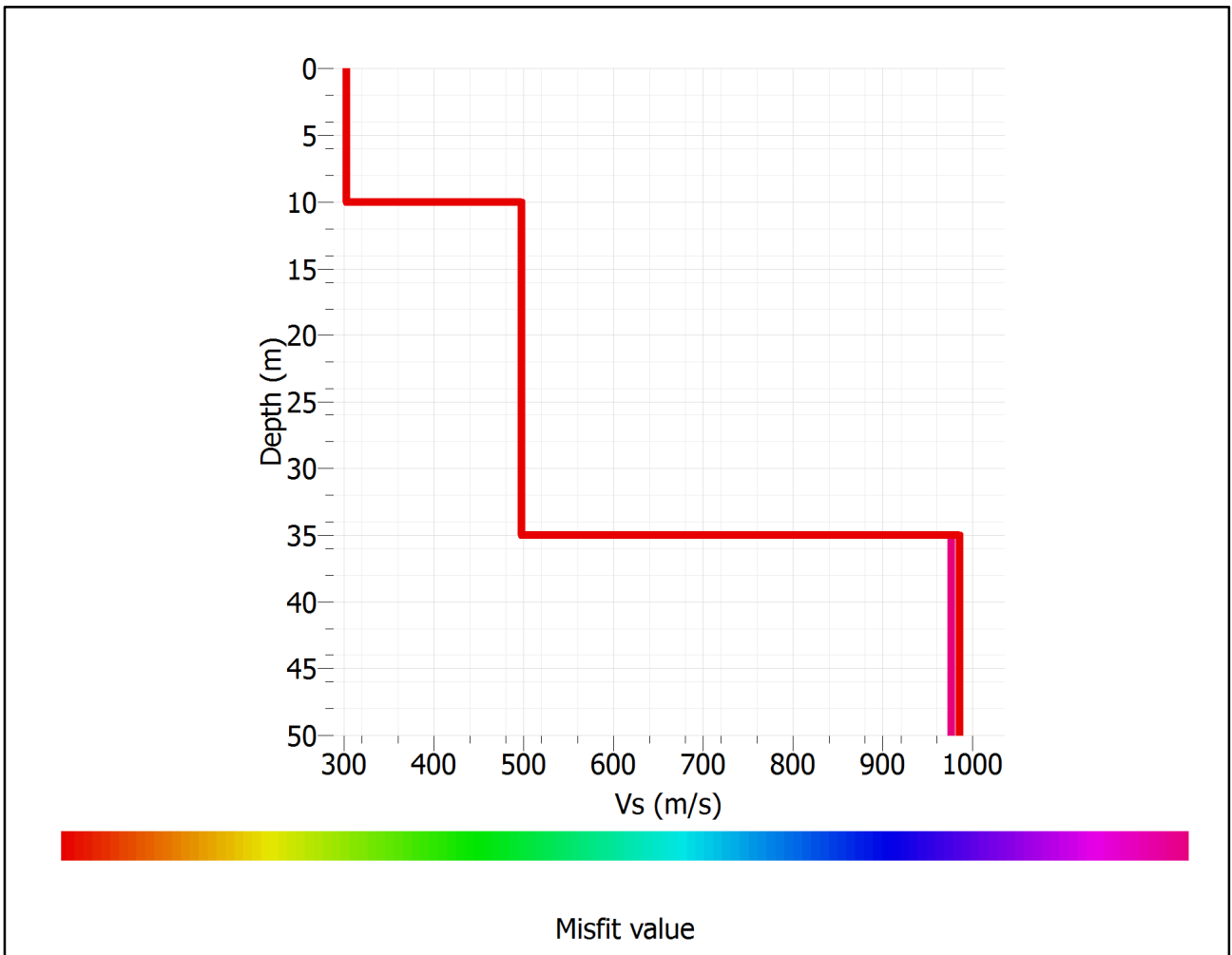
RMSE = 18.564895 m/s



Curva Teorica e Sperimentale HVSR 10



Profilo Vs MASW 2 + HVSr 10



FOTO



Foto – Stesa Sismica MASW_2

- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE DOWN – HOLE**

Indice

1. <u>Premessa</u>	1
1.1- Presentazione progetto	1
1.2- Teoria del metodo Down-Hole	1
1.3- Metodo di acquisizione e strumentazione	3
1.4- Ubicazione indagine	3
2. <u>Elaborazione dati</u>	4
2.1- Correzione StartTime	4
2.2- Calcolo Tempi corretti	7
3. <u>Risultati</u>	9
3.1- Modello Sismostratigrafico	9

1. Premessa

1.1- Presentazione progetto

In data 08/01/2021 è stata eseguita la prova sismica in foro fino alla profondità di metri 30, con la finalità di fornire informazioni sulla sismostratigrafia dell' area di studio e di definire il parametro V_{s30eq} al fine di inquadrare la categoria di suolo.

Nel presente rapporto tecnico vengono illustrati la metodologia, il metodo di acquisizione, elaborazione ed i risultati ottenuti.

1.2- Teoria del metodo Down-Hole

In sismica non esistono soltanto le metodologie di indagine a rifrazione e a riflessione ma ne esistono anche altre che prendono il nome di "sismica in foro": una di esse è la metodologia Down-Hole.

In questa tecnica viene fatto un foro nel terreno (di solito si utilizza il foro fatto per un sondaggio) opportunamente rivestito in cui viene calato un sensore a tre componenti, in grado quindi di registrare sia le onde di pressione (Onde P), sia le onde di taglio (Onde Sh). La sorgente viene posta in superficie ad una distanza nota dal foro.

Nel punto sorgente vengono prodotte sia onde di volume, ad esempio battendo ortogonalmente al terreno con una mazza su di una piastra, che onde di taglio polarizzate orizzontalmente Sh, ad esempio energizzando parallelamente al piano campagna una trave con una mazza.

L' acquisizione dei dati può avvenire in due modi differenti: utilizzando un solo ricevitore, in questo caso si parla di metodo diretto (Fig. 1), o due ricevitori, e in questo caso si parla di metodo intervallo (Fig. 2).

Per poter interpretare il down - hole con il metodo diretto, inizialmente, è necessario correggere i tempi di transito sperimentali (T) lungo i percorsi sorgente-ricevitore, tenendo così conto della reale traiettoria percorsa dalla perturbazione d' onda.

