

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## RELAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE

### Regione Toscana Comune di Pratovecchio-Stia (AR)



Regione	Soggetto realizzatore:	Data
Regione Toscana – Settore Sismica	Comune di Pratovecchio – Stia /Servizio Assetto del Territorio/RUP  Professionisti incaricati:  Dott. Geol. Cristian Pieroni Dott. Geol. Francesco Puccetti	Giugno 2022

---

## **INDICE RELAZIONE**

<b>1 – PREMESSA</b>	<b>2</b>
1.1 UBICAZIONE AREA DI STUDIO	2
1.2 INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE	2
1.3 STRUTTURA DELLA RELAZIONE	2
<b>2 – LE ONDE DI SUPERFICIE</b>	<b>3</b>
2.1 DESCRIZIONE DELLE ONDE DI SUPERFICIE	3
2.2 CENNI TEORICI	4
2.3 PROPRIETA' RIASSUNTIVE DELLE ONDE SUPERFICIALI	7
<b>3 – INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE</b>	<b>9</b>
3.1 PROCEDURE DI CAMPAGNA	9
3.2 METODI DI ELABORAZIONE DEI DATI SISMICI A RIFRAZIONE	10
<b>4 – INDAGINE SISMICA DOWN – HOLE</b>	<b>12</b>
4.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE	12
4.2 METODO INTERVALLO	13
<b>5 – BIBLIOGRAFIA</b>	<b>14</b>

## **ALLEGATI**

- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH
- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA DOWN-HOLE
- ALLEGATO GRAFICO: COLONNE STRATIGRAFICHE DEI SONDAGGI
- ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE

---

## **1 – PREMESSA**

Il presente documento riguarda la descrizione, l'elaborazione e i risultati delle indagini geofisiche, di tipo sismico attivo e passivo, condotte a supporto degli studi di microzonazione sismica di livello 2 del Comune di Pratovecchio Stia (AR).

Lo studio di microzonazione sismica (MS) di livello 2 rappresenta un livello propedeutico a successivi studi di MS (livello 3) e consiste in un approfondimento di indagini al fine di determinare il fattore di amplificazione di ciascuna area individuata nello studio di MS1.

Tale approfondimento quindi è finalizzato alla realizzazione della Carta dei fattori di amplificazione in prospettiva sismica e quindi alla valutazione della pericolosità utile per le scelte di pianificazione attuativa, con l'intento di perseguire ed assicurare la riduzione del rischio sismico, evidenziando le criticità e identificando le aree per le quali sono 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 Pratovecchio Stia 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. 4 indagini sismiche attive P/SH**, per la determinazione dei profili sismostratigrafici;

**n. 2 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 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).

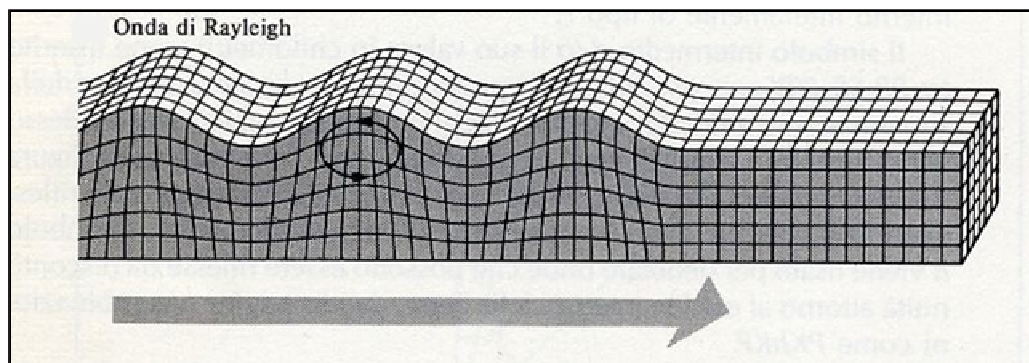


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

#### **- 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.

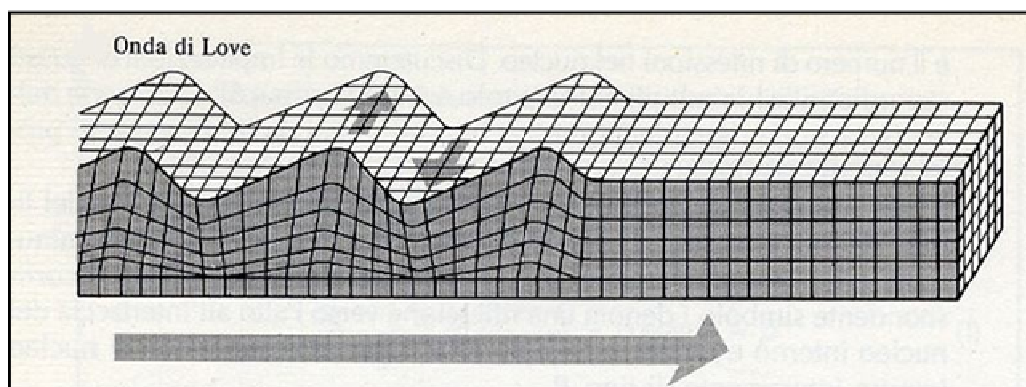


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

## **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  $\lambda$  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  $0.5 \lambda$  (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).

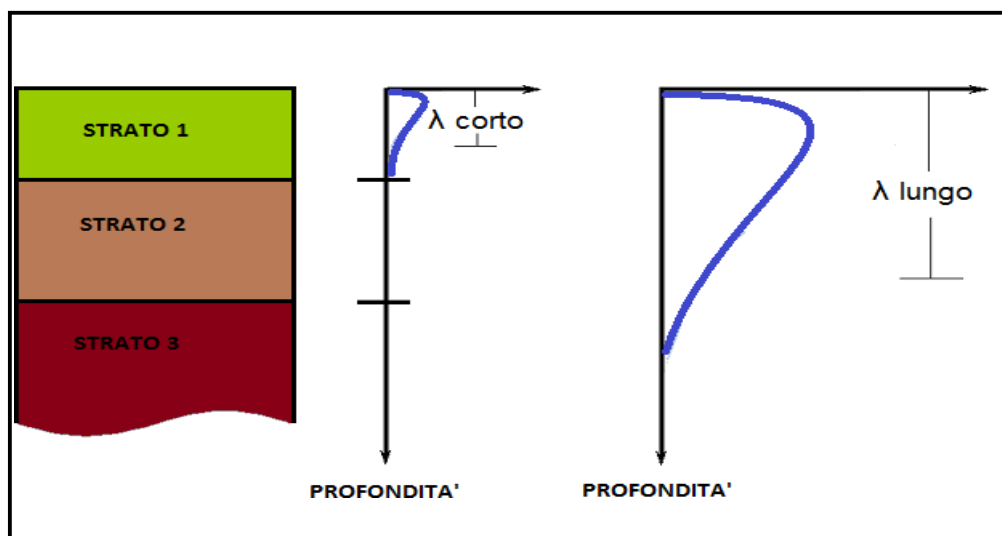


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

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).

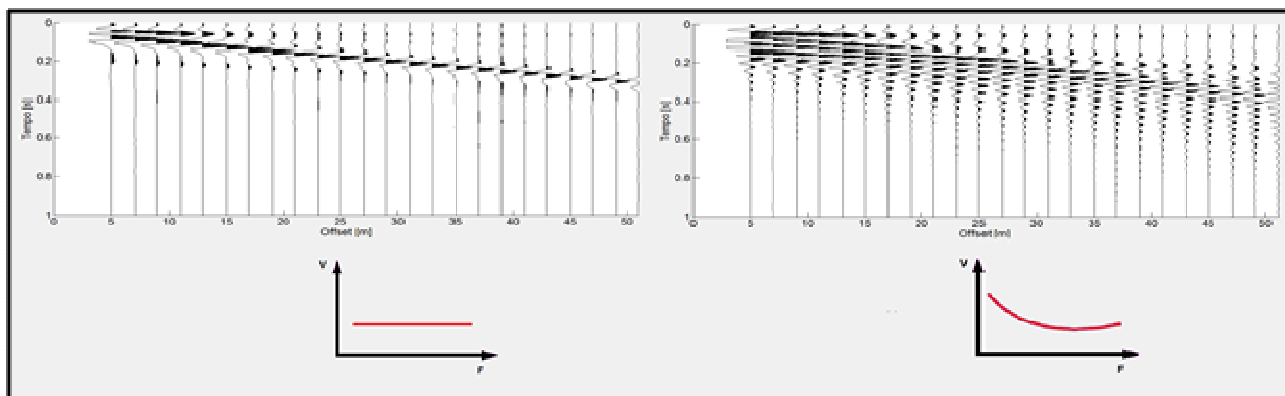


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

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  $V_s$  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  $V_s$  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-numeri d'onda 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).

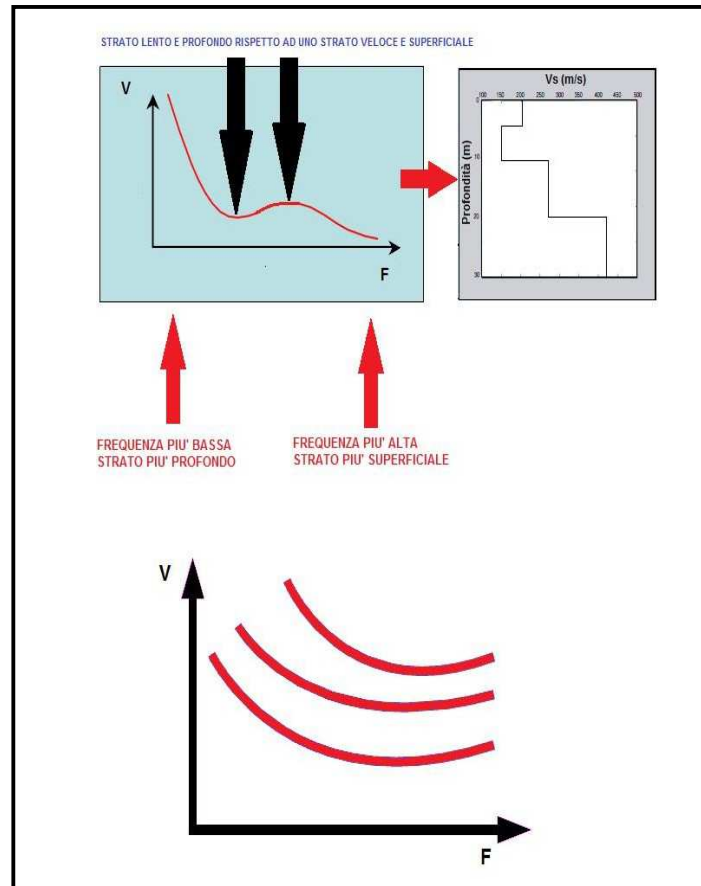


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

### **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  $\mu$ V @ 27dB; 0.076  $\mu$ 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 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:

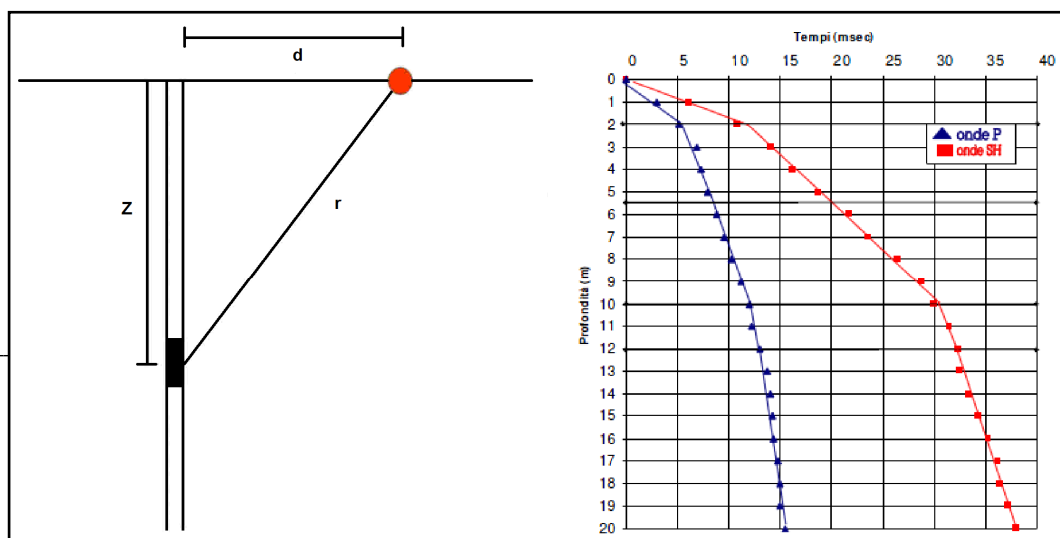
#### **4.1 METODO DIRETTO – UTILIZZANDO UN SOLO RICEVITORE**

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.



---

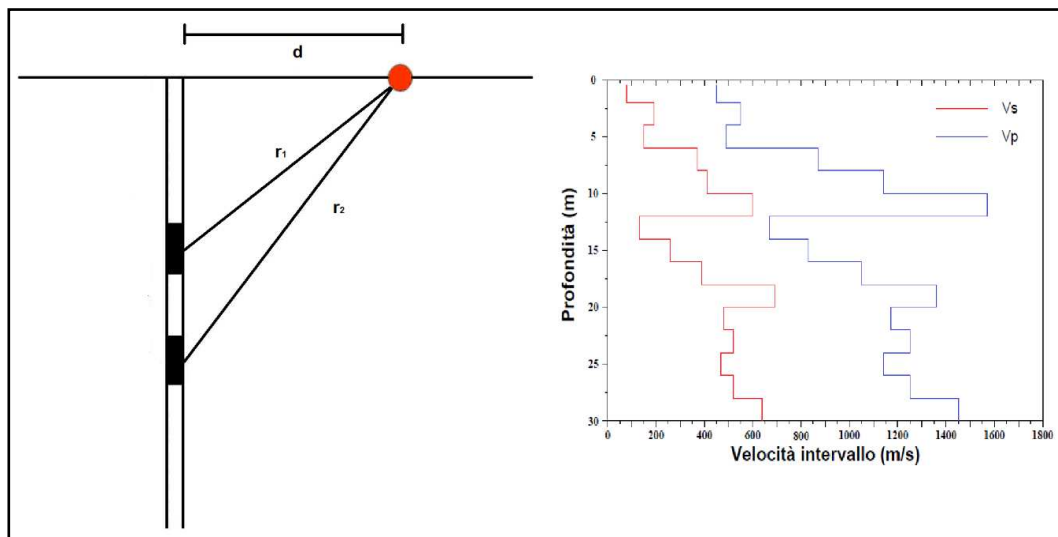
Schema di acquisizione con un ricevitore e a destra il relativo risultato

#### **4.2 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  $t_{2corr} < t_{1corr}$ .

#### **5 – 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: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH**
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA DOWN-HOLE**
- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNE STRATIGRAFICHE DEI SONDAGGI**
- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE**

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

**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  $\theta_i$  mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione  $\theta_r$ . 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

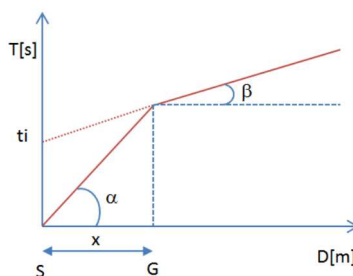
$$T = x_i / V_1$$

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

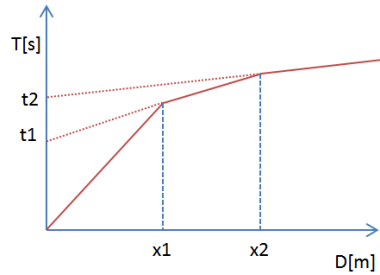
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

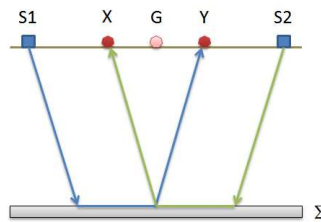


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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.

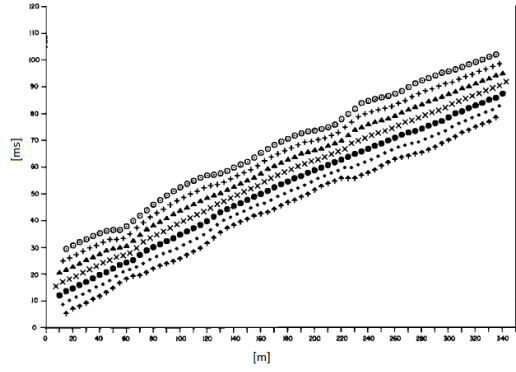


Il primo passo operativo è quello di costruire un diagramma tempi-distanze individuando nei sismogrammi ottenuti dai dati di campagna i primi arrivi delle onde sismiche. Per determinare la distanza XY ottimale è necessario considerare più punti di energizzazione tanto agli estremi quanto all'interno 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

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





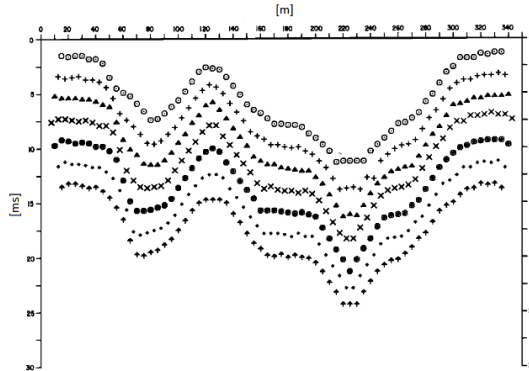
dove  $T_{S_1Y}$  e  $T_{S_2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S_1S_2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è 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:

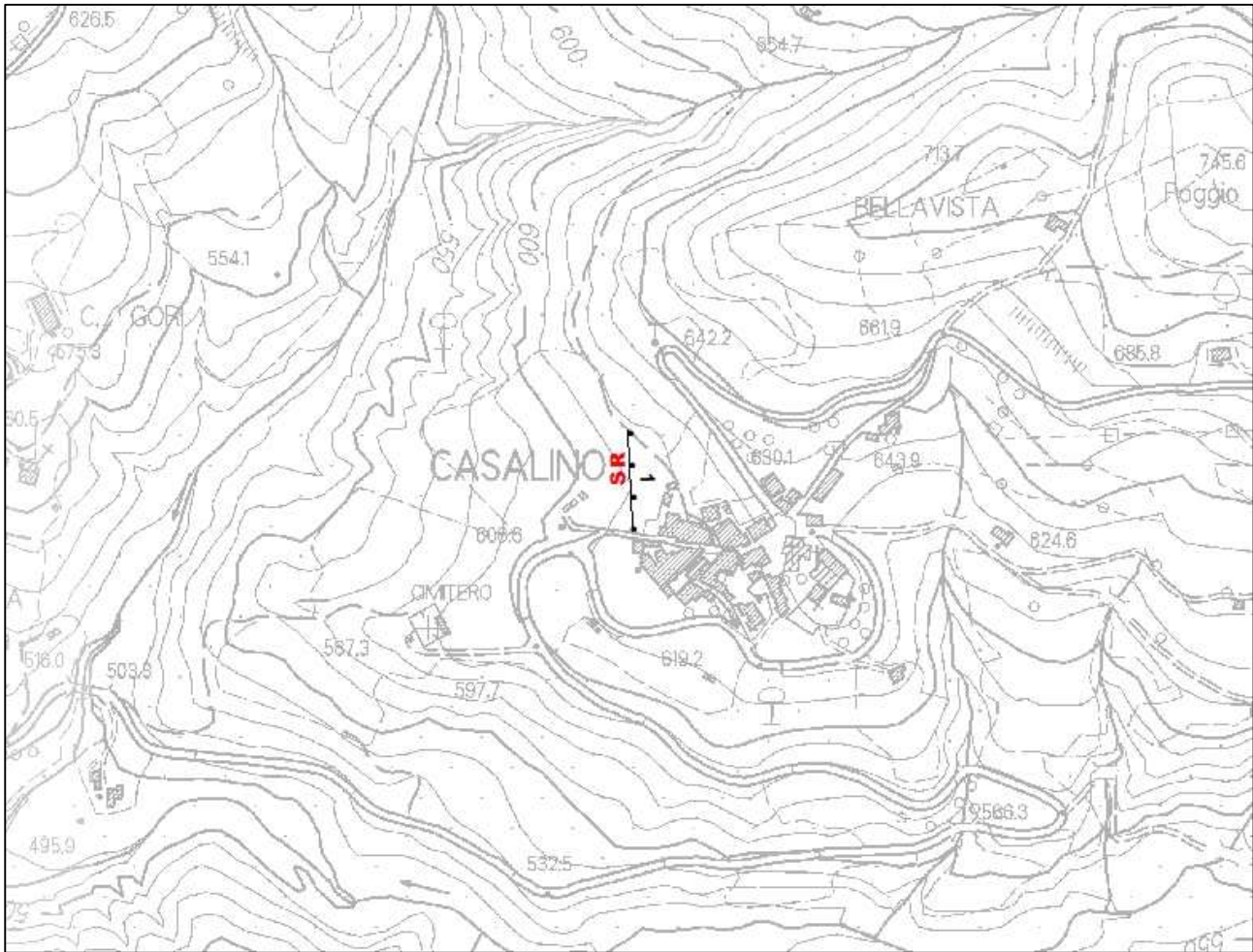
$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

---

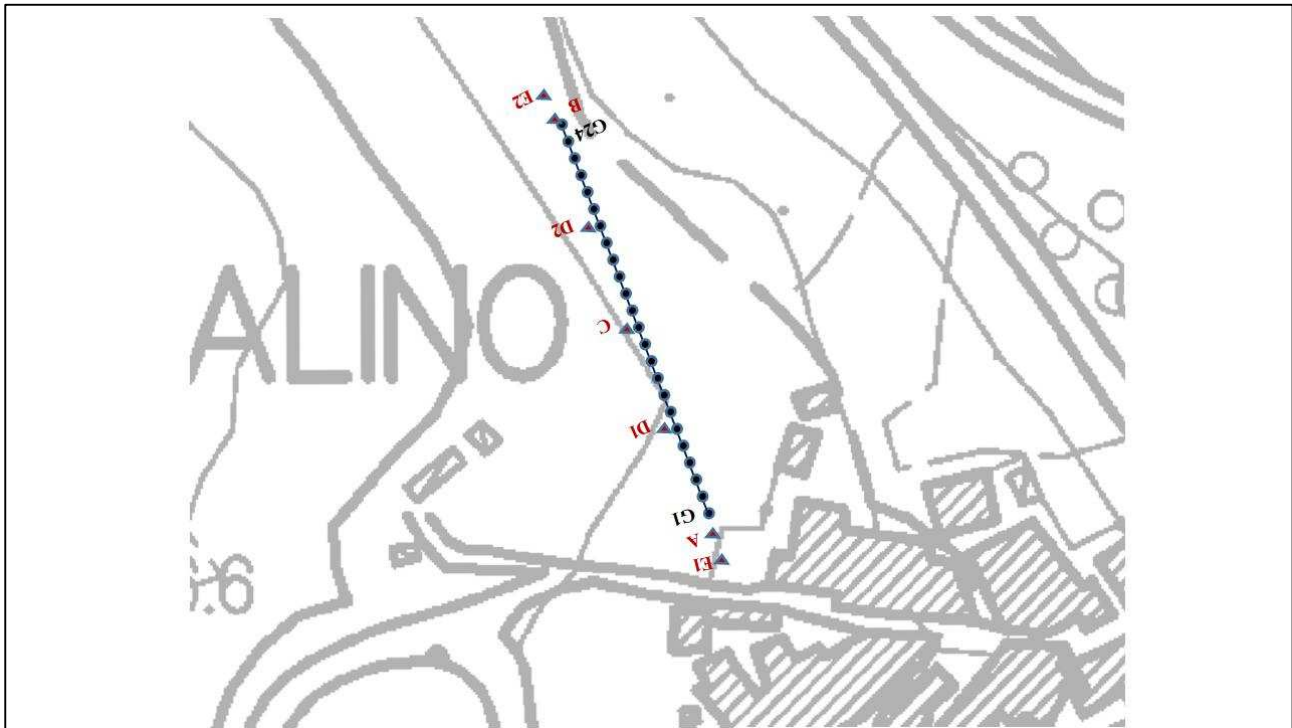
$h$  rappresenta la profondità minima dal geofono  $G$  dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio  $h$ .

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

**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.): 90

## Punti di energizzazione

	<b>E1 Esterno SX</b>	<b>A Estremo SX</b>	<b>D1 Intermedio SX</b>	<b>C Centrale</b>	<b>D2 Intermedio DX</b>	<b>B Estremo DX</b>	<b>E2 Esterno DX</b>
<b>Posizione da Geofono G1 (m)</b>	-6	-1.5	16.5	34.5	52.5	70.5	75

## Geometria geofoni

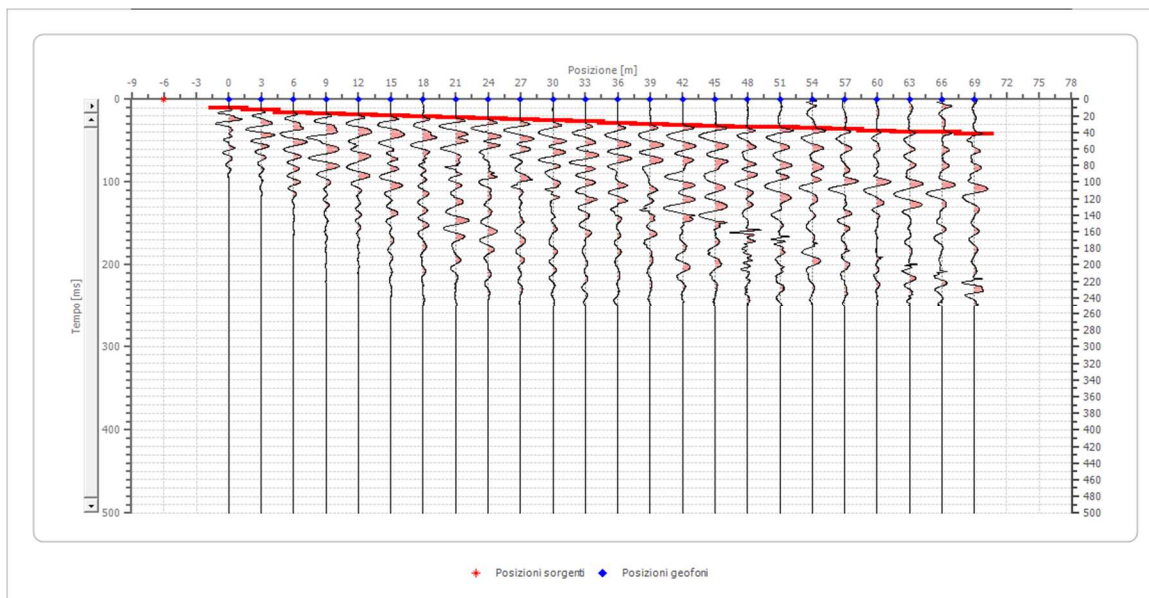
	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	-0.8
2	3.0	-1.2
3	6.0	-1.5
4	9.0	-2.0
5	12.0	-2.6
6	15.0	-3.1
7	18.0	-3.8
8	21.0	-4.3
9	24.0	-4.9
10	27.0	-5.2
11	30.0	-5.5
12	33.0	-5.3
13	36.0	-5.0
14	39.0	-4.6
15	42.0	-4.1
16	45.0	-3.8
17	48.0	-3.4
18	51.0	-3.0
19	54.0	-2.7
20	57.0	-2.4
21	60.0	-1.9
22	63.0	-1.5
23	66.0	-1.1
24	69.0	-0.8

## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

Posizione sorgente Z -3 [m]

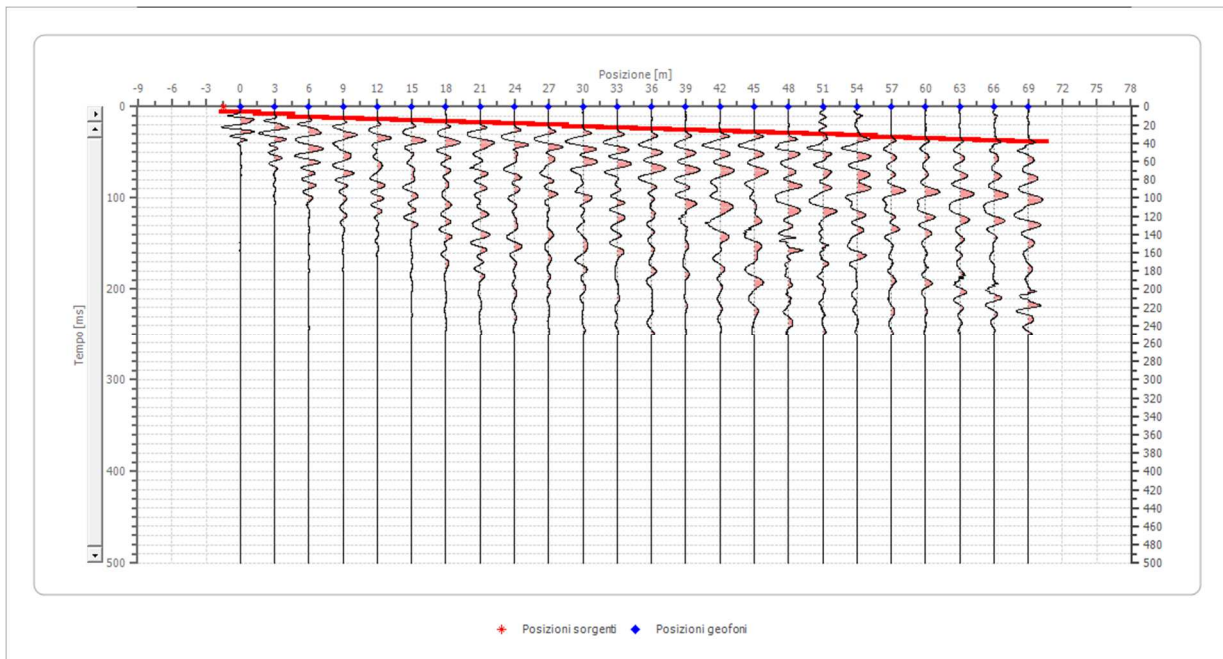


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	10.4615
3.0	13.3146
6.0	16.1678
9.0	17.1188
12.0	18.0699
15.0	20.0000
18.0	21.2500
21.0	21.8741
24.0	23.2500
27.0	24.7500
30.0	26.0000
33.0	26.6293
36.0	28.5314
39.0	30.4335
42.0	31.3845
45.0	32.3356
48.0	33.2866
51.0	34.2376
54.0	35.1887
57.0	36.1397
60.0	38.0418
63.0	38.9929
66.0	39.9439
69.0	41.8460

## Battuta 2

Posizione sorgente X        -1.5 [m]

Posizione sorgente Z        -1 [m]



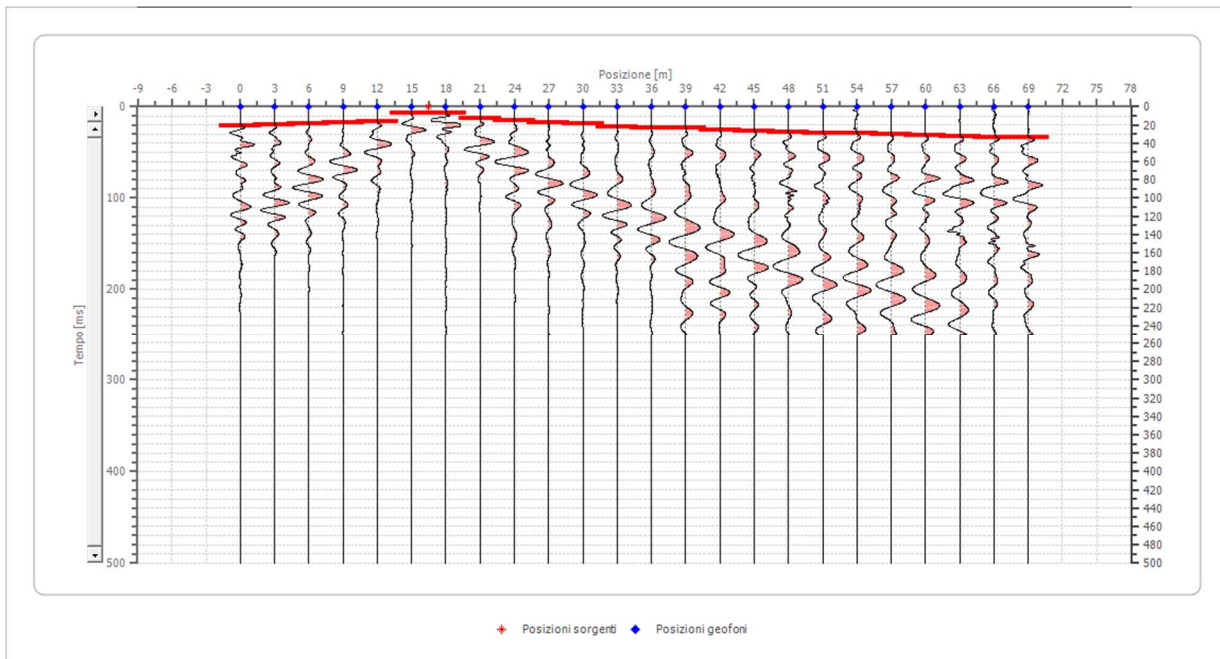
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	5.7063
3.0	7.6084
6.0	11.4125
9.0	12.3636
12.0	14.2657
15.0	15.2167
18.0	16.1678
21.0	17.1188
24.0	18.0699
27.0	19.9720
30.0	21.8741
33.0	22.8251
36.0	24.7272
39.0	25.6782
42.0	26.6293
45.0	27.5803
48.0	28.5314
51.0	30.4335
54.0	31.3845
57.0	33.2866
60.0	35.1887
63.0	36.1397
66.0	37.0908
69.0	38.0418



### Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]

Posizione sorgente Z -3 [m]

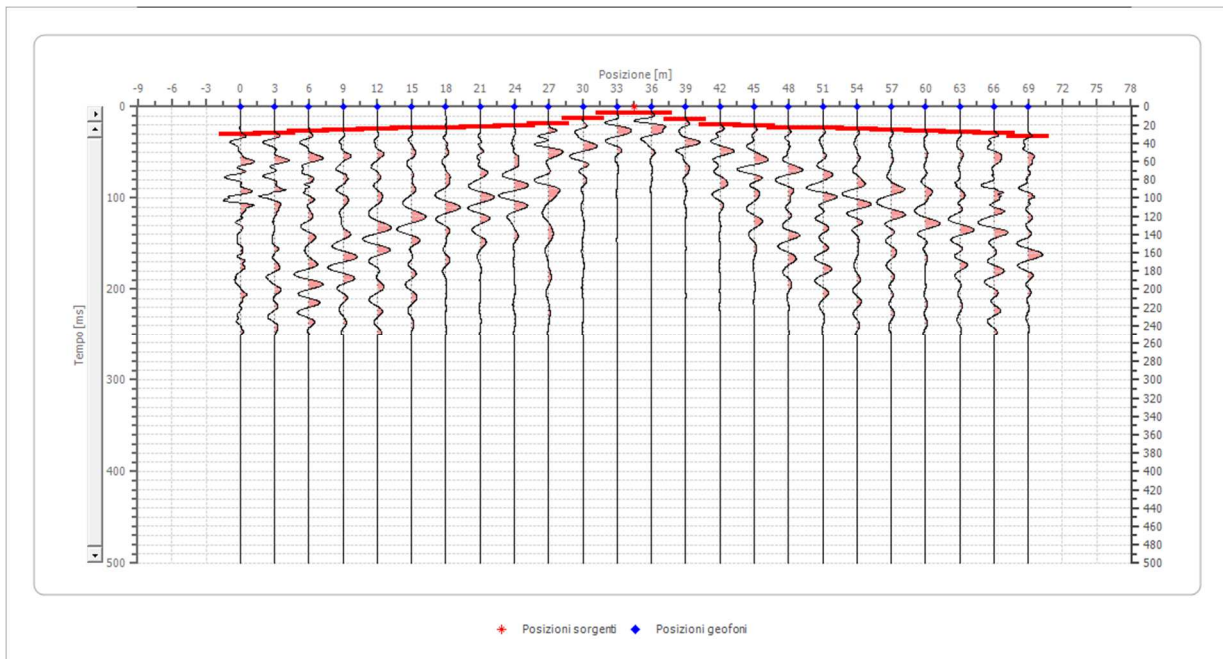


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	20.9230
3.0	19.9720
6.0	19.0209
9.0	17.1188
12.0	16.1678
15.0	6.6573
18.0	6.6573
21.0	13.3146
24.0	15.2167
27.0	17.1188
30.0	19.0209
33.0	21.8741
36.0	22.8251
39.0	23.7761
42.0	25.6782
45.0	26.6293
48.0	27.5803
51.0	28.5314
54.0	29.4824
57.0	30.4335
60.0	31.3845
63.0	32.3356
66.0	33.2866
69.0	34.2376

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]

Posizione sorgente Z -5 [m]



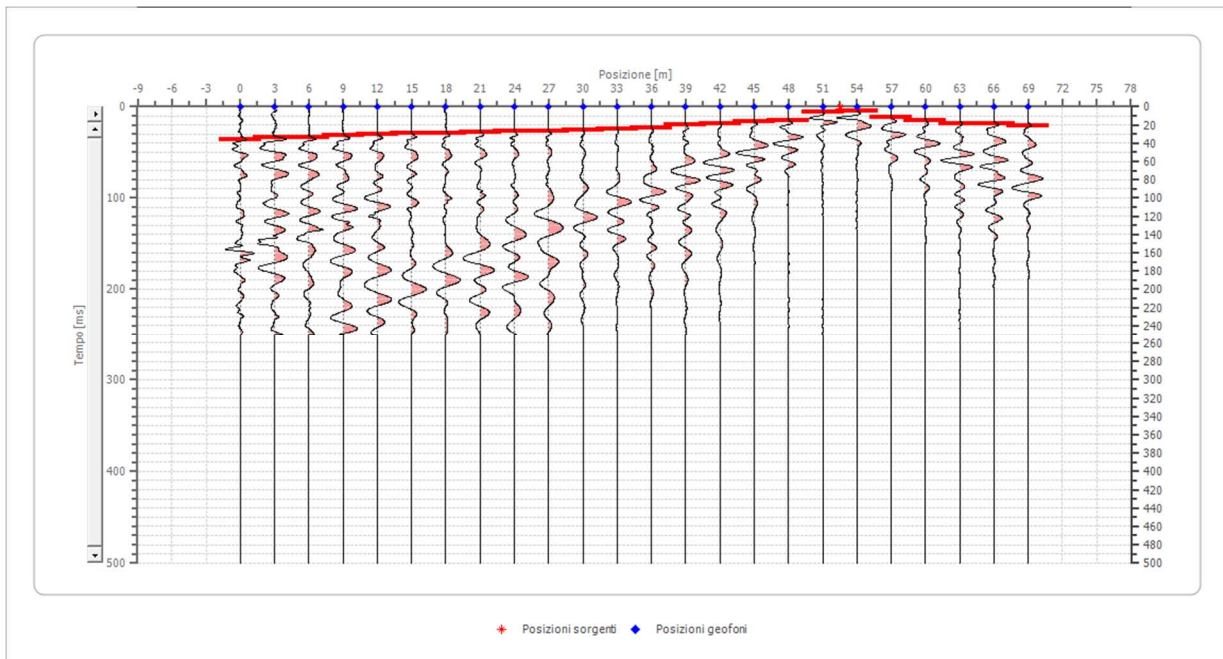
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	30.4335
3.0	29.4824
6.0	26.6293
9.0	25.6782
12.0	24.7272
15.0	23.7761
18.0	22.8251
21.0	21.8741
24.0	20.9230
27.0	19.0209
30.0	12.3636
33.0	6.6573
36.0	6.6573
39.0	14.2657
42.0	19.9720
45.0	20.9230
48.0	22.8251
51.0	23.7761
54.0	24.7272
57.0	25.6782
60.0	26.6293
63.0	27.5803
66.0	29.4824
69.0	32.3356



## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z -3 [m]

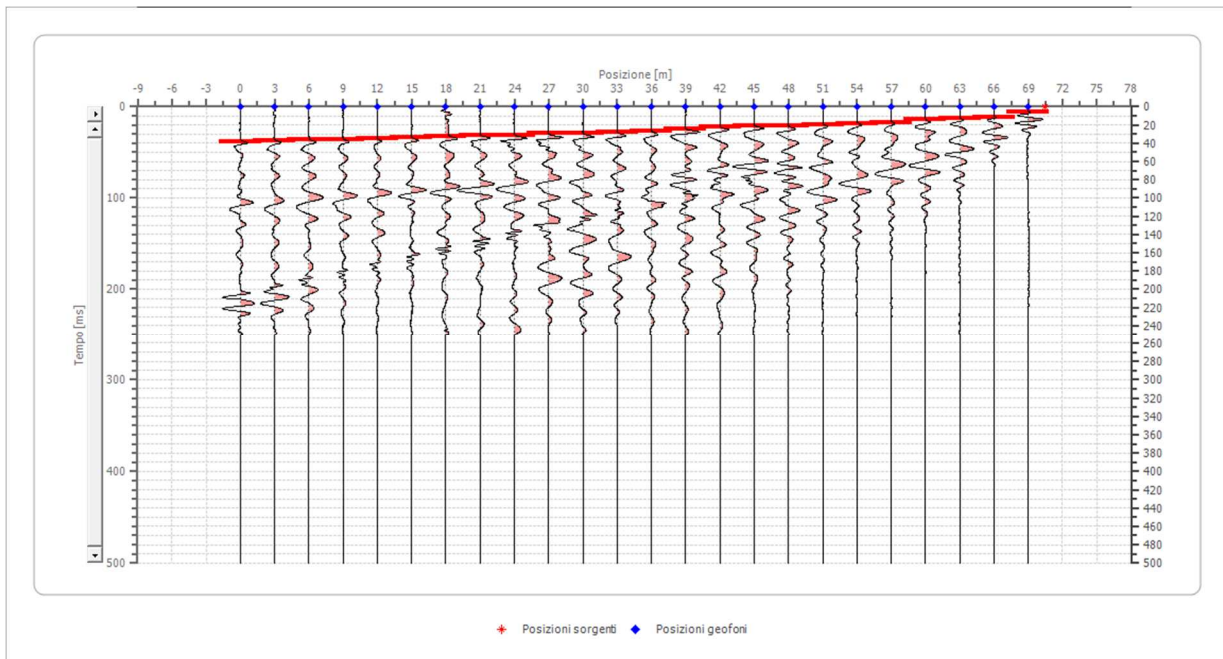


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	36.1397
3.0	34.2376
6.0	33.2866
9.0	31.3845
12.0	30.4335
15.0	29.4824
18.0	28.5314
21.0	27.5803
24.0	26.6293
27.0	26.6293
30.0	25.6782
33.0	24.7272
36.0	23.7761
39.0	19.9720
42.0	19.0209
45.0	16.1678
48.0	15.2167
51.0	5.7063
54.0	4.7552
57.0	11.4125
60.0	15.2167
63.0	18.0699
66.0	19.0209
69.0	20.9230

