

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

# MICROZONAZIONE SISMICA

## RELAZIONE DELLE INDAGINI GEOFISICHE

### Regione Toscana Comune di Ortignano Raggiolo (AR)



Regione	Soggetto realizzatore:	Data
Regione Toscana – Settore Sismica	Comune di Ortignano Raggiolo /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 – BIBLIOGRAFIA</b>	<b>12</b>

## **ALLEGATI**

- ALLEGATO GRAFICO: ELABORAZIONI INDAGINI SISMICA A RIFRAZIONE P/SH
- 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 Ortignano Raggiolo (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 Ortignano Raggiolo sia in aree urbane sia in aree limitrofe per meglio correlare ed interpretare i dati ottenuti.

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

### **1.2 – INDAGINI GEOFISICHE ESEGUITE**

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

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

### **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).

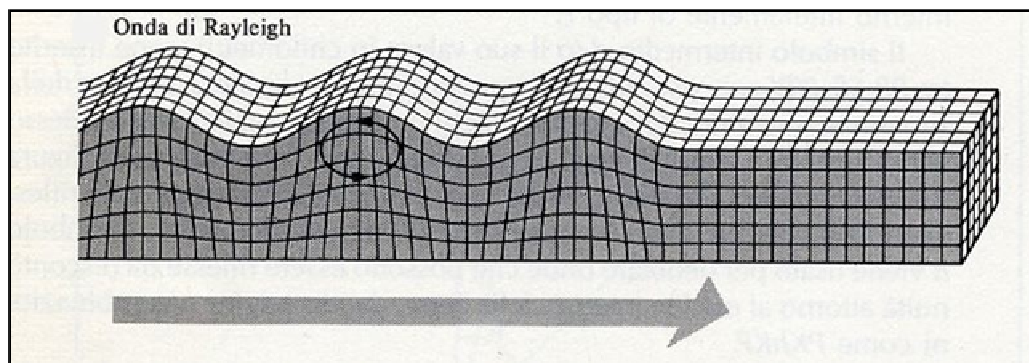


Fig. 1 - Schema di propagazione delle Onde di Rayleigh (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

#### **- 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.

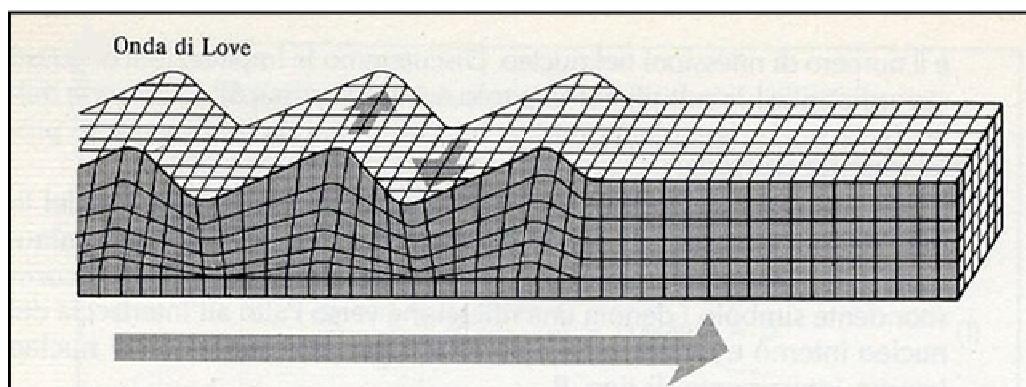


Fig. 2 - Schema di propagazione delle onde di Love (fonte immagine [www.ingv.it](http://www.ingv.it))

## **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).

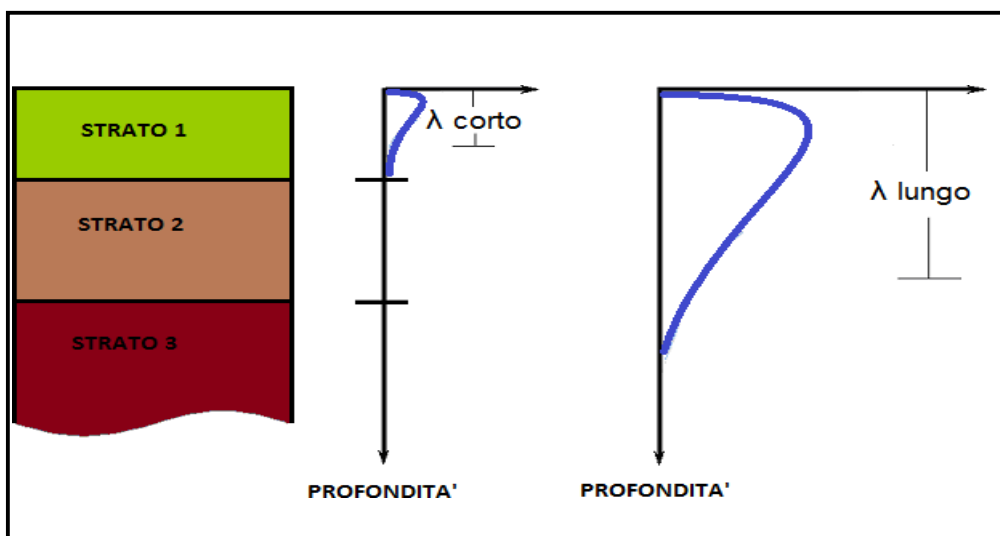


Fig. 3 - Corrispondenza tra lunghezza d'onda e profondità investigata

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).