Quindi se d è la distanza della sorgente dall' asse del foro, r la distanza fra la sorgente e il sensore tridimensionale, z la profondità della posizione del ricevitore è possibile ottenere i tempi corretti (T_{corr}) mediante la seguente formula di conversione:

$$T_{corr} = (Z / r) t$$

Una volta calcolati i tempi corretti sia per le onde P che per le onde Sh si realizza il grafico T_{corr}/z in modo che la velocità media delle onde sismiche in strati omogenei di terreno è rappresentata dal coefficiente angolare (come nella sismica a rifrazione) dei segmenti di retta lungo i quali si interpolano i dati sperimentali.

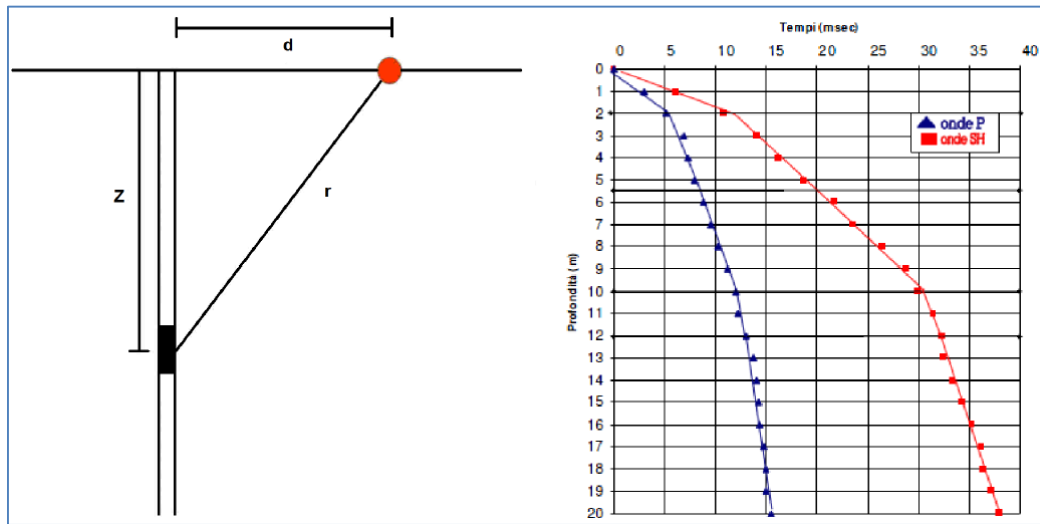


Fig. 1 - Schema di acquisizione ad un ricevitore

L'interpretazione dei dati con il metodo intervallo è basata sulla rilevazione dei tempi di transito della perturbazione d' onda tra i due ricevitori posti a differenti profondità note. Una volta determinati i valori sperimentali dei tempi di transito è possibile calcolare i tempi corretti con la formula precedente e calcolare la velocità di intervallo, per le onde P ed Sh, con la formula:

$$VP, VSh = (Z2 - Z1)/(T2Corr - T1Corr)$$

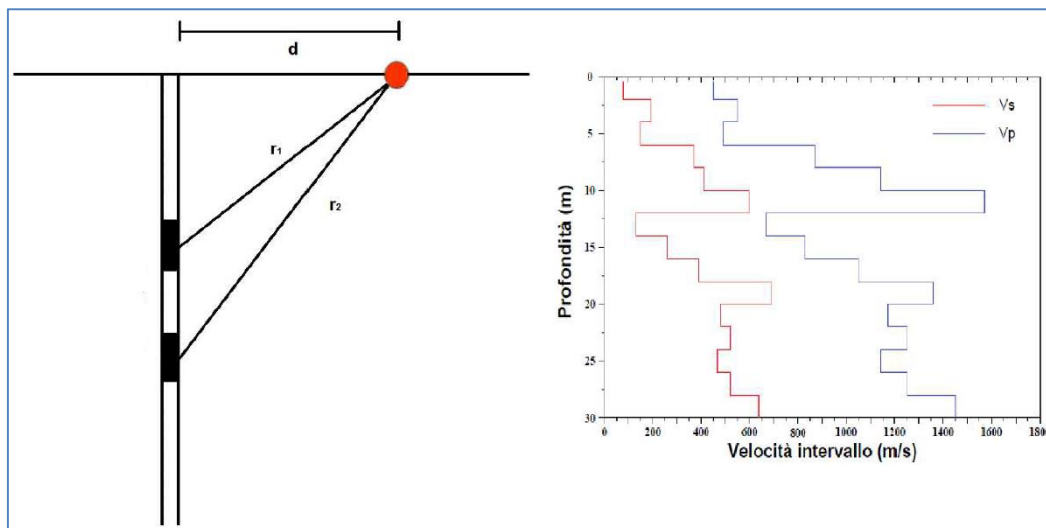


Fig. 2 - Schema di acquisizione a due ricevitori

1.3- Metodo di acquisizione e strumentazione

Nel caso di questa indagine è stato utilizzato il metodo diretto: sono stati acquisiti 3 sismogrammi per ogni profondità, uno con registrazione delle onde P, uno con registrazione delle onde Sh con energizzazione Dx, uno con registrazione delle onde Sh con energizzazione Sx (polarità opposta).

L'Apparecchiatura utilizzata per l'indagine consta di:

❖ Sistema di acquisizione/ricezione

- N°1 Sismografo multicanale digitale modulare "DoReMi 16bit - Sara Instrument"
- N°1 Geofono da foro triassiale a 3 componenti (1P - 2Sh)
- N°1 PC Portatile Dell

❖ Sistema di energizzazione/starter

- N°1 Mazza da 8 Kg
- N°1 Piastra in teflon dal diametro di 20 cm (sorgente onde P)
- N°2 Trave in legno accoppiate al terreno (sorgente onde Sh)
- N°1 geofono verticale per la determinazione del T_0

❖ Parametri di acquisizione dati

- Sample Interval: 0.05 ms
- Time Record: 400 ms
- Passo campionamento: 1 m
- Profondità indagine: 30 m
- Distanza sorgente Onde P/ForoDh: 4.5 m
- Distanza sorgente Onde Sh/ForoDh: 4 m
- Geofono di controllo a bocca foro presente