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

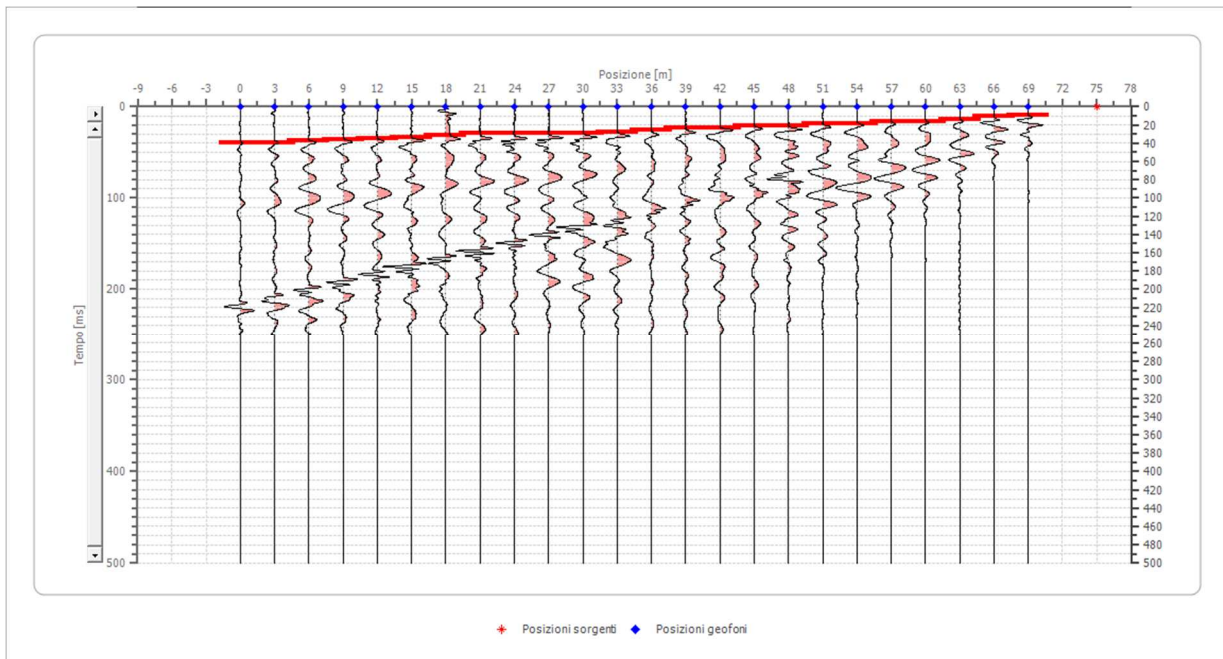
Posizione sorgente Z -1 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	38.0418
3.0	37.0908
6.0	36.1397
9.0	36.1397
12.0	35.1887
15.0	34.2376
18.0	32.3356
21.0	31.3845
24.0	31.3845
27.0	29.4824
30.0	28.5314
33.0	27.5803
36.0	26.6293
39.0	24.7272
42.0	21.8741
45.0	20.9230
48.0	20.9230
51.0	19.9720
54.0	18.0699
57.0	17.1188
60.0	14.2657
63.0	13.3146
66.0	11.4125
69.0	5.7063

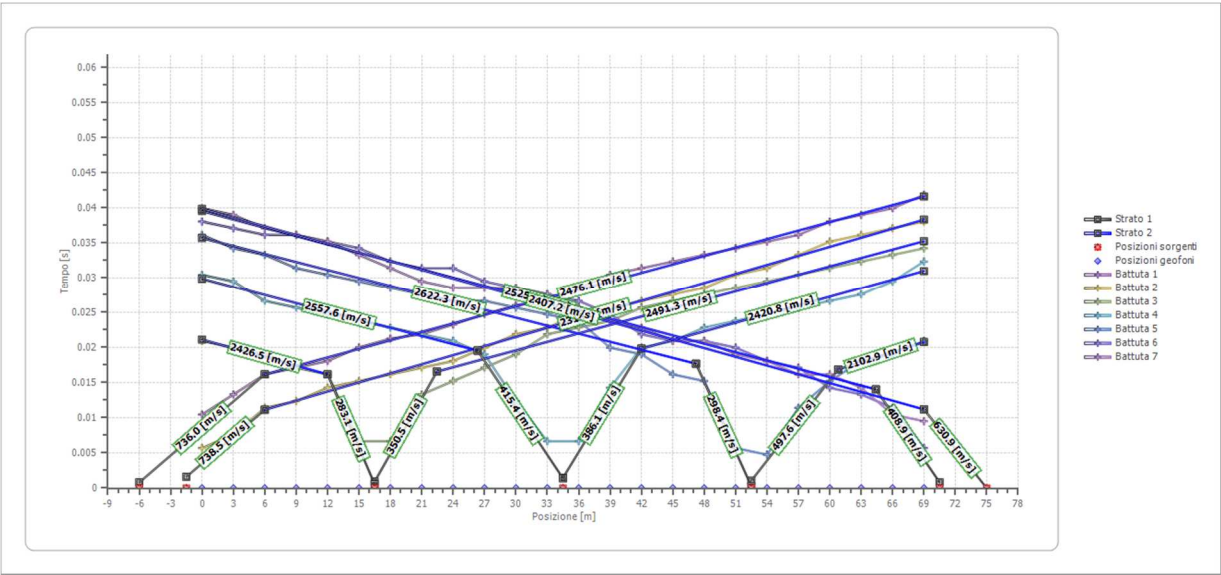
## Battuta 7

Posizione sorgente X 75 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]

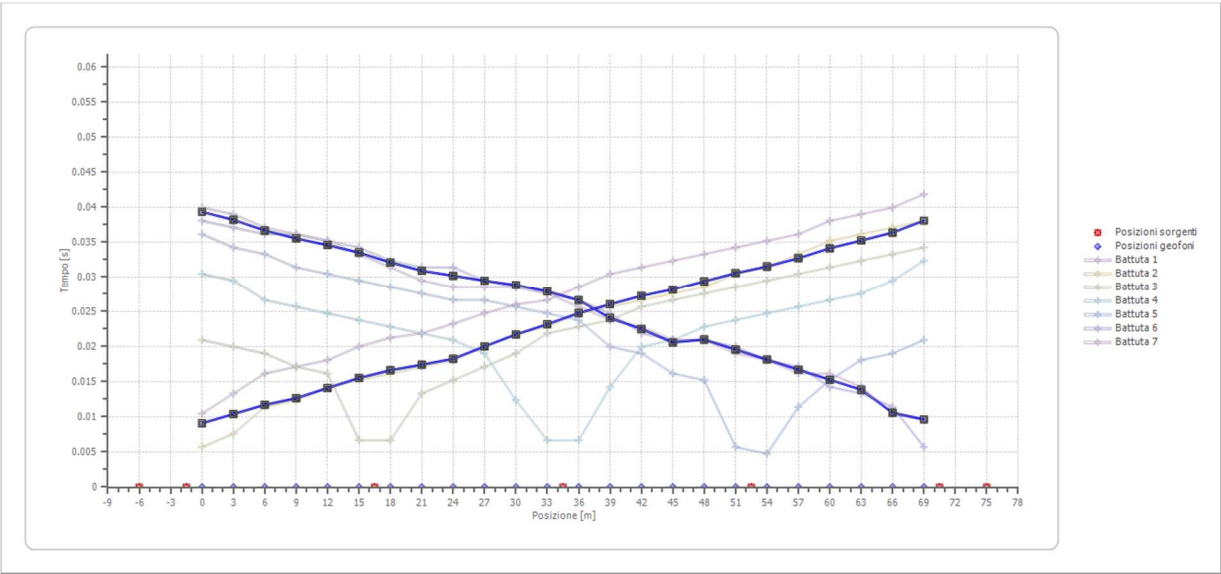


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	39.9439
3.0	38.9929
6.0	37.0908
9.0	36.1397
12.0	35.1887
15.0	33.2866
18.0	31.3845
21.0	29.4824
24.0	28.5314
27.0	28.5314
30.0	28.5314
33.0	27.5803
36.0	25.6782
39.0	23.7761
42.0	22.8251
45.0	20.9230
48.0	20.9230
51.0	19.0209
54.0	18.0699
57.0	16.1678
60.0	16.1678
63.0	14.2657
66.0	10.4615
69.0	9.5105

# Dromocrone



# Dromocrone traslate

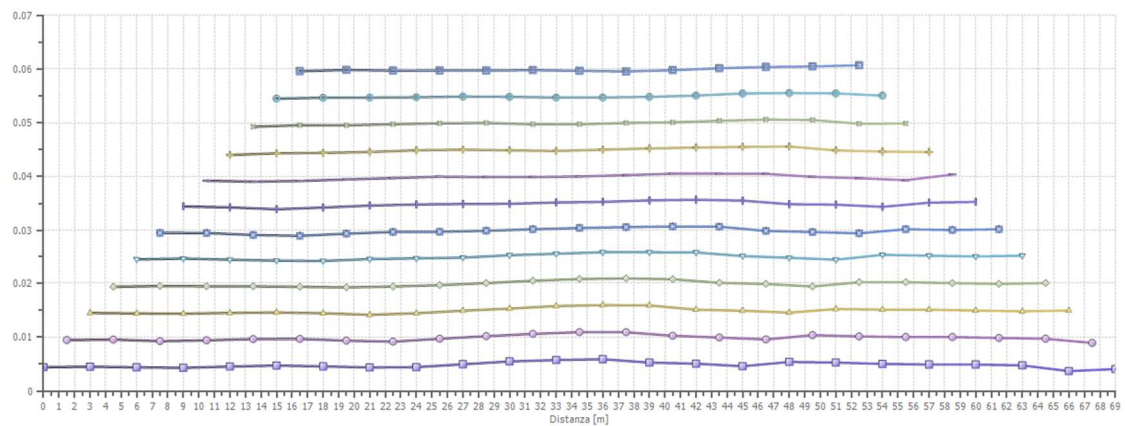
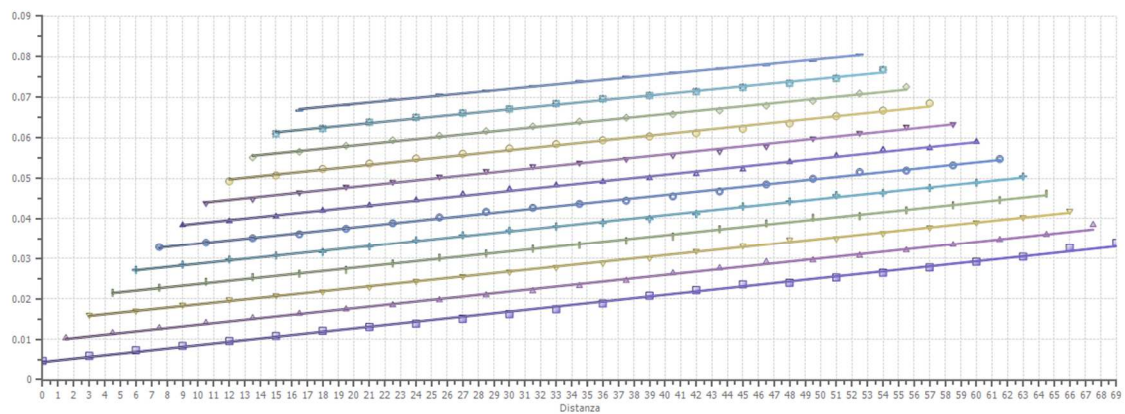


---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

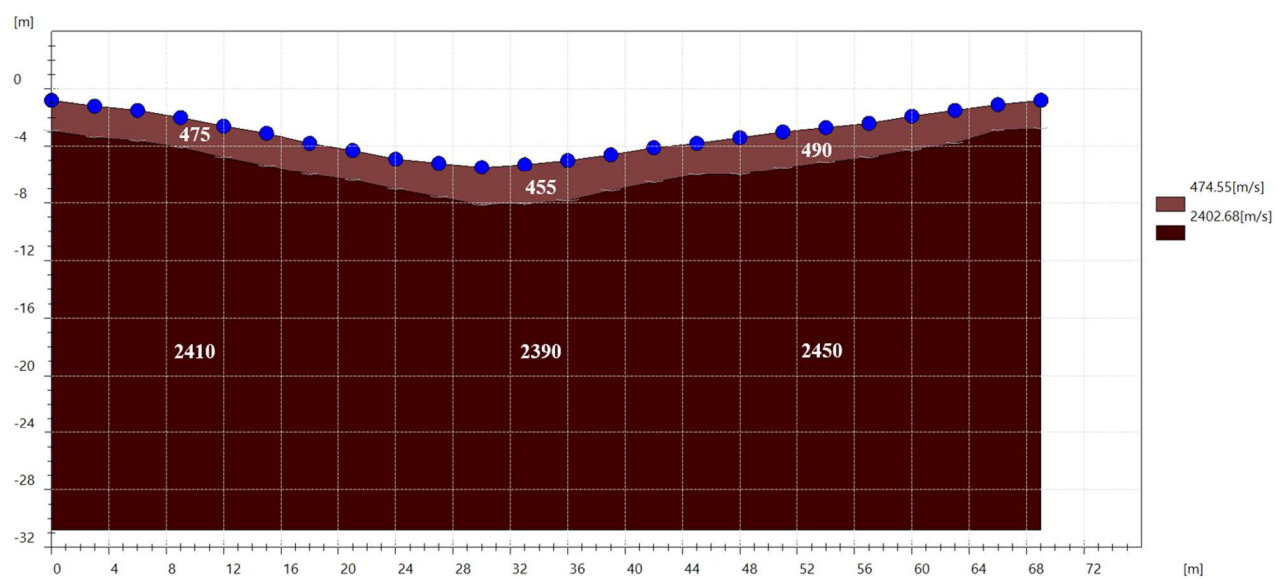
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	2.1	--
G= 3.0 [m]	2.2	--
G= 6.0 [m]	2.1	--
G= 9.0 [m]	2.1	--
G= 12.0 [m]	2.2	--
G= 15.0 [m]	2.3	--
G= 18.0 [m]	2.2	--
G= 21.0 [m]	2.1	--
G= 24.0 [m]	2.1	--
G= 27.0 [m]	2.4	--
G= 30.0 [m]	2.7	--
G= 33.0 [m]	2.8	--
G= 36.0 [m]	2.9	--
G= 39.0 [m]	2.5	--
G= 42.0 [m]	2.5	--
G= 45.0 [m]	2.2	--
G= 48.0 [m]	2.6	--
G= 51.0 [m]	2.6	--
G= 54.0 [m]	2.4	--
G= 57.0 [m]	2.4	--
G= 60.0 [m]	2.4	--
G= 63.0 [m]	2.3	--
G= 66.0 [m]	1.8	--
G= 69.0 [m]	2.0	--
Velocità [m/sec]	474.6	2402.7
Descrizione		





## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

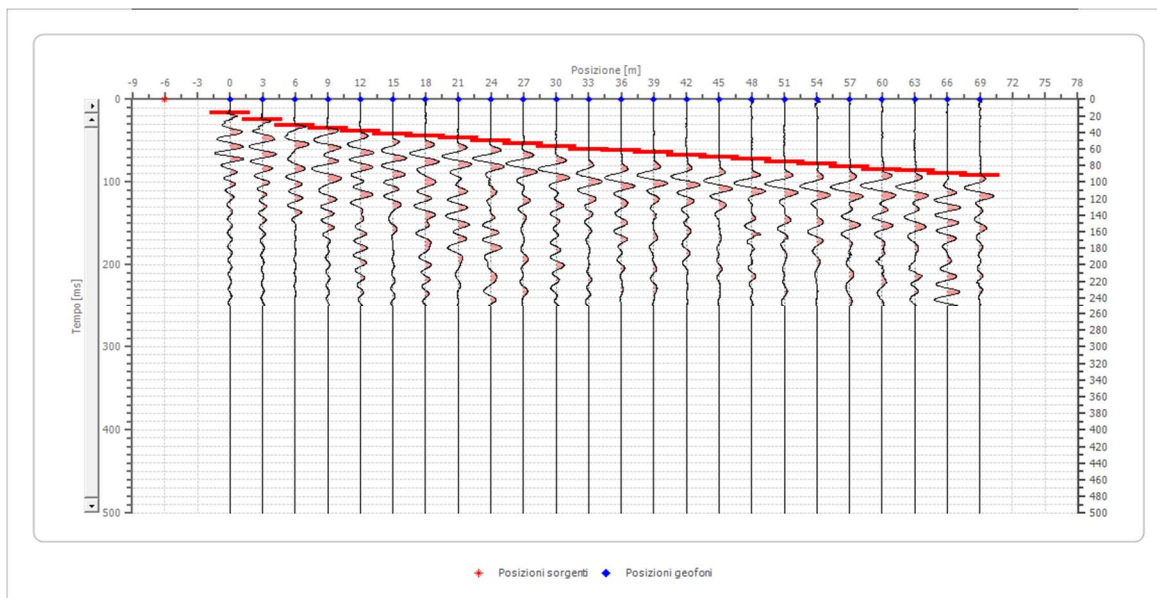


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

Posizione sorgente Z -3 [m]



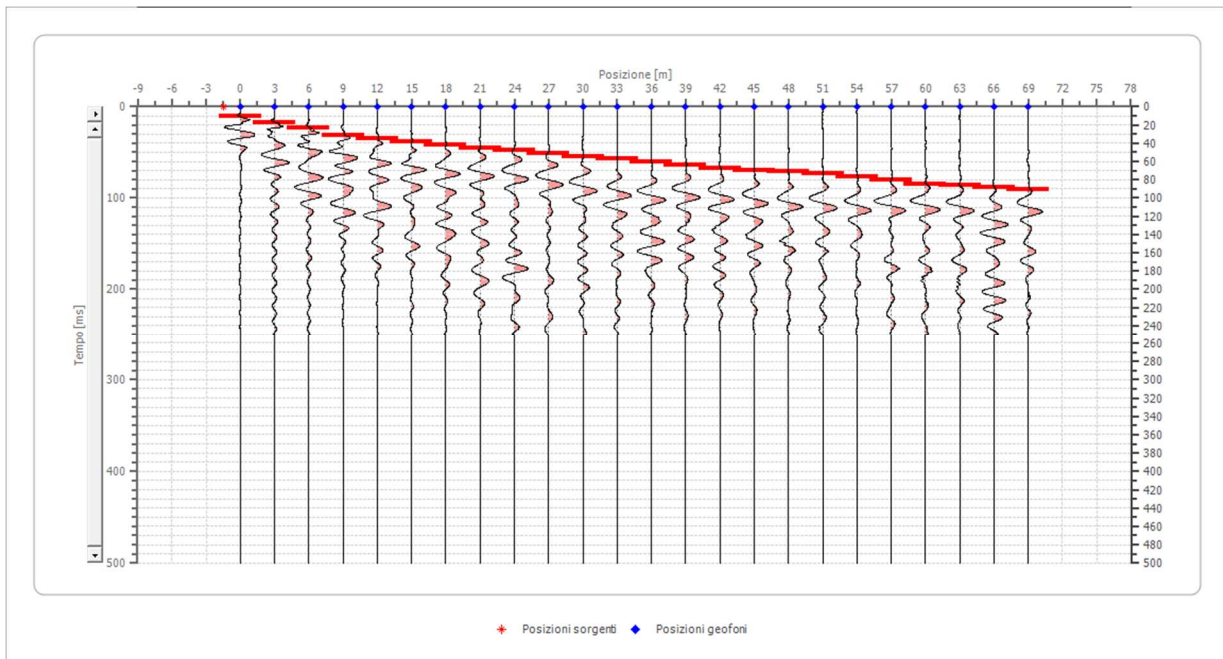
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	16.1678
3.0	24.7272
6.0	31.3845
9.0	35.1887
12.0	38.0418
15.0	41.8460
18.0	43.7481
21.0	46.6012
24.0	50.4054
27.0	53.2586
30.0	57.0627
33.0	59.9159
36.0	61.8180
39.0	63.7201
42.0	67.5242
45.0	69.4263
48.0	72.2795
51.0	76.0837
54.0	77.9857
57.0	81.7899
60.0	84.6431
63.0	86.5452
66.0	89.3983
69.0	92.2514



## Battuta 2

Posizione sorgente X -1.5 [m]

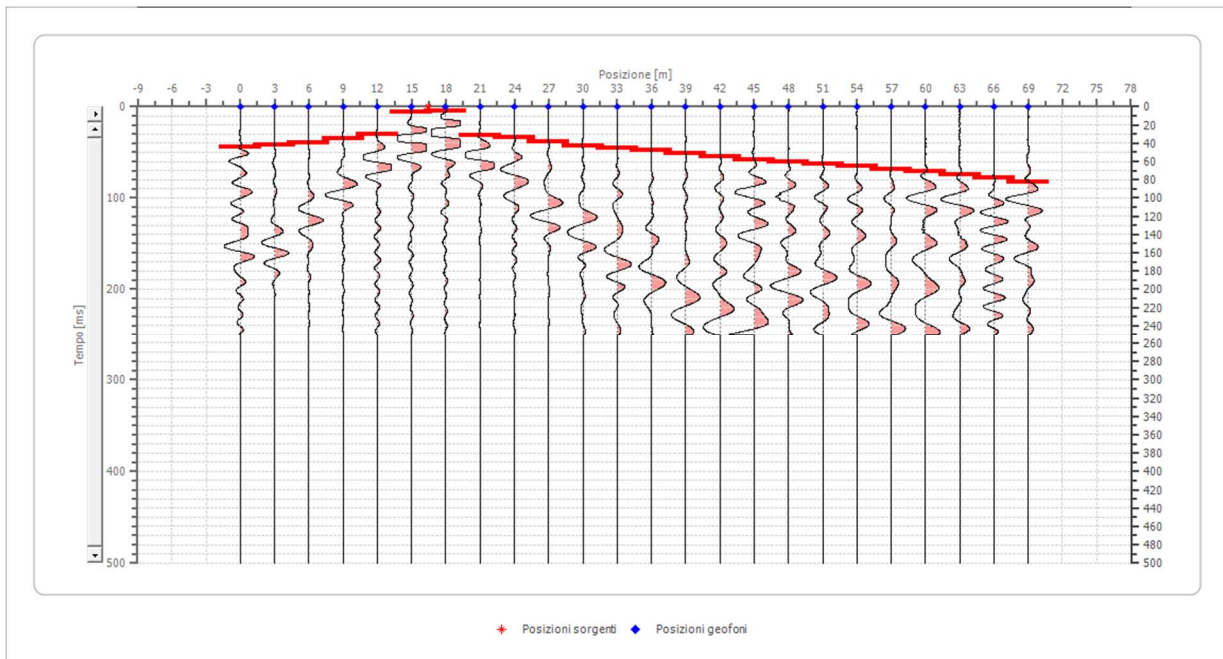
Posizione sorgente Z -1 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	10.4615
3.0	17.1188
6.0	23.7761
9.0	31.3845
12.0	35.1887
15.0	38.0418
18.0	41.8460
21.0	45.6502
24.0	47.5523
27.0	51.3565
30.0	54.2096
33.0	57.0627
36.0	60.8669
39.0	63.7201
42.0	67.5242
45.0	69.4263
48.0	71.3284
51.0	73.2305
54.0	77.0347
57.0	80.8389
60.0	84.6431
63.0	86.5452
66.0	88.4473
69.0	91.3004

### Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]  
Posizione sorgente Z -3 [m]

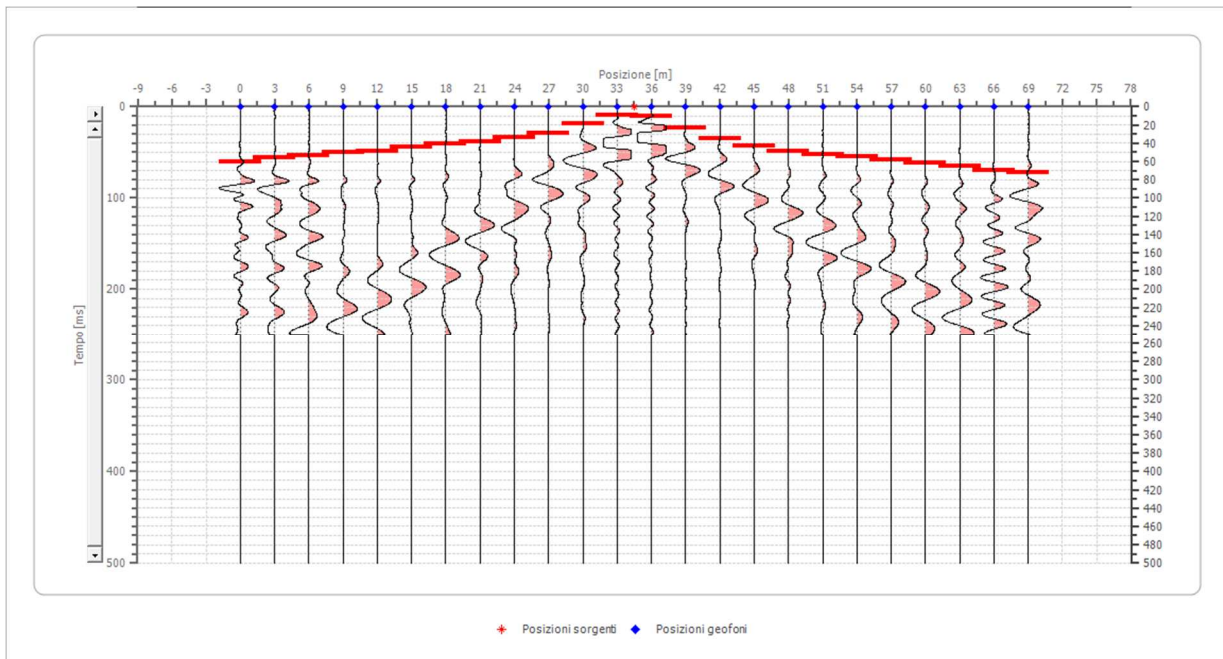


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	44.6991
3.0	41.8460
6.0	38.9929
9.0	35.1887
12.0	30.4335
15.0	5.7063
18.0	4.7552
21.0	31.3845
24.0	33.2866
27.0	38.0418
30.0	42.7971
33.0	45.6502
36.0	47.5523
39.0	51.3565
42.0	54.2096
45.0	58.0138
48.0	60.8669
51.0	62.7690
54.0	65.6222
57.0	68.4753
60.0	71.3284
63.0	74.1816
66.0	77.9857
69.0	82.7410

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]

Posizione sorgente Z -5 [m]

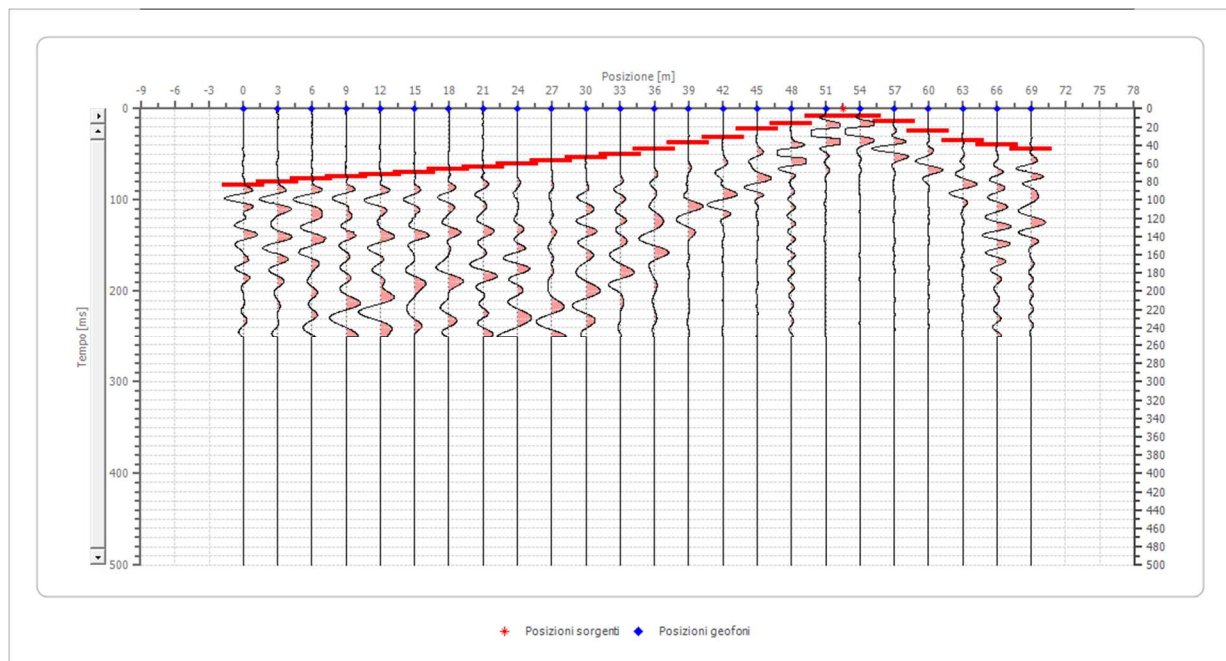


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	59.9159
3.0	56.1117
6.0	53.2586
9.0	50.4054
12.0	48.5033
15.0	44.6991
18.0	40.8950
21.0	38.0418
24.0	34.2376
27.0	29.4824
30.0	19.0209
33.0	9.5105
36.0	10.4615
39.0	22.8251
42.0	35.1887
45.0	42.7971
48.0	48.5033
51.0	52.3075
54.0	55.1607
57.0	58.0138
60.0	61.8180
63.0	65.6222
66.0	69.4263
69.0	72.2795

## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z -3 [m]

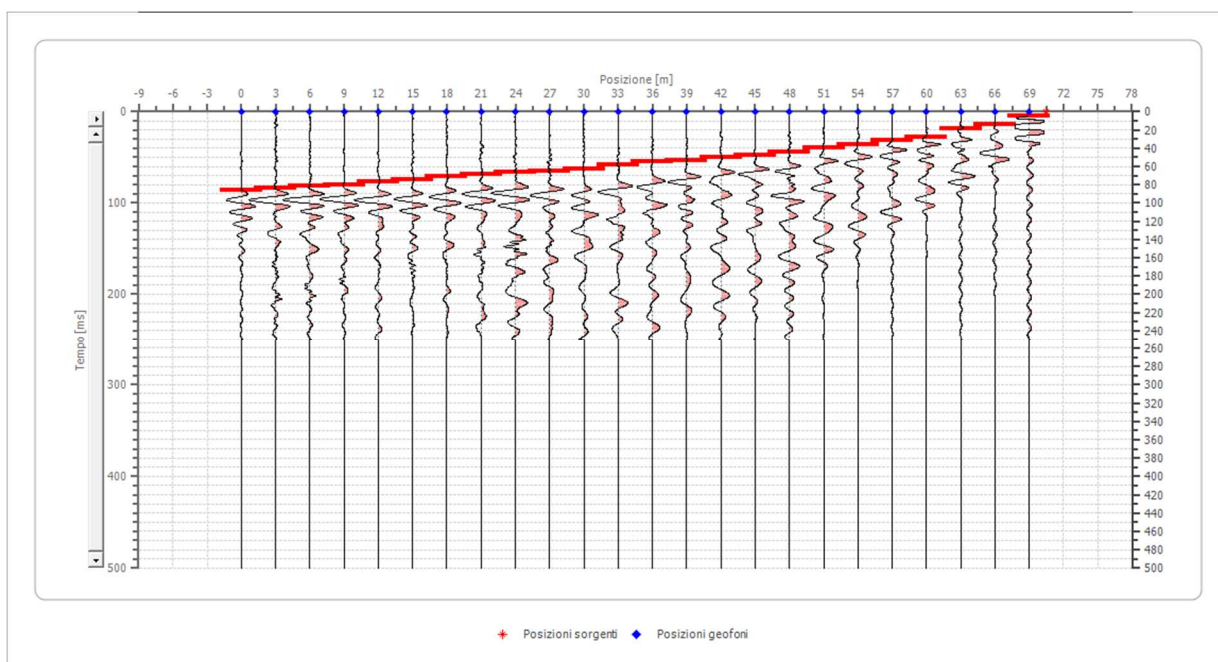


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	83.6920
3.0	79.8878
6.0	77.0347
9.0	74.1816
12.0	72.2795
15.0	69.4263
18.0	66.5732
21.0	63.7201
24.0	59.9159
27.0	57.0627
30.0	53.2586
33.0	49.4544
36.0	44.6991
39.0	37.0908
42.0	31.3845
45.0	21.8741
48.0	16.1678
51.0	7.6084
54.0	7.6084
57.0	14.2657
60.0	24.7272
63.0	35.1887
66.0	39.9439
69.0	43.7481

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

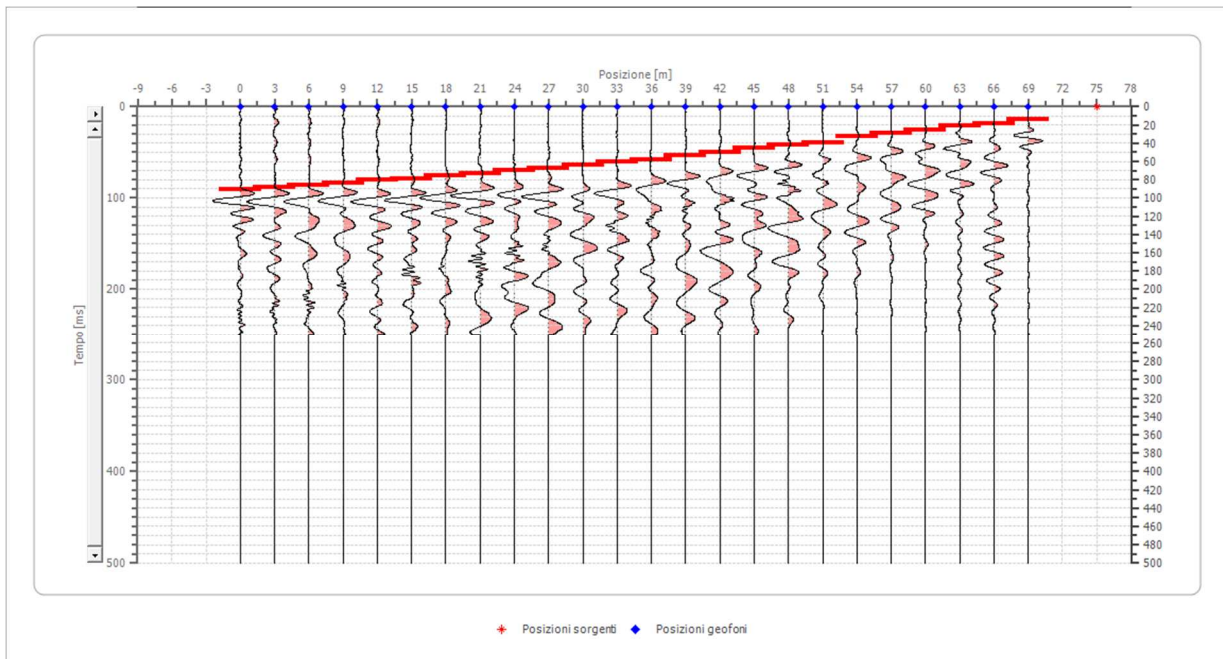


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	85.5941
3.0	83.6920
6.0	81.7899
9.0	79.8878
12.0	77.0347
15.0	74.1816
18.0	71.3284
21.0	68.4753
24.0	66.5732
27.0	64.6711
30.0	62.7690
33.0	58.0138
36.0	55.1607
39.0	53.2586
42.0	50.4054
45.0	47.5523
48.0	44.6991
51.0	39.9439
54.0	36.1397
57.0	31.3845
60.0	27.5803
63.0	18.0699
66.0	14.2657
69.0	4.7552



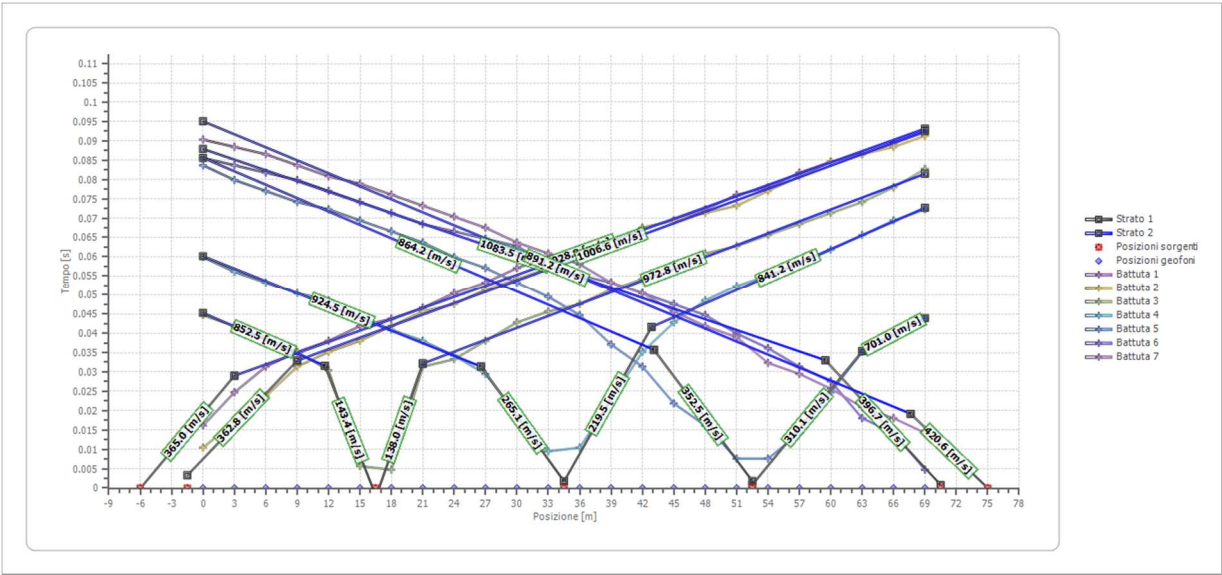
## Battuta 7

Posizione sorgente X 75 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]

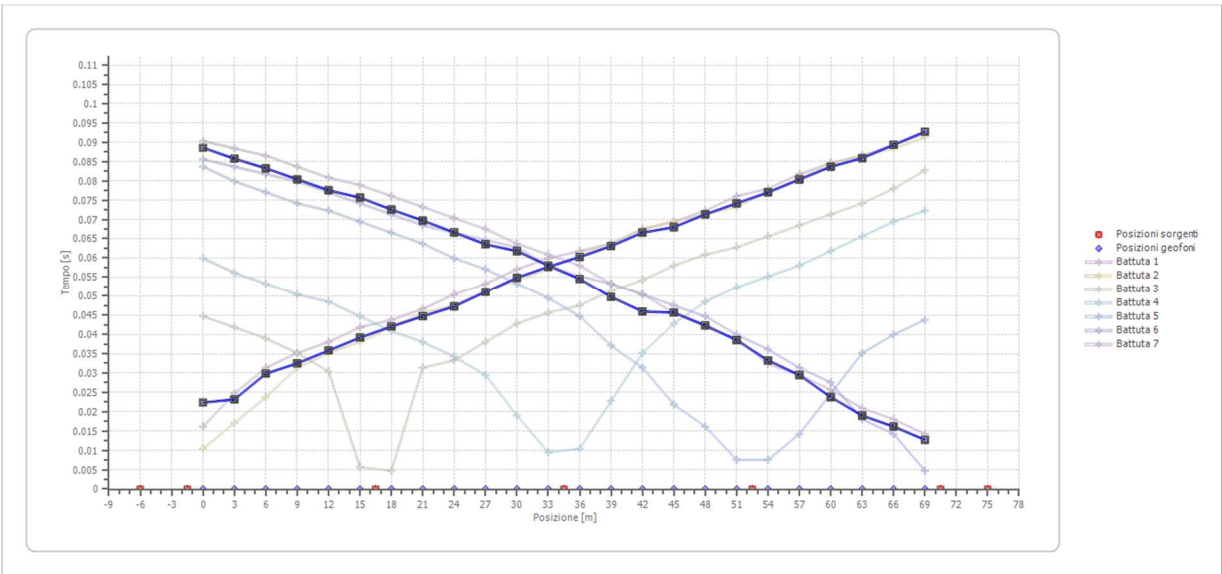


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	90.3493
3.0	88.4473
6.0	86.5452
9.0	83.6920
12.0	80.8389
15.0	78.9368
18.0	76.0837
21.0	73.2305
24.0	70.3774
27.0	67.5242
30.0	63.7201
33.0	60.8669
36.0	58.0138
39.0	53.2586
42.0	50.4054
45.0	45.6502
48.0	41.8460
51.0	38.9929
54.0	32.3356
57.0	29.4824
60.0	25.6782
63.0	20.9230
66.0	18.0699
69.0	14.2657

# Dromocrone



# Dromocrone traslate



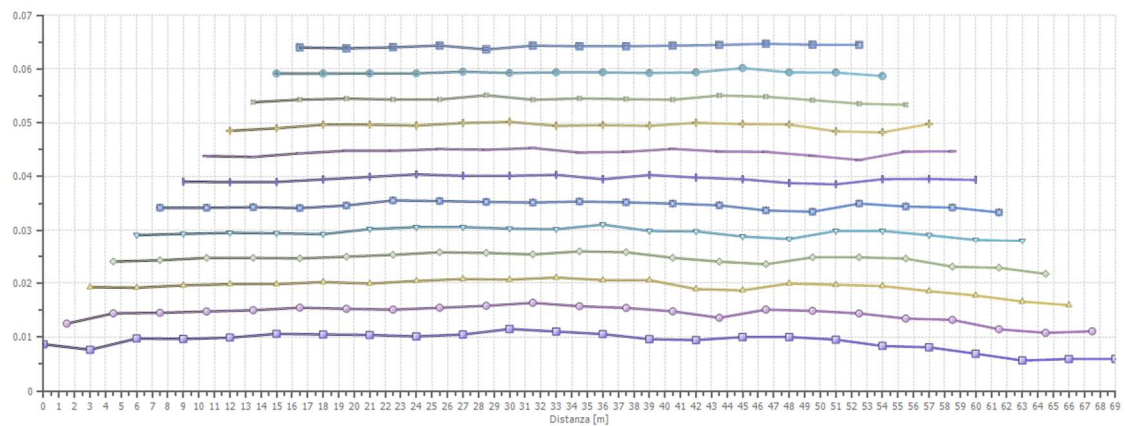
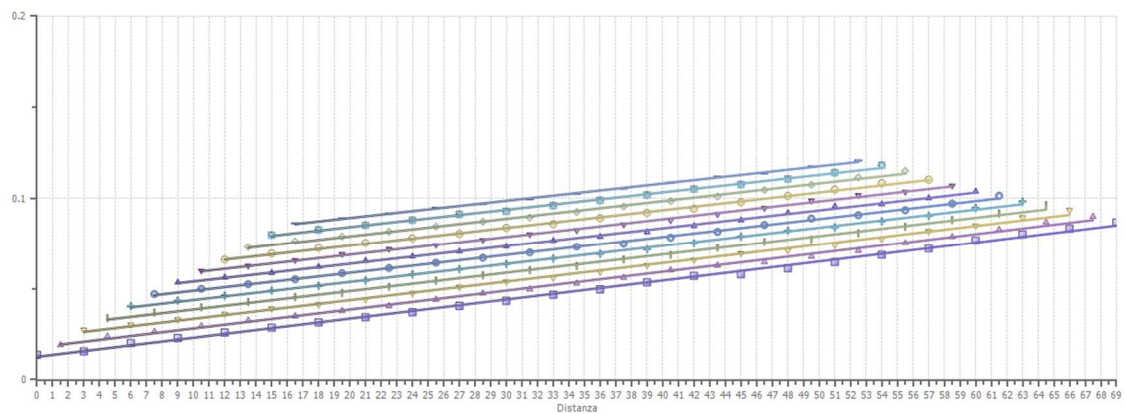
---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	2.7	--
G= 3.0 [m]	2.4	--
G= 6.0 [m]	3.1	--
G= 9.0 [m]	3.0	--
G= 12.0 [m]	3.1	--
G= 15.0 [m]	3.3	--
G= 18.0 [m]	3.3	--
G= 21.0 [m]	3.3	--
G= 24.0 [m]	3.2	--
G= 27.0 [m]	3.3	--
G= 30.0 [m]	3.6	--
G= 33.0 [m]	3.5	--
G= 36.0 [m]	3.3	--
G= 39.0 [m]	3.0	--
G= 42.0 [m]	3.0	--
G= 45.0 [m]	3.1	--
G= 48.0 [m]	3.1	--
G= 51.0 [m]	3.0	--
G= 54.0 [m]	2.6	--
G= 57.0 [m]	2.5	--
G= 60.0 [m]	2.2	--
G= 63.0 [m]	1.8	--
G= 66.0 [m]	1.9	--
G= 69.0 [m]	1.9	--
Velocità [m/sec]	297.4	951.4
Descrizione		





## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

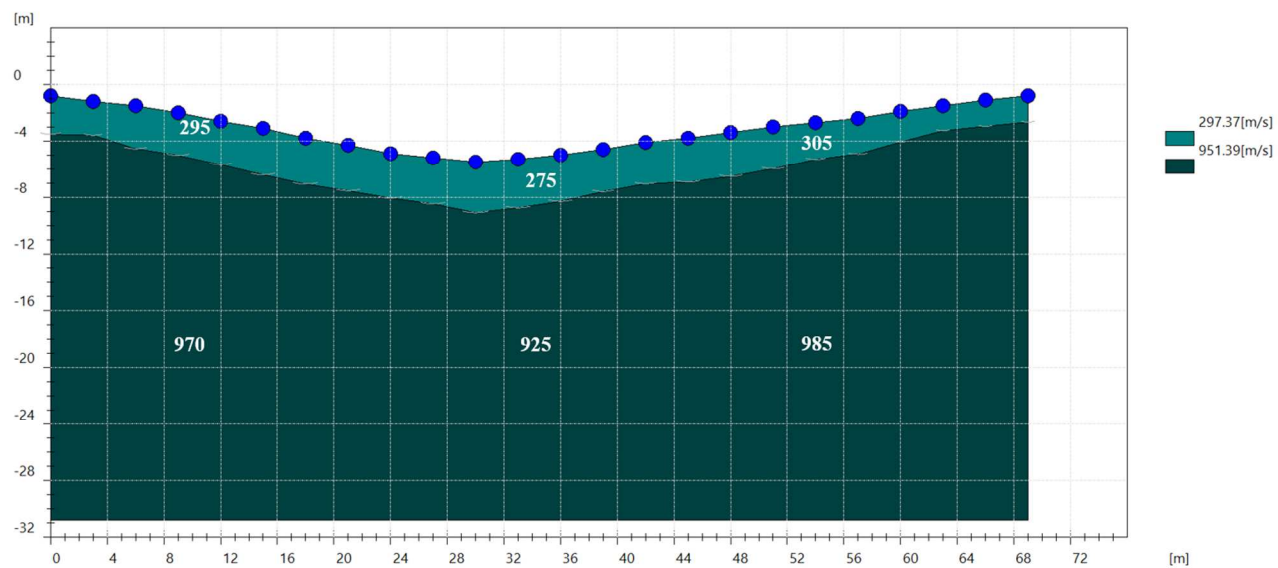




Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_1

**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  $\theta_i$  mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione  $\theta_r$ . 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

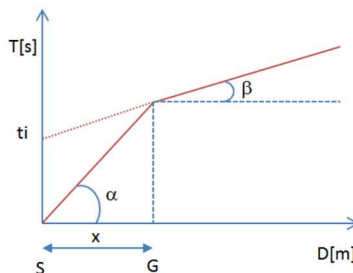
$$T = x_i / V_1$$

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

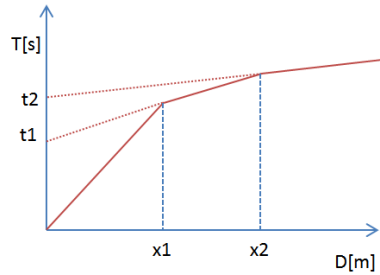
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

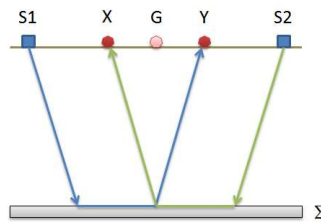


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

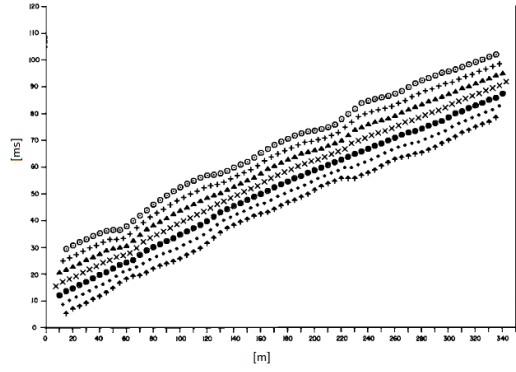
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



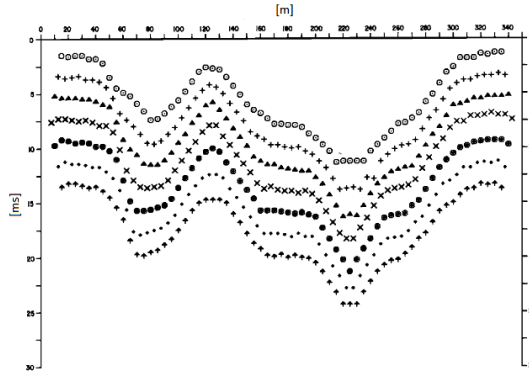
dove  $T_{S_1Y}$  e  $T_{S_2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S_1S_2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è 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:

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

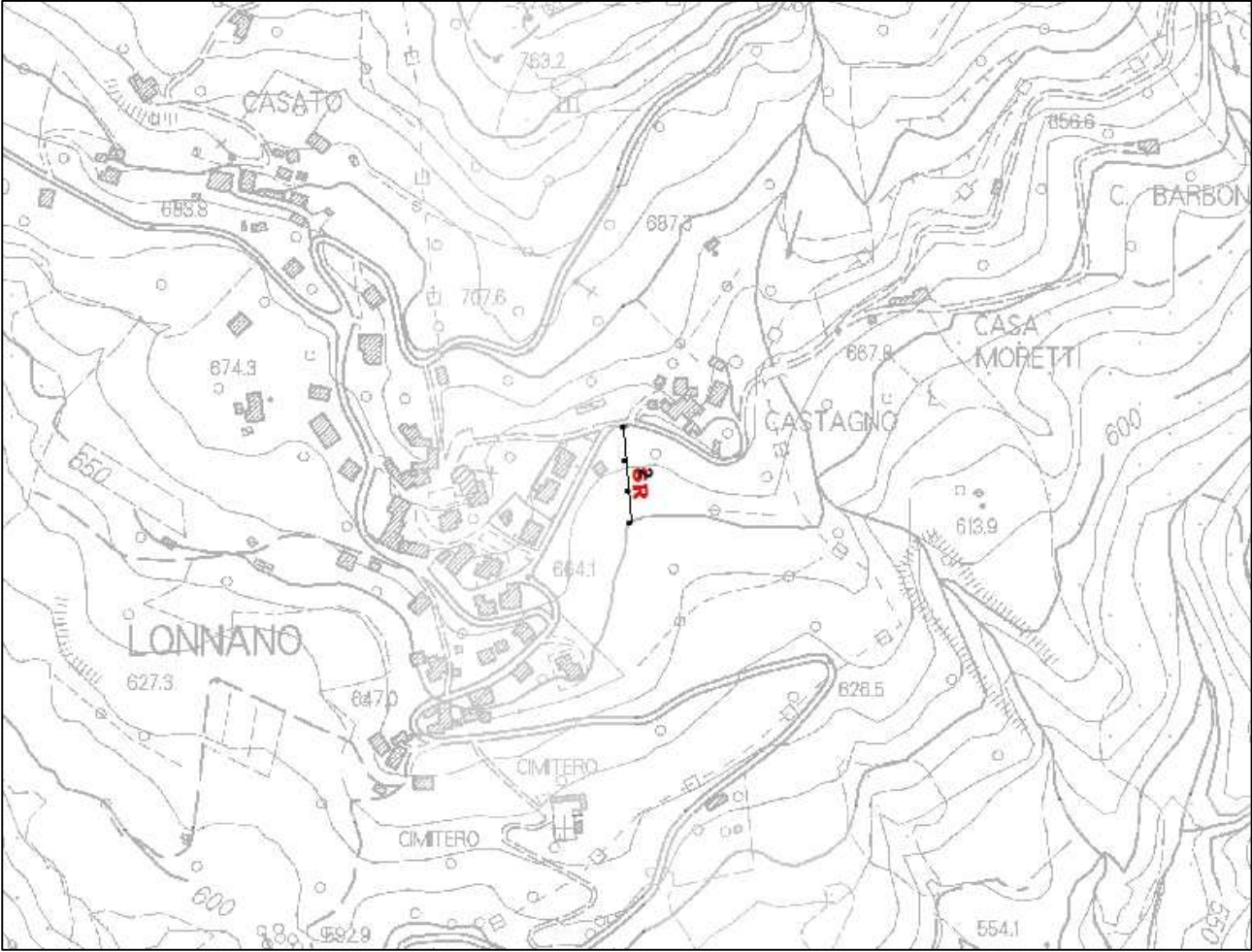
---

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

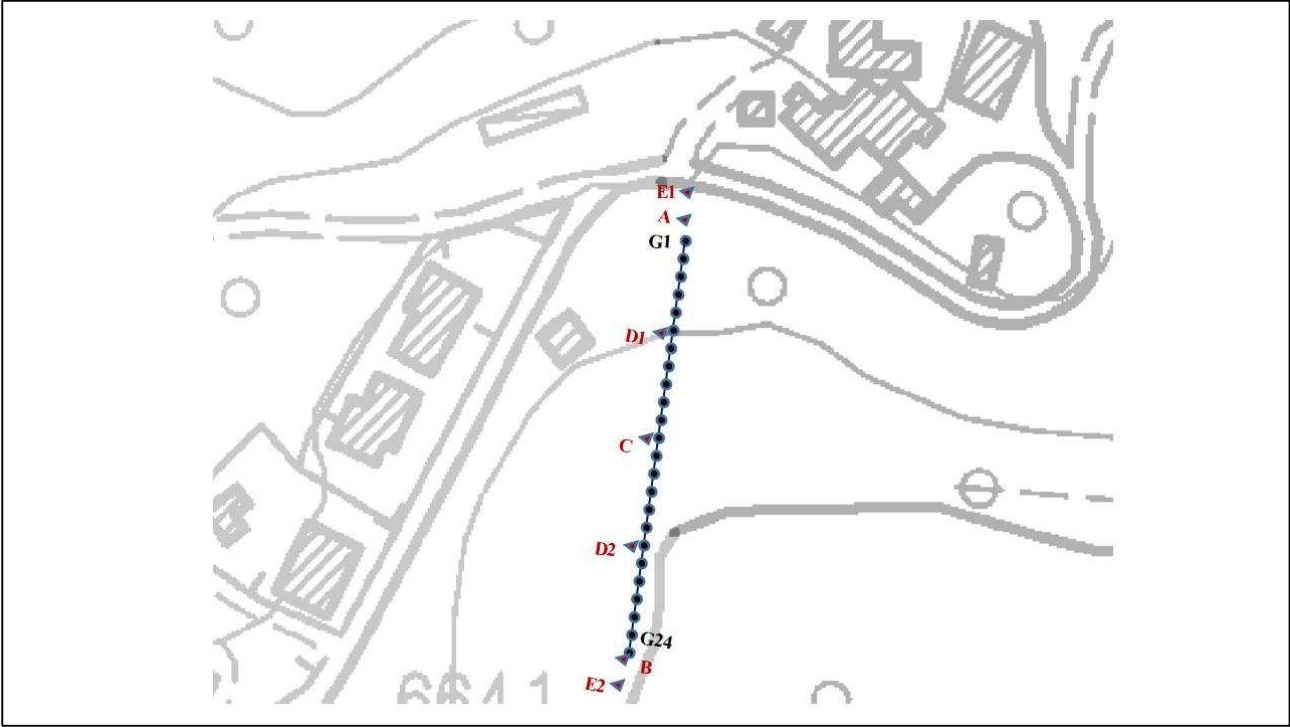
Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa  $20^\circ$



**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.): 90

## Punti di energizzazione

	<b>E1 Esterno SX</b>	<b>A Estremo SX</b>	<b>D1 Intermedio SX</b>	<b>C Centrale</b>	<b>D2 Intermedio DX</b>	<b>B Estremo DX</b>	<b>E2 Esterno DX</b>
<b>Posizione da Geofono G1 (m)</b>	-6	-1.5	16.5	34.5	52.5	70.5	75

## Geometria geofoni

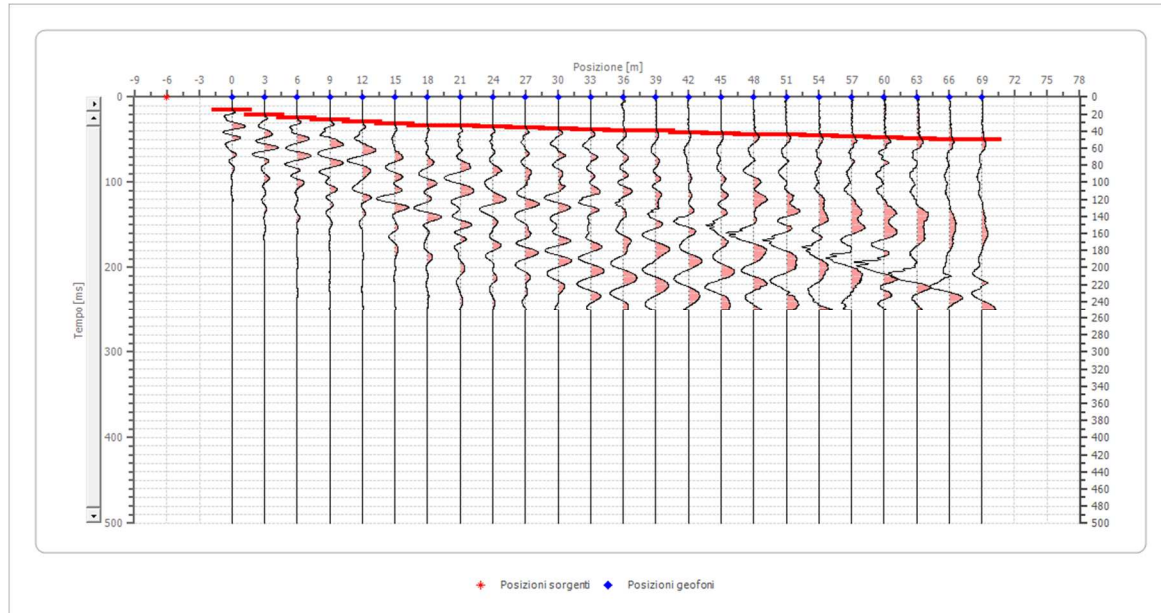
	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	-1.5
2	3.0	-2.3
3	6.0	-2.9
4	9.0	-3.4
5	12.0	-3.8
6	15.0	-4.6
7	18.0	-5.4
8	21.0	-6.3
9	24.0	-7.4
10	27.0	-7.9
11	30.0	-8.8
12	33.0	-9.2
13	36.0	-9.5
14	39.0	-10.6
15	42.0	-11.4
16	45.0	-12.4
17	48.0	-13.3
18	51.0	-14.3
19	54.0	-15.1
20	57.0	-15.8
21	60.0	-16.5
22	63.0	-16.9
23	66.0	-17.2
24	69.0	-17.4

## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

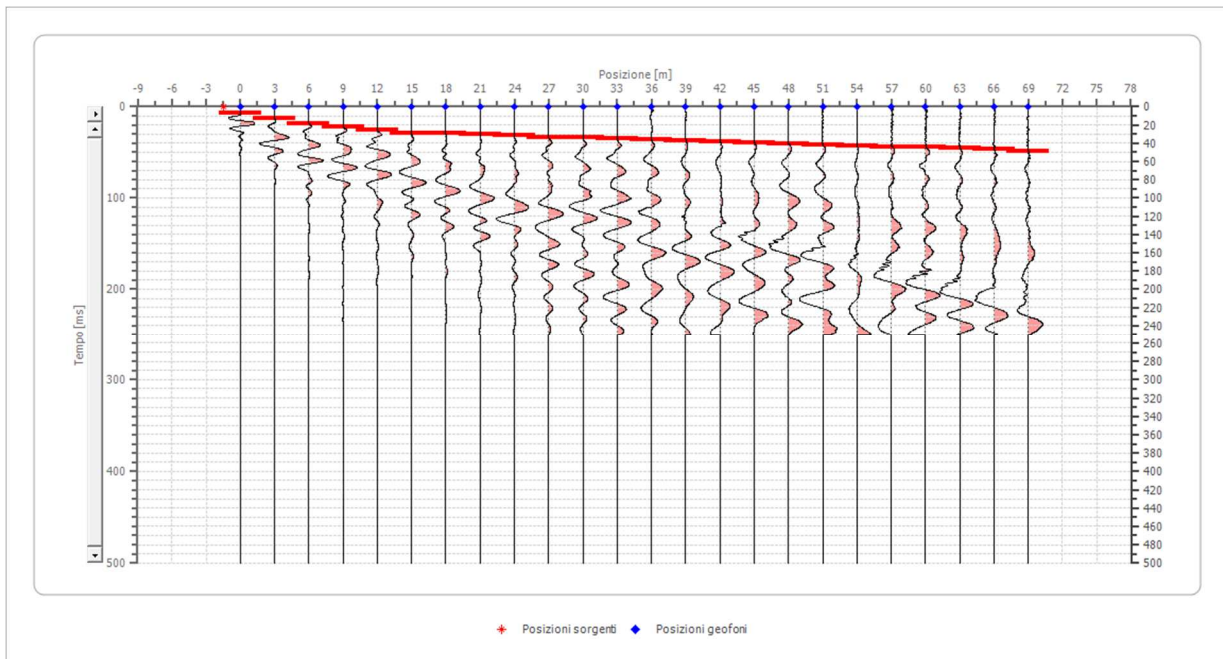


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	15.2167
3.0	20.9230
6.0	24.7272
9.0	26.6293
12.0	29.4824
15.0	31.3845
18.0	33.2866
21.0	34.2376
24.0	35.1887
27.0	36.1397
30.0	37.0908
33.0	38.0418
36.0	38.9929
39.0	39.9439
42.0	41.8460
45.0	42.7971
48.0	43.7481
51.0	44.6991
54.0	45.6502
57.0	46.6012
60.0	47.5523
63.0	48.5033
66.0	49.4544
69.0	50.4054

## Battuta 2

Posizione sorgente X -1.5 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

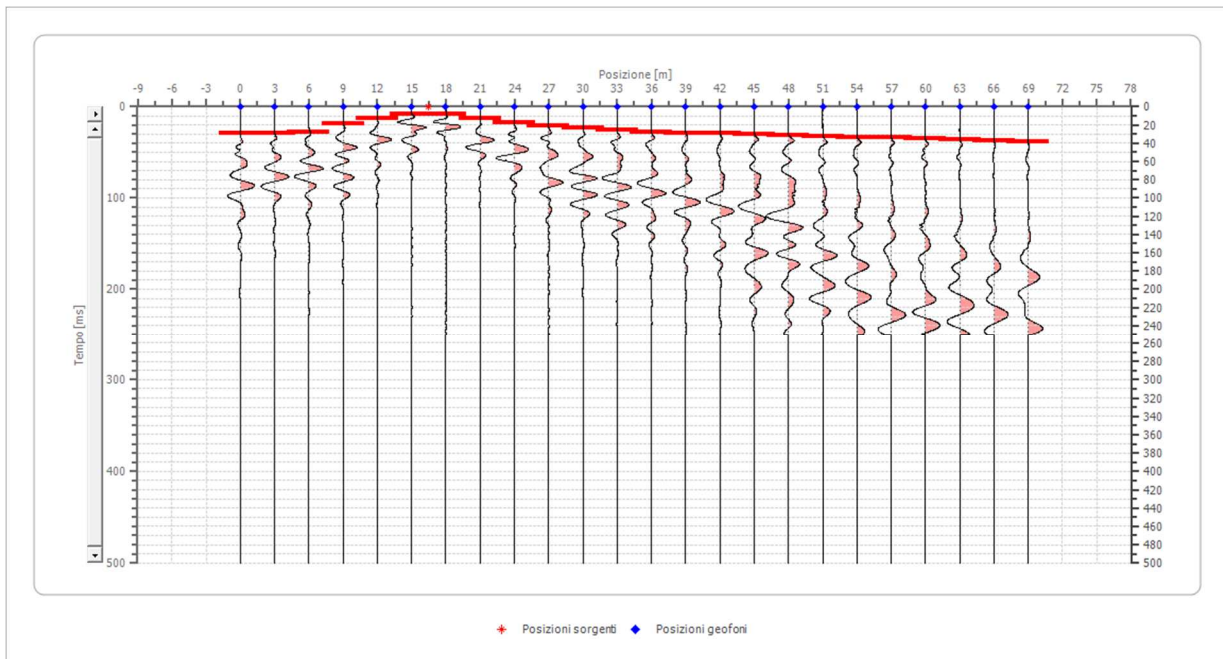


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	6.6573
3.0	13.3146
6.0	18.0699
9.0	21.8741
12.0	25.6782
15.0	28.5314
18.0	29.4824
21.0	30.4335
24.0	31.3845
27.0	33.2866
30.0	34.2376
33.0	35.1887
36.0	36.1397
39.0	37.0908
42.0	38.0418
45.0	38.9929
48.0	40.8950
51.0	41.8460
54.0	42.7971
57.0	43.7481
60.0	44.6991
63.0	45.6502
66.0	46.6012
69.0	48.5033

### Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]

Posizione sorgente Z -5 [m]



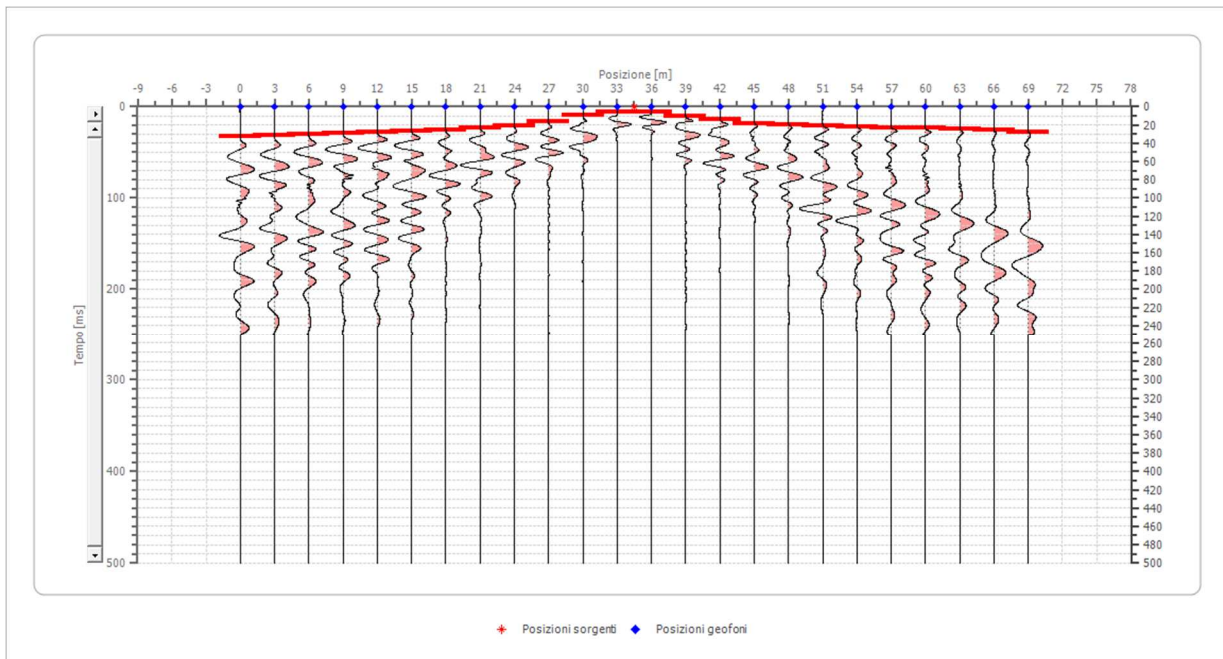
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	29.4824
3.0	28.5314
6.0	27.5803
9.0	19.0209
12.0	12.3636
15.0	7.6084
18.0	8.5594
21.0	12.3636
24.0	17.1188
27.0	20.9230
30.0	22.8251
33.0	25.6782
36.0	27.5803
39.0	28.5314
42.0	29.4824
45.0	30.4335
48.0	31.3845
51.0	32.3356
54.0	33.2866
57.0	34.2376
60.0	35.1887
63.0	36.1397
66.0	37.0908
69.0	38.0418



#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]

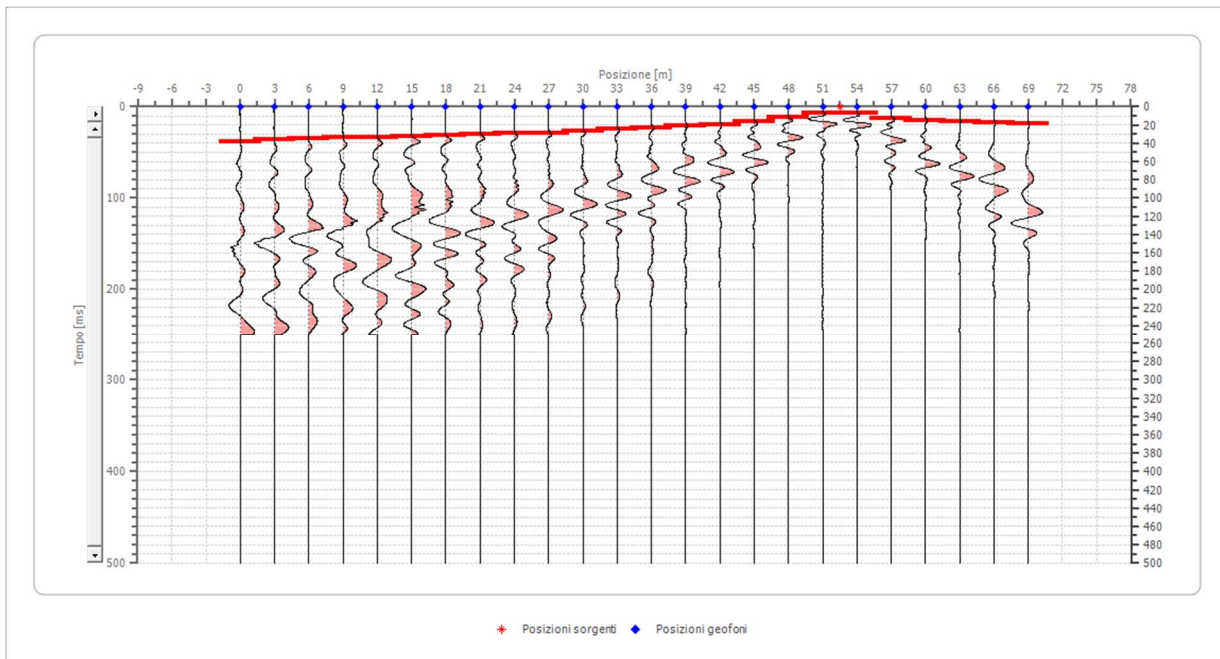
Posizione sorgente Z -9 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	32.3356
3.0	31.3845
6.0	30.4335
9.0	29.4824
12.0	27.5803
15.0	26.6293
18.0	25.6782
21.0	23.7761
24.0	20.9230
27.0	16.1678
30.0	9.5105
33.0	5.7063
36.0	5.7063
39.0	10.4615
42.0	14.2657
45.0	18.0699
48.0	19.9720
51.0	20.9230
54.0	21.8741
57.0	22.8251
60.0	23.7761
63.0	24.7272
66.0	25.6782
69.0	27.5803

## Battuta 5

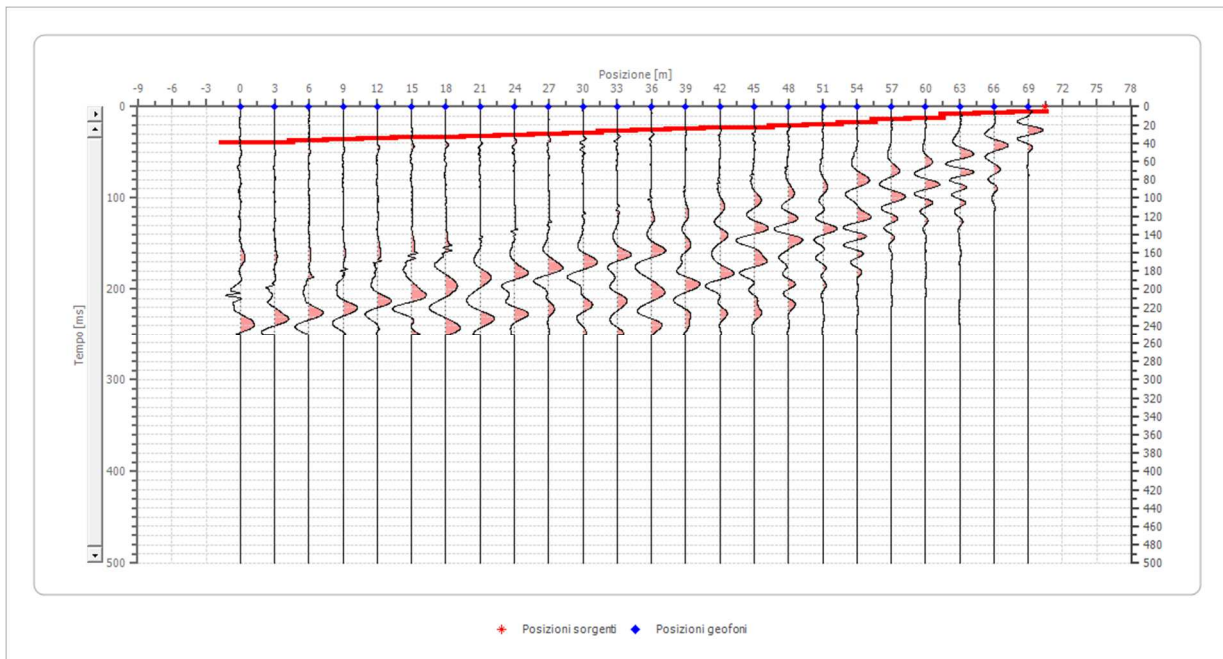
Posizione sorgente X      52.5 [m]  
 Posizione sorgente Z      -15 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	38.0418
3.0	36.1397
6.0	35.1887
9.0	34.2376
12.0	33.2866
15.0	32.3356
18.0	31.3845
21.0	30.4335
24.0	29.4824
27.0	28.5314
30.0	26.6293
33.0	24.7272
36.0	22.8251
39.0	20.9230
42.0	19.9720
45.0	16.1678
48.0	11.4125
51.0	6.6573
54.0	6.6573
57.0	12.3636
60.0	15.2167
63.0	16.1678
66.0	17.1188
69.0	19.0209

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]  
Posizione sorgente Z -18 [m]



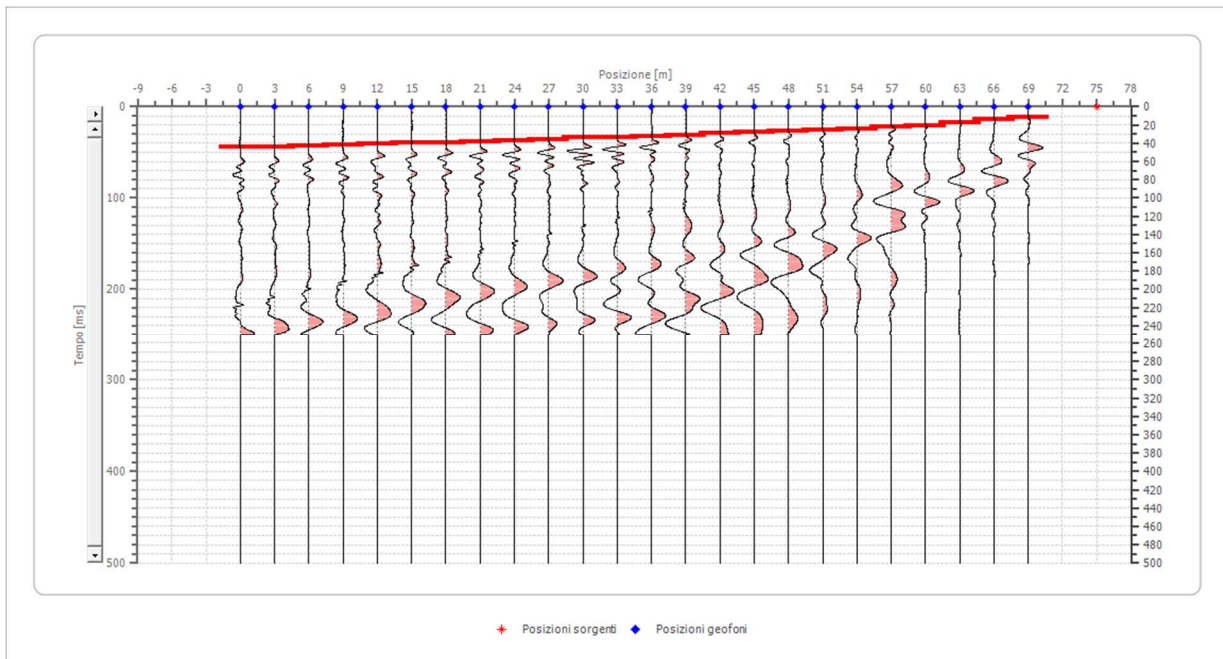
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	39.9439
3.0	38.9929
6.0	37.0908
9.0	36.1397
12.0	35.1887
15.0	34.2376
18.0	33.2866
21.0	32.3356
24.0	31.3845
27.0	30.4335
30.0	28.5314
33.0	26.6293
36.0	25.6782
39.0	24.7272
42.0	23.7761
45.0	22.8251
48.0	20.9230
51.0	19.9720
54.0	17.1188
57.0	14.2657
60.0	12.3636
63.0	8.5594
66.0	6.6573
69.0	5.7063



## Battuta 7

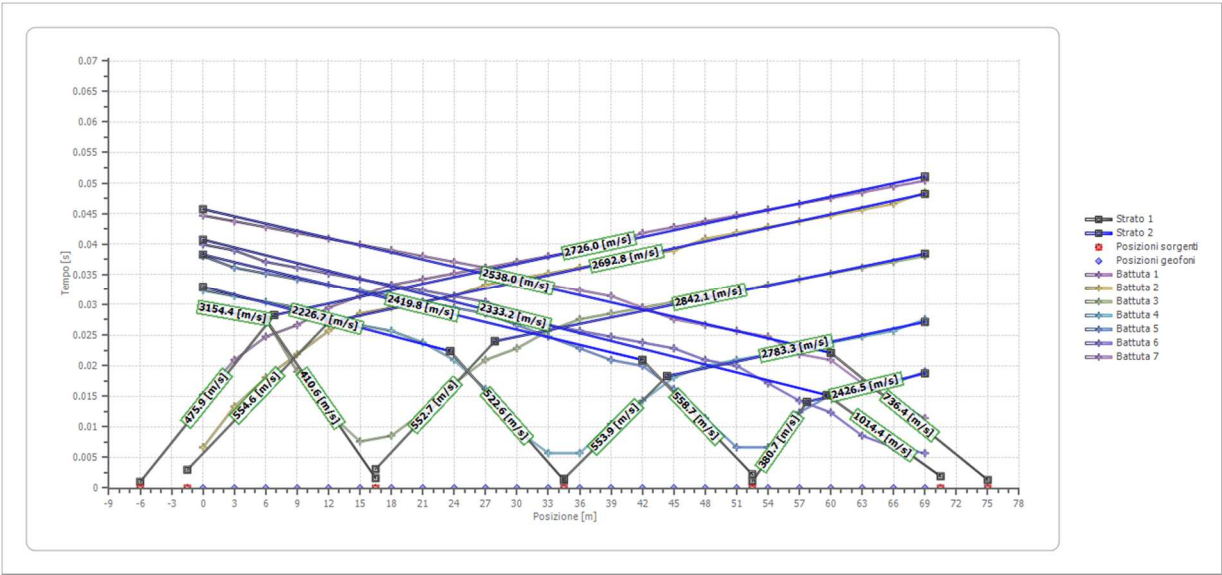
Posizione sorgente X 75 [m]

Posizione sorgente Z -19 [m]

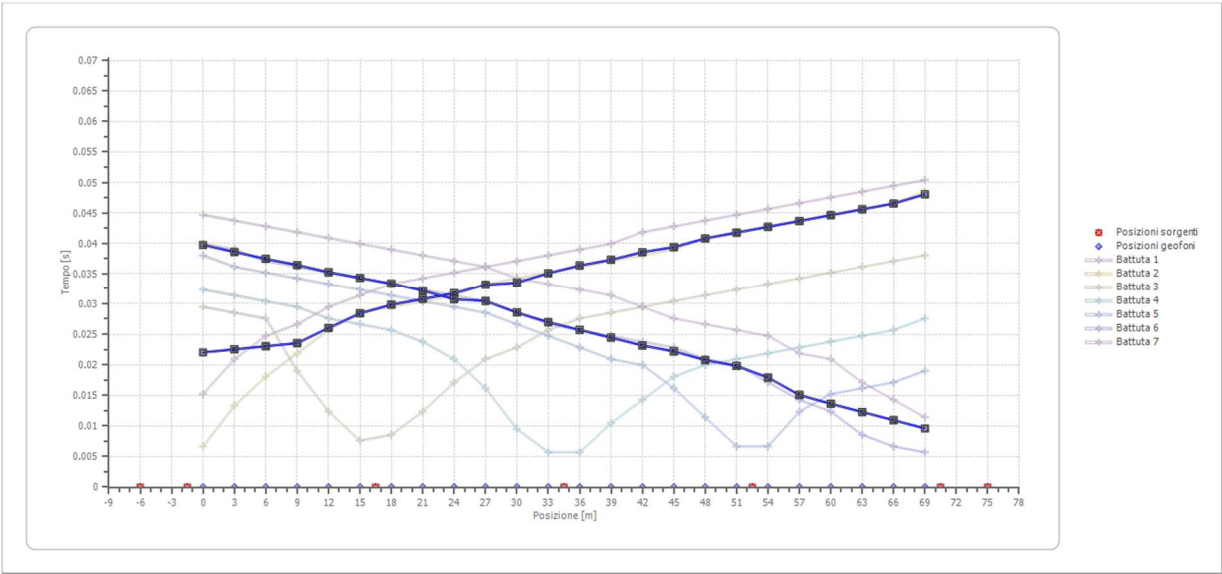


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	44.6991
3.0	43.7481
6.0	42.7971
9.0	41.8460
12.0	40.8950
15.0	39.9439
18.0	38.9929
21.0	38.0418
24.0	37.0908
27.0	36.1397
30.0	34.2376
33.0	33.2866
36.0	32.3356
39.0	31.3845
42.0	29.4824
45.0	27.5803
48.0	26.6293
51.0	25.6782
54.0	24.7272
57.0	21.8741
60.0	20.9230
63.0	17.1188
66.0	14.2657
69.0	11.4125

# Dromocrone



# Dromocrone traslate

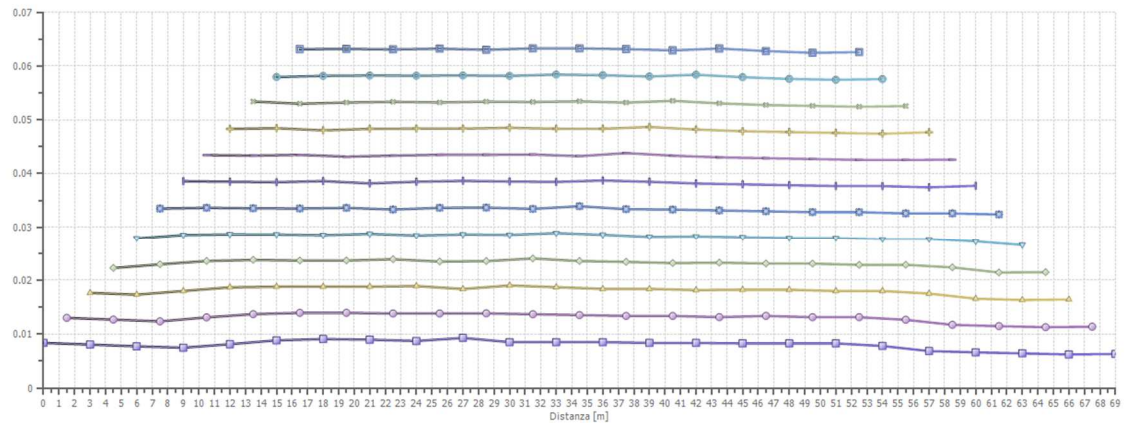
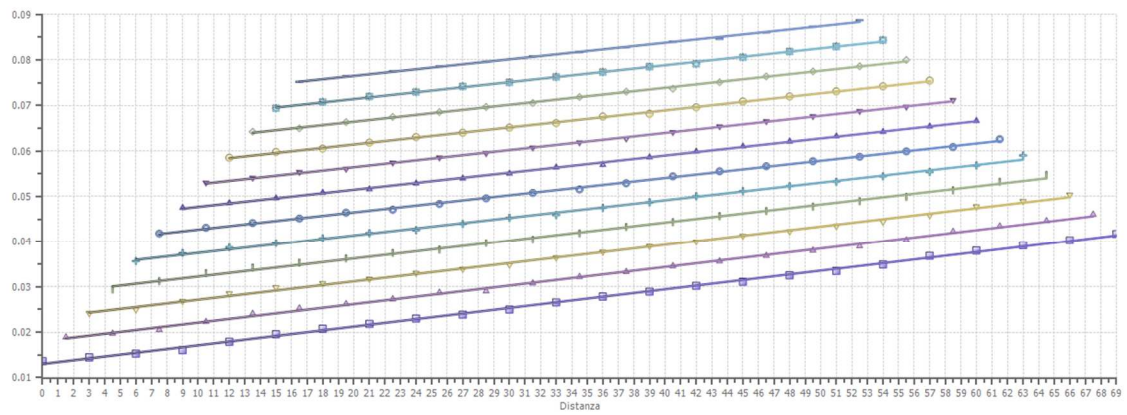