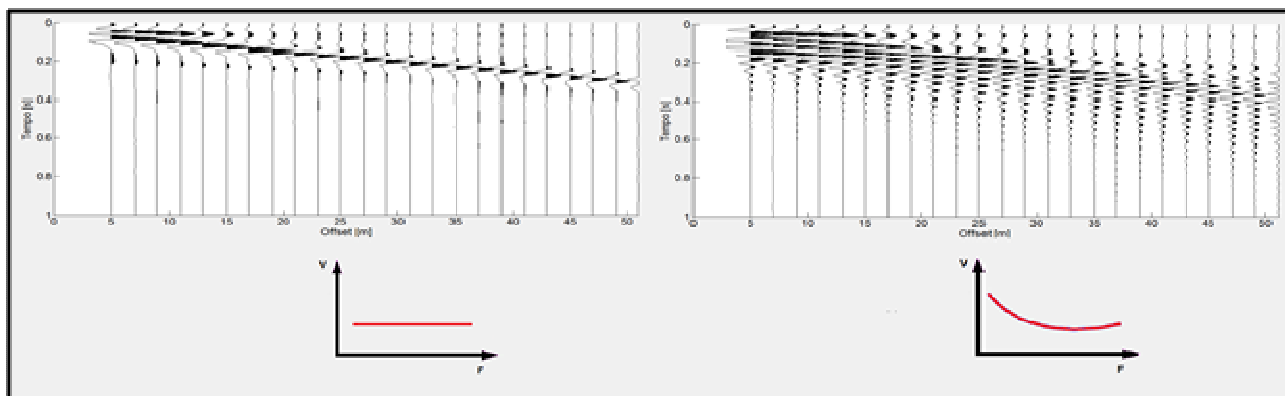


Fig. 4 - A sinistra, sismogramma risultante su terreno non dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione. A destra, sismogramma risultante su terreno dispersivo con sotto relativo andamento della curva di dispersione.

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).

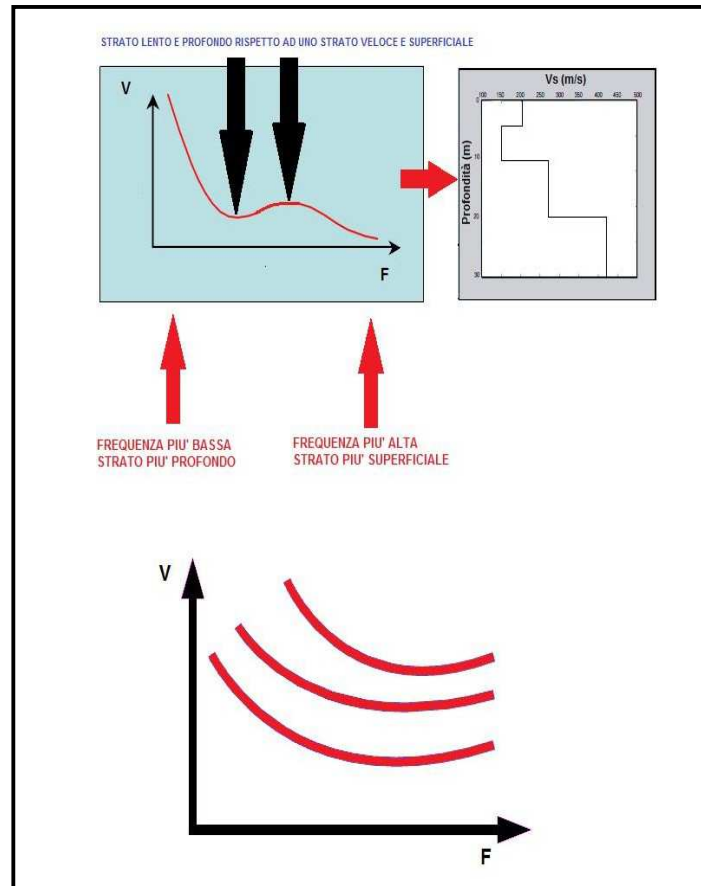


Fig. 5 - In alto, curva di dispersione con la presenza di inversione di velocità. In basso, andamento tipico della curva di dispersione (Modo Fondamentale e Modi Superiori); all'aumentare della frequenza diminuisce la velocità.