1.4- Ubicazione Indagine

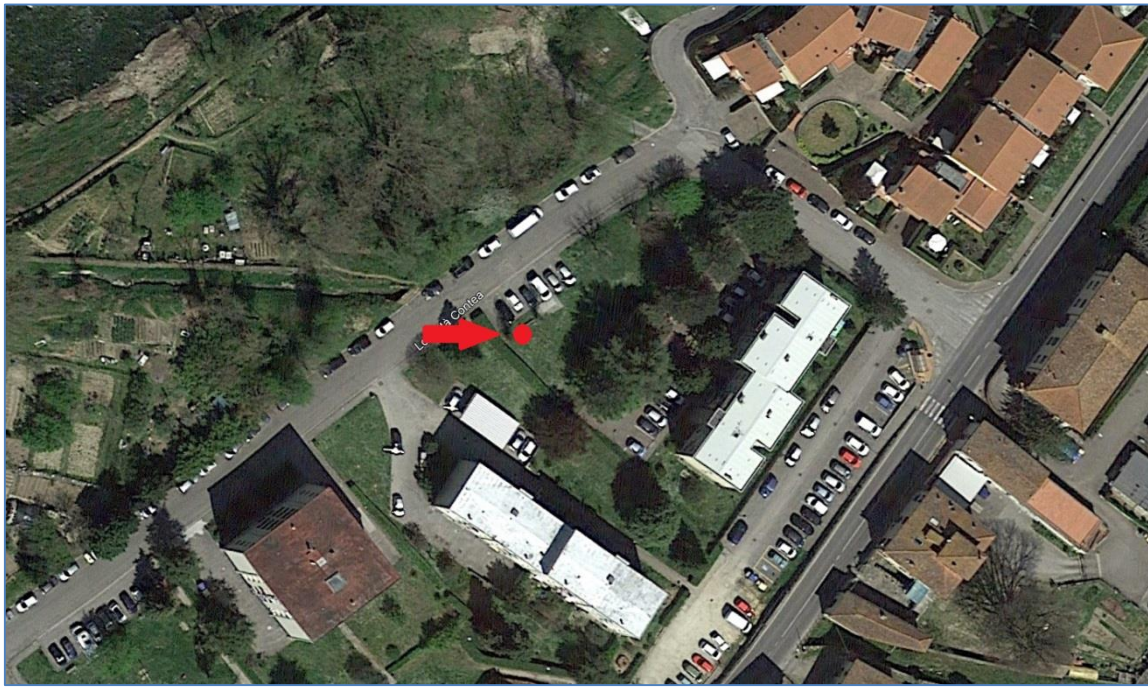


Fig. 3 - Posizione indagine Down/Hole

2. Elaborazione dati

2.1- Correzione StartTime

Nella prima fase di elaborazione dati ci si propone di ricostruire l' esperimento ideale equivalente ad aver nella stessa energizzazione un numero di geofoni pari alla profondità dell' indagine. Questa fase si articola in due momenti: il montaggio geometrico dei sismogrammi ideali composti da un numero di tracce pari ai metri del sondaggio per ogni componente (P, Sh e geofono di controllo) e la verifica del T_0 (StartTime).

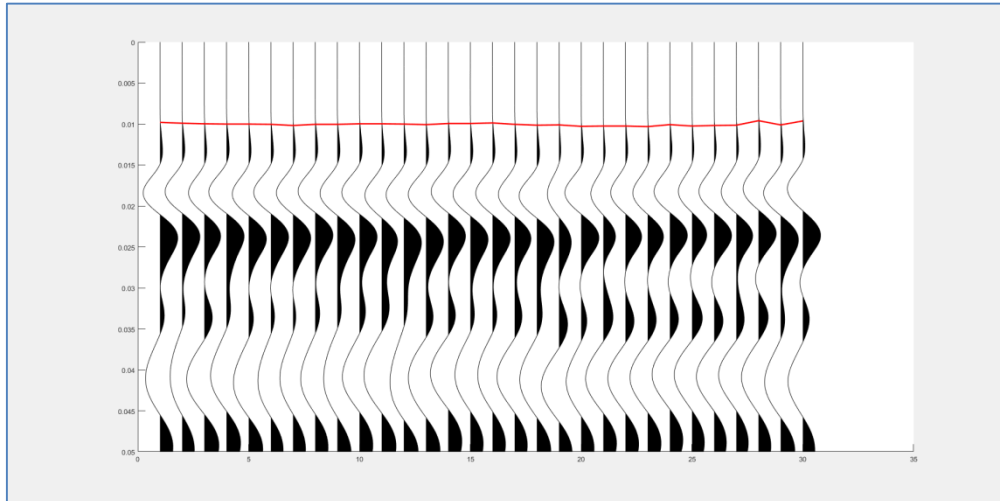


Fig. 4 – Sismogramma (Onde P) sperimentale geofono di controllo prima della correzione (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

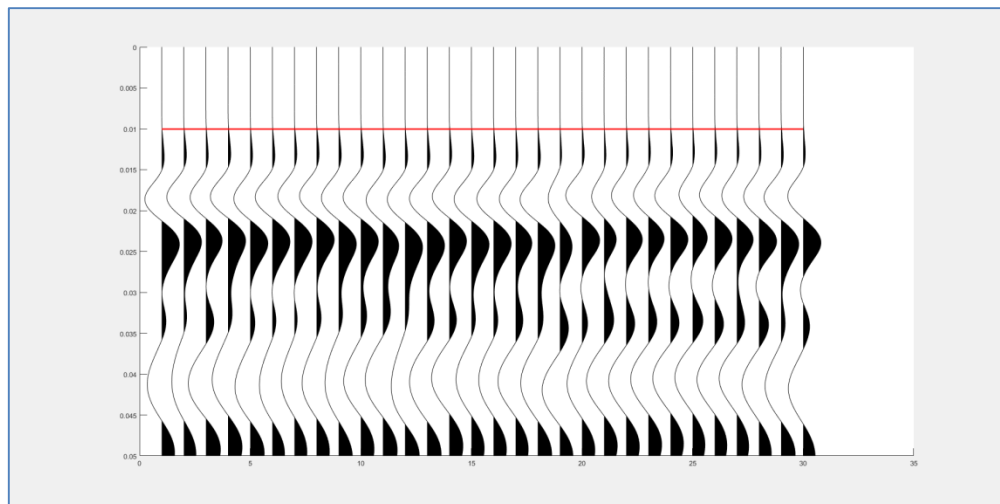


Fig. 5 – Sismogramma (Onde P) di verifica sul geofono di controllo della qualità delle correzioni da applicare in seguito ai dati sperimentali (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

Sul sismogramma del geofono di controllo si verifica la correttezza del T_0 e in caso si renda necessario vengono applicati gli shift temporali per avere il medesimo StartTime su ogni energizzazione.

In Fig. 4, sul sismogramma portato ad esempio relativo alle onde di volume (P), sono visibili shift del T_0 poi corretti come si vede in Fig. 5 dove viene rappresentato il sismogramma di controllo per verificare i corretti shift temporali che successivamente verranno applicati anche ai dati sperimentali (Fig. 6 e 7) relativi alle onde P ed Sh prima di procedere all' indentificazione dei primi arrivi ed al calcolo dei tempi corretti e delle velocità.