---

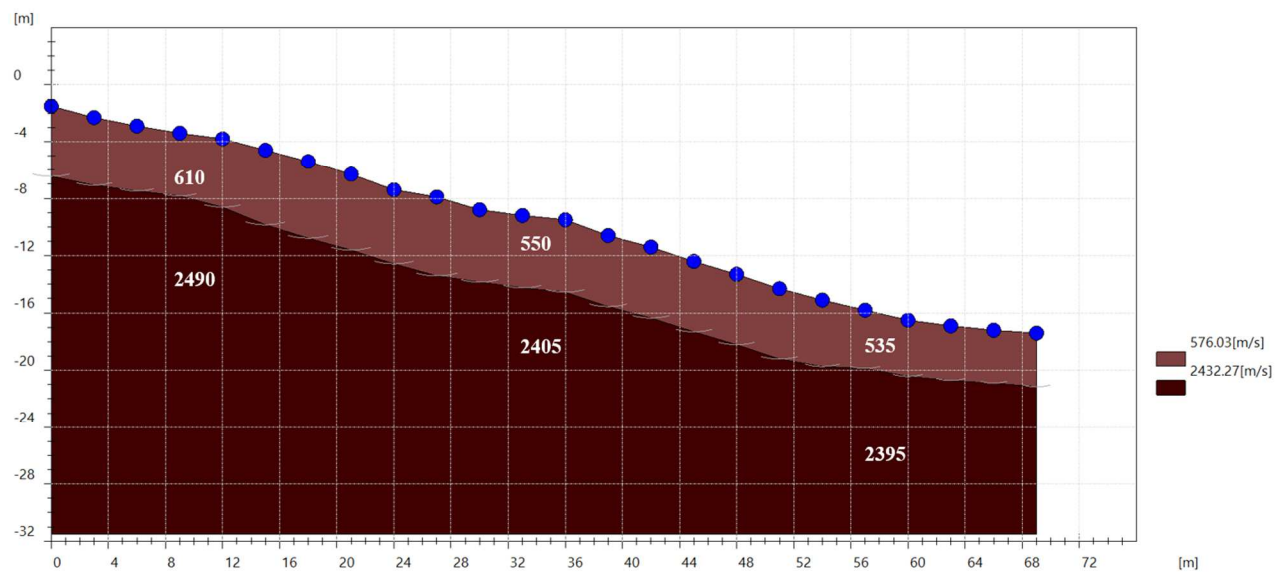
**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	5.0	--
G= 3.0 [m]	4.8	--
G= 6.0 [m]	4.6	--
G= 9.0 [m]	4.4	--
G= 12.0 [m]	4.8	--
G= 15.0 [m]	5.2	--
G= 18.0 [m]	5.4	--
G= 21.0 [m]	5.3	--
G= 24.0 [m]	5.2	--
G= 27.0 [m]	5.5	--
G= 30.0 [m]	5.0	--
G= 33.0 [m]	5.0	--
G= 36.0 [m]	5.0	--
G= 39.0 [m]	5.0	--
G= 42.0 [m]	5.0	--
G= 45.0 [m]	4.9	--
G= 48.0 [m]	4.9	--
G= 51.0 [m]	4.9	--
G= 54.0 [m]	4.6	--
G= 57.0 [m]	4.1	--
G= 60.0 [m]	3.9	--
G= 63.0 [m]	3.8	--
G= 66.0 [m]	3.7	--
G= 69.0 [m]	3.7	--
Velocità [m/sec]	576.0	2432.3
Descrizione		



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

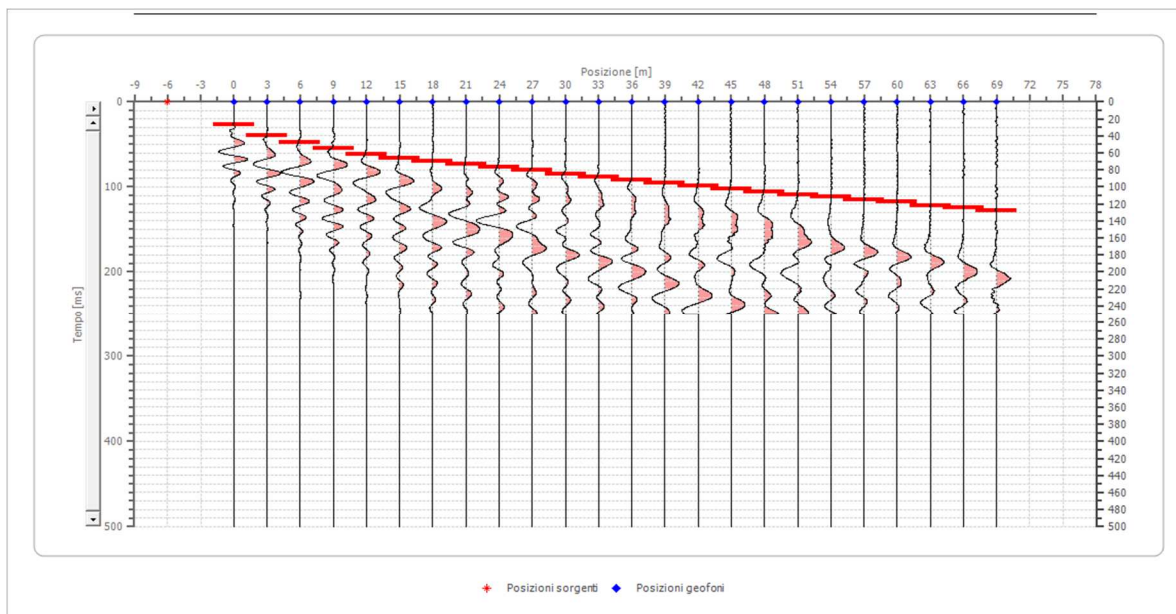


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



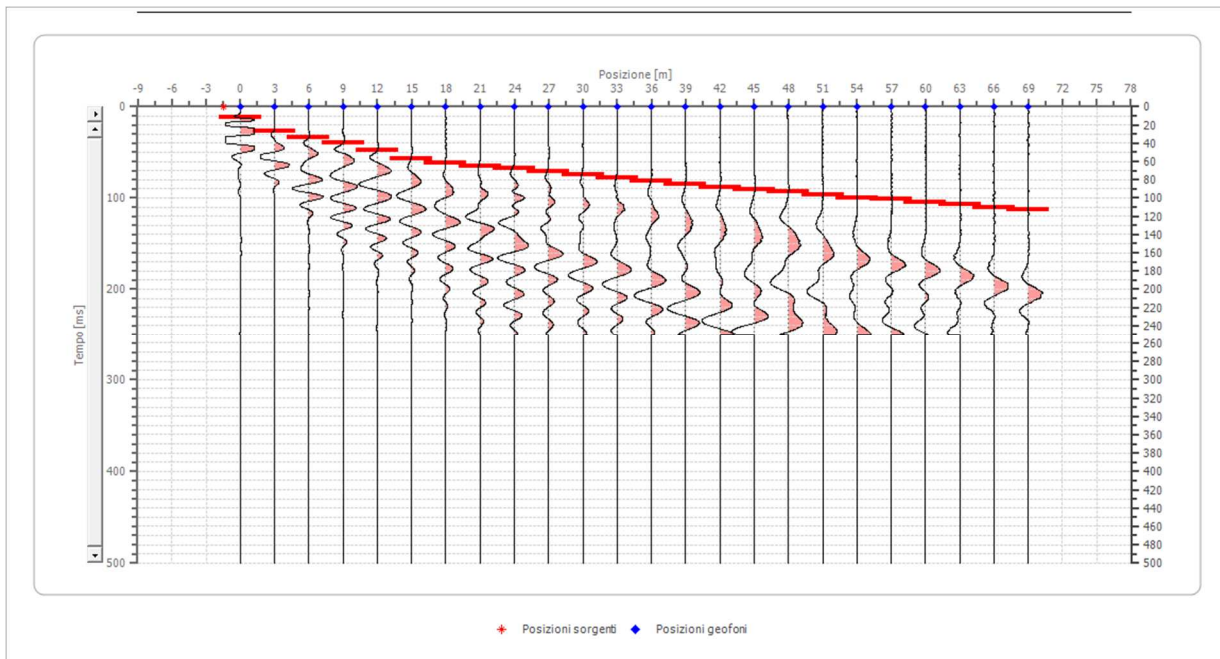
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	26.6293
3.0	39.9439
6.0	47.5523
9.0	55.1607
12.0	61.8180
15.0	66.5732
18.0	70.3774
21.0	73.2305
24.0	77.0347
27.0	80.8389
30.0	84.6431
33.0	88.4473
36.0	92.2514
39.0	95.1046
42.0	98.9088
45.0	102.7129
48.0	105.5661
51.0	109.3703
54.0	112.2234
57.0	115.0765
60.0	117.9297
63.0	121.7339
66.0	124.5870
69.0	127.4401



## Battuta 2

Posizione sorgente X -1.5 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

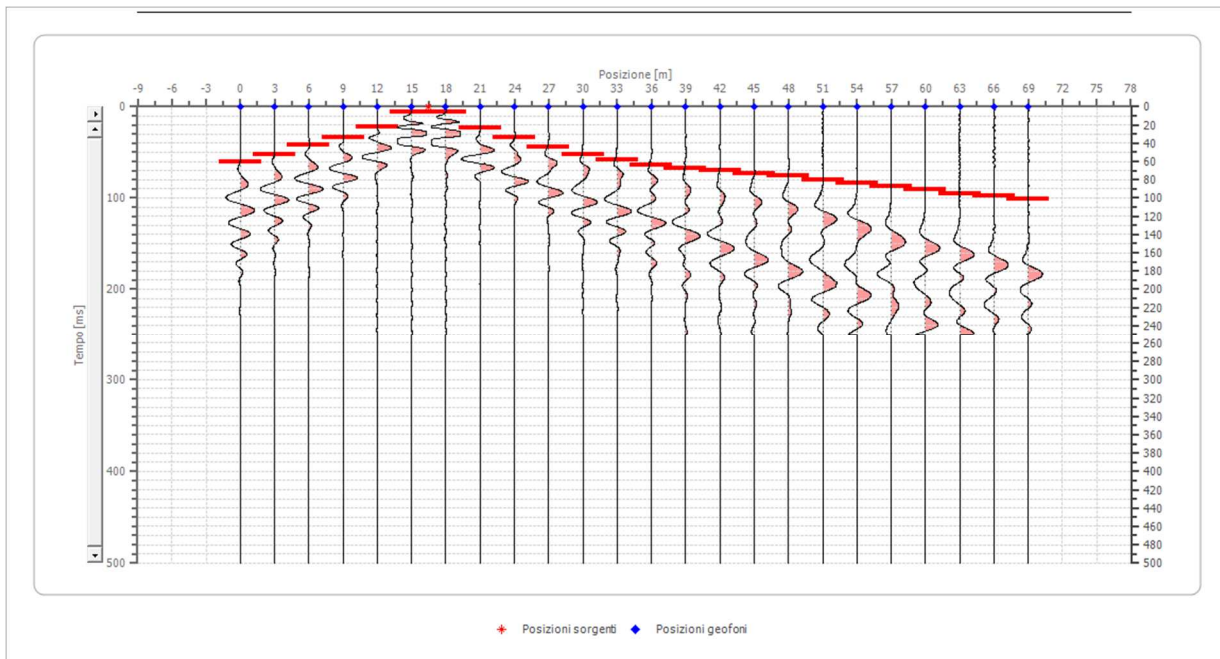


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	11.4125
3.0	26.6293
6.0	34.2376
9.0	39.9439
12.0	47.5523
15.0	57.0627
18.0	61.8180
21.0	64.6711
24.0	67.5242
27.0	71.3284
30.0	74.1816
33.0	77.9857
36.0	81.7899
39.0	84.6431
42.0	88.4473
45.0	91.3004
48.0	93.2025
51.0	97.0067
54.0	99.8598
57.0	101.7619
60.0	104.6150
63.0	107.4682
66.0	110.3213
69.0	113.1744

### Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]

Posizione sorgente Z -5 [m]



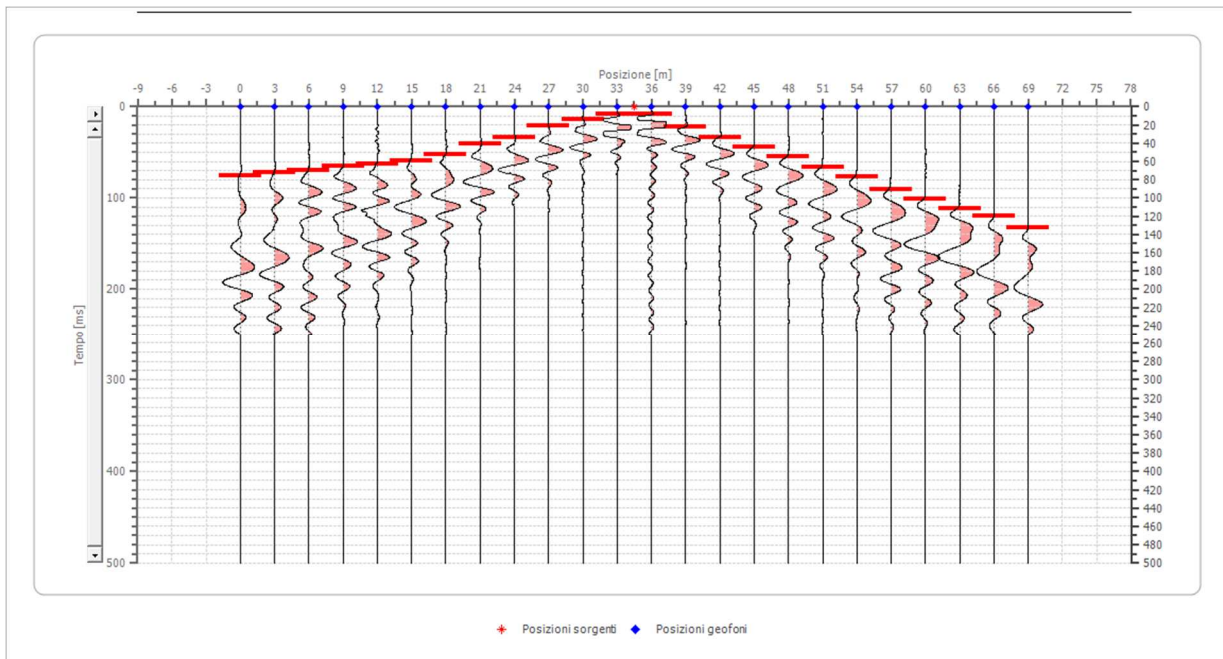
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	60.8669
3.0	52.3075
6.0	41.8460
9.0	33.2866
12.0	21.8741
15.0	5.7063
18.0	5.7063
21.0	22.8251
24.0	34.2376
27.0	44.6991
30.0	52.3075
33.0	58.0138
36.0	63.7201
39.0	67.5242
42.0	70.3774
45.0	73.2305
48.0	76.0837
51.0	79.8878
54.0	83.6920
57.0	87.4962
60.0	91.3004
63.0	95.1046
66.0	97.9577
69.0	100.8108



#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]

Posizione sorgente Z -9 [m]

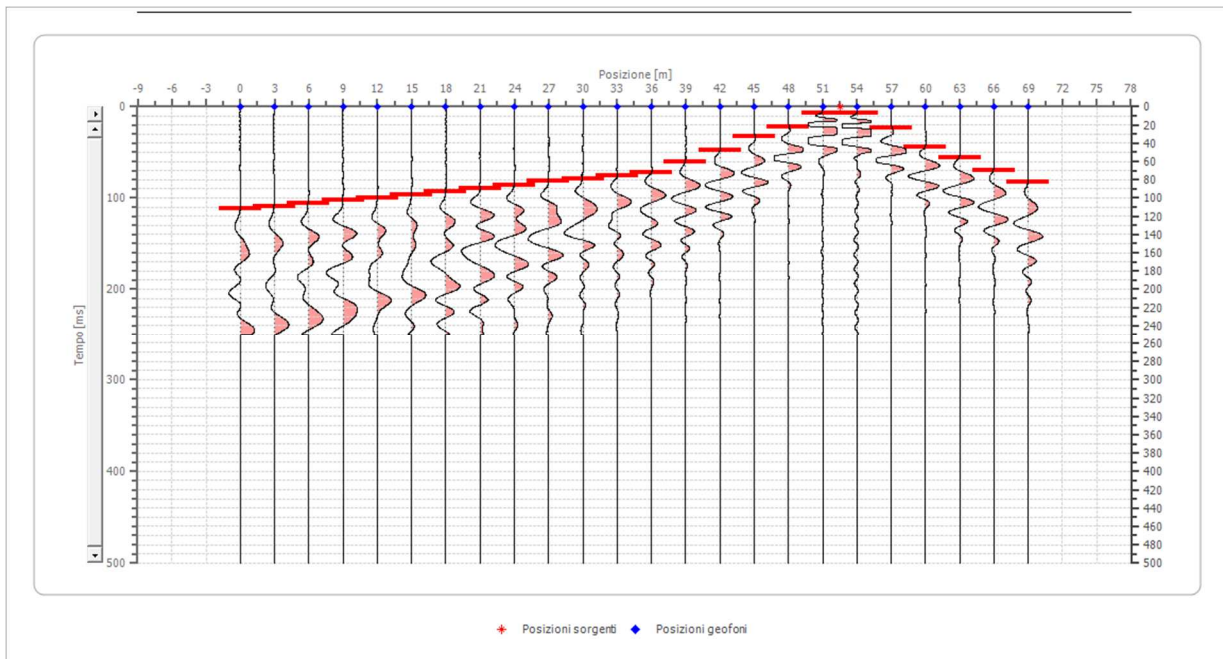


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	75.1326
3.0	72.2795
6.0	69.4263
9.0	65.6222
12.0	62.7690
15.0	58.9648
18.0	52.3075
21.0	40.8950
24.0	33.2866
27.0	20.9230
30.0	14.2657
33.0	7.6084
36.0	8.5594
39.0	21.8741
42.0	34.2376
45.0	43.7481
48.0	54.2096
51.0	66.5732
54.0	77.0347
57.0	90.3493
60.0	100.8108
63.0	111.2723
66.0	119.8318
69.0	133.1464

## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z -15 [m]

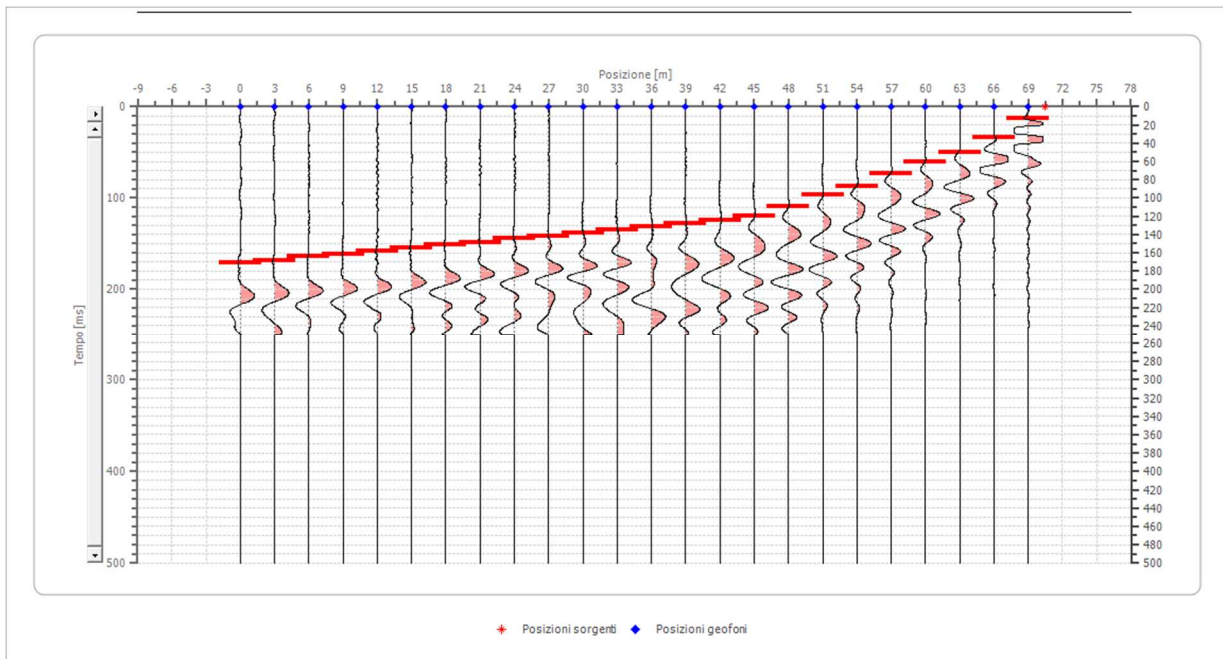


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	112.2234
3.0	109.3703
6.0	105.5661
9.0	102.7129
12.0	99.8598
15.0	96.0556
18.0	93.2025
21.0	89.3983
24.0	85.5941
27.0	81.7899
30.0	78.9368
33.0	75.1326
36.0	72.2795
39.0	60.8669
42.0	47.5523
45.0	32.3356
48.0	21.8741
51.0	6.6573
54.0	6.6573
57.0	23.7761
60.0	43.7481
63.0	56.1117
66.0	70.3774
69.0	82.7410

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

Posizione sorgente Z -18 [m]

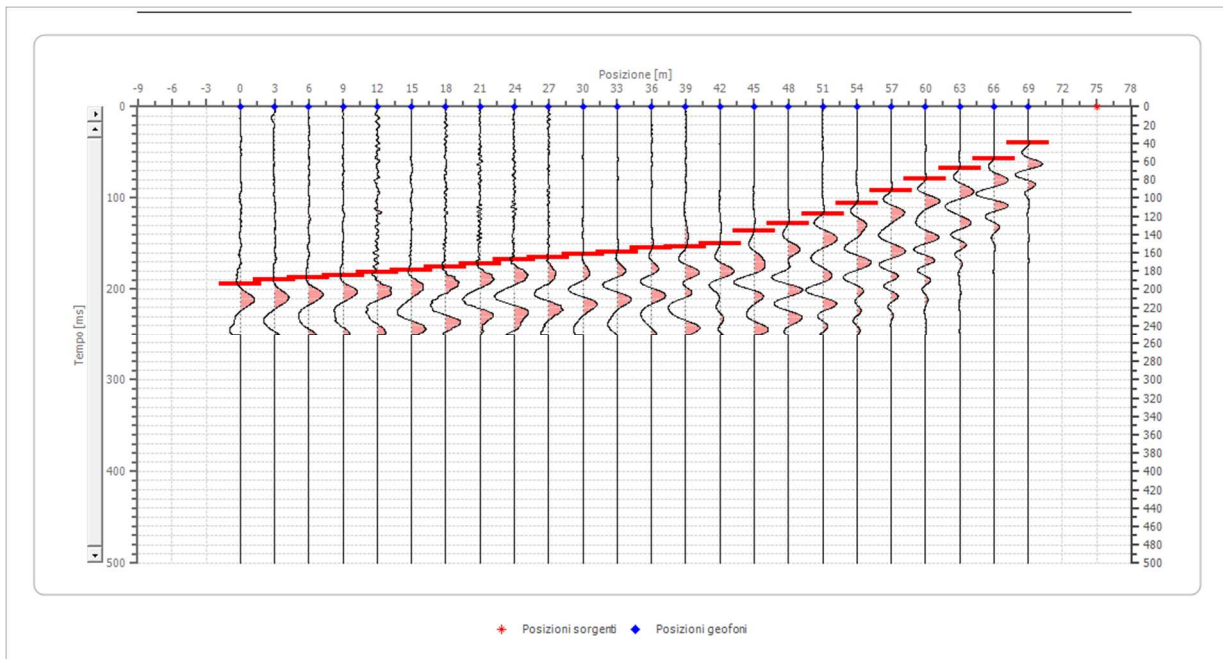


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	171.1882
3.0	168.3351
6.0	164.5309
9.0	161.6778
12.0	157.8736
15.0	155.0205
18.0	151.2163
21.0	148.3631
24.0	144.5589
27.0	141.7058
30.0	137.9016
33.0	135.0485
36.0	131.2443
39.0	128.3912
42.0	124.5870
45.0	119.8318
48.0	109.3703
51.0	96.0556
54.0	87.4962
57.0	73.2305
60.0	60.8669
63.0	50.4054
66.0	33.2866
69.0	13.3146

## Battuta 7

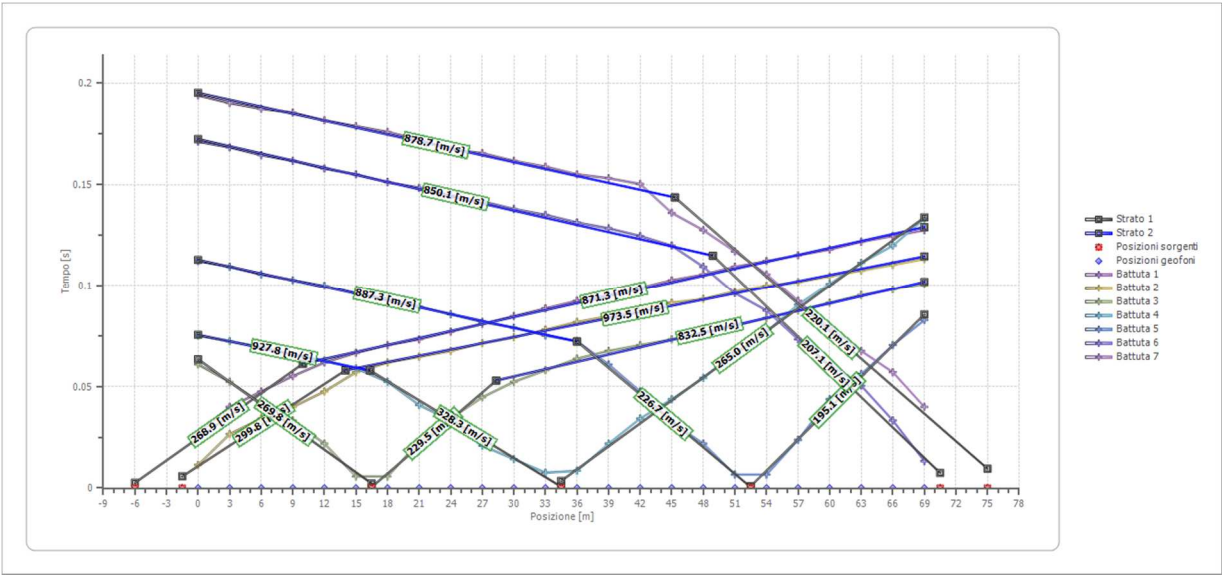
Posizione sorgente X 75 [m]

Posizione sorgente Z -19 [m]

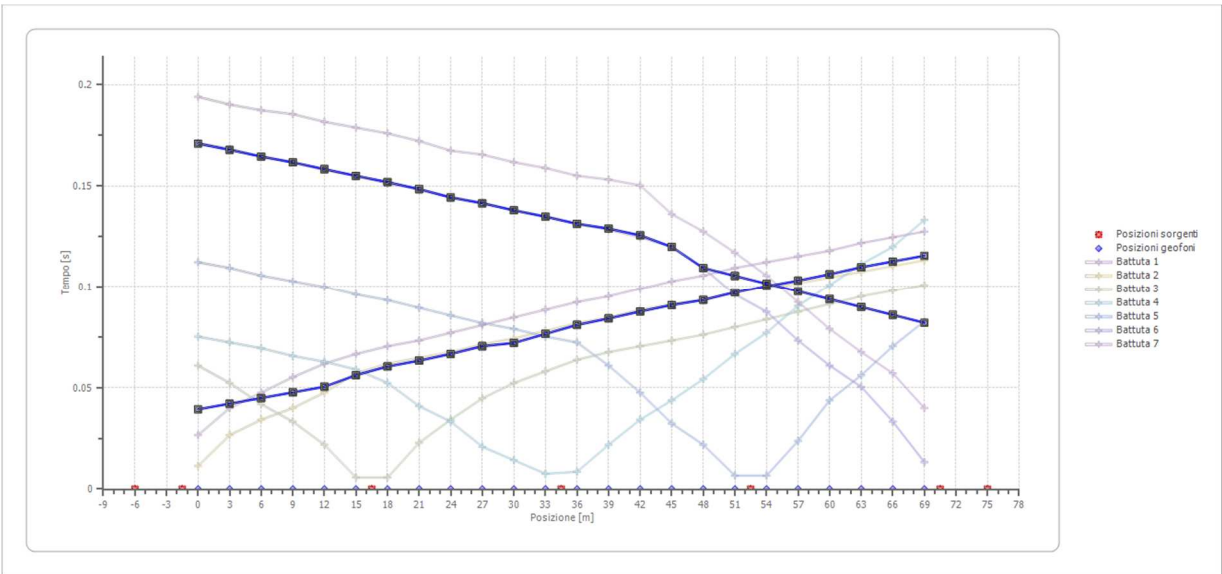


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	194.0133
3.0	190.2091
6.0	187.3560
9.0	185.4539
12.0	181.6497
15.0	178.7966
18.0	175.9435
21.0	172.1393
24.0	167.3840
27.0	165.4820
30.0	161.6778
33.0	158.8246
36.0	155.0205
39.0	153.1184
42.0	150.2652
45.0	135.9995
48.0	127.4401
51.0	116.9786
54.0	105.5661
57.0	92.2514
60.0	78.9368
63.0	67.5242
66.0	57.0627
69.0	39.9439

# Dromocrone



# Dromocrone traslate



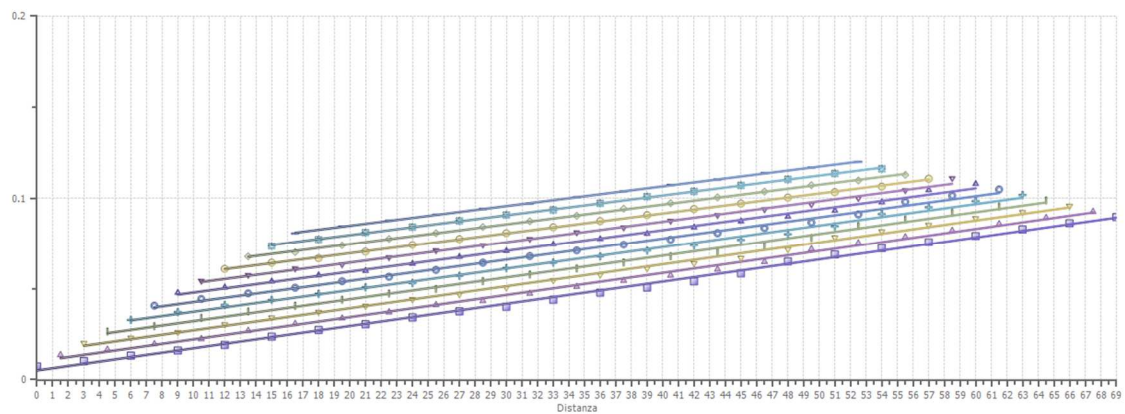
---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

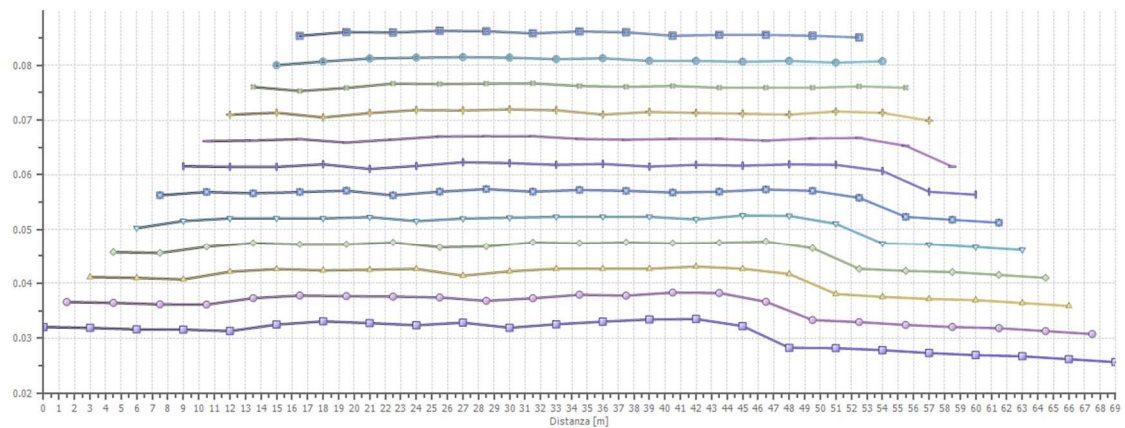
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	8.4	--
G= 3.0 [m]	8.4	--
G= 6.0 [m]	8.3	--
G= 9.0 [m]	8.3	--
G= 12.0 [m]	8.3	--
G= 15.0 [m]	8.6	--
G= 18.0 [m]	8.7	--
G= 21.0 [m]	8.6	--
G= 24.0 [m]	8.5	--
G= 27.0 [m]	8.7	--
G= 30.0 [m]	8.4	--
G= 33.0 [m]	8.6	--
G= 36.0 [m]	8.7	--
G= 39.0 [m]	8.8	--
G= 42.0 [m]	8.8	--
G= 45.0 [m]	8.5	--
G= 48.0 [m]	7.4	--
G= 51.0 [m]	7.4	--
G= 54.0 [m]	7.3	--
G= 57.0 [m]	7.2	--
G= 60.0 [m]	7.1	--
G= 63.0 [m]	7.0	--
G= 66.0 [m]	6.9	--
G= 69.0 [m]	6.8	--
Velocità [m/sec]	251.0	817.7
Descrizione		





XY = 0, Deviazione standard = 0.0254  
 XY = 3, Deviazione standard = 0.02427  
 XY = 6, Deviazione standard = 0.0231  
 XY = 9, Deviazione standard = 0.02188  
 XY = 12, Deviazione standard = 0.0206  
 XY = 15, Deviazione standard = 0.01925  
 XY = 18, Deviazione standard = 0.01795  
 XY = 21, Deviazione standard = 0.01664  
 XY = 24, Deviazione standard = 0.01524  
 XY = 27, Deviazione standard = 0.01416  
 XY = 30, Deviazione standard = 0.01324  
 XY = 33, Deviazione standard = 0.01221



XY = 0, Rugosità = 0.002348  
 XY = 3, Rugosità = 0.00219  
 XY = 6, Rugosità = 0.002039  
 XY = 9, Rugosità = 0.001893  
 XY = 12, Rugosità = 0.001691  
 XY = 15, Rugosità = 0.001369  
 XY = 18, Rugosità = 0.001045  
 XY = 21, Rugosità = 0.000689  
 XY = 24, Rugosità = 0.00038  
 XY = 27, Rugosità = 0.000294  
 XY = 30, Rugosità = 0.000341  
 XY = 33, Rugosità = 0.000345

## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

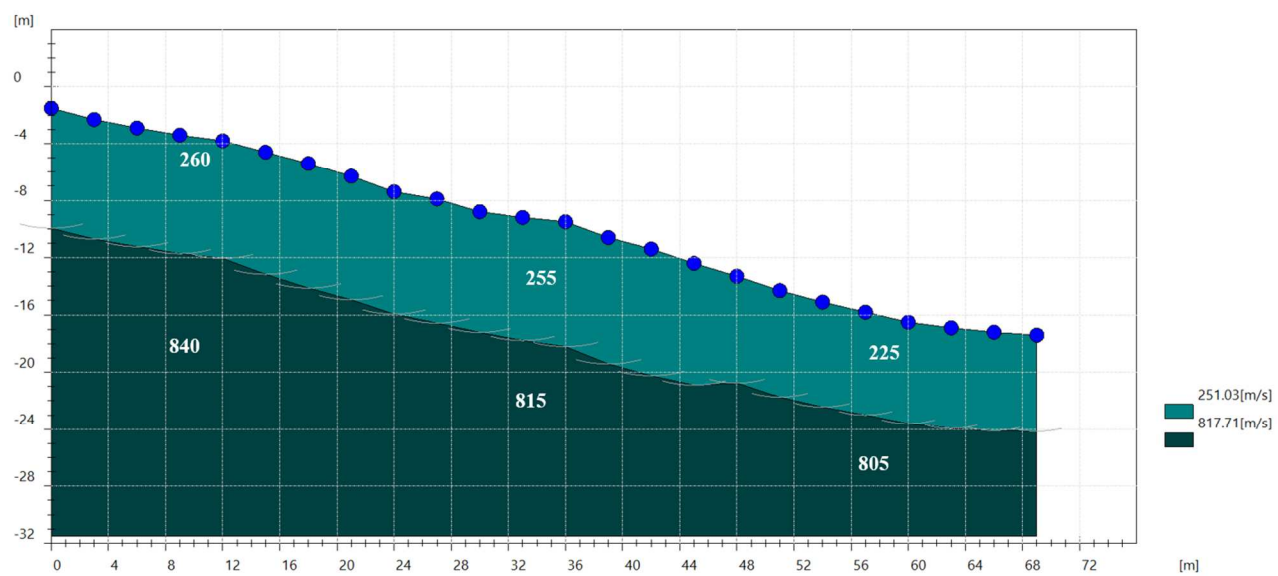






Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_2

**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  $\theta_i$  mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione  $\theta_r$ . 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

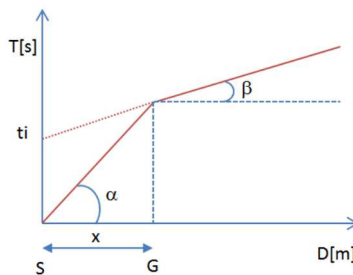
$$T = x_i / V_1$$

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

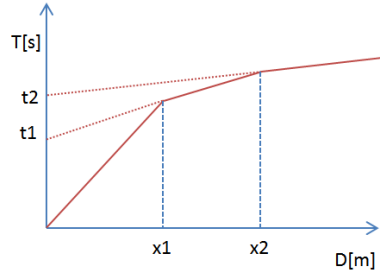
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

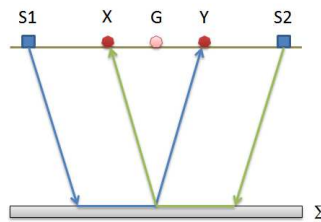


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

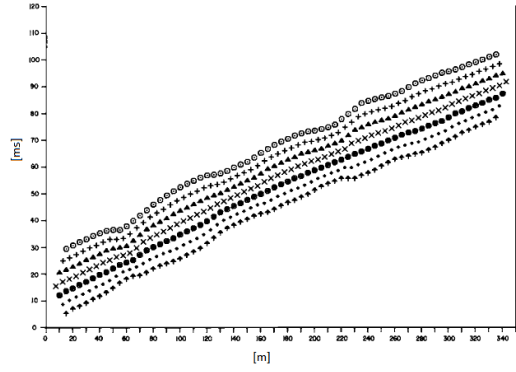
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



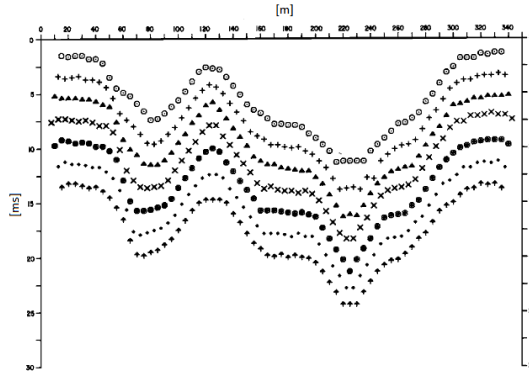
dove  $T_{S_1Y}$  e  $T_{S_2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S_1S_2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è 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:

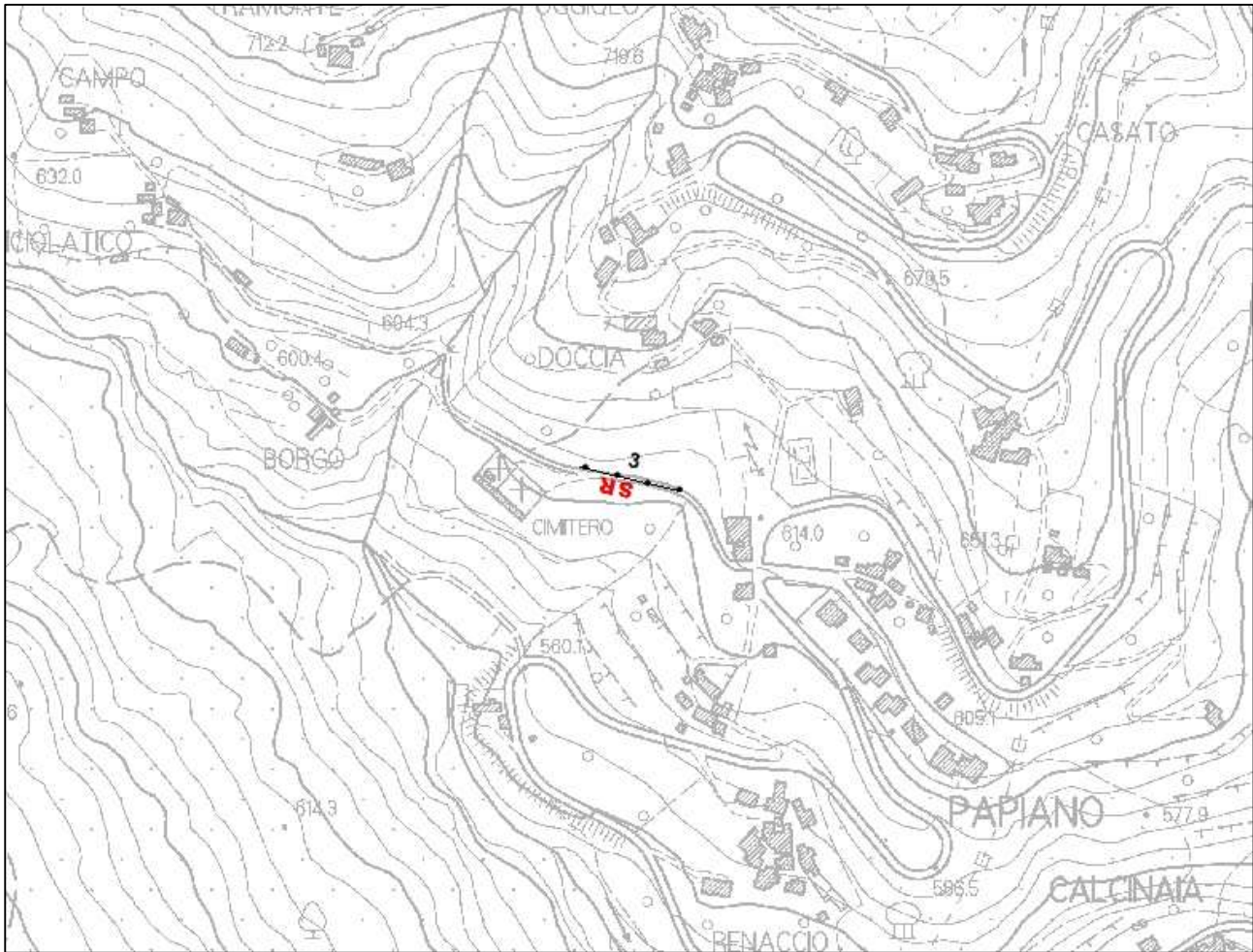
$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

---

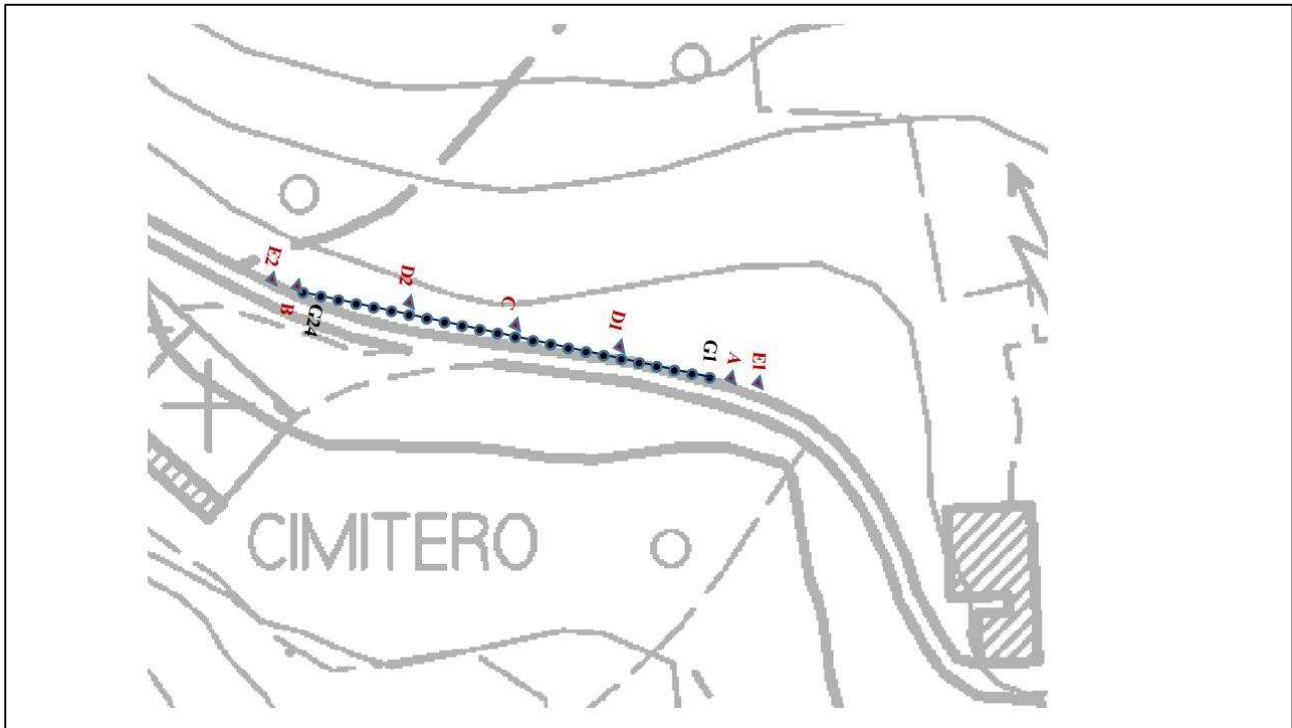
$h$  rappresenta la profondità minima dal geofono  $G$  dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio  $h$ .