### **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 – 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: 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

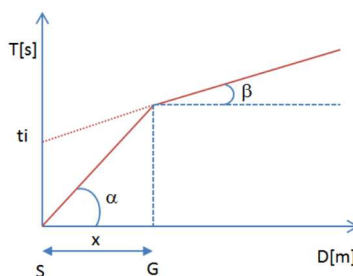
$$T = x_i / V_1$$

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

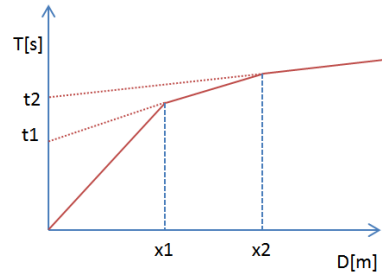
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

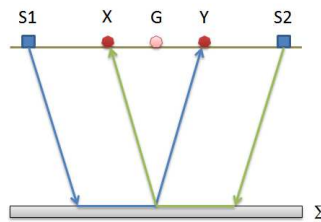


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

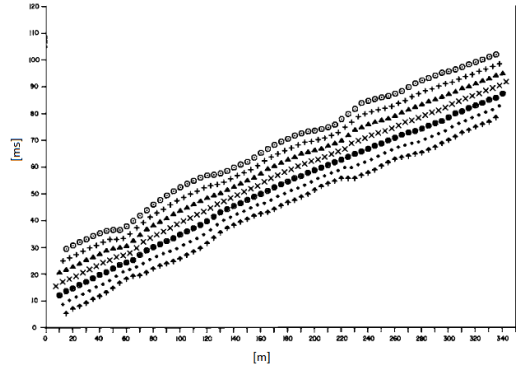
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



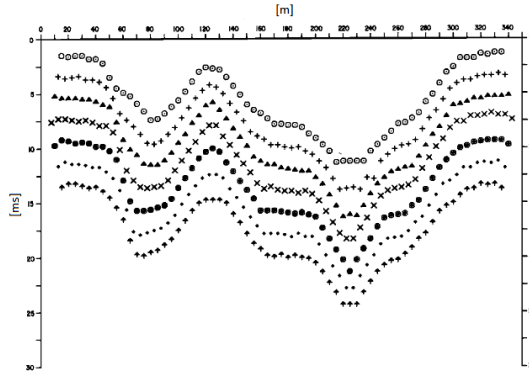
dove  $T_{S_1Y}$  e  $T_{S_2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S_1S_2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è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