A titolo d' esempio, per illustrare la sequenza di elaborazione a cui sono stati sottoposti i dati acquisiti, vengono riportate le immagini relative alle onde di volume: la stessa procedura viene poi applicata anche ai dati relativi alle onde Sh, a cui si aggiunge la somma delle energizzazioni a polarità invertita per ridurre la componente residuale delle onde P, incrementando così il rapporto S/N delle onde di taglio (Sh).

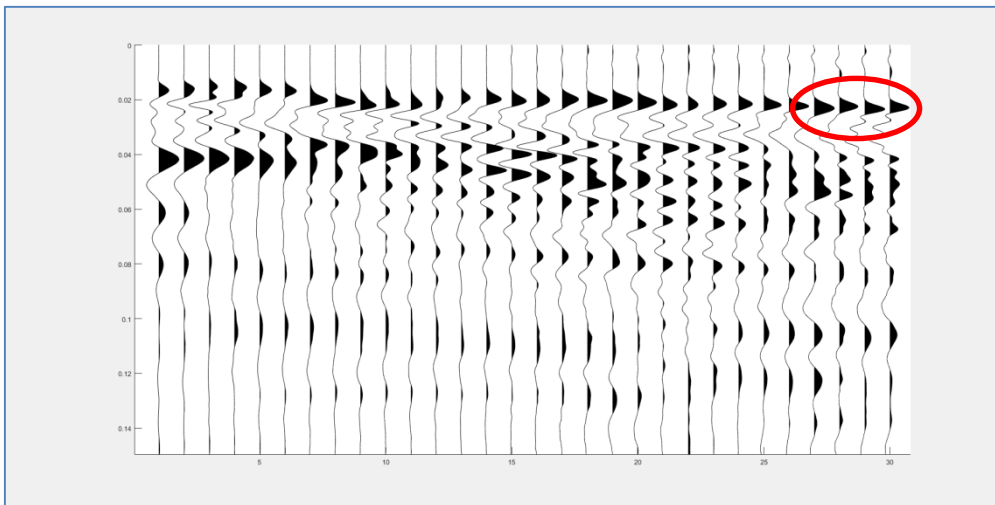


Fig. 6 – Sismogramma relativo alle onde di pressione prima dell' applicazione delle correzioni relative al geofono di controllo. Viene evidenziata, a titolo di esempio, l' area dove sarà più apprezzabile alla vista la piccola correzione dello Start Time, come era intuibile dal sismogramma del geofono di controllo (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

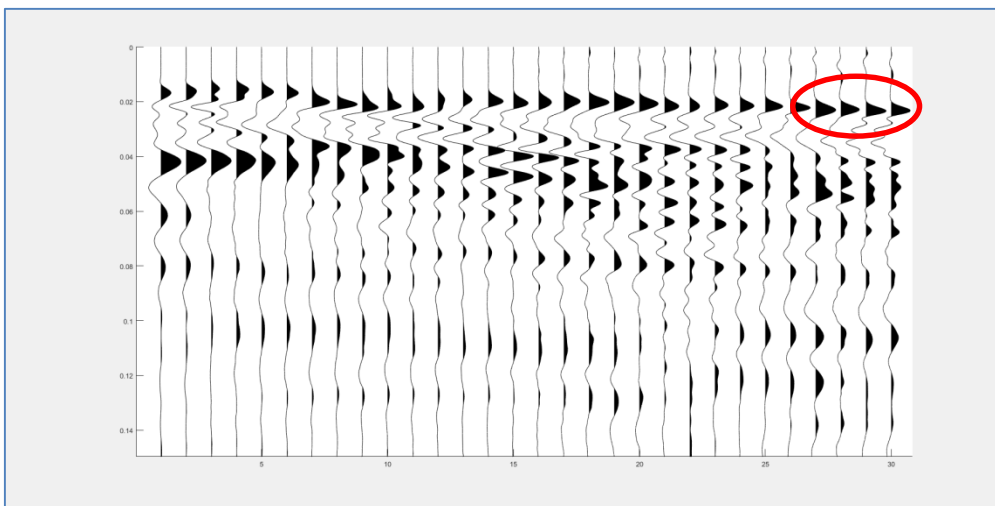


Fig. 7 – Sismogramma relativo alle onde di pressione dopo l' applicazione delle correzioni relative al geofono di controllo: i canali 28 e 30 subiscono un leggero shift temporale dato il piccolo anticipo osservato sul geofono di controllo (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

In Tabella 1 vengono riportati i dati relativi al picking del geofono di controllo e il valore delle correzioni apportate ai dati.

Onde P		Onde Sh			
Tempo	Correzione	Tempo DX	CorrDX	Tempo SX	CorrSX
0.009799	0.000237	0.008986	0.000380	0.009806	-0.000441
0.009902	0.000134	0.009080	0.000285	0.008814	0.000551
0.009971	0.000065	0.008514	0.000851	0.009093	0.000272
0.010005	0.000031	0.008679	0.000686	0.009527	-0.000162
0.010005	0.000031	0.008915	0.000450	0.009992	-0.000626
0.010040	-0.000003	0.009151	0.000214	0.010364	-0.000998
0.010177	-0.000141	0.009175	0.000191	0.009062	0.000303
0.010040	-0.000003	0.009387	-0.000021	0.008690	0.000675
0.010040	-0.000003	0.009198	0.000167	0.009899	-0.000533
0.009971	0.000065	0.009175	0.000191	0.008783	0.000582
0.009971	0.000065	0.009458	-0.000092	0.009062	0.000303
0.010005	0.000031	0.008892	0.000474	0.009620	-0.000255
0.010074	-0.000038	0.009528	-0.000163	0.010364	-0.000998
0.009937	0.000100	0.009198	0.000167	0.009775	-0.000410
0.009937	0.000100	0.009010	0.000356	0.009899	-0.000533
0.009868	0.000168	0.009269	0.000096	0.010023	-0.000657
0.010040	-0.000003	0.009363	0.000002	0.010054	-0.000688
0.010143	-0.000106	0.009434	-0.000069	0.008597	0.000768
0.010108	-0.000072	0.009293	0.000073	0.009403	-0.000038
0.010280	-0.000244	0.009387	-0.000021	0.009899	-0.000533
0.010246	-0.000209	0.009552	-0.000187	0.009248	0.000117
0.010246	-0.000209	0.009269	0.000096	0.009155	0.000210
0.010314	-0.000278	0.009646	-0.000281	0.009651	-0.000286
0.010074	-0.000038	0.009434	-0.000069	0.009465	-0.000100
0.010246	-0.000209	0.009528	-0.000163	0.009186	0.000179
0.010177	-0.000141	0.009316	0.000049	0.009713	-0.000348
0.010143	-0.000106	0.009741	-0.000375	0.009186	0.000179
0.009593	0.000443	0.009245	0.000120	0.009465	-0.000100
0.010108	-0.000072	0.009363	0.000002	0.009558	-0.000193
0.009627	0.000409	0.009387	-0.000021	0.009000	0.000365
Valor riferimento		Valor riferimento		Valor riferimento	
0.01003613		0.00936548		0.00936548	

Tabella 1 – Tempi di riferimento per le correzioni del T_0 , unità di misura: secondi

2.2- Calcolo Tempi corretti

Successivamente all' identificazione dei tempi di transito sui sismogrammi (Fig. 8, 9 e 10), come esposto nella premessa, si procede al calcolo dei tempi corretti (Tabella 2).