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

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.): 90

## Punti di energizzazione

	<b>E1 Esterno SX</b>	<b>A Estremo SX</b>	<b>D1 Intermedio SX</b>	<b>C Centrale</b>	<b>D2 Intermedio DX</b>	<b>B Estremo DX</b>	<b>E2 Esterno DX</b>
<b>Posizione da Geofono G1 (m)</b>	-6	-1.5	16.5	34.5	52.5	70.5	75

## Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	3.0	0.0
3	6.0	0.0
4	9.0	0.0
5	12.0	0.0
6	15.0	0.0
7	18.0	0.0
8	21.0	0.0
9	24.0	0.0
10	27.0	0.0
11	30.0	0.0
12	33.0	0.0
13	36.0	0.0
14	39.0	0.0
15	42.0	0.0
16	45.0	0.0
17	48.0	0.0
18	51.0	0.0
19	54.0	0.0
20	57.0	0.0
21	60.0	0.0
22	63.0	0.0
23	66.0	0.0
24	69.0	0.0

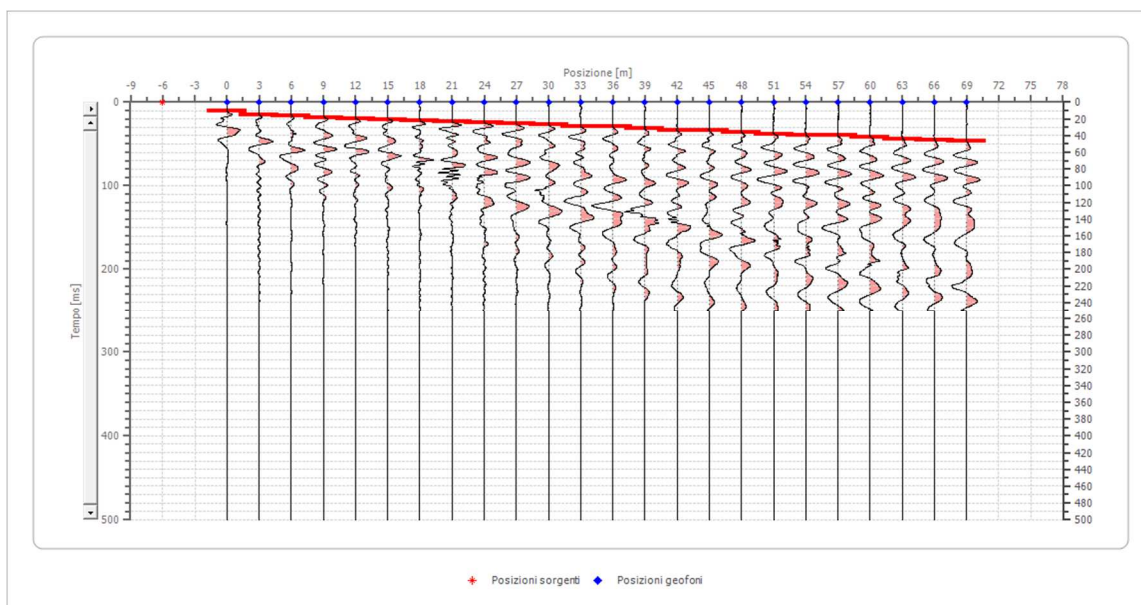


## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

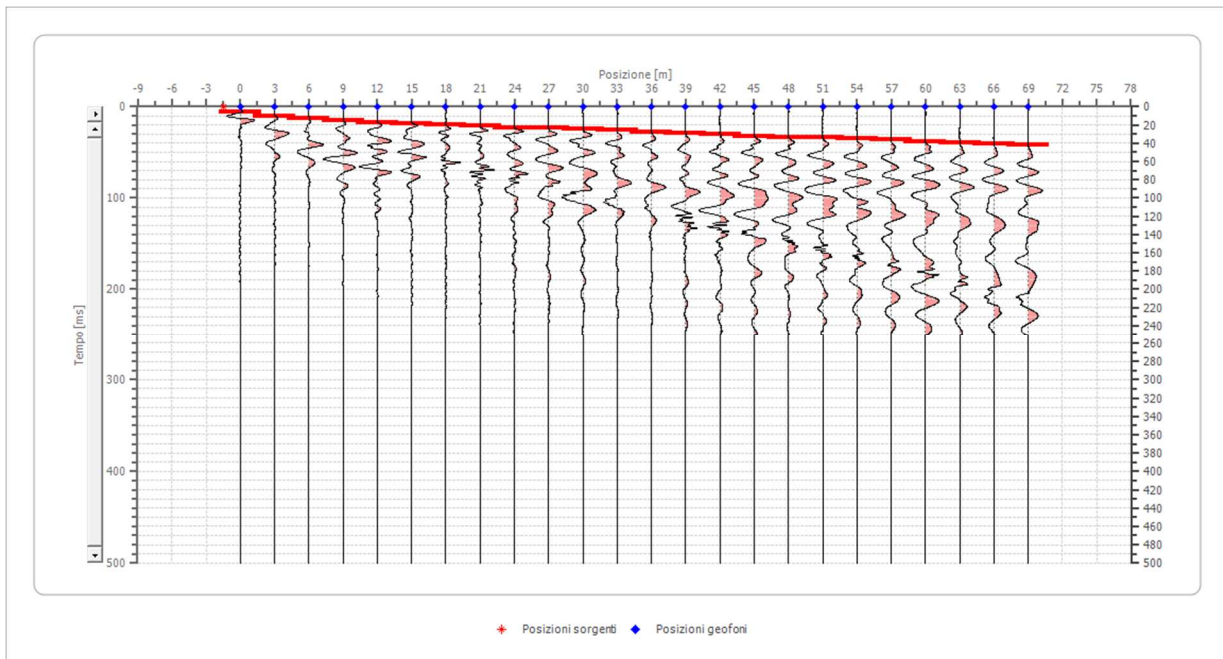


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	10.4615
3.0	15.2167
6.0	16.1678
9.0	18.0699
12.0	19.9720
15.0	20.9230
18.0	21.8741
21.0	22.8251
24.0	24.7272
27.0	25.6782
30.0	26.6293
33.0	28.5314
36.0	29.4824
39.0	31.3845
42.0	33.2866
45.0	34.2376
48.0	36.1397
51.0	38.0418
54.0	38.9929
57.0	39.9439
60.0	41.8460
63.0	43.7481
66.0	45.6502
69.0	46.6012

## Battuta 2

Posizione sorgente X -1.5 [m]

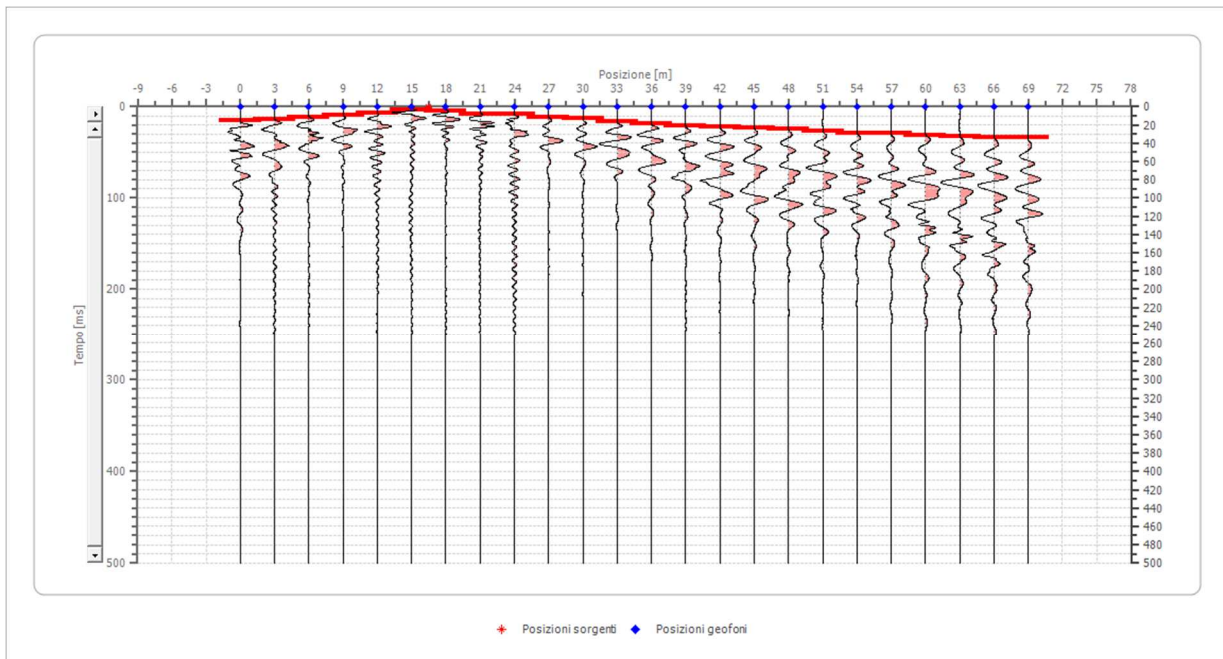
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	5.7063
3.0	10.4615
6.0	13.3146
9.0	15.2167
12.0	17.1188
15.0	18.0699
18.0	19.9720
21.0	20.9230
24.0	22.8251
27.0	23.7761
30.0	24.7272
33.0	25.6782
36.0	27.5803
39.0	29.4824
42.0	30.4335
45.0	32.3356
48.0	33.2866
51.0	34.2376
54.0	35.1887
57.0	36.1397
60.0	38.0418
63.0	39.9439
66.0	40.8950
69.0	41.8460

### Battuta 3

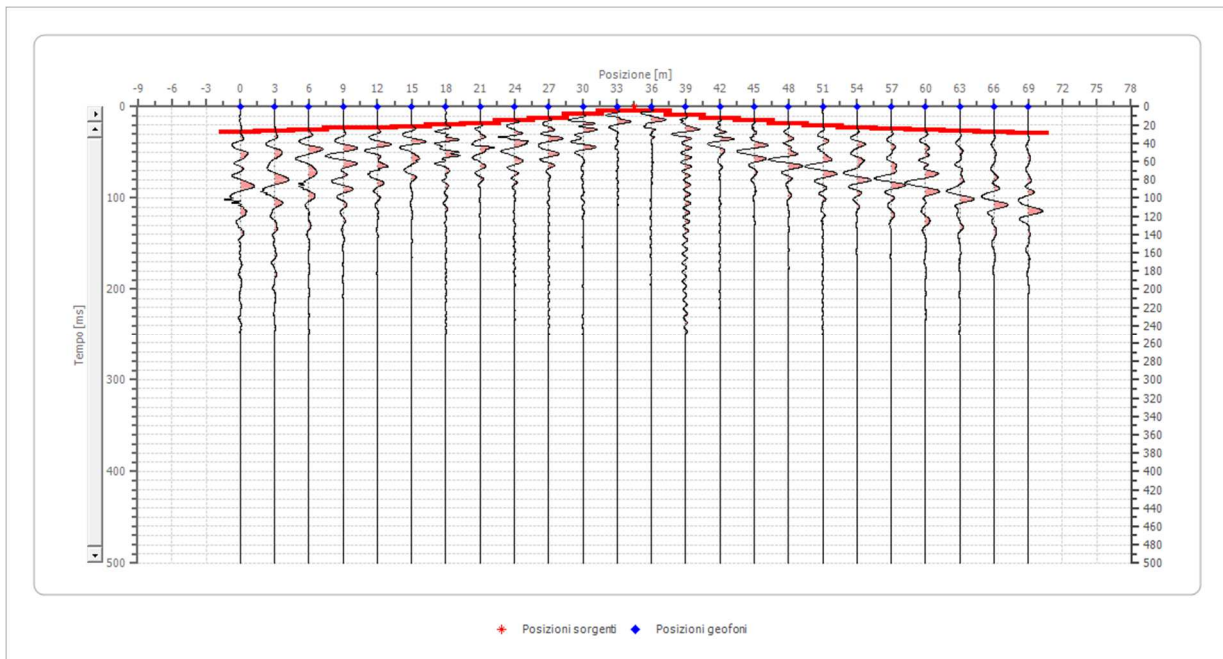
Posizione sorgente X 16.5 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	15.2167
3.0	14.2657
6.0	11.4125
9.0	9.5105
12.0	6.6573
15.0	3.8042
18.0	4.7552
21.0	7.6084
24.0	8.5594
27.0	11.4125
30.0	13.3146
33.0	16.1678
36.0	19.0209
39.0	20.9230
42.0	21.8741
45.0	22.8251
48.0	24.7272
51.0	26.6293
54.0	28.5314
57.0	29.4824
60.0	31.3845
63.0	32.3356
66.0	33.2866
69.0	34.2376

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]

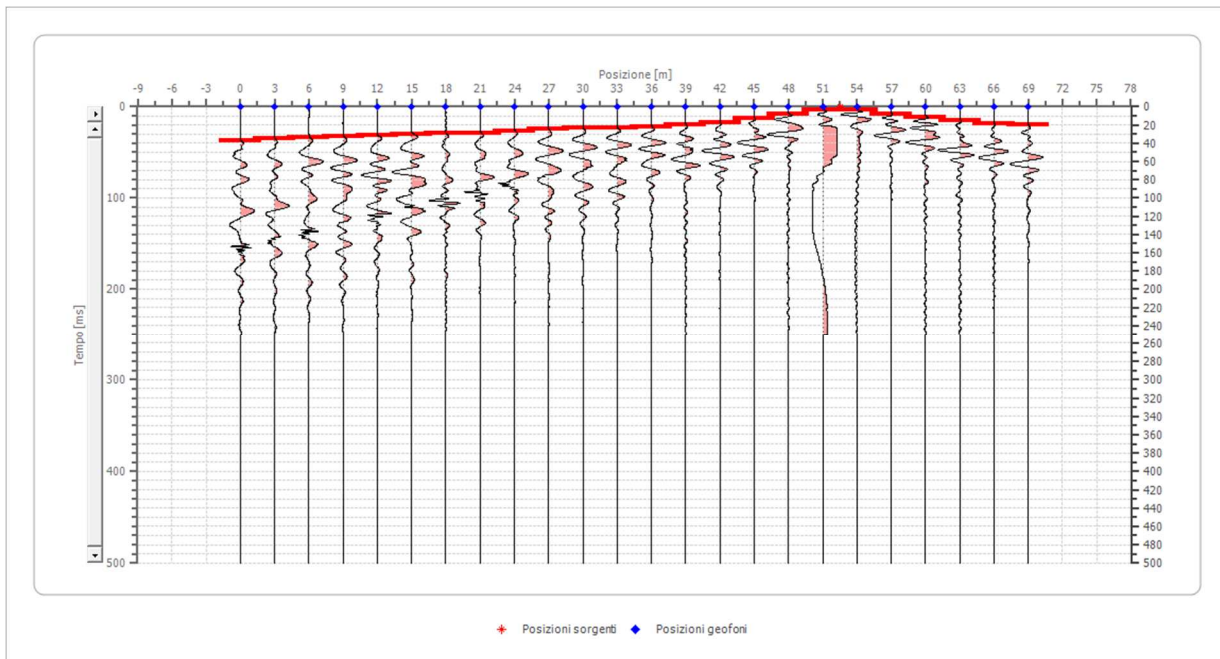


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	27.5803
3.0	26.6293
6.0	25.6782
9.0	23.7761
12.0	22.8251
15.0	21.8741
18.0	19.9720
21.0	18.0699
24.0	15.2167
27.0	13.3146
30.0	8.5594
33.0	4.7552
36.0	4.7552
39.0	9.5105
42.0	13.3146
45.0	15.2167
48.0	19.0209
51.0	20.9230
54.0	22.8251
57.0	24.7272
60.0	25.6782
63.0	26.6293
66.0	27.5803
69.0	29.4824

## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

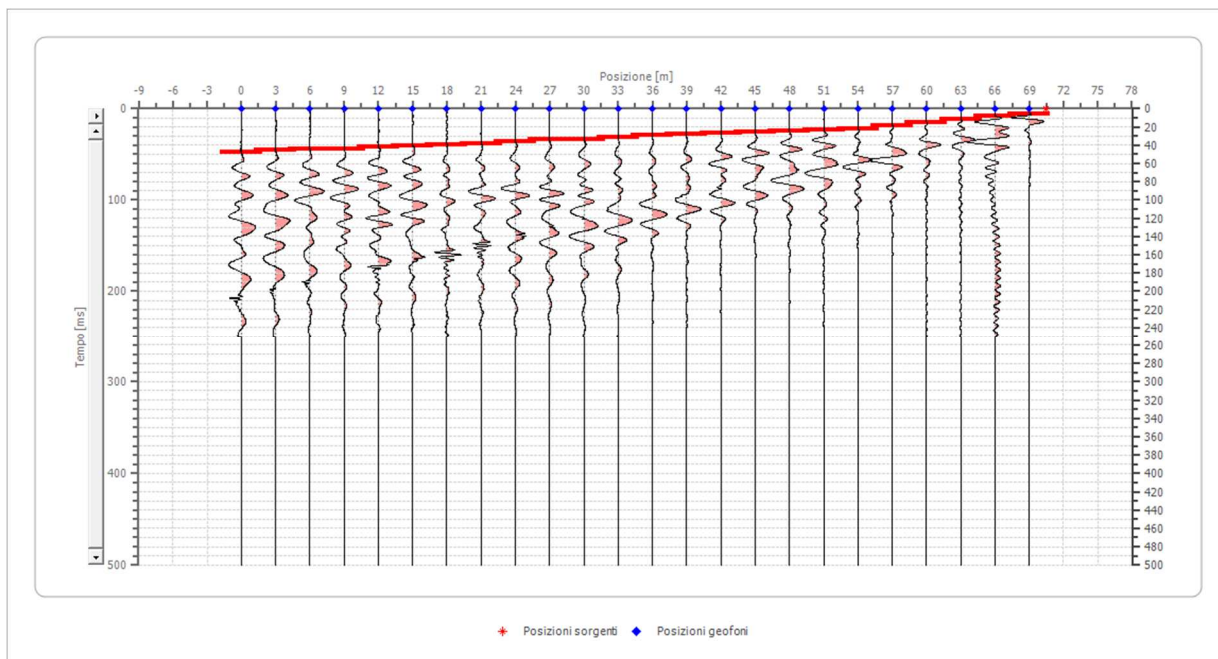


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	37.0908
3.0	35.1887
6.0	34.2376
9.0	32.3356
12.0	31.3845
15.0	30.4335
18.0	29.4824
21.0	28.5314
24.0	26.6293
27.0	24.7272
30.0	23.7761
33.0	22.8251
36.0	21.8741
39.0	19.9720
42.0	17.1188
45.0	12.3636
48.0	7.6084
51.0	3.8042
54.0	3.8042
57.0	7.6084
60.0	11.4125
63.0	15.2167
66.0	18.0699
69.0	19.9720

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

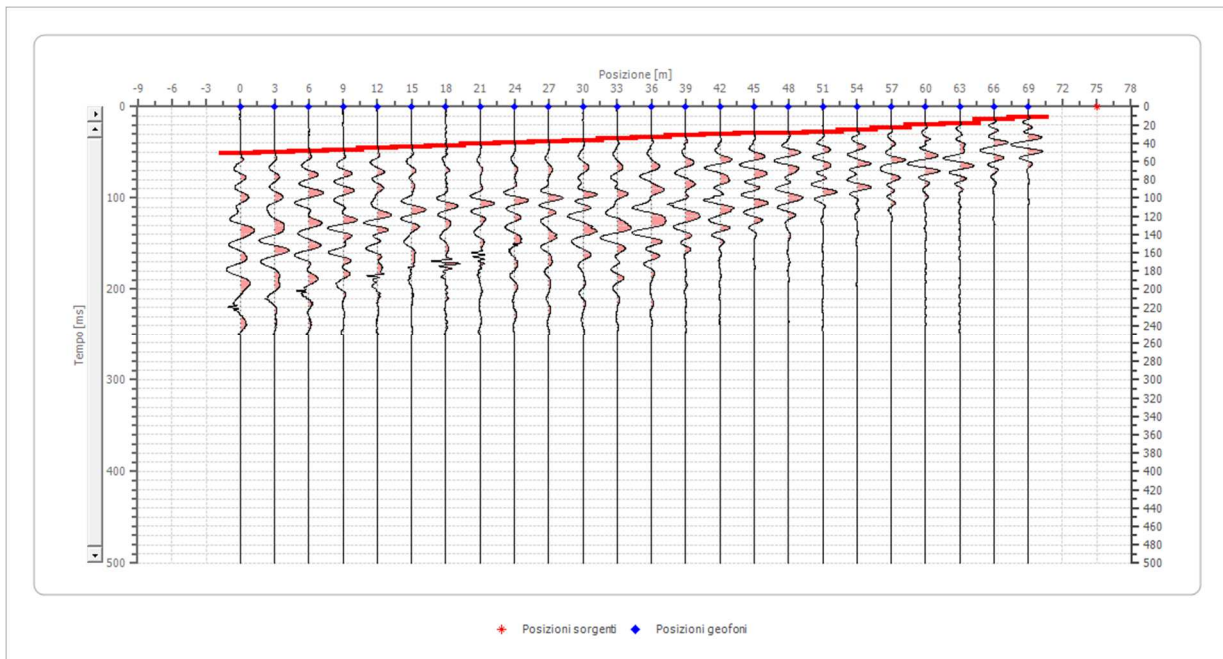


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	47.5523
3.0	45.6502
6.0	44.6991
9.0	43.7481
12.0	41.8460
15.0	40.8950
18.0	39.9439
21.0	38.0418
24.0	36.1397
27.0	34.2376
30.0	33.2866
33.0	31.3845
36.0	29.4824
39.0	27.5803
42.0	26.6293
45.0	25.6782
48.0	24.7272
51.0	23.7761
54.0	21.8741
57.0	19.0209
60.0	15.2167
63.0	11.4125
66.0	7.6084
69.0	5.7063



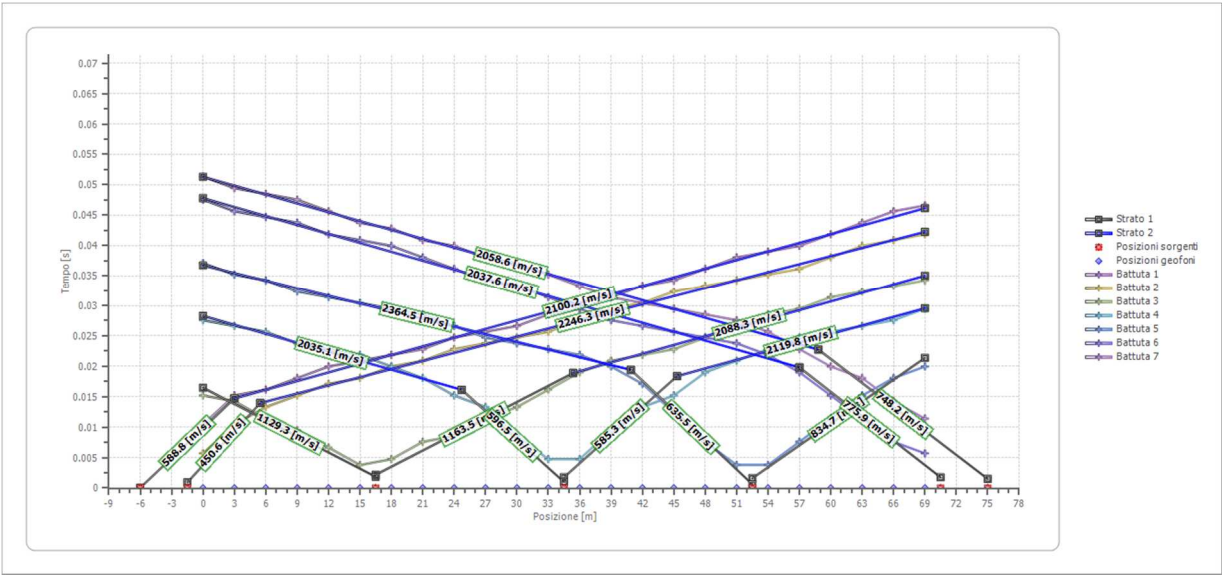
## Battuta 7

Posizione sorgente X 75 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]

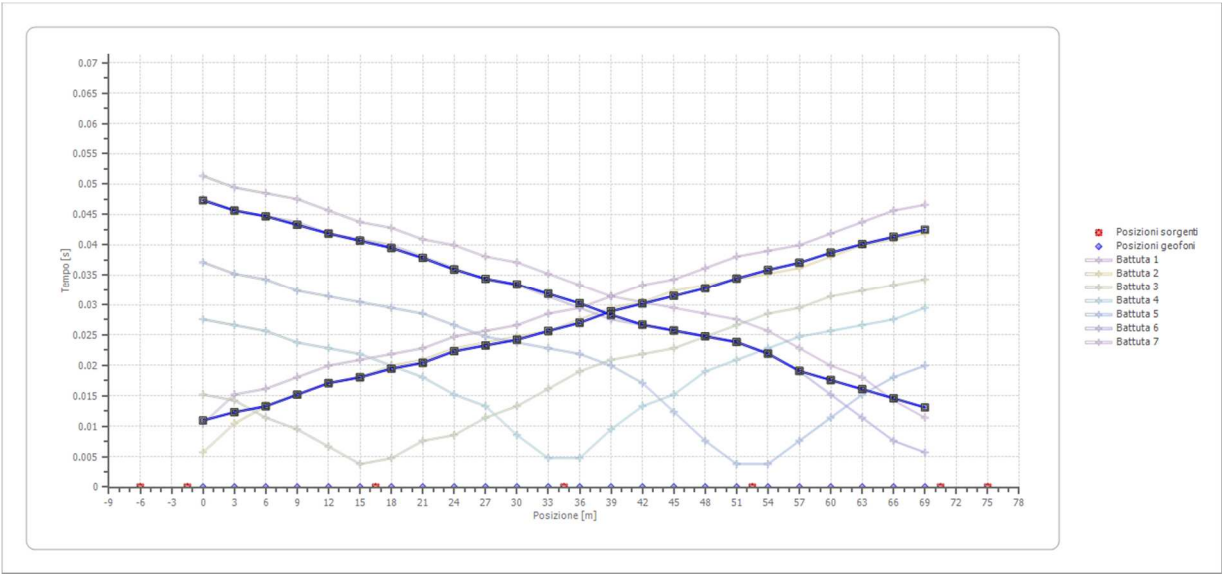


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	51.3565
3.0	49.4544
6.0	48.5033
9.0	47.5523
12.0	45.6502
15.0	43.7481
18.0	42.7971
21.0	40.8950
24.0	39.9439
27.0	38.0418
30.0	37.0908
33.0	35.1887
36.0	33.2866
39.0	31.3845
42.0	30.4335
45.0	29.4824
48.0	28.5314
51.0	27.5803
54.0	25.6782
57.0	22.8251
60.0	19.9720
63.0	18.0699
66.0	14.2657
69.0	11.4125

# Dromocrone



# Dromocrone traslate



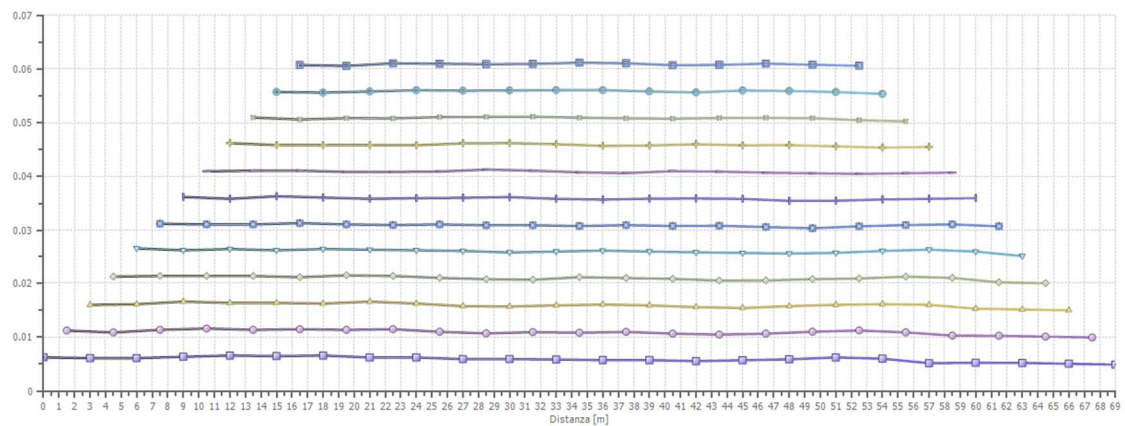
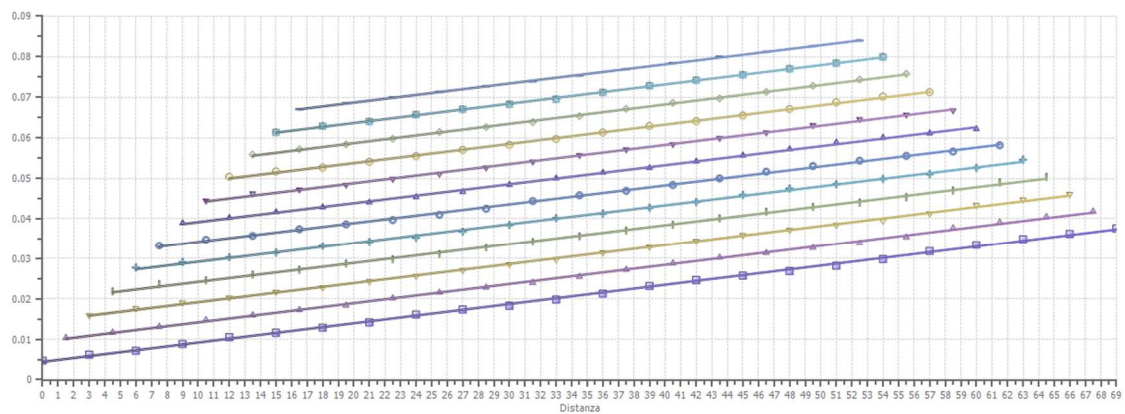


---

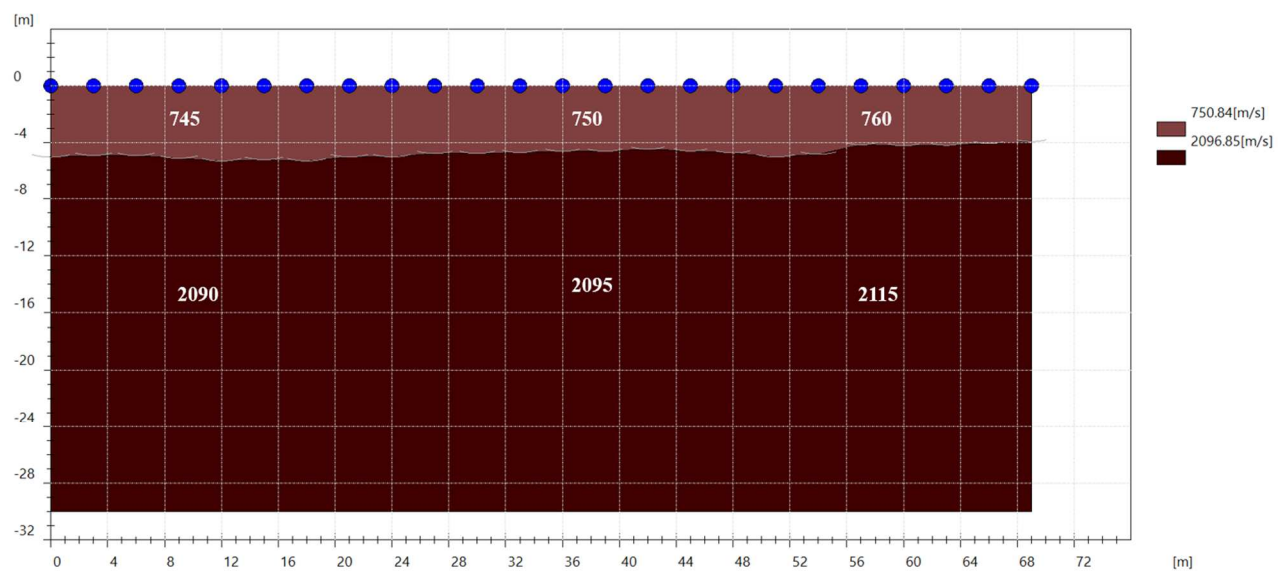
**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	5.0	--
G= 3.0 [m]	4.9	--
G= 6.0 [m]	4.9	--
G= 9.0 [m]	5.1	--
G= 12.0 [m]	5.3	--
G= 15.0 [m]	5.2	--
G= 18.0 [m]	5.3	--
G= 21.0 [m]	5.0	--
G= 24.0 [m]	5.0	--
G= 27.0 [m]	4.8	--
G= 30.0 [m]	4.8	--
G= 33.0 [m]	4.7	--
G= 36.0 [m]	4.6	--
G= 39.0 [m]	4.6	--
G= 42.0 [m]	4.5	--
G= 45.0 [m]	4.6	--
G= 48.0 [m]	4.7	--
G= 51.0 [m]	5.0	--
G= 54.0 [m]	4.8	--
G= 57.0 [m]	4.2	--
G= 60.0 [m]	4.2	--
G= 63.0 [m]	4.2	--
G= 66.0 [m]	4.1	--
G= 69.0 [m]	3.9	--
Velocità [m/sec]	750.8	2096.8
Descrizione		



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

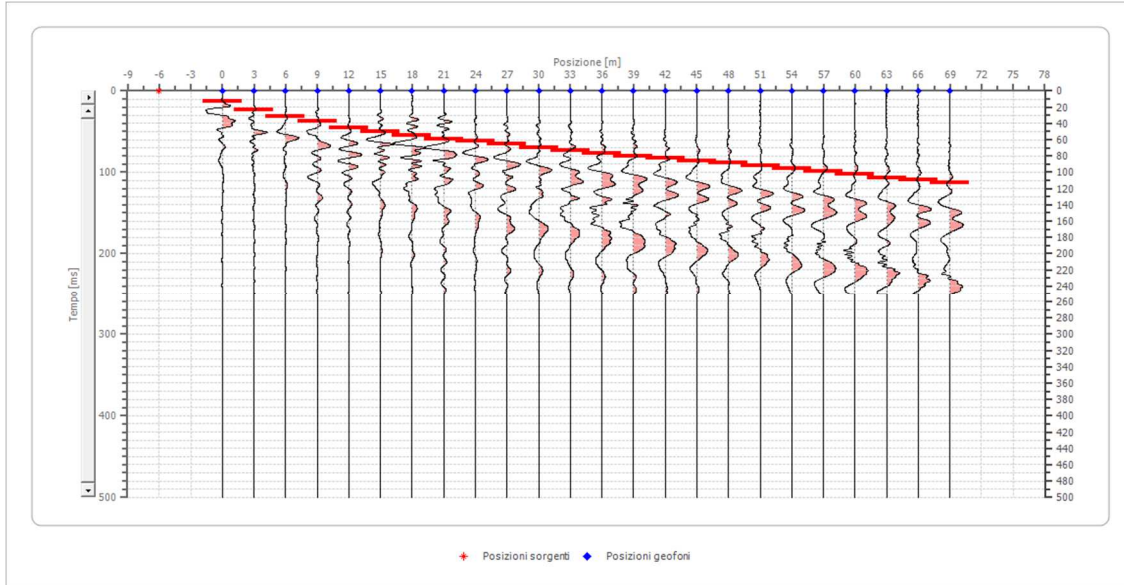


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

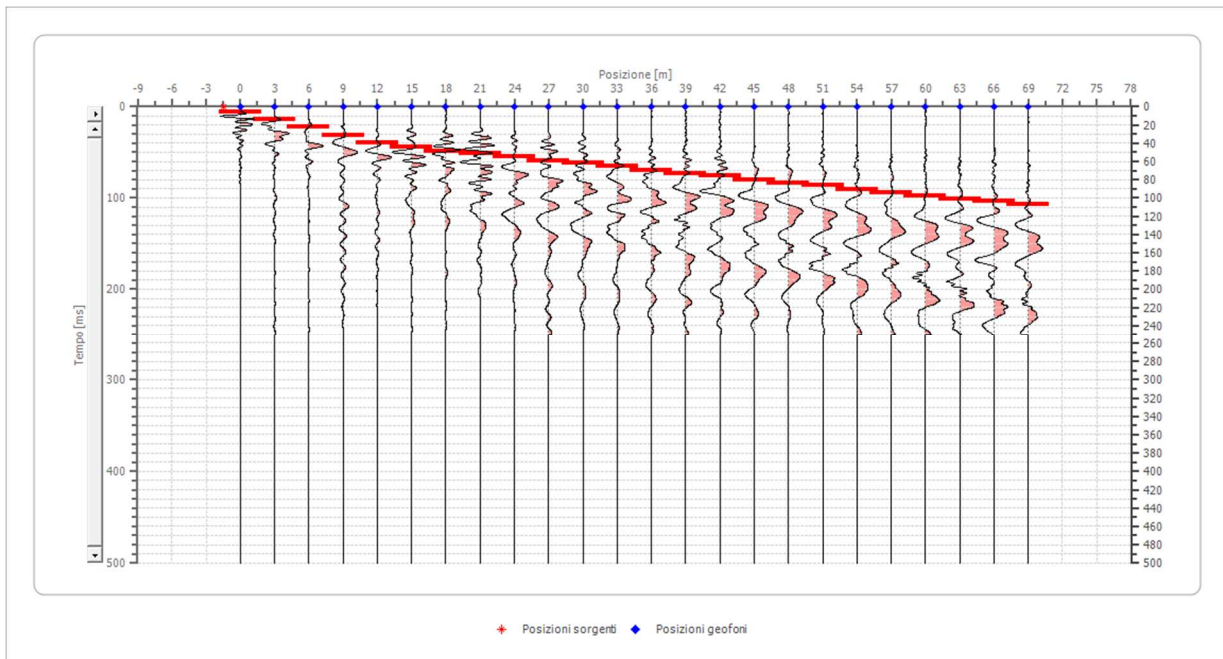


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	13.3146
3.0	23.7761
6.0	31.3845
9.0	37.0908
12.0	45.6502
15.0	49.4544
18.0	54.2096
21.0	58.9648
24.0	61.8180
27.0	65.6222
30.0	70.3774
33.0	73.2305
36.0	77.0347
39.0	79.8878
42.0	82.7410
45.0	85.5941
48.0	88.4473
51.0	92.2514
54.0	95.1046
57.0	98.9088
60.0	102.7129
63.0	106.5171
66.0	109.3703
69.0	113.1744

## Battuta 2

Posizione sorgente X        -1.5 [m]

Posizione sorgente Z        0 [m]