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

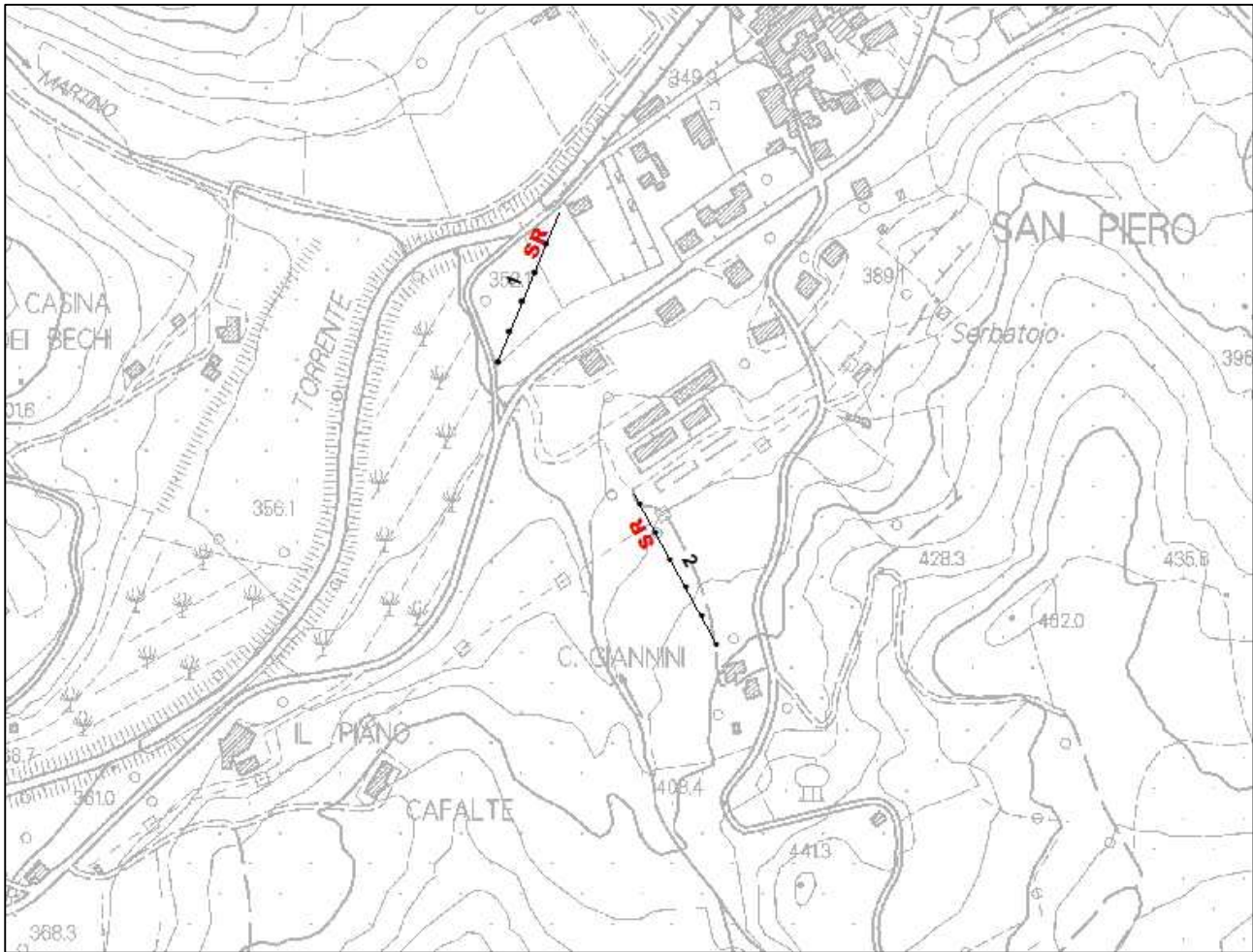
---

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

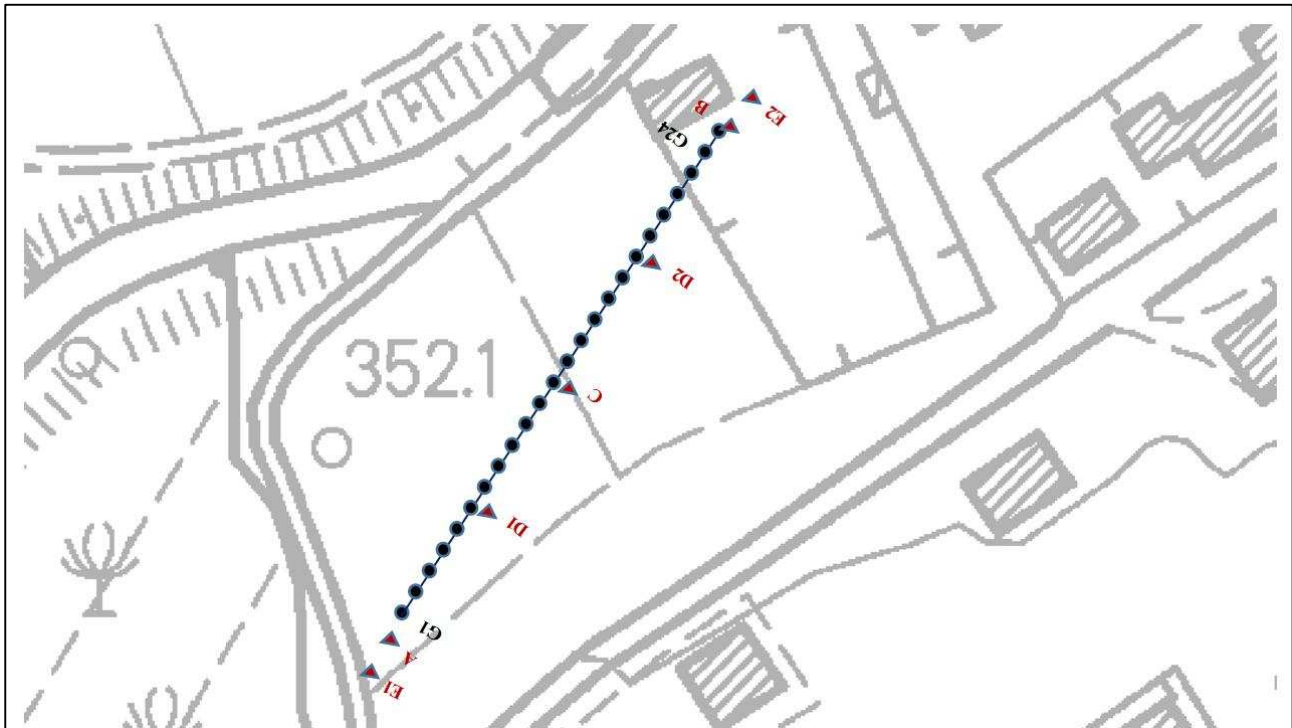
Uno dei principali vantaggi del G.R.M. è che il fattore di conversione della profondità è relativamente insensibile alle inclinazioni fino a circa  $20^\circ$