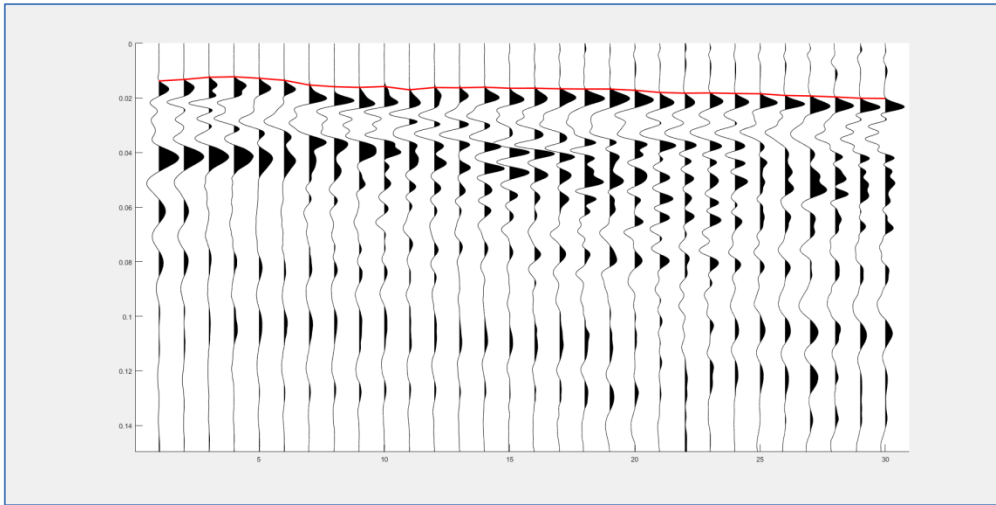


Fig. 8 - Picking Onde P (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

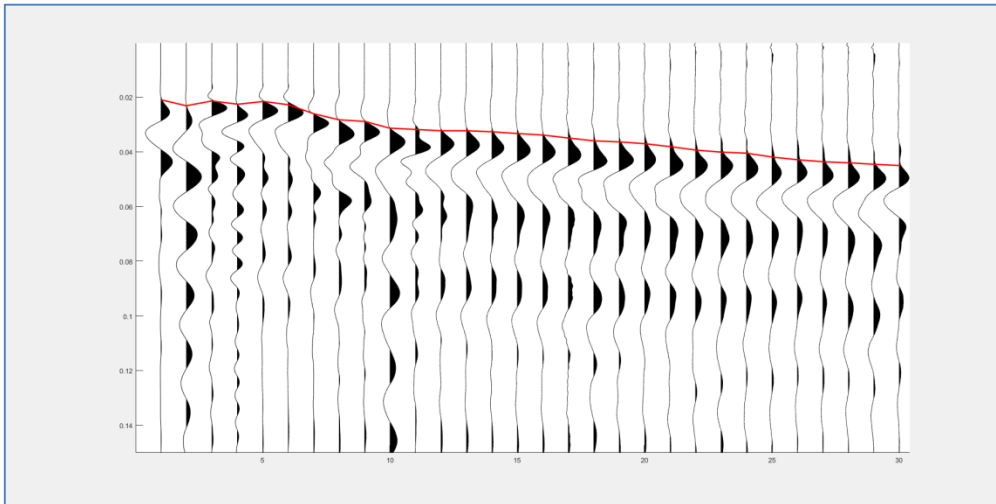


Fig. 9 - Picking Onde Sh su sismogramma risultato dalla somma degli scoppi Dx e Sx con polarità invertita per la riduzione della componente P (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

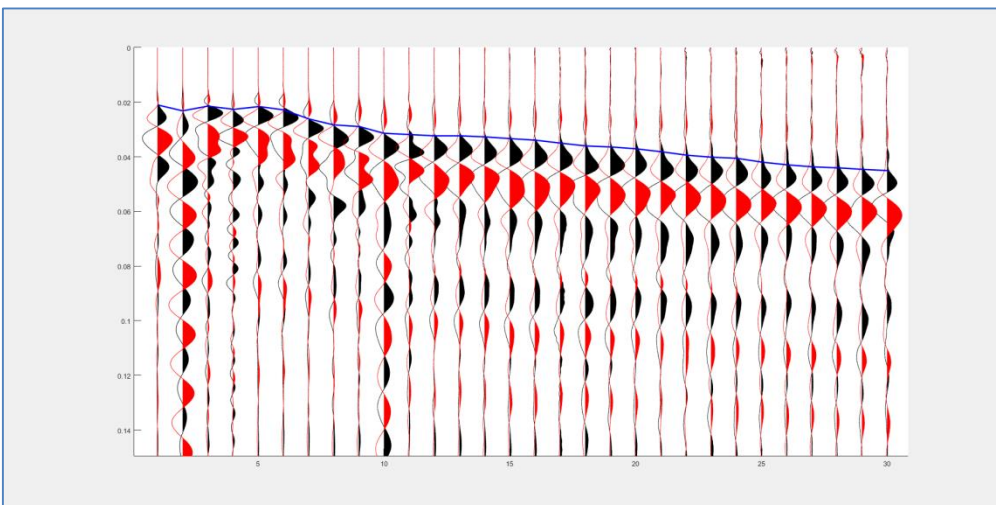


Fig. 10 - Verifica del precedente picking sul sismogramma di sovrapposizione ShDx/ShSx (In ordinata il Time Record in secondi, in ascissa le profondità in metri)