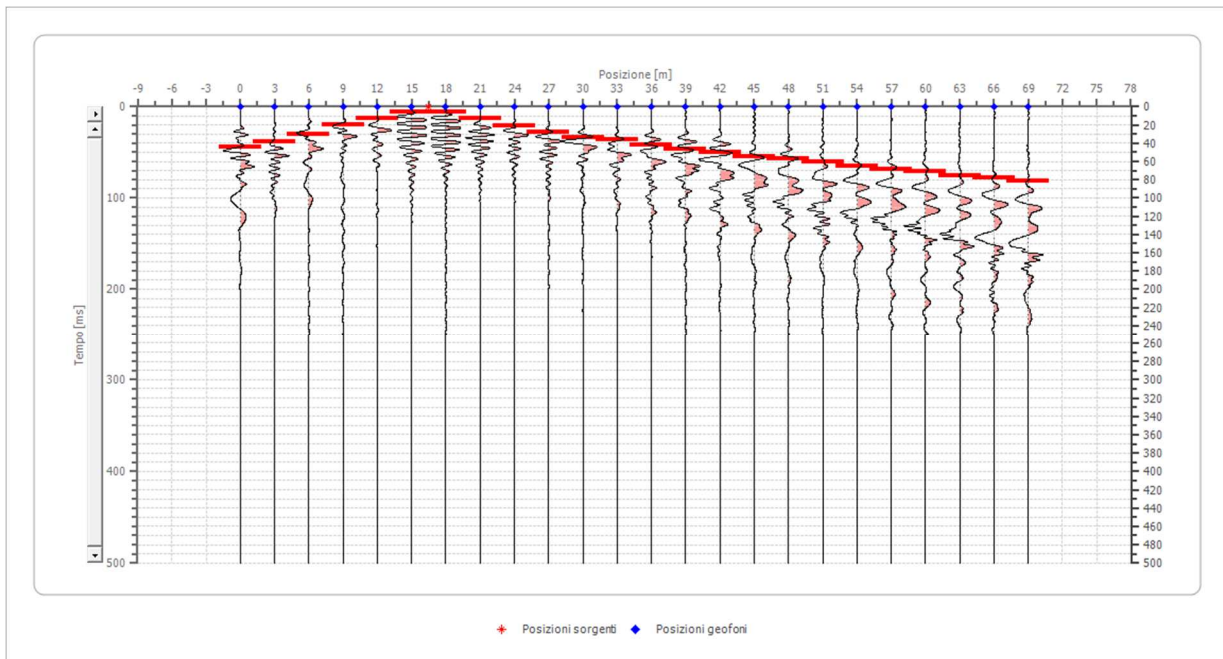


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	5.7063
3.0	14.2657
6.0	21.8741
9.0	31.3845
12.0	38.9929
15.0	43.7481
18.0	48.5033
21.0	51.3565
24.0	55.1607
27.0	58.9648
30.0	61.8180
33.0	65.6222
36.0	69.4263
39.0	73.2305
42.0	76.0837
45.0	79.8878
48.0	83.6920
51.0	86.5452
54.0	90.3493
57.0	94.1535
60.0	97.9577
63.0	101.7619
66.0	103.6640
69.0	107.4682

### Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

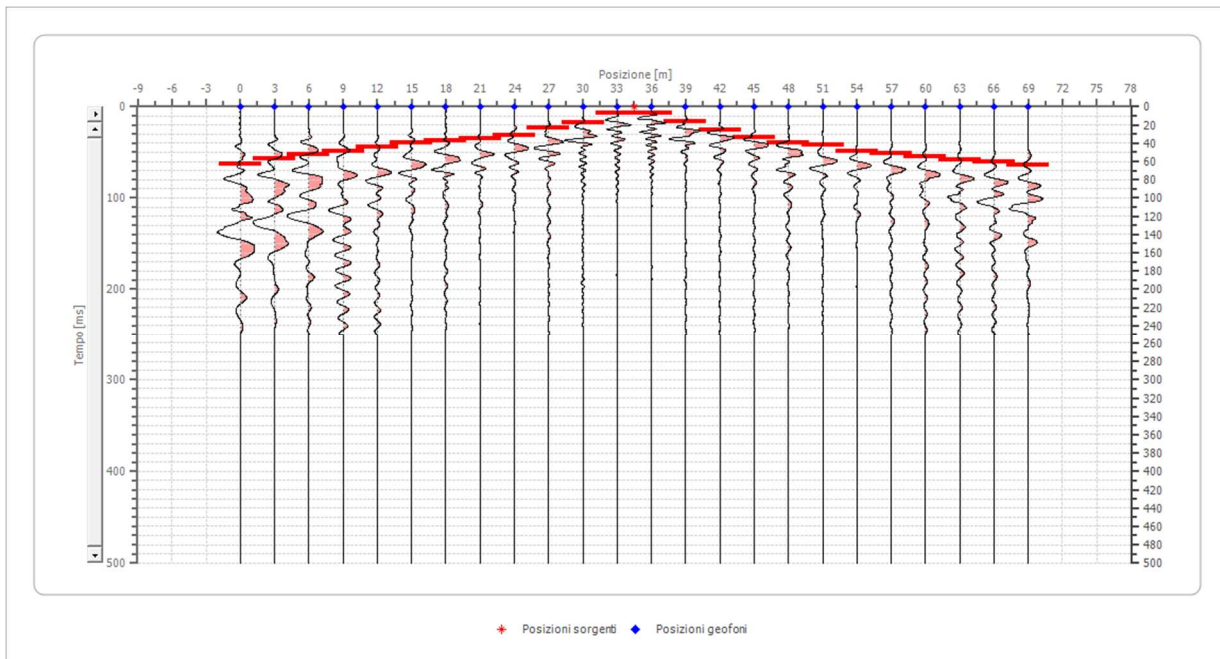


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	43.7481
3.0	38.0418
6.0	30.4335
9.0	19.9720
12.0	12.3636
15.0	5.7063
18.0	5.7063
21.0	13.3146
24.0	20.9230
27.0	27.5803
30.0	33.2866
33.0	36.1397
36.0	41.8460
39.0	46.6012
42.0	50.4054
45.0	54.2096
48.0	57.0627
51.0	60.8669
54.0	64.6711
57.0	68.4753
60.0	71.3284
63.0	75.1326
66.0	77.9857
69.0	81.7899



#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]



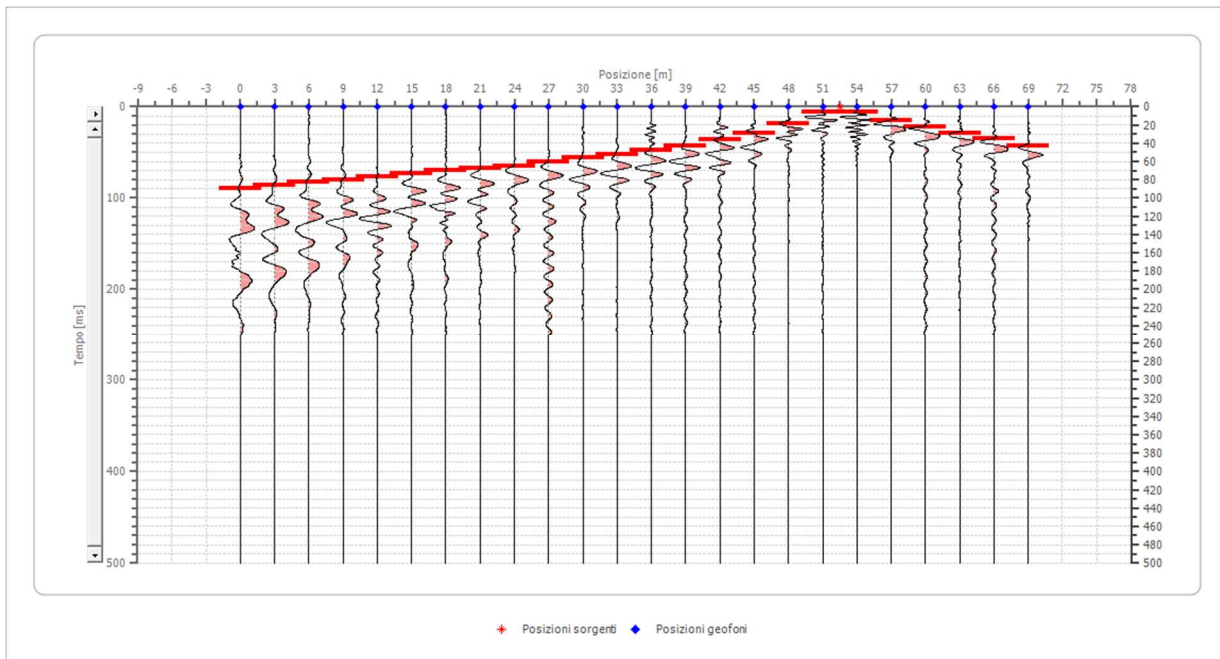
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	62.7690
3.0	57.0627
6.0	52.3075
9.0	48.5033
12.0	43.7481
15.0	39.9439
18.0	37.0908
21.0	35.1887
24.0	31.3845
27.0	23.7761
30.0	17.1188
33.0	6.6573
36.0	6.6573
39.0	16.1678
42.0	25.6782
45.0	33.2866
48.0	38.9929
51.0	41.8460
54.0	48.5033
57.0	51.3565
60.0	55.1607
63.0	58.0138
66.0	60.8669
69.0	63.7201



## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

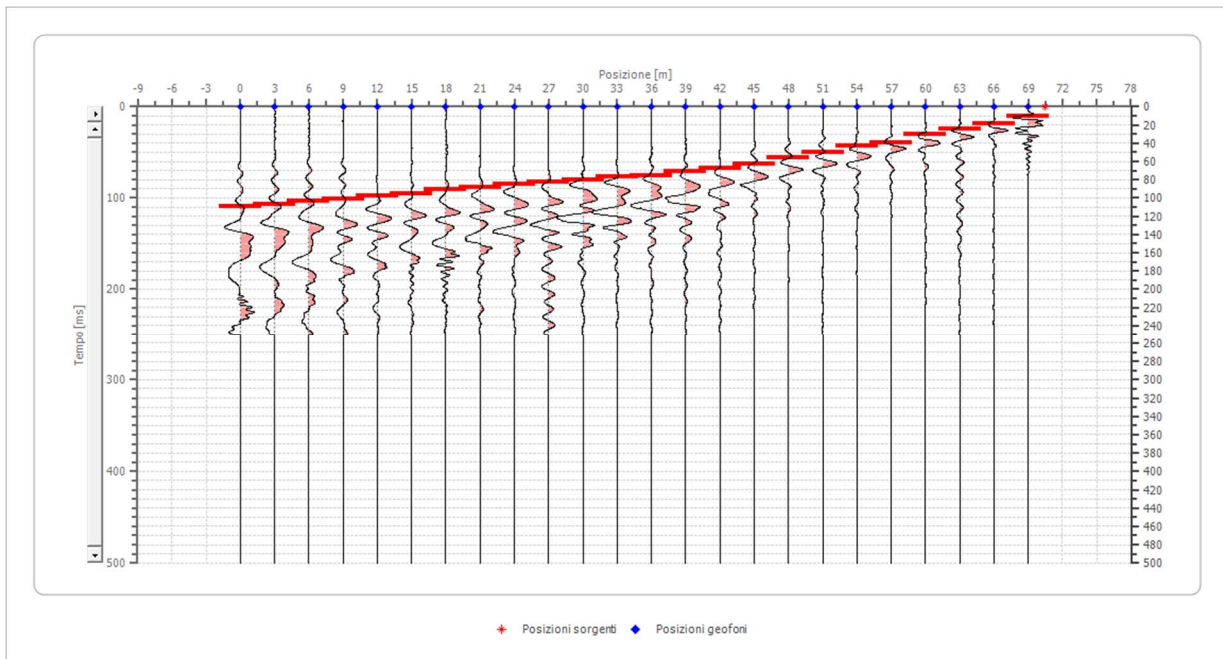


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	89.3983
3.0	85.5941
6.0	82.7410
9.0	80.8389
12.0	77.0347
15.0	73.2305
18.0	70.3774
21.0	67.5242
24.0	64.6711
27.0	59.9159
30.0	56.1117
33.0	52.3075
36.0	47.5523
39.0	42.7971
42.0	36.1397
45.0	28.5314
48.0	19.0209
51.0	5.7063
54.0	5.7063
57.0	15.2167
60.0	21.8741
63.0	28.5314
66.0	35.1887
69.0	42.7971

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

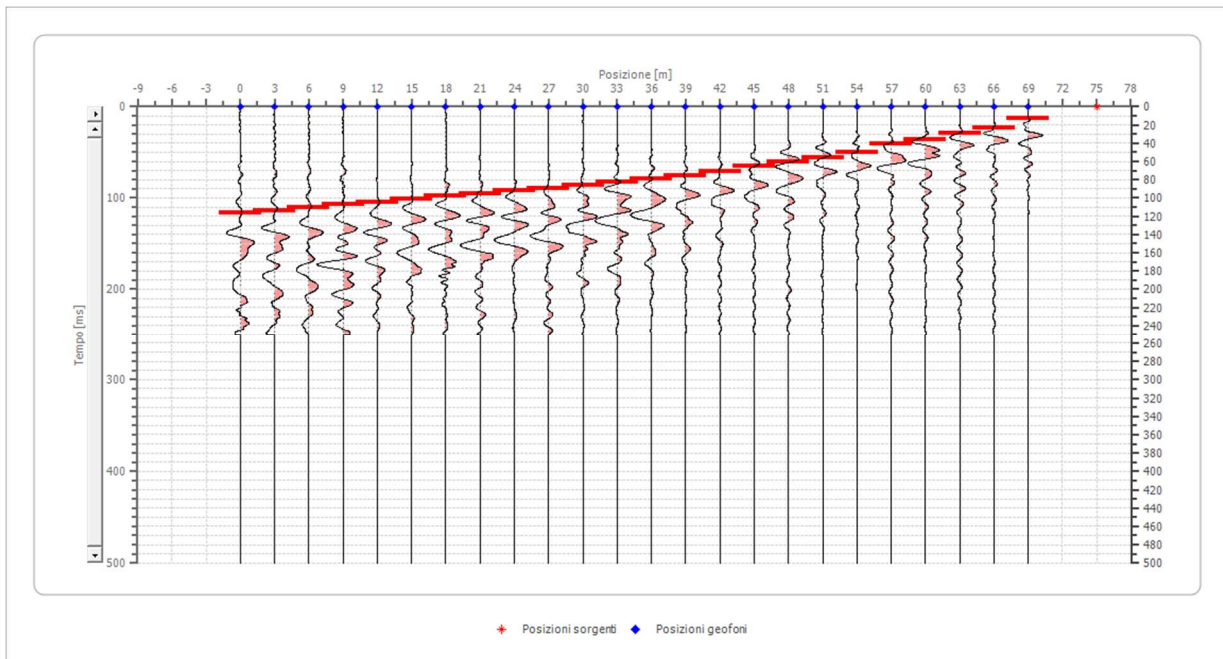
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	109.3703
3.0	106.5171
6.0	103.6640
9.0	100.8108
12.0	97.9577
15.0	95.1046
18.0	91.3004
21.0	88.4473
24.0	84.6431
27.0	82.7410
30.0	79.8878
33.0	77.0347
36.0	75.1326
39.0	71.3284
42.0	67.5242
45.0	62.7690
48.0	56.1117
51.0	50.4054
54.0	42.7971
57.0	38.9929
60.0	30.4335
63.0	24.7272
66.0	18.0699
69.0	10.4615

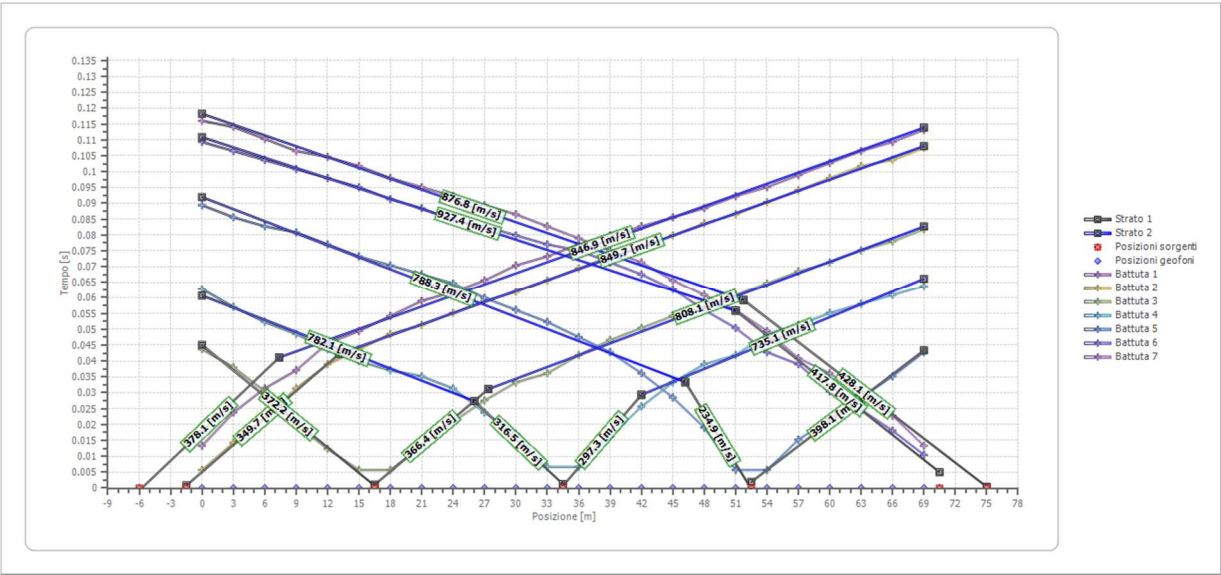
## Battuta 7

Posizione sorgente X 75 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]

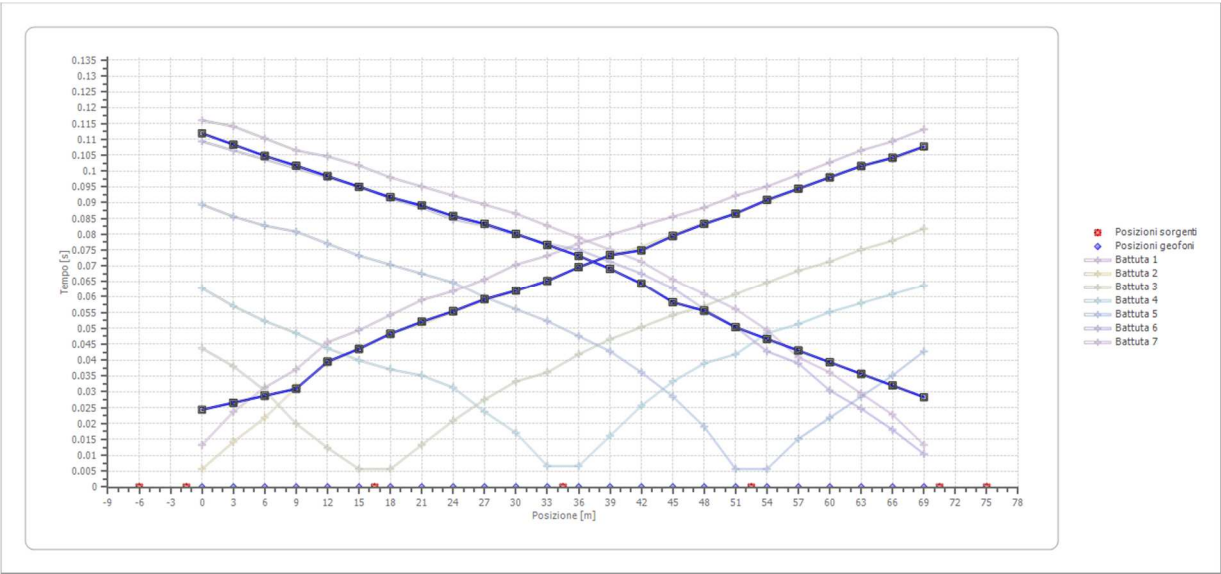


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	116.0276
3.0	114.1255
6.0	110.3213
9.0	106.5171
12.0	104.6150
15.0	101.7619
18.0	97.9577
21.0	95.1046
24.0	92.2514
27.0	89.3983
30.0	86.5452
33.0	82.7410
36.0	78.9368
39.0	75.1326
42.0	71.3284
45.0	65.6222
48.0	60.8669
51.0	56.1117
54.0	49.4544
57.0	40.8950
60.0	36.1397
63.0	29.4824
66.0	22.8251
69.0	13.3146

# Dromocrone



# Dromocrone traslate



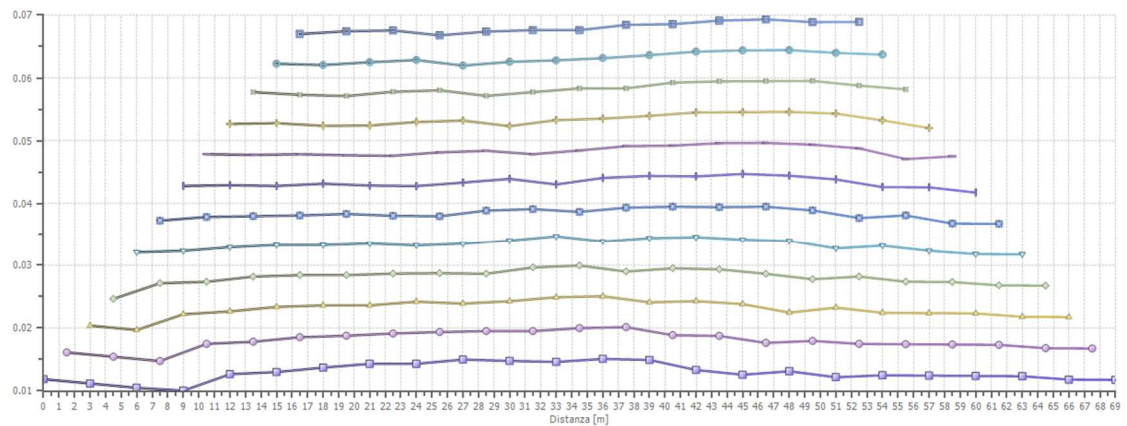
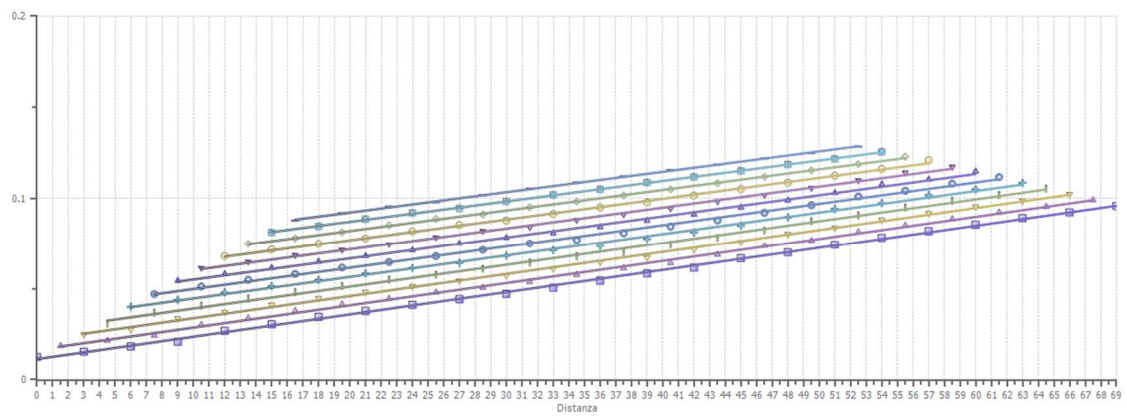
---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	4.7	--
G= 3.0 [m]	4.4	--
G= 6.0 [m]	4.2	--
G= 9.0 [m]	4.0	--
G= 12.0 [m]	5.0	--
G= 15.0 [m]	5.1	--
G= 18.0 [m]	5.4	--
G= 21.0 [m]	5.7	--
G= 24.0 [m]	5.7	--
G= 27.0 [m]	5.9	--
G= 30.0 [m]	5.8	--
G= 33.0 [m]	5.8	--
G= 36.0 [m]	6.0	--
G= 39.0 [m]	5.9	--
G= 42.0 [m]	5.3	--
G= 45.0 [m]	5.0	--
G= 48.0 [m]	5.2	--
G= 51.0 [m]	4.8	--
G= 54.0 [m]	4.9	--
G= 57.0 [m]	4.9	--
G= 60.0 [m]	4.9	--
G= 63.0 [m]	4.9	--
G= 66.0 [m]	4.7	--
G= 69.0 [m]	4.7	--
Velocità [m/sec]	355.9	815.0
Descrizione		





## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

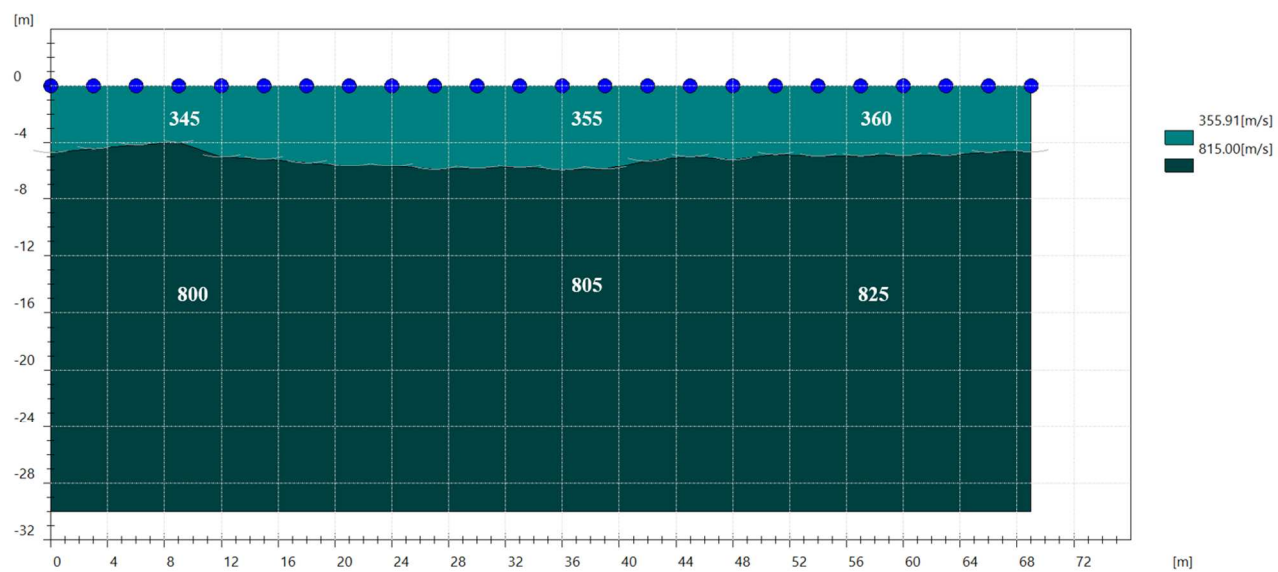






Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_3

**SR\_4: 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  $\theta_i$  mentre quello formato tra il raggio rifratto e la superficie normale è detto angolo di rifrazione  $\theta_r$ . 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

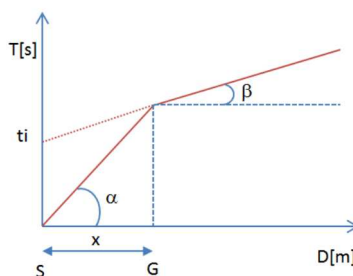
$$T = x_i / V_1$$

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

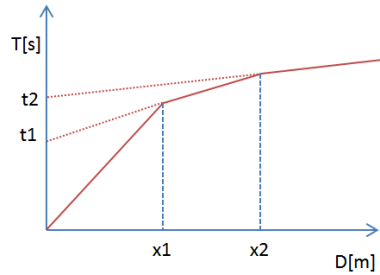
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

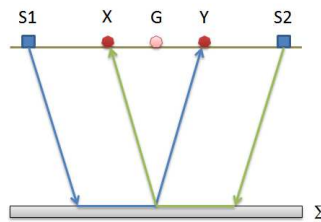


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

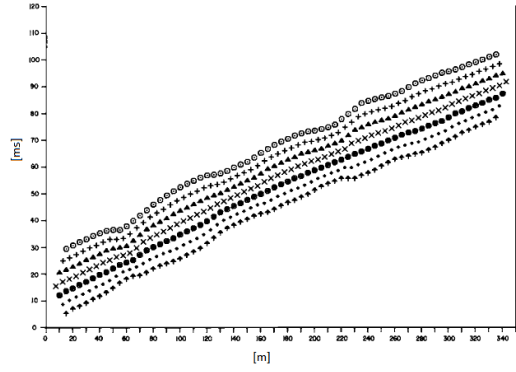
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



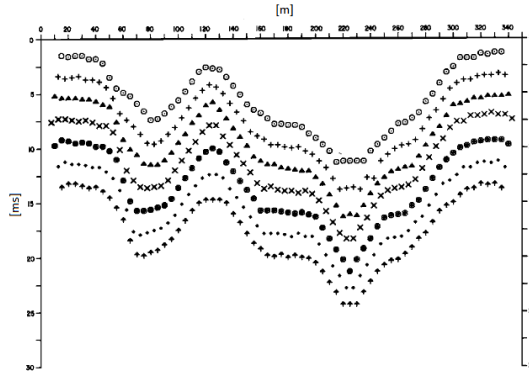
dove  $T_{S_1Y}$  e  $T_{S_2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S_1S_2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è 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  $20^\circ$

A topographic map of the STIA area. The map shows various elevation contours with labels such as 451.3, 455.0, 459.4, 460.5, 468.2, 473.5, 474.6, 476.7, 478.9, 486.9, and 496.9. Buildings are represented by hatched patterns. A red arrow labeled 'SR' points to a specific location on the map. The area is labeled 'STIA' in the center-right.



---

## Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24

Intervallo (m): 5 m

Lunghezza Stendimento (m): 115 m

Quota (m.s.l.m.): 90

## Punti di energizzazione

	<b>E1 Esterno SX</b>	<b>A Estremo SX</b>	<b>D1 Intermedio SX</b>	<b>C Centrale</b>	<b>D2 Intermedio DX</b>	<b>B Estremo DX</b>	<b>E2 Esterno DX</b>
<b>Posizione da Geofono G1 (m)</b>	-10	-2.5	27.5	57.5	87.5	117.5	125

## Geometria geofoni

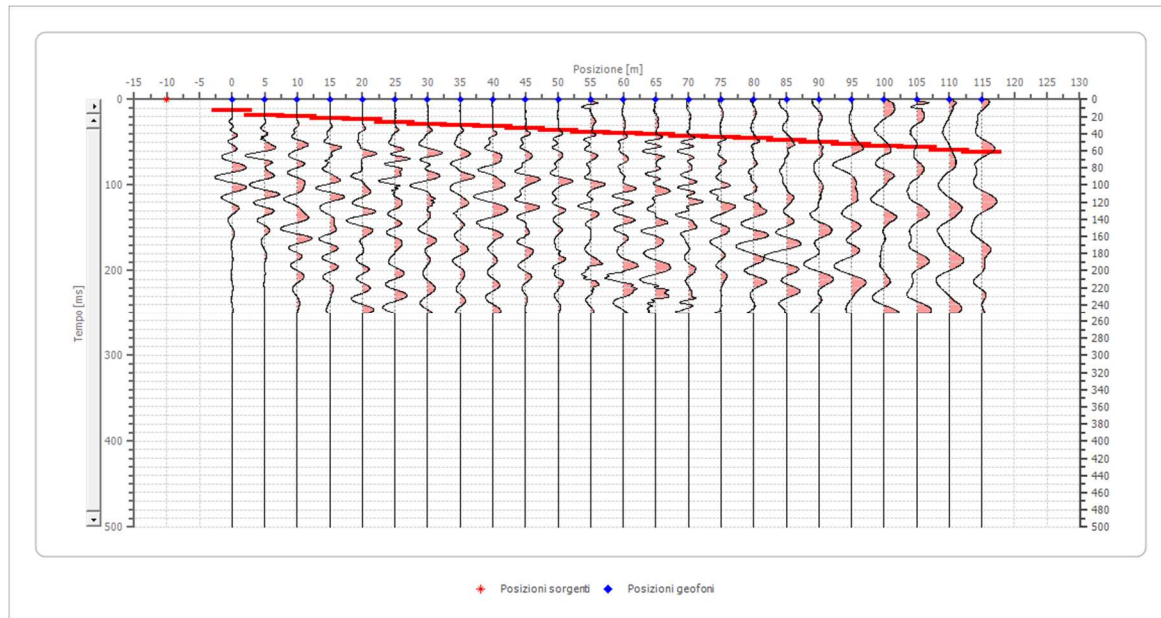
	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.4
2	5.0	0.5
3	10.0	0.8
4	15.0	1.0
5	20.0	1.1
6	25.0	2.2
7	30.0	2.9
8	35.0	2.1
9	40.0	1.4
10	45.0	1.0
11	50.0	0.7
12	55.0	0.4
13	60.0	0.2
14	65.0	-0.1
15	70.0	-0.3
16	75.0	-0.5
17	80.0	-0.5
18	85.0	-0.6
19	90.0	-0.6
20	95.0	-0.8
21	100.0	-0.8
22	105.0	-0.9
23	110.0	-1.0
24	115.0	-1.1

## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -10 [m]

Posizione sorgente Z 2 [m]

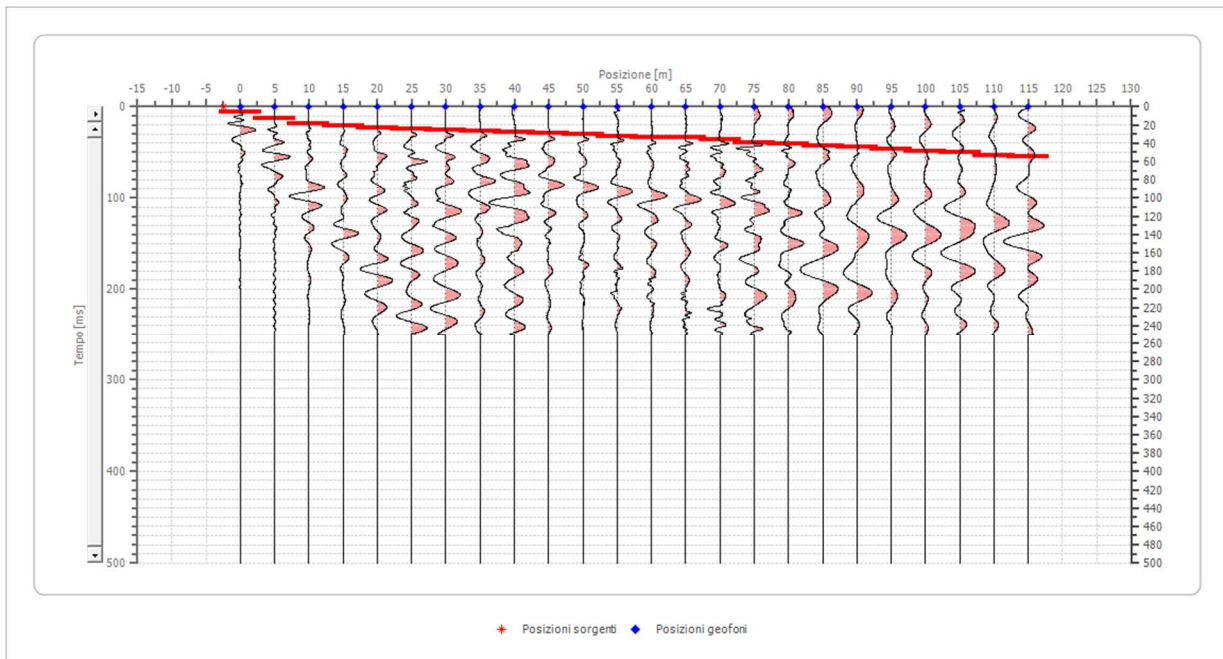


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	12.3636
5.0	18.0699
10.0	19.9720
15.0	21.8741
20.0	23.7761
25.0	26.6293
30.0	28.5314
35.0	30.4335
40.0	31.3845
45.0	34.2376
50.0	36.1397
55.0	38.0418
60.0	39.9439
65.0	40.8950
70.0	42.7971
75.0	43.7481
80.0	45.6502
85.0	47.5523
90.0	50.4054
95.0	52.3075
100.0	54.2096
105.0	56.1117
110.0	58.9648
115.0	61.8180

## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

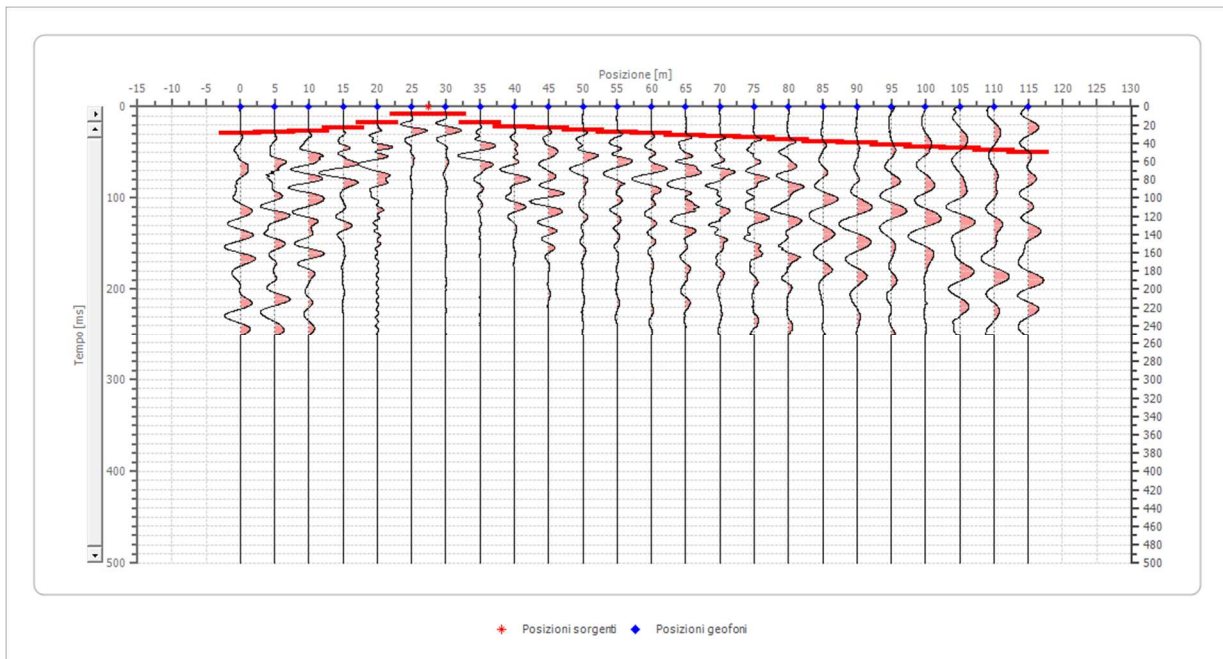
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	5.7063
5.0	12.3636
10.0	18.0699
15.0	20.9230
20.0	22.8251
25.0	24.7272
30.0	25.6782
35.0	26.6293
40.0	27.5803
45.0	28.5314
50.0	30.4335
55.0	32.3356
60.0	33.2866
65.0	34.2376
70.0	36.1397
75.0	38.9929
80.0	40.8950
85.0	42.7971
90.0	43.7481
95.0	46.6012
100.0	48.5033
105.0	50.4054
110.0	53.2586
115.0	55.1607

### Battuta 3

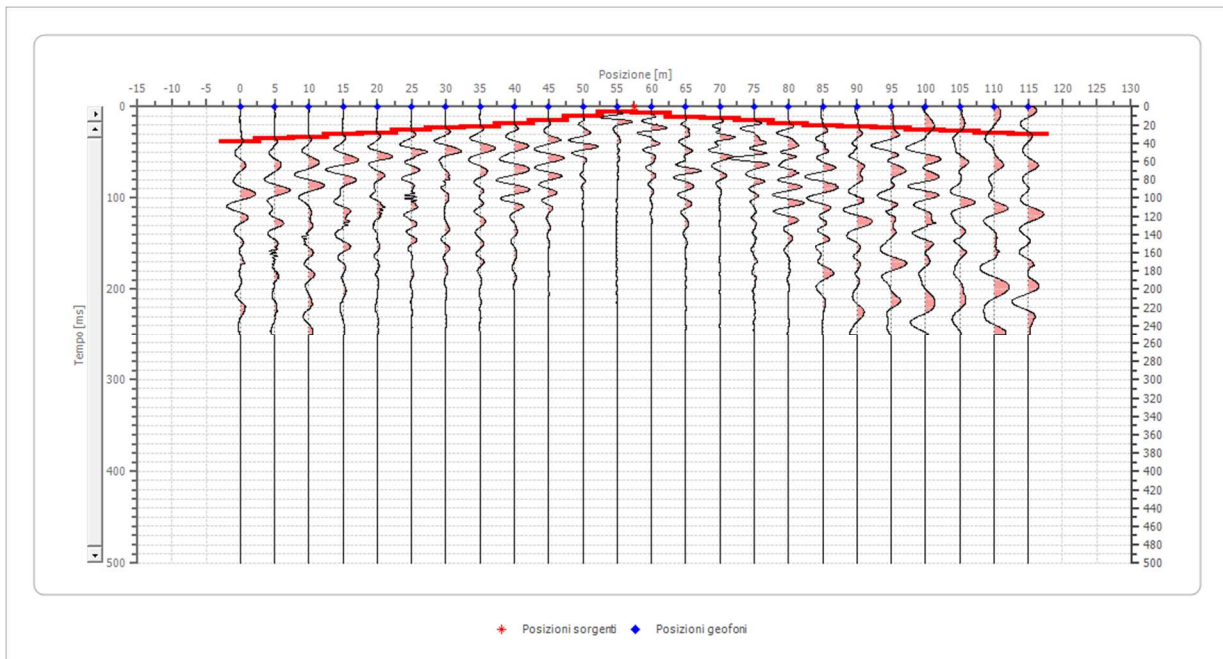
Posizione sorgente X      27.5 [m]  
Posizione sorgente Z      3 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	29.4824
5.0	27.5803
10.0	26.6293
15.0	23.7761
20.0	17.1188
25.0	7.6084
30.0	7.6084
35.0	17.1188
40.0	21.8741
45.0	23.7761
50.0	25.6782
55.0	27.5803
60.0	29.4824
65.0	31.3845
70.0	32.3356
75.0	34.2376
80.0	36.1397
85.0	38.0418
90.0	39.9439
95.0	41.8460
100.0	44.6991
105.0	45.6502
110.0	47.5523
115.0	50.4054

#### Battuta 4

Posizione sorgente X      57.5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]