**Planimetria Scala 1:5000**



**Planimetria Scala 1:1000**



---

## Geometria dello stendimento

Numero Geofoni: 24

Intervallo (m): 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

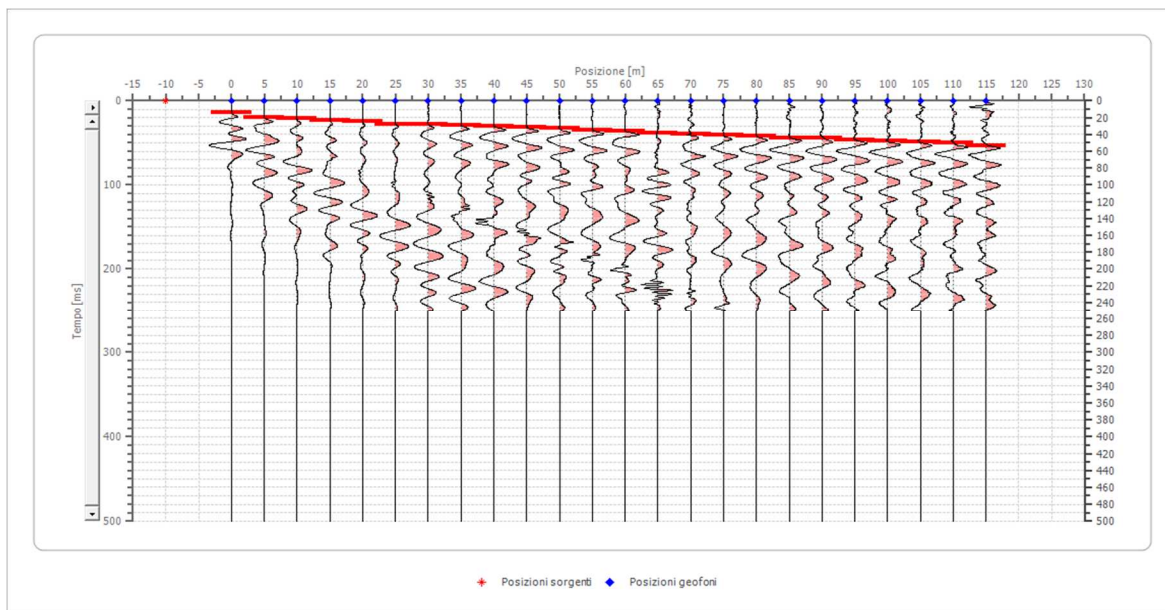
	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	0.0
2	5.0	0.0
3	10.0	0.0
4	15.0	0.0
5	20.0	0.0
6	25.0	0.0
7	30.0	0.0
8	35.0	0.0
9	40.0	0.0
10	45.0	0.0
11	50.0	0.0
12	55.0	0.0
13	60.0	0.0
14	65.0	0.0
15	70.0	0.0
16	75.0	0.0
17	80.0	0.0
18	85.0	0.0
19	90.0	0.0
20	95.0	0.0
21	100.0	0.0
22	105.0	0.0
23	110.0	0.0
24	115.0	0.0

## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -10 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