Tempi di arrivo sperimentali				Tempi di arrivo corretti			
Onde SH		Onde P		Onde SH		Onde P	
1	0.021036	1	0.013790	1	0.005102	1	0.002992
2	0.023165	2	0.013242	2	0.010360	2	0.005378
3	0.021430	3	0.012420	3	0.012858	3	0.006889
4	0.022613	4	0.012237	4	0.015990	4	0.008130
5	0.021588	5	0.012785	5	0.016857	5	0.009503
6	0.022812	6	0.013516	6	0.018981	6	0.010813
7	0.026162	7	0.015252	7	0.022715	7	0.012830
8	0.028292	8	0.015892	8	0.025305	8	0.013851
9	0.028923	9	0.016140	9	0.026430	9	0.014436
10	0.031368	10	0.015818	10	0.029124	10	0.014425
11	0.031841	11	0.017006	11	0.029924	11	0.015740
12	0.032314	12	0.016183	12	0.030656	12	0.015153
13	0.032314	13	0.016283	13	0.030885	13	0.015387
14	0.032709	14	0.016075	14	0.031450	14	0.015304
15	0.033340	15	0.016440	15	0.032214	15	0.015747
16	0.033892	16	0.016429	16	0.032880	16	0.015815
17	0.034996	17	0.016649	17	0.034066	17	0.016094
18	0.036021	18	0.016740	18	0.035163	18	0.016240
19	0.036416	19	0.016740	19	0.035634	19	0.016290
20	0.037068	20	0.017188	20	0.036348	20	0.016769
21	0.038151	21	0.017994	21	0.037477	21	0.017594
22	0.039413	22	0.018251	22	0.038777	22	0.017880
23	0.040122	23	0.018176	23	0.039529	23	0.017838
24	0.040517	24	0.018359	24	0.039965	24	0.018045
25	0.041973	25	0.018468	25	0.041446	25	0.018176
26	0.042962	26	0.019090	26	0.042462	26	0.018811
27	0.043672	27	0.019273	27	0.043200	27	0.019011
28	0.044054	28	0.019638	28	0.043611	28	0.019390
29	0.044606	29	0.020095	29	0.044187	29	0.019858
30	0.045047	30	0.020187	30	0.044652	30	0.019963

Tabella 2 – Tempi di transito (P – Sh)

3. Risultati

3.1- Modello Sismostratigrafico

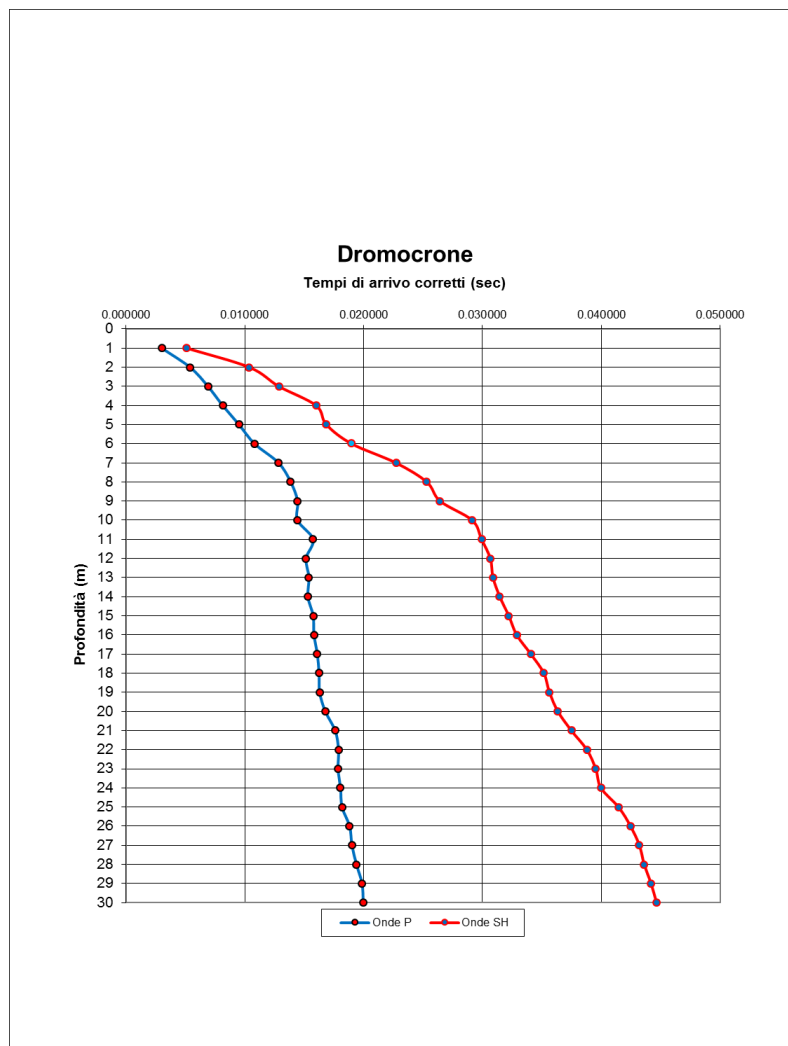


Fig. 10 – Grafico dromocrone P e Sh

Profondità (m dal p.c.)	Vel Onde SH (m/sec)	Profondità (m dal p.c.)	Vel Onde P (m/sec)
0.00-2.00	190.2	0.00-3.00	504
2.00-4.00	353.7	3.00-7.00	680
4.00-6.00	631.6	7.00-9.00	1215
6.00-8.00	312.8	9.00-18.00	4589
8.00-10.00	495.7	18.00-22.00	2035
10.00-16.00	1661.6	22.00-30.00	3205
16.00-18.00	875.4		
18.00-20.00	1665.4		
20.00-22.00	822.0		
22.00-24.00	1643.9		
24.00-27.00	910.7		
27.00-30.00	2019.9		