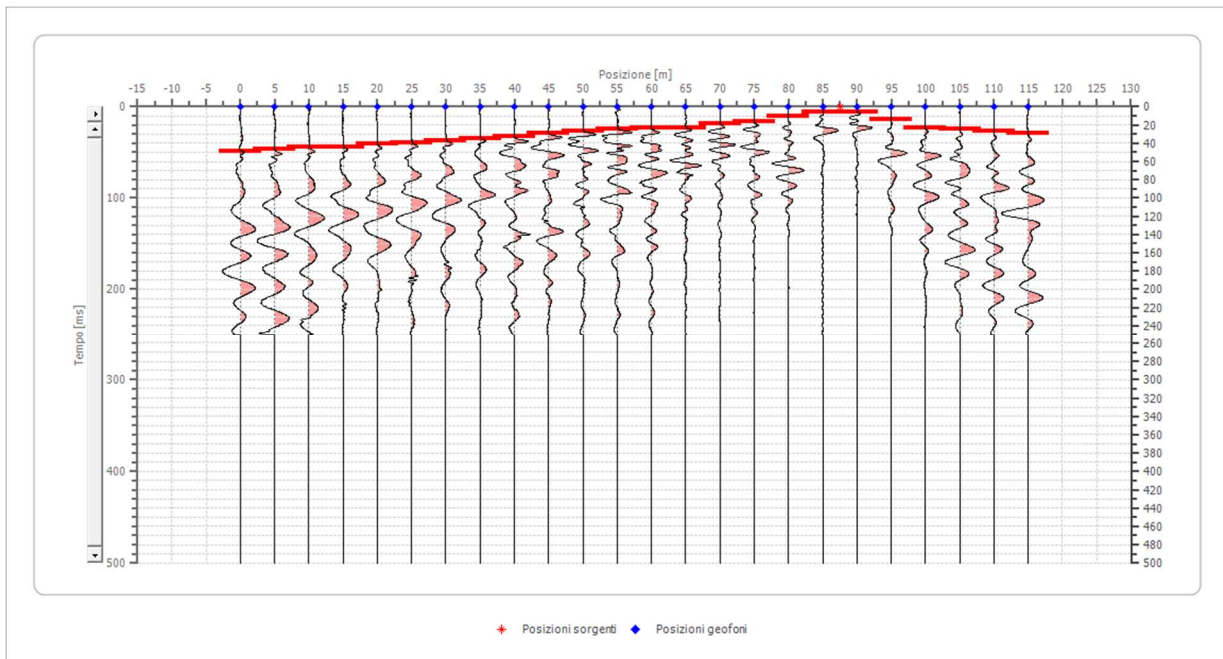


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	38.0418
5.0	35.1887
10.0	33.2866
15.0	30.4335
20.0	28.5314
25.0	25.6782
30.0	23.7761
35.0	21.8741
40.0	18.0699
45.0	15.2167
50.0	10.4615
55.0	5.7063
60.0	6.6573
65.0	11.4125
70.0	12.3636
75.0	15.2167
80.0	18.0699
85.0	20.9230
90.0	21.8741
95.0	23.7761
100.0	25.6782
105.0	26.6293
110.0	28.5314
115.0	30.4335

## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]



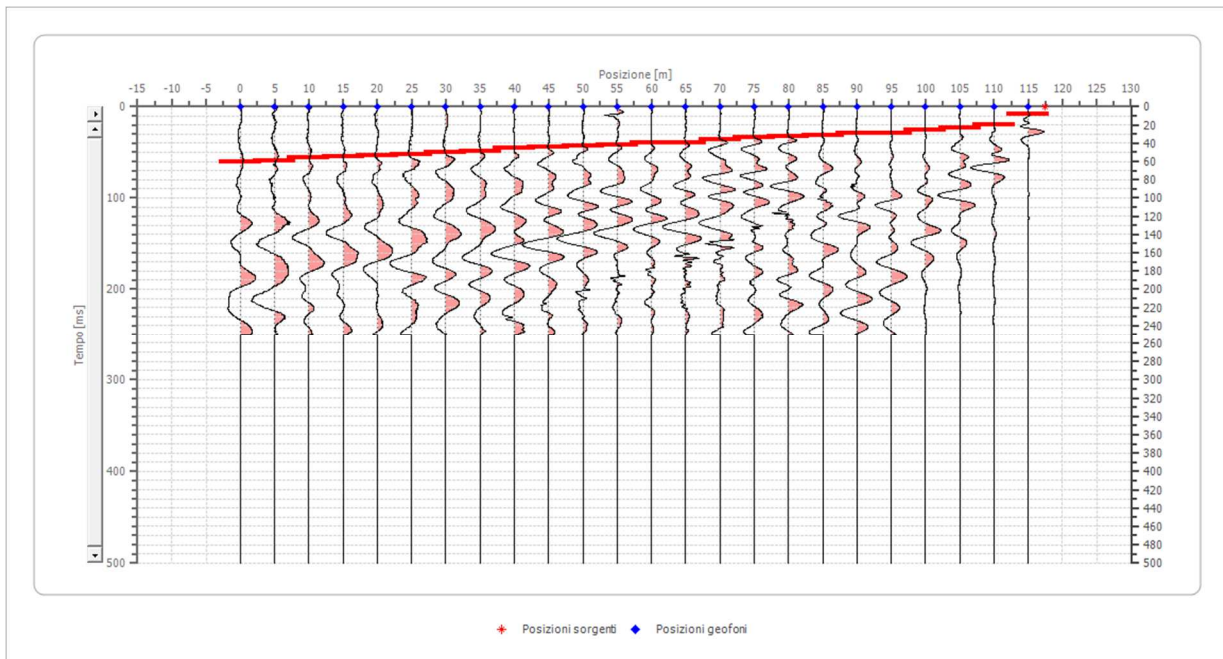
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	48.5033
5.0	46.6012
10.0	44.6991
15.0	43.7481
20.0	40.8950
25.0	38.9929
30.0	37.0908
35.0	35.1887
40.0	32.3356
45.0	29.4824
50.0	26.6293
55.0	24.7272
60.0	23.7761
65.0	22.8251
70.0	19.0209
75.0	16.1678
80.0	10.4615
85.0	5.7063
90.0	5.7063
95.0	14.2657
100.0	22.8251
105.0	24.7272
110.0	26.6293
115.0	29.4824



## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]



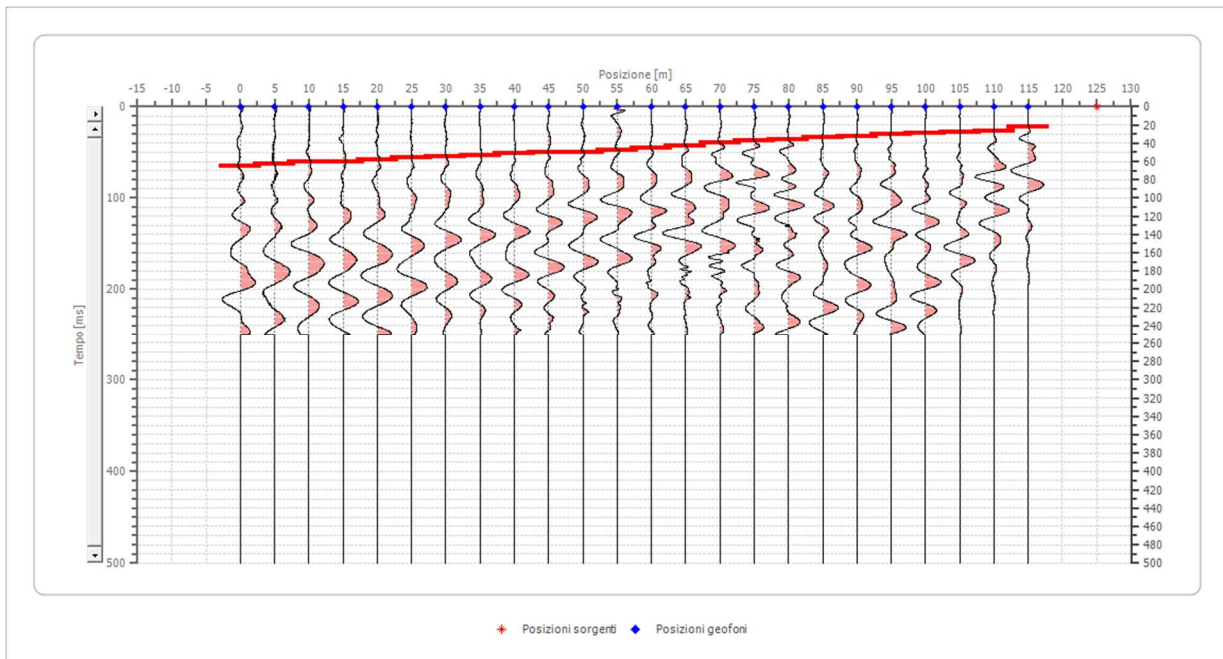
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	59.9159
5.0	58.9648
10.0	56.1117
15.0	54.2096
20.0	53.2586
25.0	52.3075
30.0	50.4054
35.0	48.5033
40.0	45.6502
45.0	44.6991
50.0	42.7971
55.0	41.8460
60.0	39.9439
65.0	38.9929
70.0	36.1397
75.0	34.2376
80.0	32.3356
85.0	31.3845
90.0	29.4824
95.0	28.5314
100.0	25.6782
105.0	23.7761
110.0	19.9720
115.0	7.6084



## Battuta 7

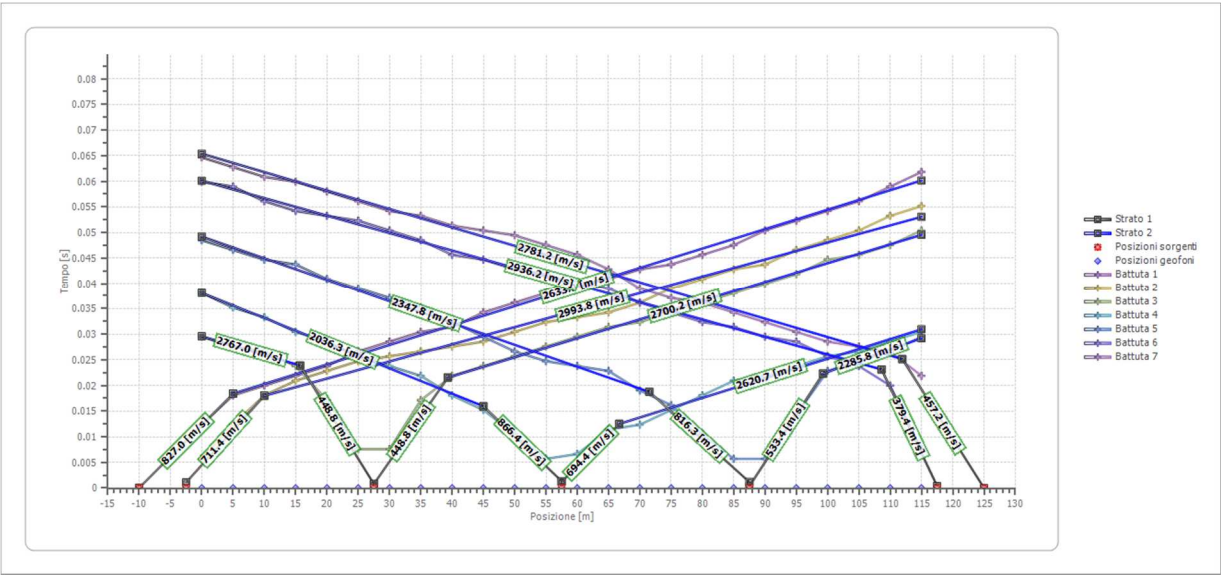
Posizione sorgente X 125 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

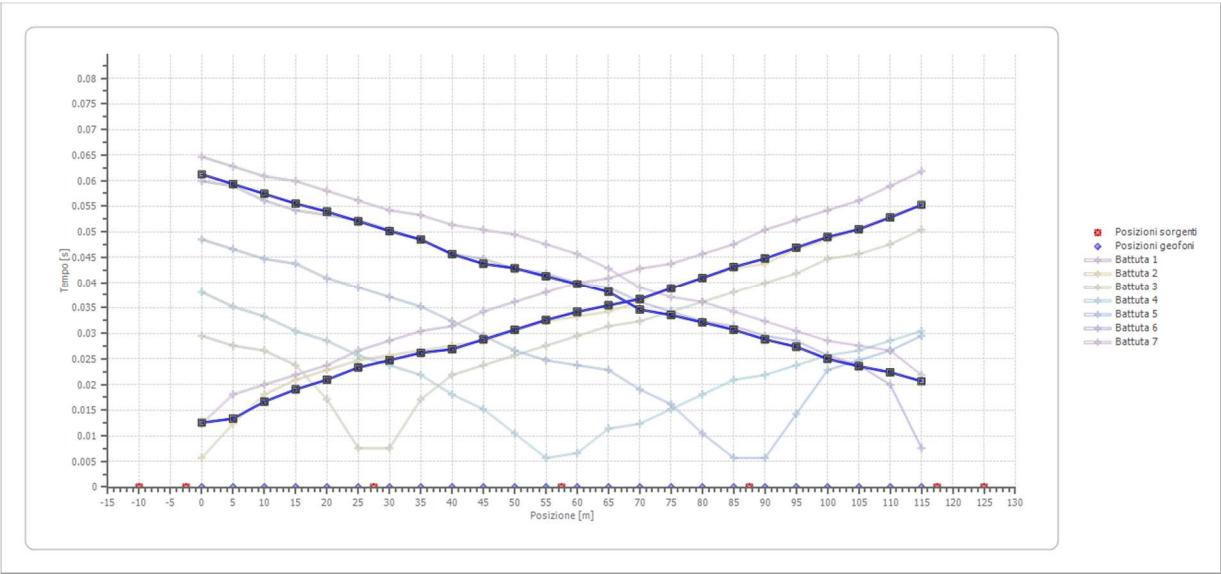


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	64.6711
5.0	62.7690
10.0	60.8669
15.0	59.9159
20.0	58.0138
25.0	56.1117
30.0	54.2096
35.0	53.2586
40.0	51.3565
45.0	50.4054
50.0	49.4544
55.0	47.5523
60.0	45.6502
65.0	42.7971
70.0	38.9929
75.0	37.0908
80.0	36.1397
85.0	34.2376
90.0	32.3356
95.0	30.4335
100.0	28.5314
105.0	27.5803
110.0	26.6293
115.0	21.8741

# Dromocrone



# Dromocrone traslate

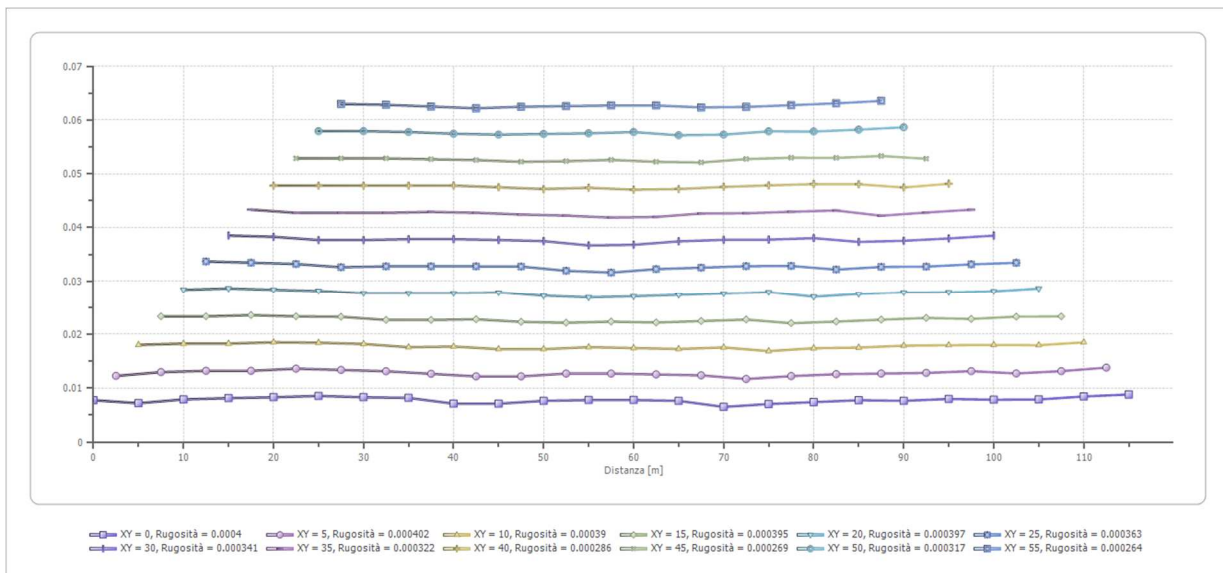
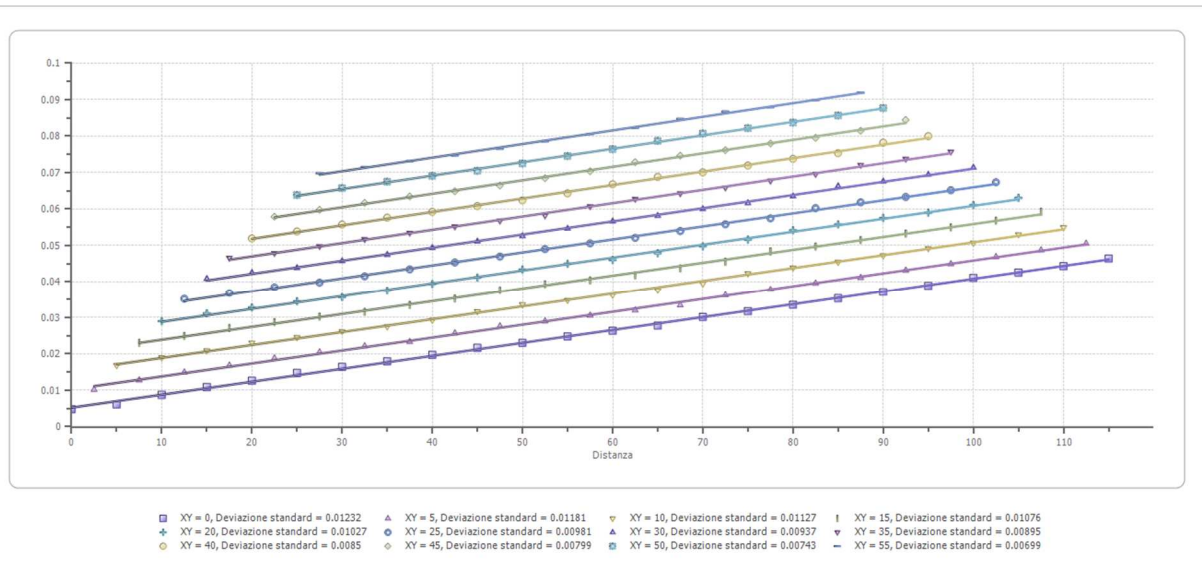


---

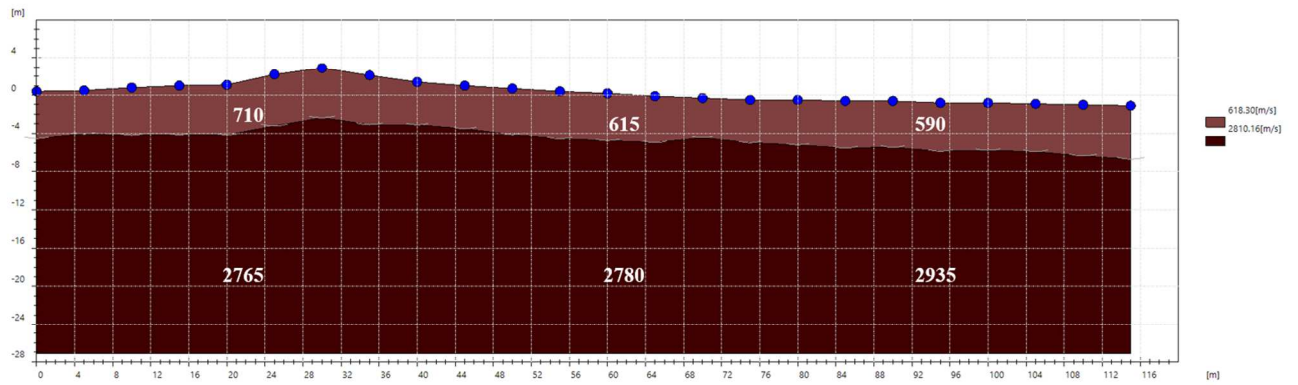
**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	4.9	--
G= 5.0 [m]	4.6	--
G= 10.0 [m]	5.0	--
G= 15.0 [m]	5.2	--
G= 20.0 [m]	5.3	--
G= 25.0 [m]	5.4	--
G= 30.0 [m]	5.3	--
G= 35.0 [m]	5.2	--
G= 40.0 [m]	4.5	--
G= 45.0 [m]	4.5	--
G= 50.0 [m]	4.8	--
G= 55.0 [m]	4.9	--
G= 60.0 [m]	4.9	--
G= 65.0 [m]	4.8	--
G= 70.0 [m]	4.1	--
G= 75.0 [m]	4.5	--
G= 80.0 [m]	4.7	--
G= 85.0 [m]	4.9	--
G= 90.0 [m]	4.8	--
G= 95.0 [m]	5.1	--
G= 100.0 [m]	5.0	--
G= 105.0 [m]	5.0	--
G= 110.0 [m]	5.4	--
G= 115.0 [m]	5.6	--
Velocità [m/sec]	618.3	2810.2
Descrizione		



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

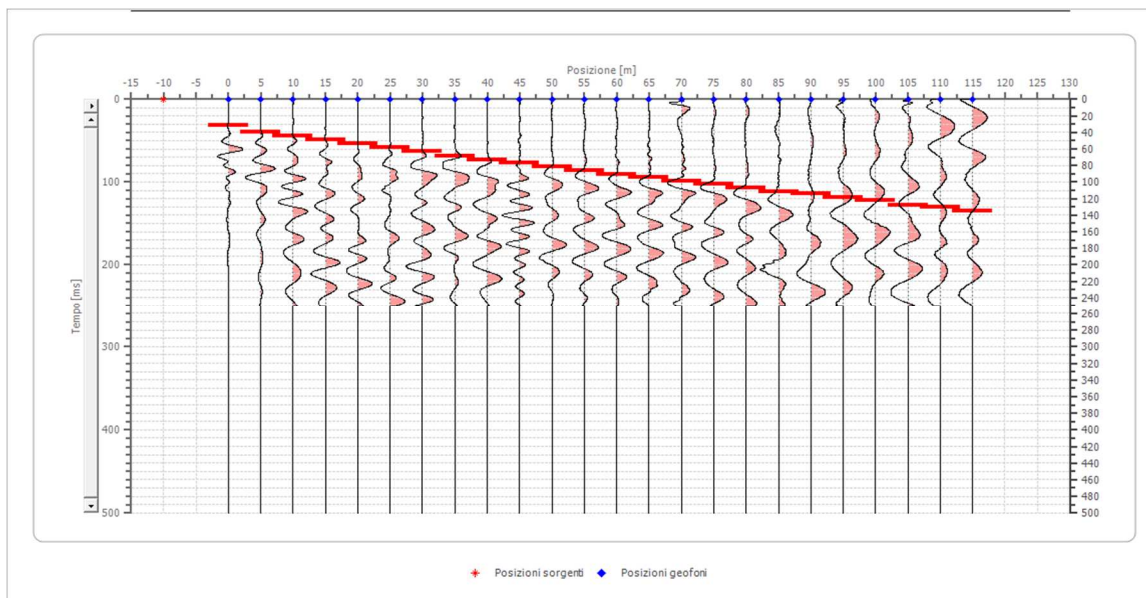


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -10 [m]

Posizione sorgente Z 2 [m]



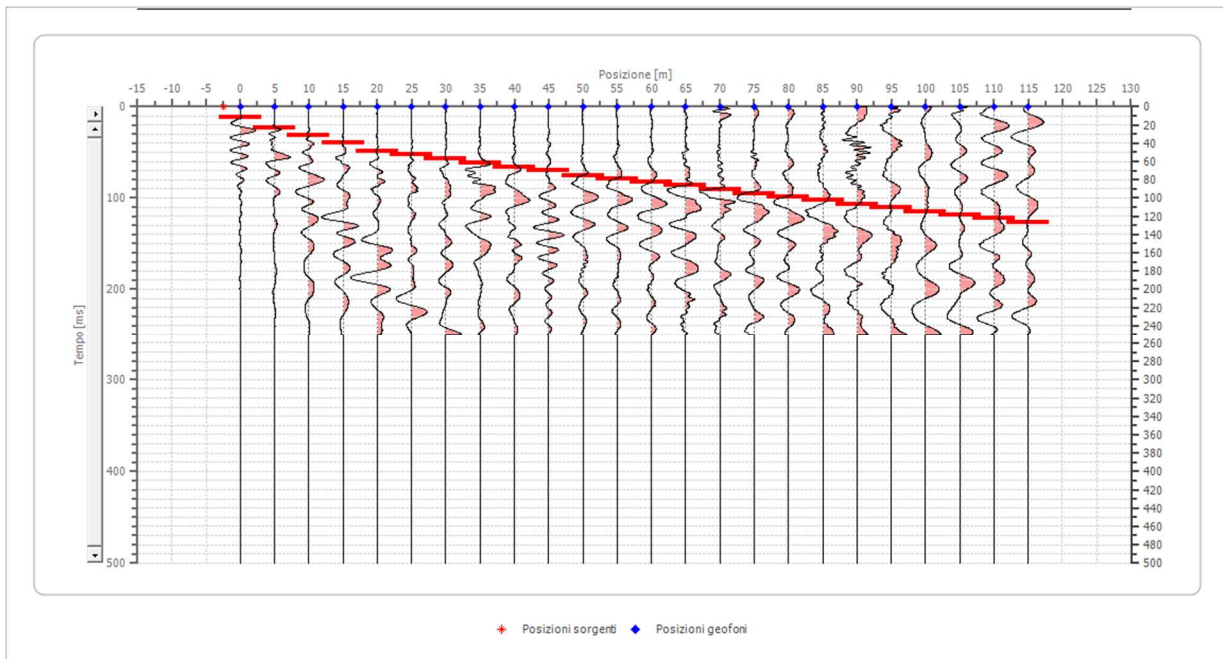
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	31.3845
5.0	38.9929
10.0	43.7481
15.0	48.5033
20.0	53.2586
25.0	58.0138
30.0	62.7690
35.0	68.4753
40.0	73.2305
45.0	77.0347
50.0	81.7899
55.0	85.5941
60.0	90.3493
65.0	94.1535
70.0	98.9088
75.0	102.7129
80.0	107.4682
85.0	111.2723
90.0	114.1255
95.0	118.8807
100.0	122.6849
105.0	127.4401
110.0	130.2933
115.0	135.0485



## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

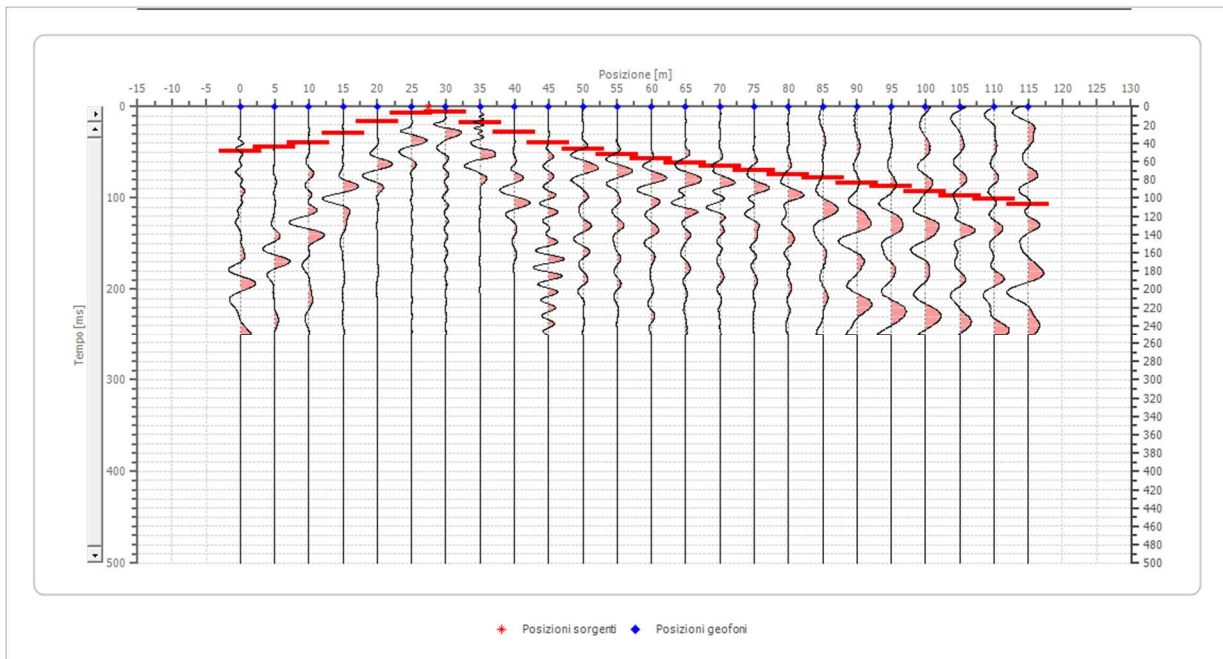


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	11.4125
5.0	22.8251
10.0	31.3845
15.0	39.9439
20.0	48.5033
25.0	52.3075
30.0	57.0627
35.0	61.8180
40.0	66.5732
45.0	70.3774
50.0	75.1326
55.0	78.9368
60.0	82.7410
65.0	86.5452
70.0	90.3493
75.0	95.1046
80.0	98.9088
85.0	102.7129
90.0	106.5171
95.0	110.3213
100.0	115.0765
105.0	118.8807
110.0	122.6849
115.0	126.4891



### Battuta 3

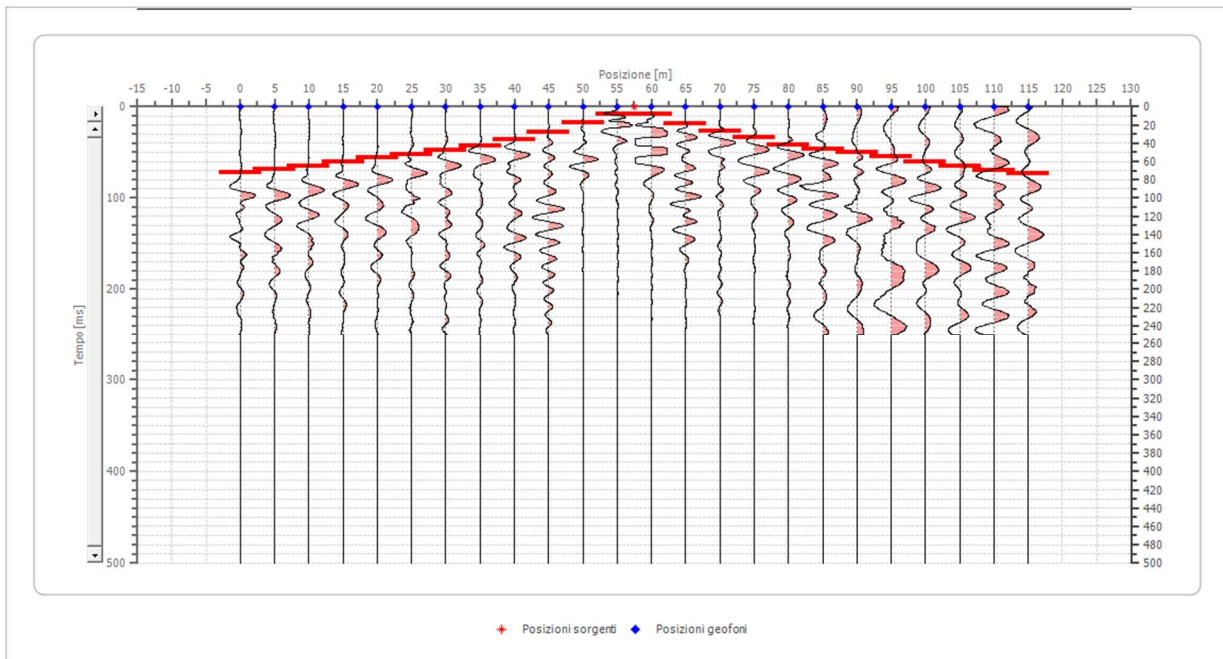
Posizione sorgente X      27.5 [m]  
Posizione sorgente Z      3 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	48.5033
5.0	43.7481
10.0	38.9929
15.0	29.4824
20.0	16.1678
25.0	6.6573
30.0	5.7063
35.0	17.1188
40.0	27.5803
45.0	39.9439
50.0	46.6012
55.0	52.3075
60.0	57.0627
65.0	61.8180
70.0	65.6222
75.0	69.4263
80.0	74.1816
85.0	77.9857
90.0	83.6920
95.0	87.4962
100.0	93.2025
105.0	97.9577
110.0	101.7619
115.0	107.4682

#### Battuta 4

Posizione sorgente X      57.5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]

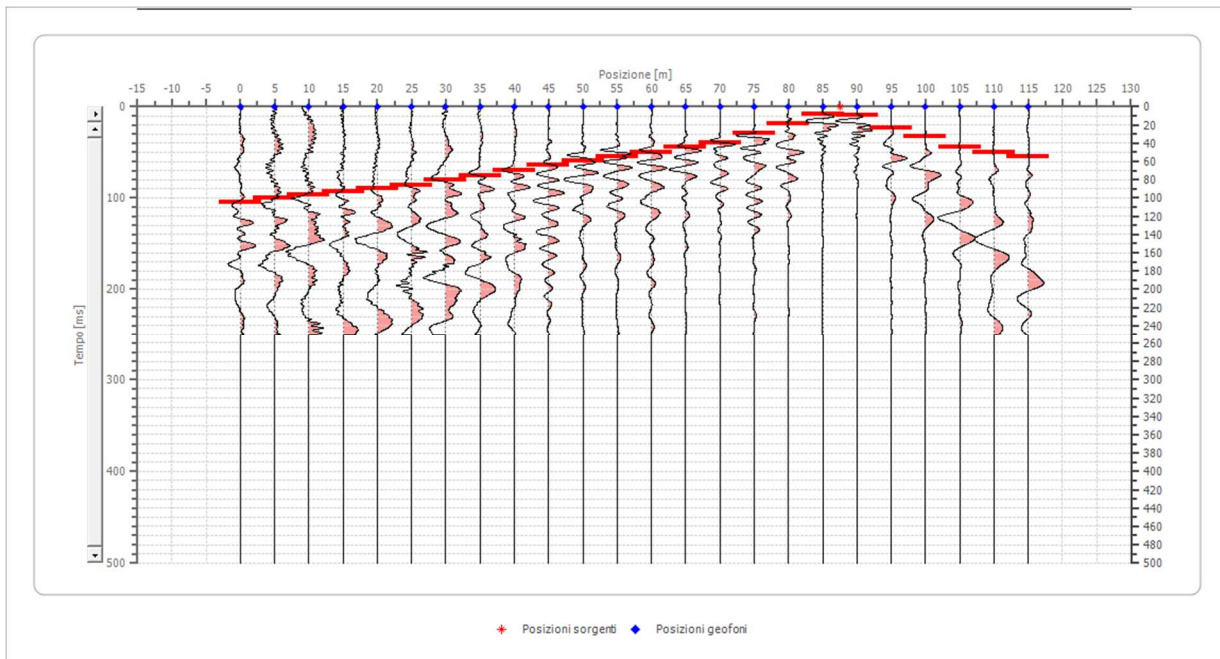


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	72.2795
5.0	68.4753
10.0	64.6711
15.0	59.9159
20.0	56.1117
25.0	52.3075
30.0	47.5523
35.0	42.7971
40.0	36.1397
45.0	27.5803
50.0	17.1188
55.0	8.5594
60.0	8.5594
65.0	18.0699
70.0	26.6293
75.0	34.2376
80.0	41.8460
85.0	46.6012
90.0	50.4054
95.0	55.1607
100.0	60.8669
105.0	64.6711
110.0	69.4263
115.0	73.2305

## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

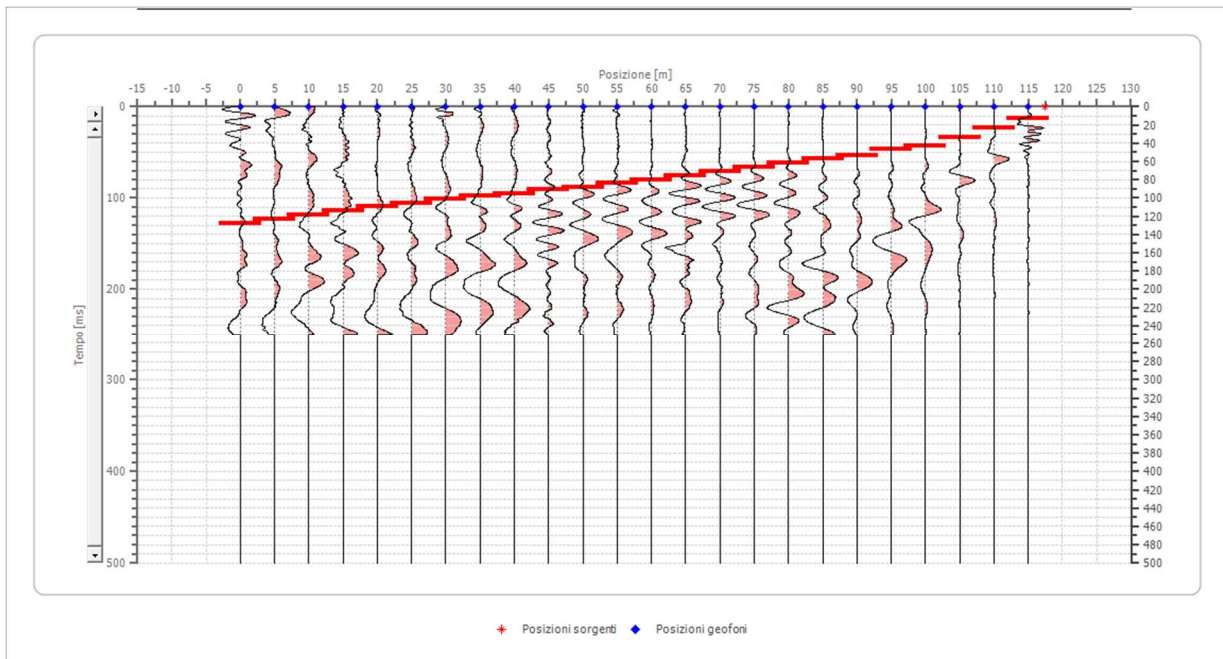


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	104.6150
5.0	99.8598
10.0	97.0067
15.0	93.2025
20.0	89.3983
25.0	86.5452
30.0	80.8389
35.0	75.1326
40.0	69.4263
45.0	63.7201
50.0	58.9648
55.0	54.2096
60.0	49.4544
65.0	44.6991
70.0	39.9439
75.0	29.4824
80.0	18.0699
85.0	8.5594
90.0	9.5105
95.0	22.8251
100.0	32.3356
105.0	43.7481
110.0	50.4054
115.0	54.2096

## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

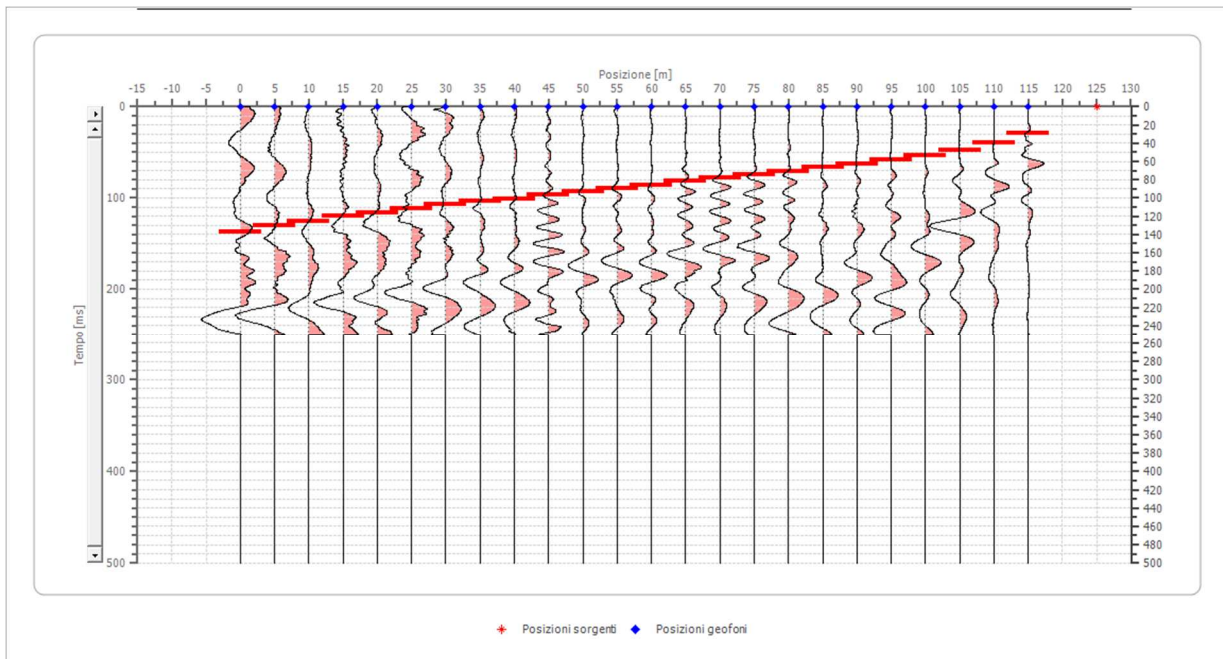
Posizione sorgente Z -1 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	127.4401
5.0	123.6359
10.0	118.8807
15.0	114.1255
20.0	109.3703
25.0	105.5661
30.0	100.8108
35.0	97.9577
40.0	95.1046
45.0	91.3004
50.0	88.4473
55.0	83.6920
60.0	79.8878
65.0	75.1326
70.0	71.3284
75.0	66.5732
80.0	61.8180
85.0	57.0627
90.0	53.2586
95.0	46.6012
100.0	42.7971
105.0	34.2376
110.0	23.7761
115.0	13.3146

## Battuta 7

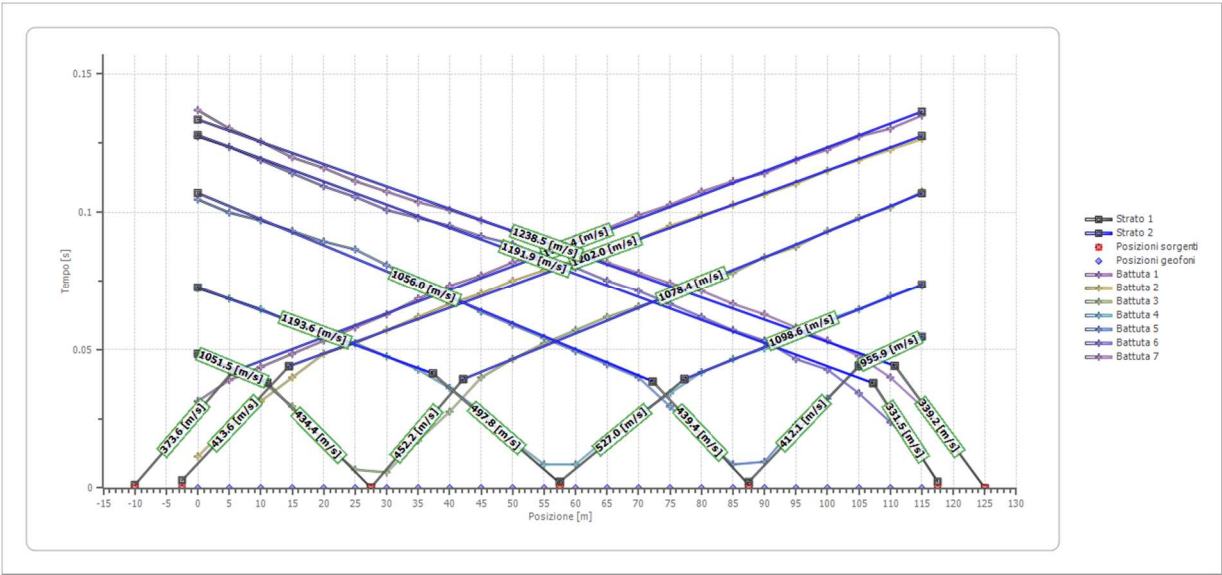
Posizione sorgente X      125 [m]  
Posizione sorgente Z      -1 [m]