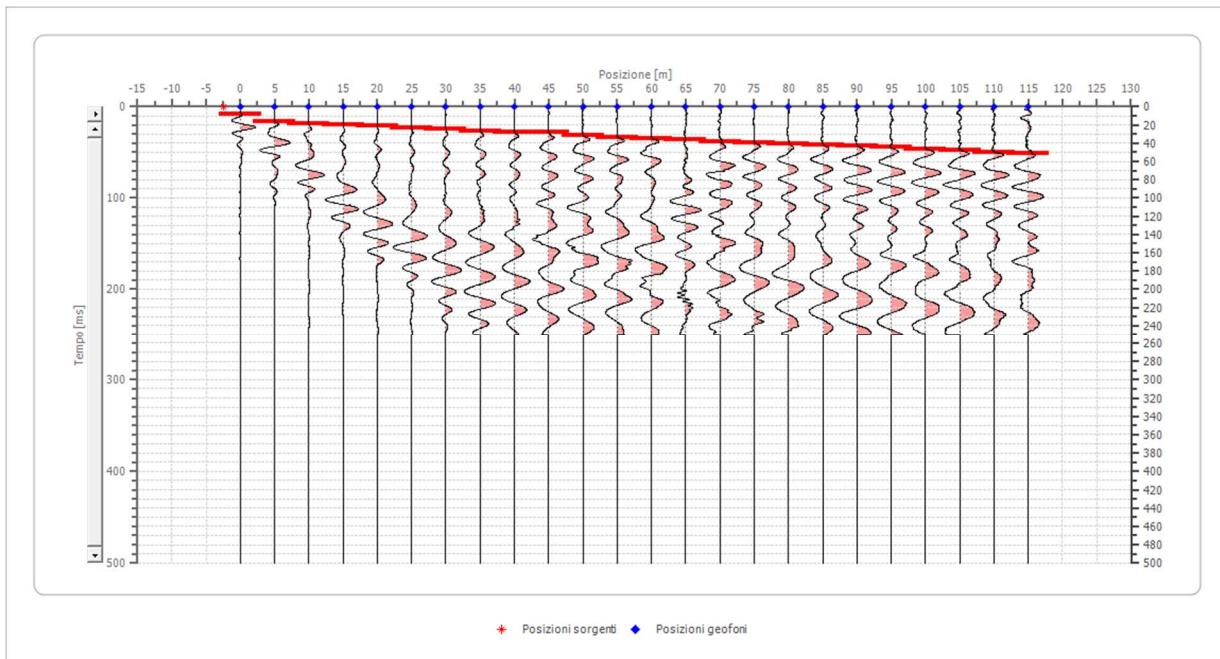


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	14.2657
5.0	20.0000
10.0	21.0000
15.0	23.2500
20.0	24.5000
25.0	27.7500
30.0	28.0000
35.0	29.5000
40.0	30.4335
45.0	31.7500
50.0	32.3356
55.0	35.0000
60.0	36.0000
65.0	38.0418
70.0	39.9439
75.0	41.2500
80.0	41.7500
85.0	44.2500
90.0	44.0000
95.0	47.0000
100.0	47.5523
105.0	48.5033
110.0	49.4544
115.0	53.5000

## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

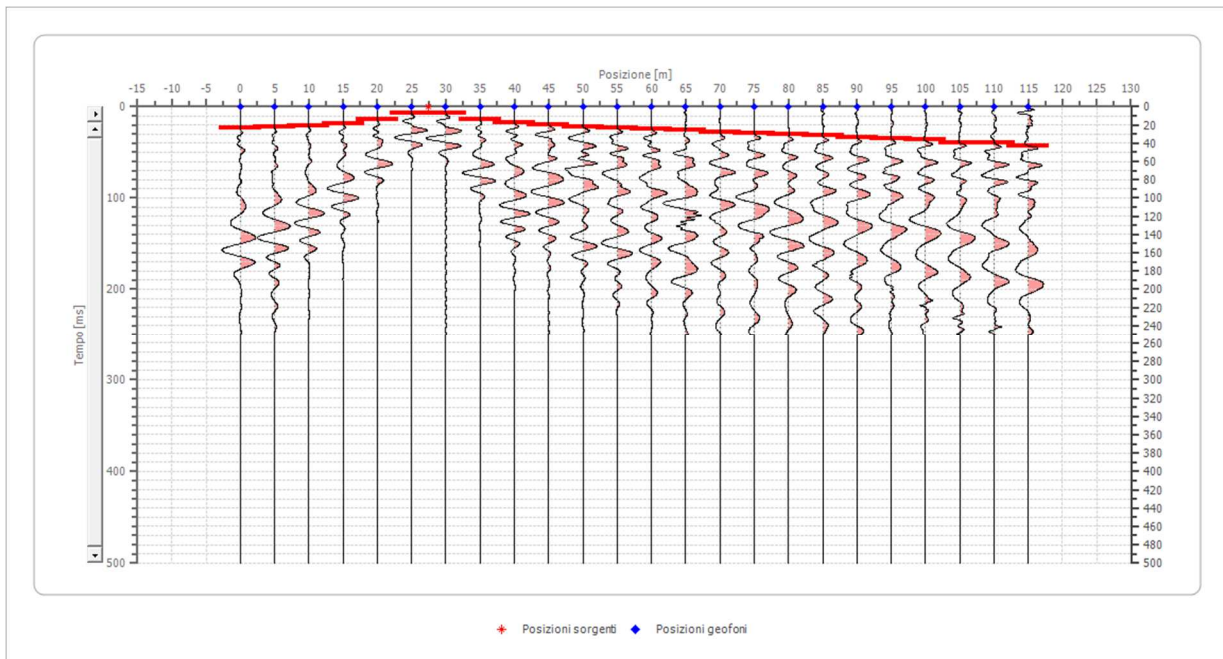
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	7.6084
5.0	16.1678
10.0	18.0699
15.0	20.0000
20.0	21.2500
25.0	22.7500
30.0	24.7500
35.0	26.6293
40.0	27.5803
45.0	28.2500
50.0	31.7500
55.0	33.5000
60.0	34.5000
65.0	36.1397
70.0	38.0418
75.0	39.7500
80.0	41.2500
85.0	42.2500
90.0	42.7500
95.0	43.7500
100.0	46.0000
105.0	48.0000
110.0	49.4544
115.0	51.3565