Tabella 3 – Intervalli di velocità

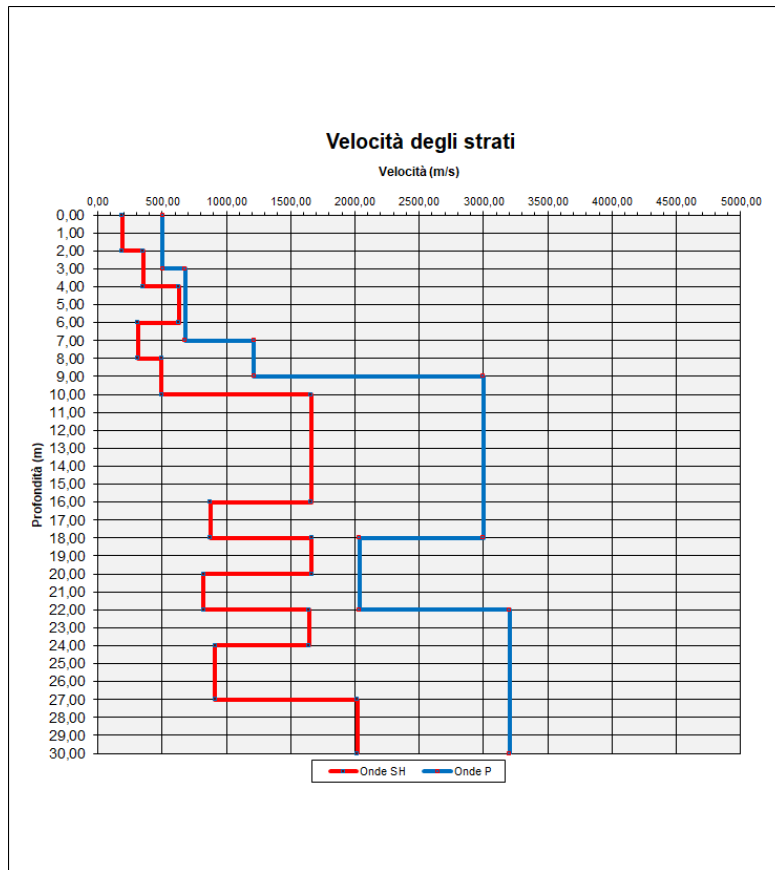


Fig. 11 - Sismostratigrafia



Programma: MS3 - Comune di: Rufina (FI) - Località: Contea - DH S1

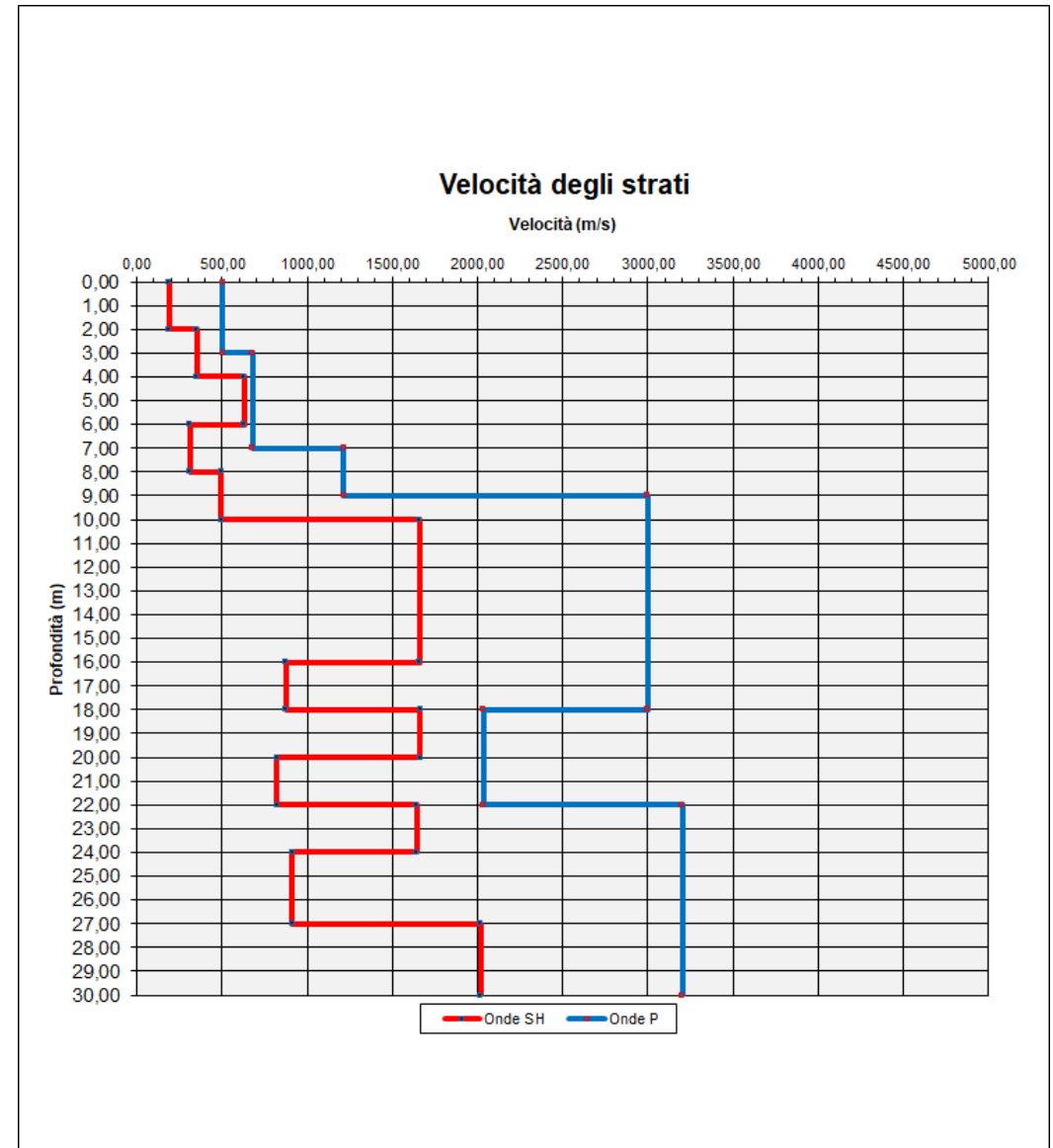
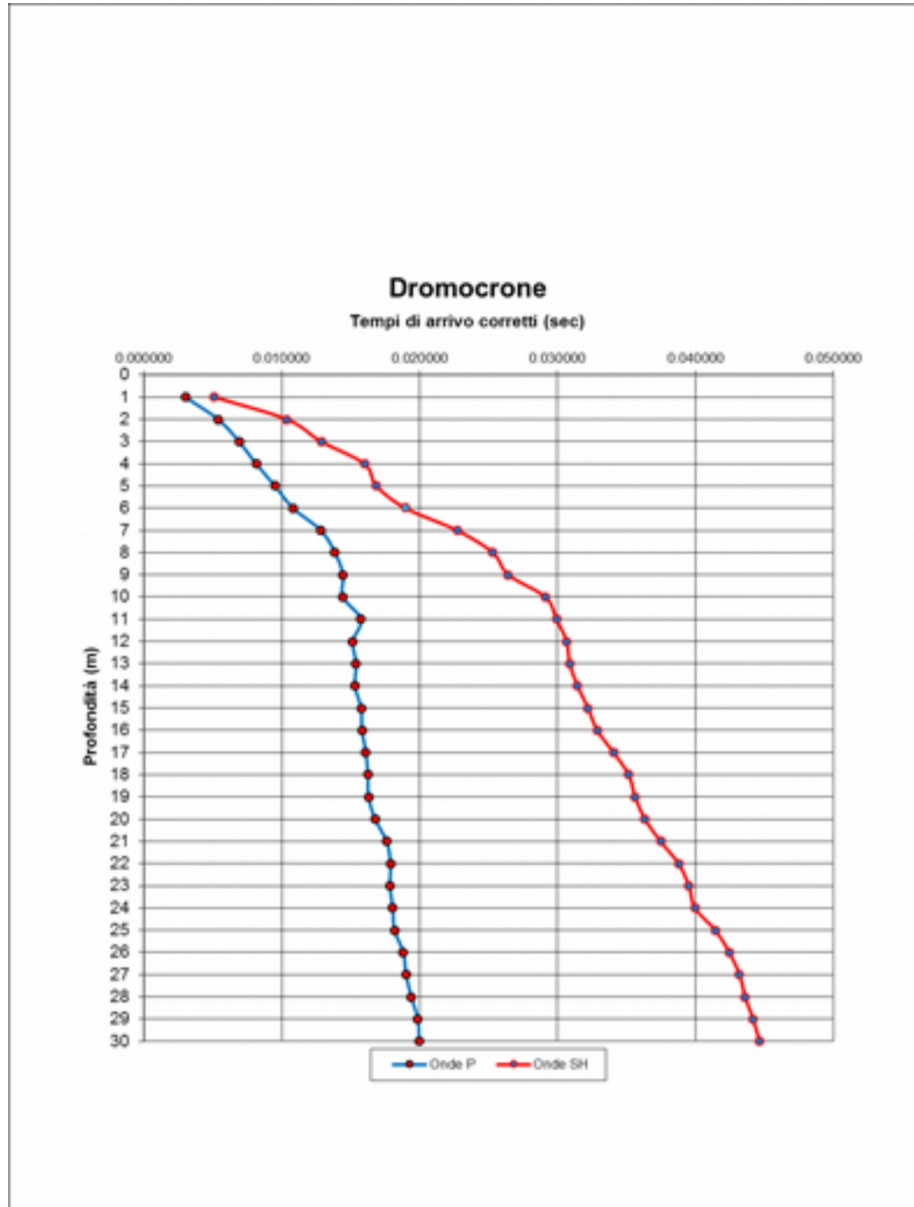