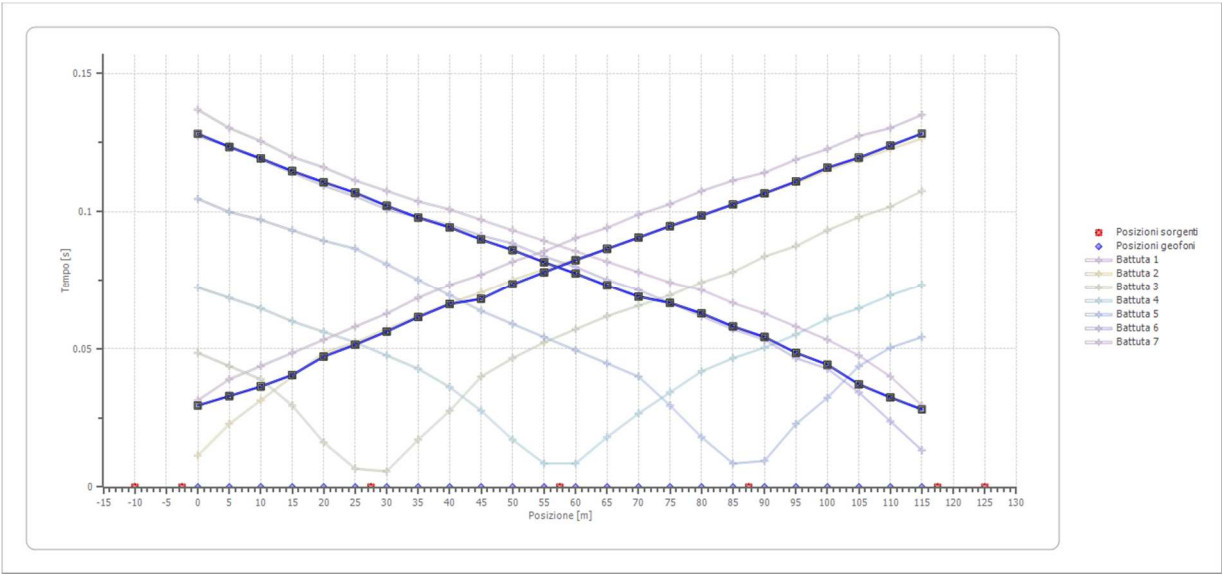
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	136.9506
5.0	130.2933
10.0	125.5380
15.0	119.8318
20.0	116.0276
25.0	111.2723
30.0	107.4682
35.0	103.6640
40.0	100.8108
45.0	97.0067
50.0	93.2025
55.0	89.3983
60.0	85.5941
65.0	81.7899
70.0	77.9857
75.0	74.1816
80.0	71.3284
85.0	66.5732
90.0	62.7690
95.0	58.0138
100.0	53.2586
105.0	47.5523
110.0	39.9439
115.0	29.4824



# Dromocrone



# Dromocrone traslate



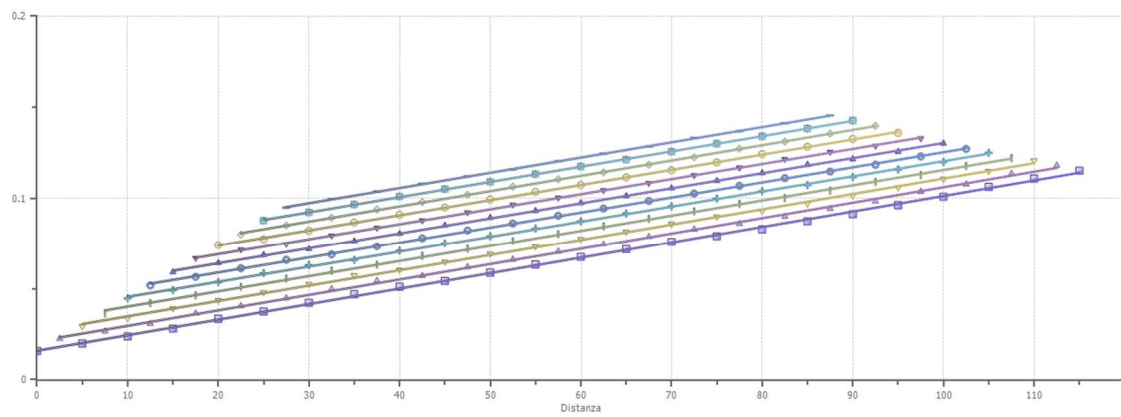
---

**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

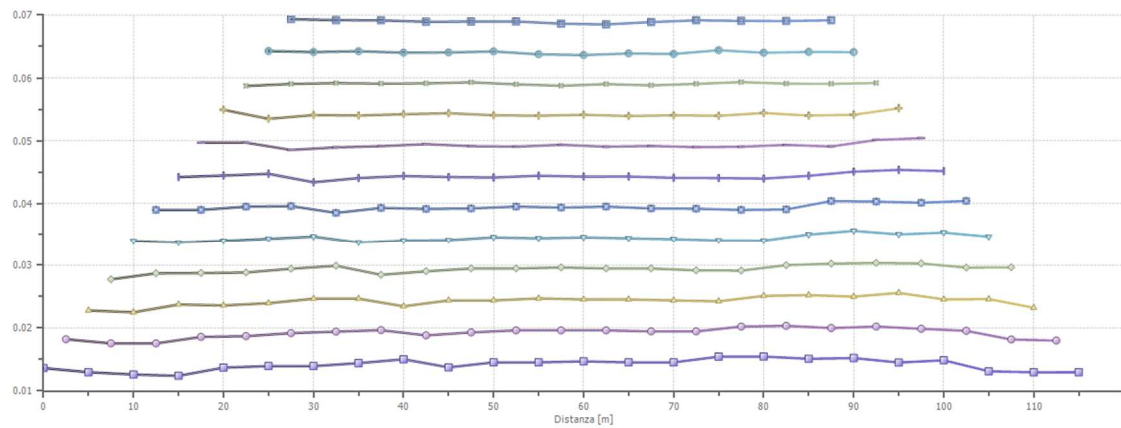
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	6.2	--
G= 5.0 [m]	5.9	--
G= 10.0 [m]	5.7	--
G= 15.0 [m]	5.6	--
G= 20.0 [m]	6.2	--
G= 25.0 [m]	6.3	--
G= 30.0 [m]	6.3	--
G= 35.0 [m]	6.5	--
G= 40.0 [m]	6.8	--
G= 45.0 [m]	6.2	--
G= 50.0 [m]	6.6	--
G= 55.0 [m]	6.6	--
G= 60.0 [m]	6.7	--
G= 65.0 [m]	6.6	--
G= 70.0 [m]	6.6	--
G= 75.0 [m]	7.0	--
G= 80.0 [m]	7.0	--
G= 85.0 [m]	6.8	--
G= 90.0 [m]	6.9	--
G= 95.0 [m]	6.6	--
G= 100.0 [m]	6.7	--
G= 105.0 [m]	5.9	--
G= 110.0 [m]	5.9	--
G= 115.0 [m]	5.9	--
Velocità [m/sec]	422.1	1170.6
Descrizione		





■ XY = 0, Deviazione standard = 0.02957    ▲ XY = 5, Deviazione standard = 0.02822    ▼ XY = 10, Deviazione standard = 0.02682    I XY = 15, Deviazione standard = 0.02537  
 ◆ XY = 20, Deviazione standard = 0.02401    ● XY = 25, Deviazione standard = 0.02273    ▲ XY = 30, Deviazione standard = 0.02152    ▼ XY = 35, Deviazione standard = 0.02032  
 ● XY = 40, Deviazione standard = 0.01922    ◇ XY = 45, Deviazione standard = 0.01817    ■ XY = 50, Deviazione standard = 0.01688    — XY = 55, Deviazione standard = 0.01564



■ XY = 0, Rugosità = 0.000779    ● XY = 5, Rugosità = 0.000682    ● XY = 10, Rugosità = 0.000602    ● XY = 15, Rugosità = 0.000491    ● XY = 20, Rugosità = 0.000408    ● XY = 25, Rugosità = 0.000409  
 ● XY = 30, Rugosità = 0.000336    ● XY = 35, Rugosità = 0.000342    ● XY = 40, Rugosità = 0.000271    ● XY = 45, Rugosità = 0.000129    ● XY = 50, Rugosità = 0.000166    ● XY = 55, Rugosità = 0.000172

## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

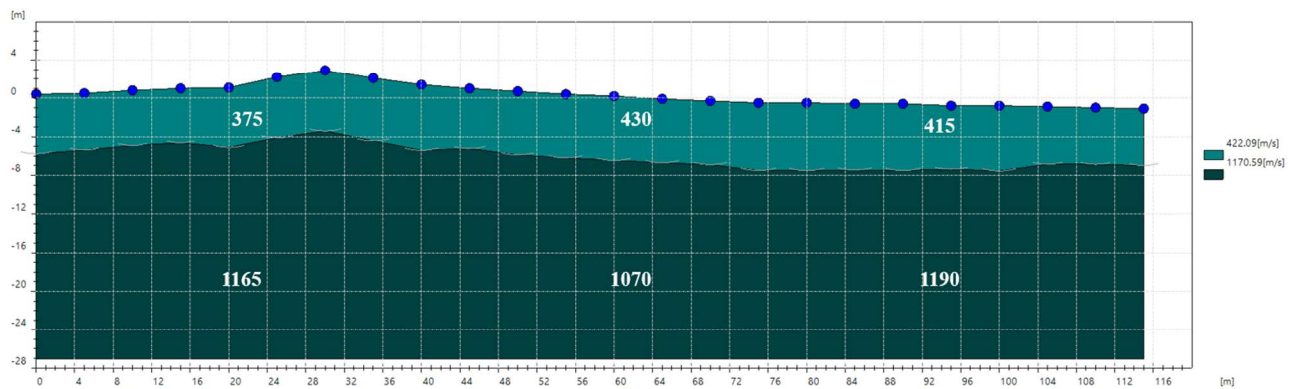




Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_4

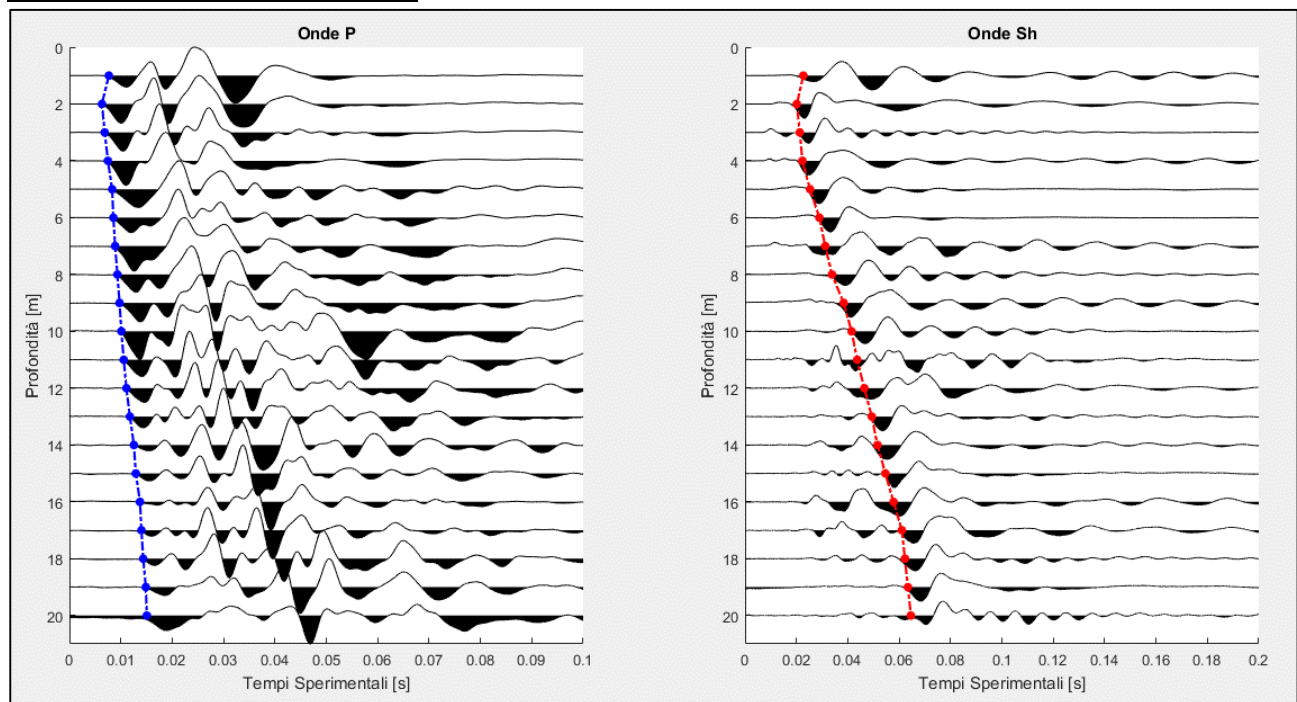
- **ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONE INDAGINE DOWN – HOLE**

<b>Indagine</b>
Dh_1_Pratovecchio Stia

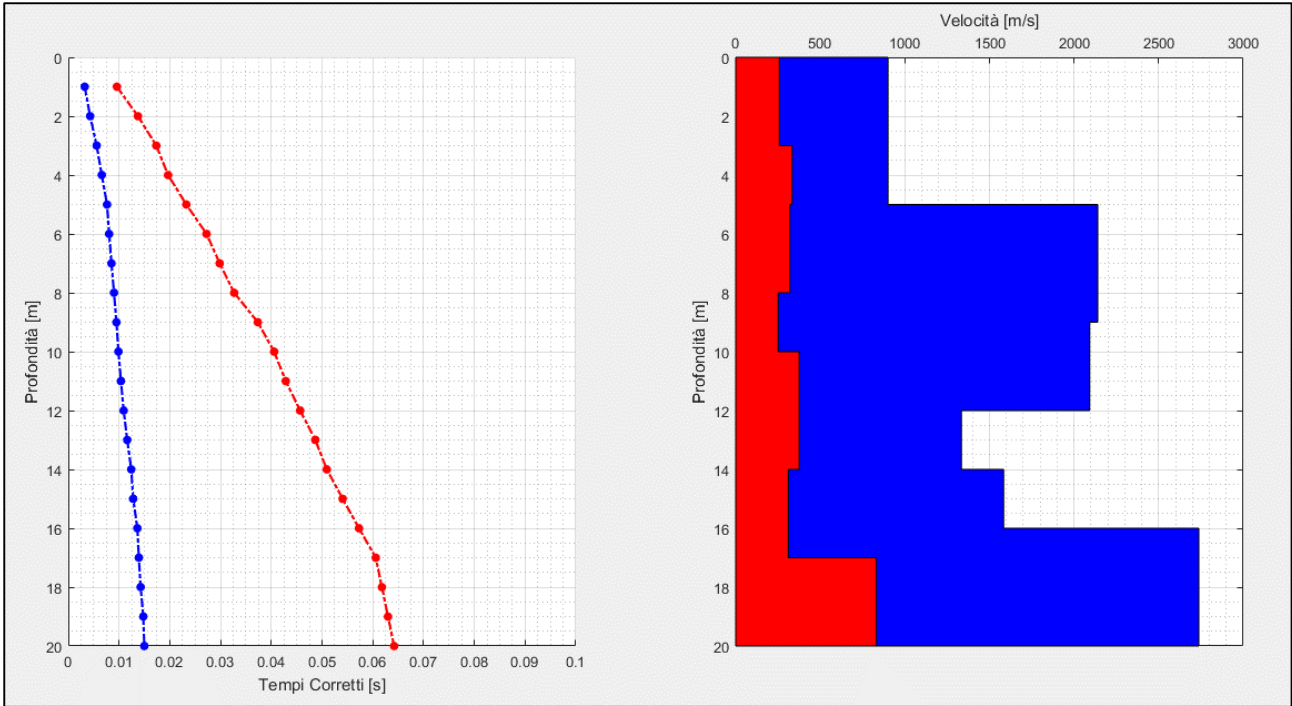
### Tabella dei Travel time

Tempi di arrivo sperimentali				Tempi di arrivo corretti			
Onde SH		Onde P		Onde SH		Onde P	
1	0.022716	1	0.007667	1	0.009580	1	0.003233
2	0.020148	2	0.006321	2	0.013723	2	0.004305
3	0.021333	3	0.006867	3	0.017340	3	0.005582
4	0.022321	4	0.007492	4	0.019661	4	0.006599
5	0.025306	5	0.008311	5	0.023248	5	0.007635
6	0.028943	6	0.008545	6	0.027246	6	0.008044
7	0.031210	7	0.008896	7	0.029834	7	0.008504
8	0.033848	8	0.009325	8	0.032688	8	0.009006
9	0.038394	9	0.009755	9	0.037344	9	0.009488
10	0.041481	10	0.010106	10	0.040555	10	0.009880
11	0.043654	11	0.010574	11	0.042844	11	0.010378
12	0.046420	12	0.011081	12	0.045692	12	0.010908
13	0.049334	13	0.011764	13	0.048673	13	0.011606
14	0.051534	14	0.012550	14	0.050937	14	0.012405
15	0.054610	15	0.012915	15	0.054057	15	0.012784
16	0.057794	16	0.013734	16	0.057279	16	0.013612
17	0.061067	17	0.014008	17	0.060585	17	0.013897
18	0.062232	18	0.014359	18	0.061793	18	0.014257
19	0.063397	19	0.014866	19	0.062995	19	0.014772
20	0.064562	20	0.015061	20	0.064193	20	0.014975

### Sismogrammi e Tempi Sperimentali



**Tempi Corretti e Profilo di Velocità**



**Modello di velocità**

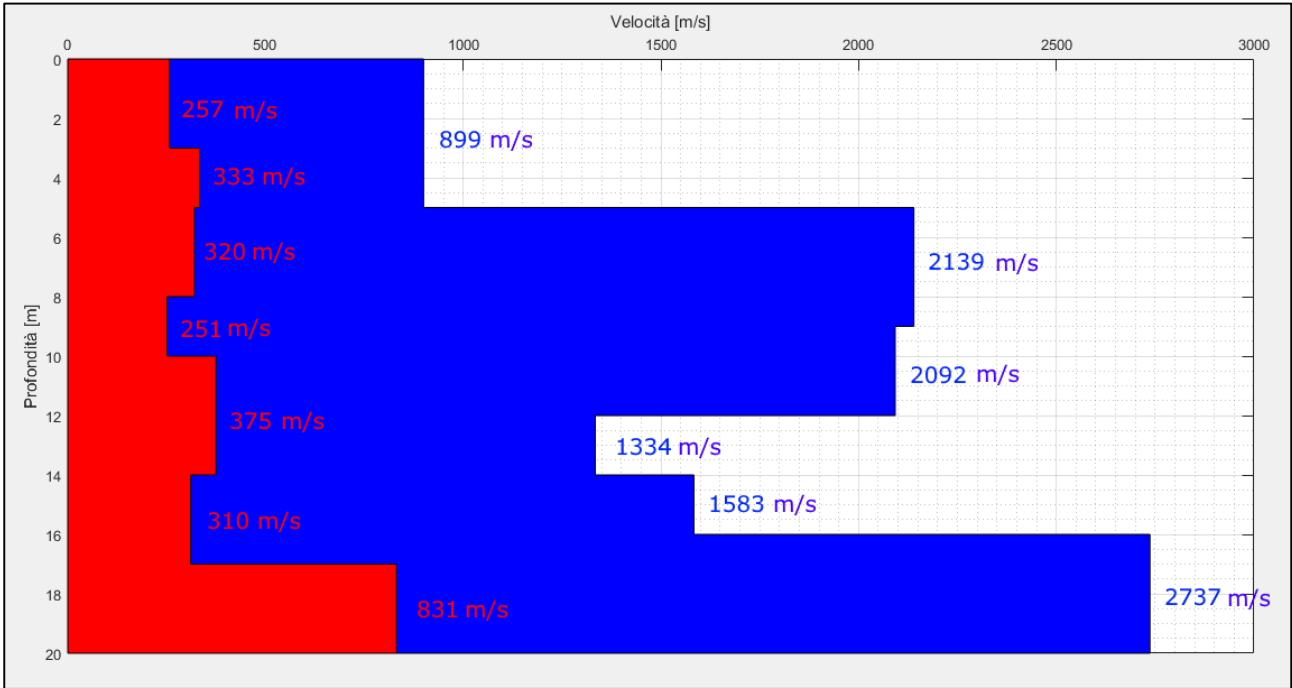






Foto – Indagine sismica Down Hole DH\_1

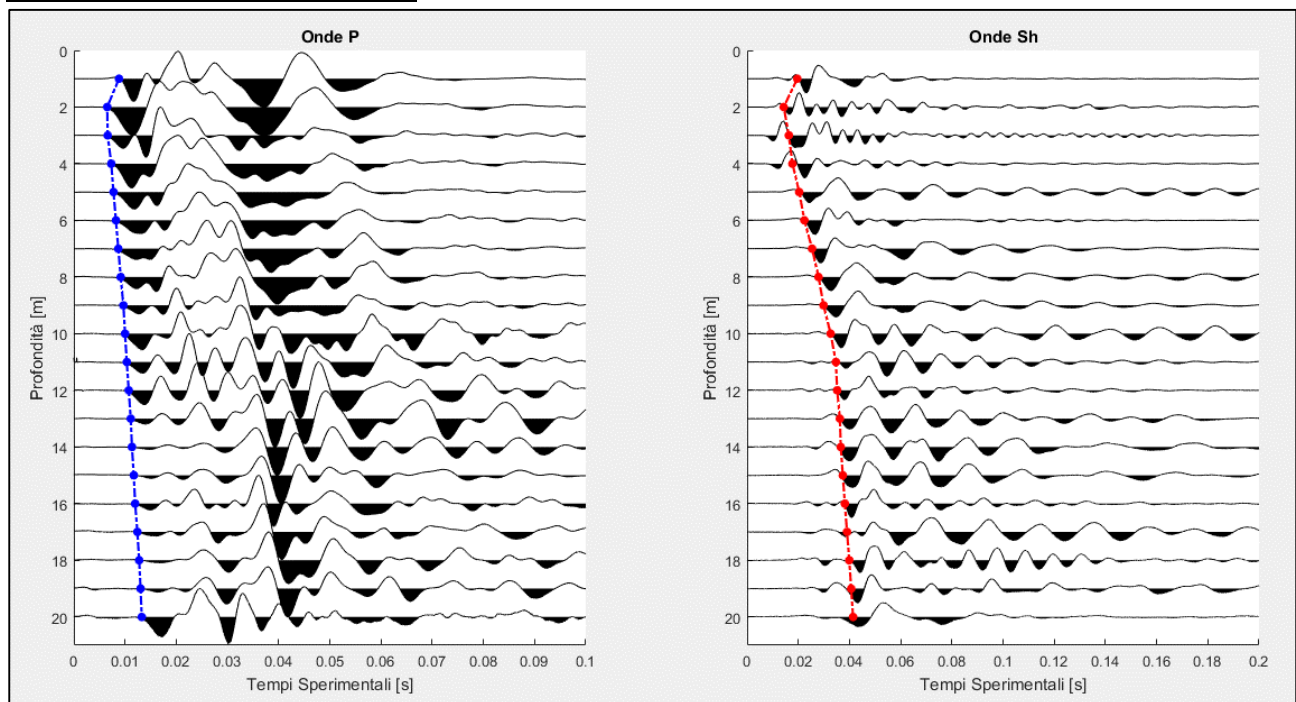


<b>Indagine</b>
Dh_2_Pratovecchio Stia

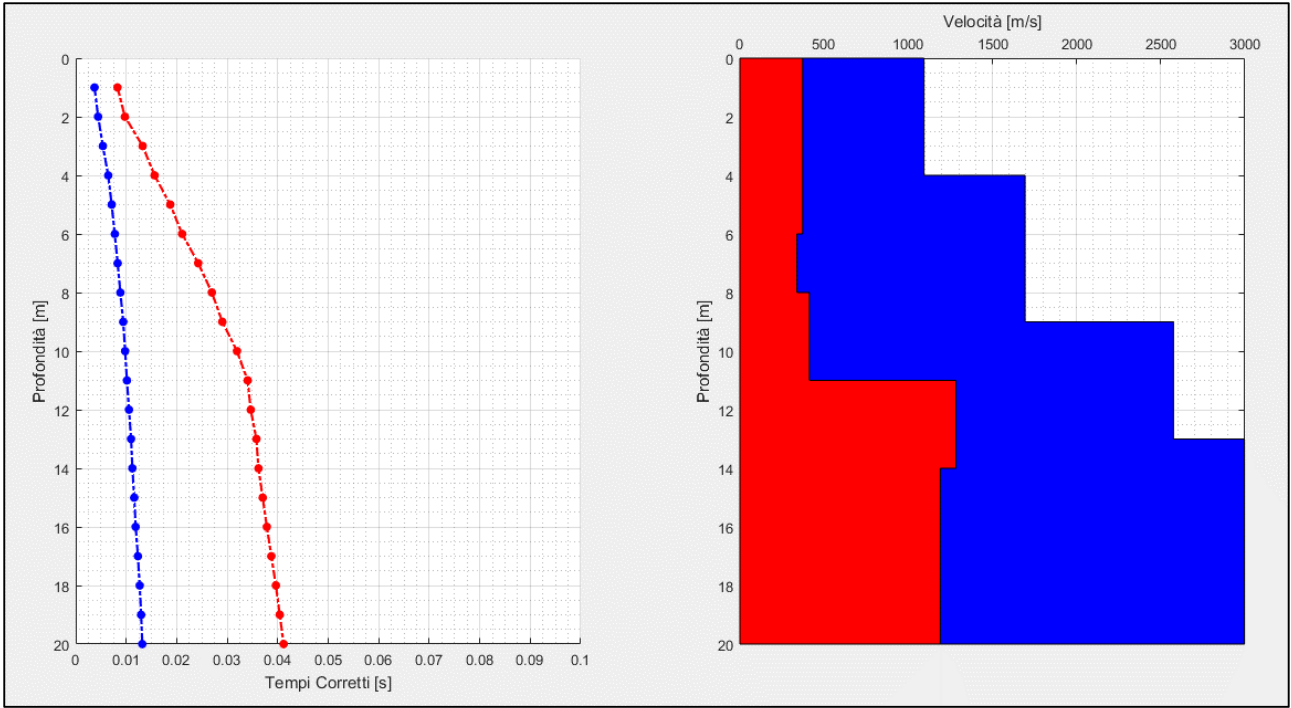
### Tabella dei Travel time

Tempi di arrivo sperimentali				Tempi di arrivo corretti			
Onde SH		Onde P		Onde SH		Onde P	
1	0.019592	1	0.008818	1	0.008263	1	0.003719
2	0.014310	2	0.006517	2	0.009747	2	0.004439
3	0.016306	3	0.006607	3	0.013254	3	0.005370
4	0.017721	4	0.007304	4	0.015609	4	0.006433
5	0.020368	5	0.007749	5	0.018711	5	0.007119
6	0.022387	6	0.008217	6	0.021075	6	0.007735
7	0.025372	7	0.008685	7	0.024254	7	0.008302
8	0.027918	8	0.009153	8	0.026961	8	0.008839
9	0.029849	9	0.009677	9	0.029032	9	0.009412
10	0.032658	10	0.010003	10	0.031929	10	0.009780
11	0.034678	11	0.010335	11	0.034034	11	0.010143
12	0.035204	12	0.010724	12	0.034653	12	0.010556
13	0.036258	13	0.011112	13	0.035772	13	0.010963
14	0.036609	14	0.011354	14	0.036185	14	0.011223
15	0.037399	15	0.011706	15	0.037021	15	0.011587
16	0.038189	16	0.011979	16	0.037849	16	0.011872
17	0.039043	17	0.012408	17	0.038734	17	0.012310
18	0.039921	18	0.012759	18	0.039640	18	0.012669
19	0.040662	19	0.013032	19	0.040404	19	0.012950
20	0.041403	20	0.013266	20	0.041166	20	0.013190

### Sismogrammi e Tempi Sperimentali



**Tempi Corretti e Profilo di Velocità**



**Modello di velocità**

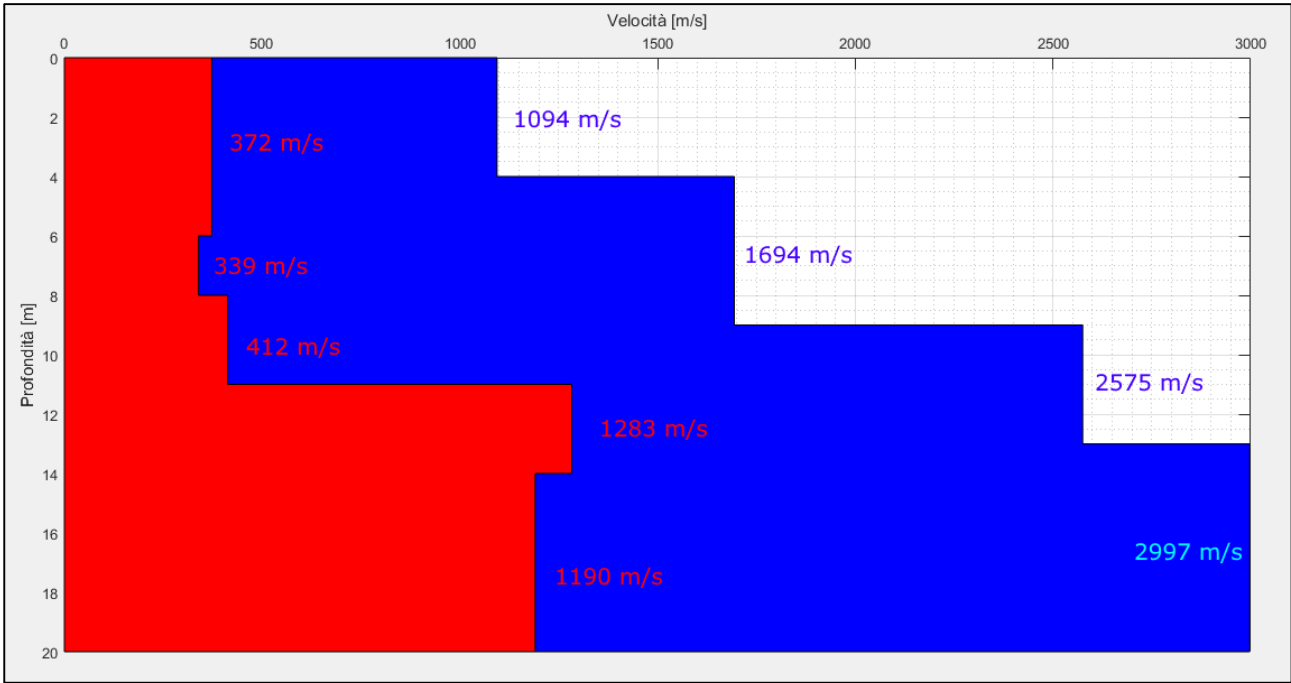




Foto – Indagine sismica Down Hole DH\_2

- **ALLEGATO GRAFICO: COLONNE STRATIGRAFICHE DEI SONDAGGI**

Srl

Sede Legale : Via Ser Gorello, 11/a - 52100 AREZZO - Cod. fiscale e Part. IVA: 01358250510

Uffici e Deposito : Via A. Grandi, 51 - 52100 AREZZO - tel: 0575 - 323501 - fax e tel: 0575 - 1979797

E-mail: [info@geognostica.it](mailto:info@geognostica.it) - [tecna@geognostica.it](mailto:tecna@geognostica.it) - Skype : tecna.ufficio - tecna.porta

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

STRATIGRAFIA

Committente Comune di Pratovecchio-Stia			Località Pratovecchio		Certificato n° / Data 061A del 05/04/2022
Cantiere Pratovecchio (AR)			Sondaggio n. DH1	Inizio / Fine Esecuzione dal 23/03/2022 al 23/03/2022	Commessa n° / Data 061 del 23/03/2022
Responsabile di sito Geol Luigi Farini	Operatore Paolo, Alessio e Alessandro	Tipo Carotaggio continuo		Tipo Sonda T41	Diametro perforazione / Diametro rivestimento 101 mm / 127 mm

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz	Cass. Catalog.	Tubo Down Hole	I - (1)
			0.10						
		Terreno vegetale.	0.50						
		Limo sabbioso argilloso color grigio brunoastro marrone.							
1		Limo sabbioso argilloso debolmente ghiaioso color marrone brunoastro.	1.50 1.80	1.50 R 1.80					
2		Prelievo campione.	2.30						
		Limo sabbioso argilloso debolmente ghiaioso color marrone brunoastro.	3.00						
3		Limo sabbioso ghiaioso debolmente argilloso color marrone bruno. Elementi ghiaiosi eterogenei (dmax 3-5 cm) costituiti da arenarie talora molto alterate e/o disgregate. Presenza sparsa di materiale carbonioso bruno nerastro.	3.60						
4									
		Limo sabbioso ghiaioso debolmente argilloso color marrone brunoastro. Elementi ghiaiosi eterogenei (dmax 3-4 cm) di natura prevalentemente arenacea e subordinatamente calcareo marnosa e calcarenitica.	4.80 5.65				# 1 5.00		
5									
6		Limo ghiaioso sabbioso debolmente argilloso color marrone brunoastro. Elementi ghiaiosi (dmax 3-4 cm) e talora ciottoli (d > 6 cm) di natura arenacea.							
7		Argilliti, argilliti marnose e argilliti siltitiche color bruno marrone grigio verdastro, destrutturate e caoticizzate. Si presentano come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.							
8									
9		Argilliti, argilliti marnose e argilliti siltitiche color grigio scuro verdastro, destrutturate e talora caoticizzate. Si presentano principalmente come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.	8.70 R 9.00 9.70 10.00				# 2 10.00		
10									
11		Prelievo campione.							
12		Argilliti, argilliti marnose e argilliti siltitiche color grigio scuro verdastro, destrutturate e talora caoticizzate. Si presentano principalmente come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.							
13									
14							(RM)		
15							# 3 15.00		
16							15.00		
17									
18									
19									
20			20.00			(CS)	# 4 20.00		
						20.00			

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT

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)

02 (23/03/22)

Responsabile di sito  
Geol. Luigi Farini

Sonda:T41

Direttore laboratorio  
Dr. Moretti Giuliano



# SONDAGGIO DH1

(lunghezza 20,0 m dal p.c.)

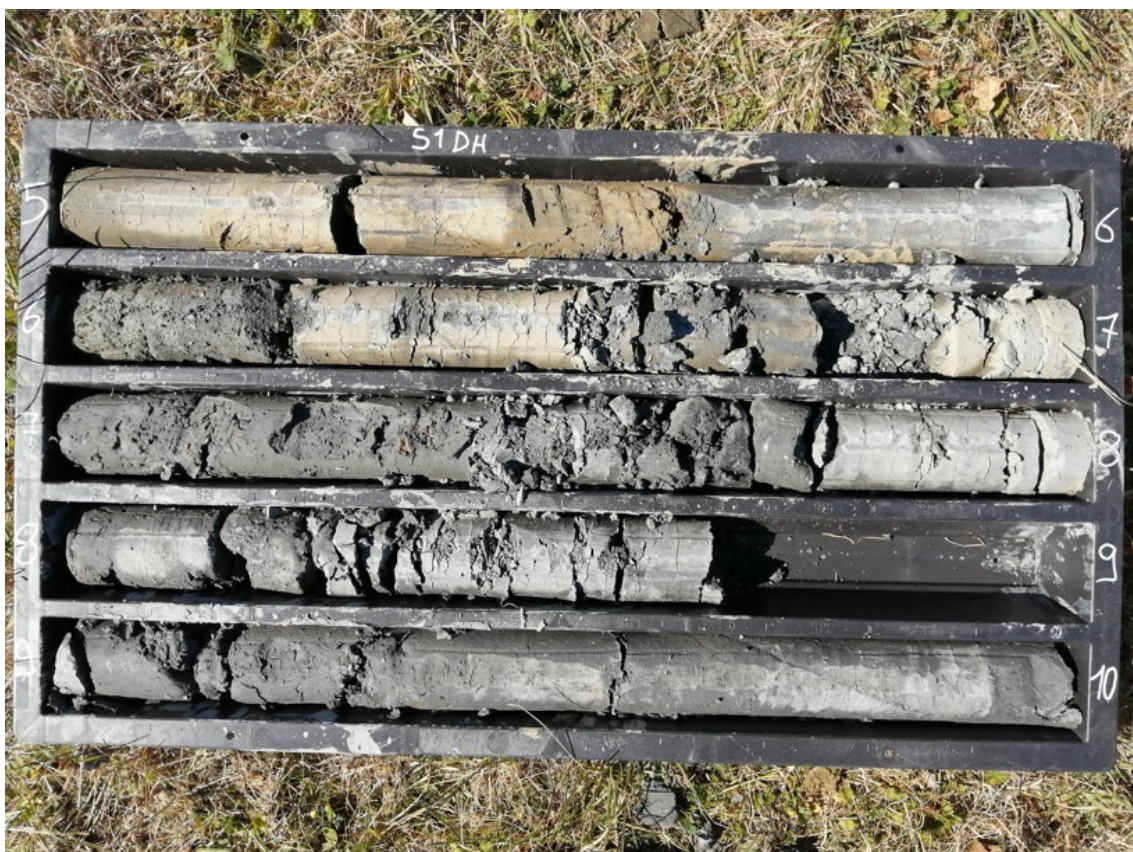


*postazione*



*(cassetta 1 – 0,0 / 5,0 m dal p.c.)*





*(cassetta 2 – 5,0 / 10,0 m dal p.c.)*



*(cassetta 3 – 10,0 / 15,0 m dal p.c.)*





*(cassetta 4 – 15,0 / 20,0 m dal p.c.)*

Committente Comune di Pratovecchio-Stia			Località Stia		Certificato n° / Data 061B del 05/04/2022	
Cantiere Stia (AR)			Sondaggio n. DH1	Inizio / Fine Esecuzione dal 24/03/2022 al 25/03/2022		Commessa n° / Data 061 del 23/03/2022
Responsabile di sito Geol Luigi Farini	Operatore Paolo, Alessio e Alessandro	Tipo Carotaggio continuo		Tipo Sonda T41	Diametro perforazione / Diametro rivestimento 101 mm / 127 mm	

Scala (m)	Litologia	Descrizione	Quota	Campioni	Metodo Perforazione	Metodo Stabilizzaz.	Cass. Catalog.	Tubo Down Hole	I - (1)
		Terreno vegetale.	0.10						
1		Limo sabbioso e con sabbia debolmente argilloso e debolmente ghiaioso color marrone brunastro.	1.50						
2		Limo sabbioso e con sabbia debolmente argilloso, da ghiaioso a debolmente ghiaioso per presenza di elementi arenacei fortemente alterati; color marrone grigio brunastro.	2.00						
3									
4		Limo ghiaioso e con ghiaia argilloso debolmente sabbioso color marrone bruno grigiastro. La ghiaia, eterometrica (dmax 3-4 cm) è costituita da pezzame e scaglie litoidi arenacee fortemente alterate.							
5									
6			6.60						
7		Prelievo campione.	7.00	6.70					
8		Limo ghiaioso e con ghiaia argilloso debolmente sabbioso color marrone bruno grigiastro. La ghiaia, eterometrica (dmax 3-4 cm) è costituita da pezzame e scaglie litoidi arenacee fortemente alterate.	8.30	7.00					
9									
10		Limo ghiaioso e con ghiaia argilloso debolmente sabbioso color grigio marrone brunastro. La ghiaia, eterometrica (dmax 3-4 cm) è costituita da pezzame e scaglie litoidi arenacee fortemente alterate.	9.85						
11			10.80						
12		Alternanza di argilliti siltitiche, argilliti marnose e siltiti argillitiche color grigio. Talora si presentano come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.	11.50						
13			12.40						
14		Arenarie a granulometria medio fine color grigio.	12.80						
15			13.40						
16		Alternanza di argilliti siltitiche, argilliti marnose e siltiti argillitiche color grigio. Talora si presentano come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.	13.60	12.80					
17									
18		Arenarie a granulometria medio fine color grigio.							
19		Alternanza di argilliti siltitiche e siltiti argillitiche color grigio. Si presentano come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.	15.60						
20			16.50						
21		Prelievo campione.							
22		Alternanza di argilliti siltitiche, argilliti marnose e siltiti argillitiche color grigio. Si presentano come pezzame e scaglie litoidi in matrice argilloso limosa.	17.30						
23			18.00						
24		Arenarie a granulometria medio fine color grigio.	18.50						
25		Alternanza di argilliti siltitiche, argilliti marnose e siltiti argillitiche color grigio.	19.60						
26			20.00						
27		Arenarie a granulometria media color grigio.							
28		Alternanza di siltiti marnose, arenarie fini e marne siltitiche color grigio.							
29		Arenarie a granulometria medio fine color grigio. Presenza di vene di calcite.							
30		Arenarie a granulometria media color grigio. Presenza di vene di calcite.							
31		Alternanza di siltiti marnose, arenarie fini e marne siltitiche color grigio.							
32									

Campioni: S-Pareti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, RS-Rimaneggiato da SPT

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

Responsabile di sito  
Geol. Luigi Farini

Sonda:T41

Direttore laboratorio  
Dr. Moretti Giuliano

Campioni prelevati n° (data prelievo)

02 (25/03/22)



# STIA - SONDAGGIO DH1

(lunghezza 20,0 m dal p.c.)



*postazione*



*(cassetta 1 – 0,0 / 5,0 m dal p.c.)*





*(cassetta 2 – 5,0 / 10,0 m dal p.c.)*



*(cassetta 3 – 10,0 / 15,0 m dal p.c.)*





*(cassetta 4 – 15,0 / 20,0 m dal p.c.)*

- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**





Legenda



Via Andrea Del Castagno,8  
50132 Firenze (FI)  
Tel/Fax: 055571393

Esecutori indagini geofisiche e geognostiche:  
Dott. Geol. Francesco Puccetti  
Dott. Geol. Cristian Pieroni

- 

Sismica a Rifrazione in onde P-Sh
- 

Prova sismica in foro Down-Hole