### Battuta 3

Posizione sorgente X      27.5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]

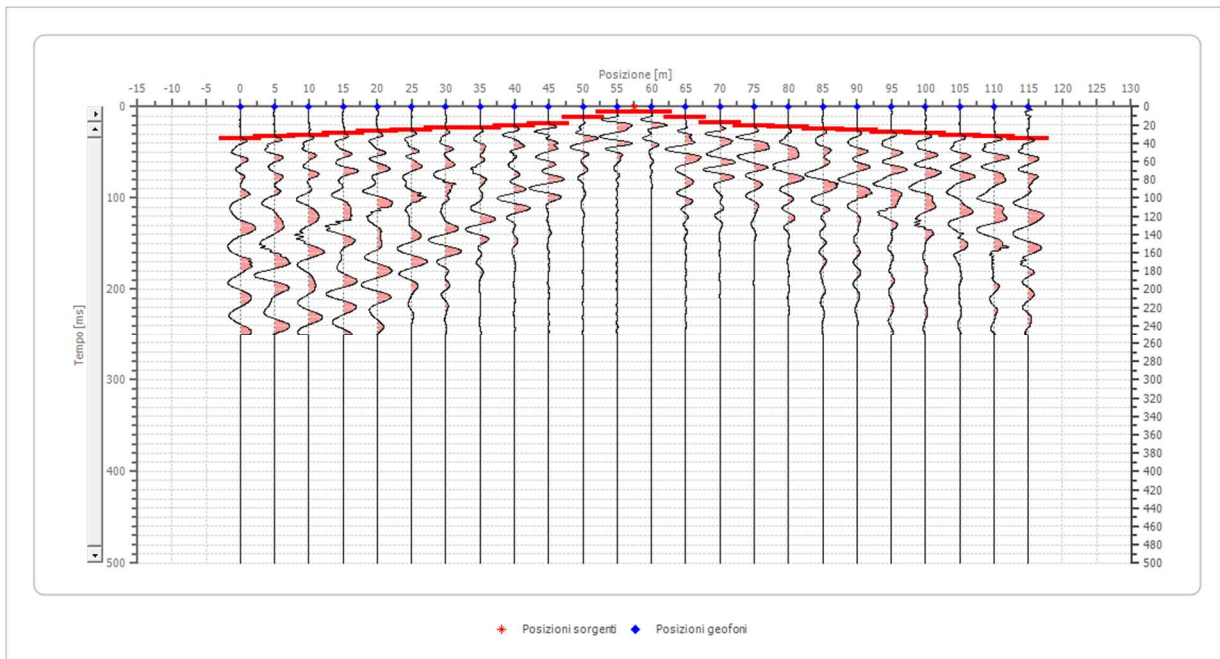


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	23.7761
5.0	21.8741
10.0	21.0000
15.0	19.0209
20.0	14.2657
25.0	6.6573
30.0	6.6573
35.0	14.2657
40.0	17.1188
45.0	20.0000
50.0	21.8741
55.0	22.8251
60.0	24.0000
65.0	25.6782
70.0	27.5803
75.0	29.4824
80.0	30.7500
85.0	31.7500
90.0	33.2866
95.0	35.1887
100.0	36.1397
105.0	38.9929
110.0	39.9439
115.0	42.7971