Fig. 12 - Fase di acquisizione dati

- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNA STRATIGRAFICA DEL SONDAGGIO**

Autorizzazione Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ad effettuare e certificare prove geotecniche sui terreni n. 4542 del 13/04/2012

Committente Grandini Gabriele		Località Rufina (FI)		Certificato n° / Data 3 del 04-01-2021	
Cantiere Indagini geognostiche		Sondaggio n. S 1	Inizio / Fine Esecuzione 22-12-20		Commessa n° / Data 219 del 23-12-20
Responsabile di sito Geol Luigi Farini	Operatore Mongi	Tipo Carotaggio continuo	Tipo Sonda T44	Diametro perforazione / Diametro rivestimento 101 mm - 127 mm	

Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cass. Catalog.	Down-Hole	I - (1)
		Terreno vegetale.	0.00					
1		Terreno di riporto limoso	0.80					
		Limo argilloso debolmente sabbioso compatto di colorazione bruno rossastro contenente ghiaia.						
2			2.60					
3		Argilliti siltose e siltiti argillose compatte di colorazione bruno rossastre grigiastre contenenti ghiaia e intercalati da pezzame livelli lapidei calcarenitici dell'ordine del ciottolo.				# 1		
4			5.00			5.00		
5		Alternanze di materiale lapideo marnoso e calcarenitico prevalentemente frantumato di colorazione grigio, avana, brunastro ad argilliti e siltiti contenenti clasti dell'ordine della ghiaia di colorazione bruno. Tra 6,10 e 6,30, 10,45 e 10,75 presente roccia arenitica fine compatta di colorazione grigio chiara e avana.						
6				(CS)				
7				9.00		# 2		
8						10.00		
9			11.30					
10		Roccia marnosa , calcarenitica fine frantumata con vene di calcite visibili, colorazione grigio marrone ramata. Dalla profondità di 14,70, roccia di colorazione prevalentemente grigia. Breve tratto siltoso tra 11,80 e 12,00.						
11					(RM)			
12						# 3		
13						15.00		
14			17.30					
15		Argilliti compatte grigie.						
16		Roccia marnosa calcarenitica fine grigia scura frantumata.	18.00					
17				(CD)				
18		Argilliti e siltiti debolmente compatte intercalate da pezzame lapideo marnoso, calcarenitico fine grigio dell'ordine della ghiaia, ciottolo.	19.00			# 4		
19						20.00		
20			22.00					
21		Marne, calcareniti fini grigie						
22			24.10					
23		Argilliti e siltiti ghiaiose grigie intercalate da clasti sub arrotondati e livelli lapidei marnosi, calcarenitici fini grigi dell'ordine del ciottolo.				# 5		
24						25.00		
25			27.10					
26		Marne, calcareniti fini grigie relativamente compatte.						
27			28.00					
28		Argilliti e siltiti grigie biancastre intercalate da pezzame lapideo marnoso, calcarenitico fine grigio dell'ordine della ghiaia.	29.20					
29				(CS)		# 6		
30		Marne calcaree grigie biancastre molto compatte. Livello argillitico grigio tra 29,80 e 30,00.	30.00			30.00		
				30.00				

Piezometro: ATA-Tubo Aperto, CSG-Casagrande Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua Stabilizzazione: RM-Rivestimento Metallico, FB-Fanghi Betonitici Carotaggio: continuo	Campioni prelevati n° (data prelievo) 0	Sonda: T44 Responsabile di sito Geol. Luigi Farini	Direttore laboratorio Dr. Moretti Giuliano
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------	----------------------------------------------------------	-----------------------------------------------

SDH Contea



0 - 5m



5m - 10m



10m - 15m



15m - 20m



20m - 25m



25m - 30m

- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

MICROZONAZIONE SISMICA

Carta delle indagini geofisiche
Microzonazione Sismica di Livello 3

Regione Toscana
Comune di Rufina (FI)



Regione	Soggetto realizzatore:	Data
Regione Toscana - Settore Sismica	Comune di Rufina - Servizio Assetto del Territorio/RUP Dott. Geol. Enea Aiello Dott. Geol. Gabriele Grandini Dott. Geol. Cristian Parroni Dott. Geol. Francesco Pucetti	Aprile 2021