#### Battuta 4

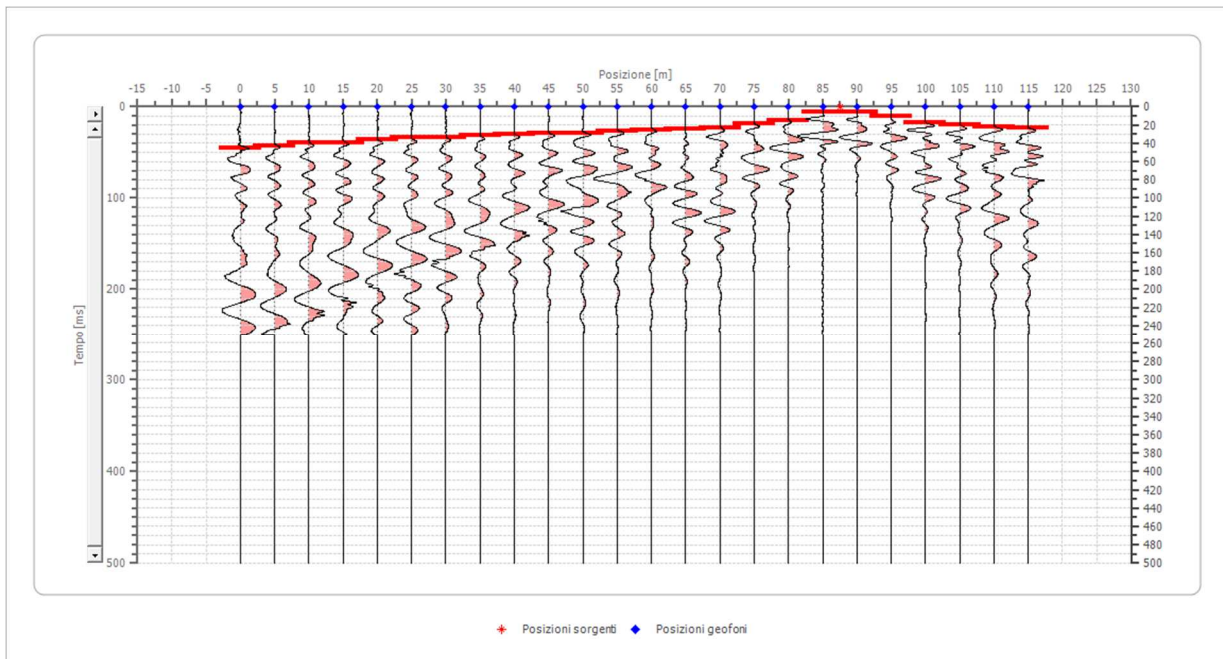
Posizione sorgente X      57.5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	35.1887
5.0	32.3356
10.0	31.3845
15.0	29.4824
20.0	26.6293
25.0	25.6782
30.0	23.7761
35.0	22.8251
40.0	20.9230
45.0	18.0699
50.0	11.4125
55.0	5.7063
60.0	5.7063
65.0	11.4125
70.0	17.1188
75.0	20.9230
80.0	21.8741
85.0	24.7272
90.0	25.6782
95.0	27.5803
100.0	29.4824
105.0	31.3845
110.0	32.3356
115.0	35.1887

## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]  
 Posizione sorgente Z 0 [m]

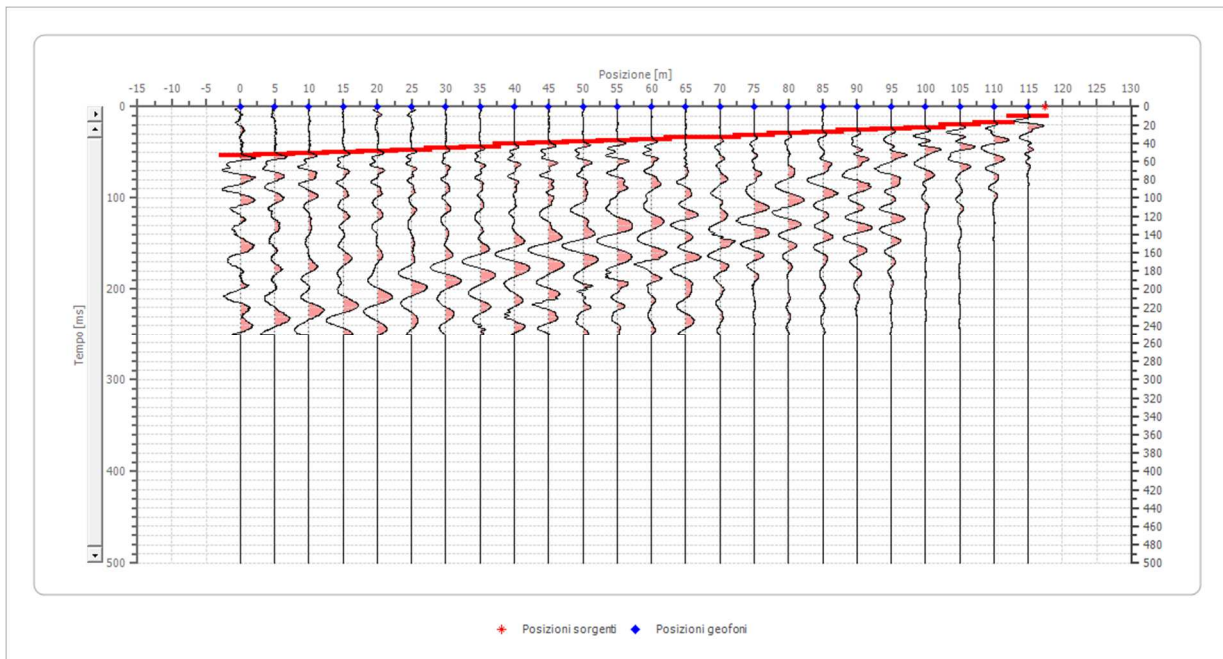


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	45.6502
5.0	42.7971
10.0	39.9439
15.0	38.9929
20.0	36.1397
25.0	34.2376
30.0	33.2866
35.0	31.3845
40.0	30.4335
45.0	29.4824
50.0	28.5314
55.0	26.6293
60.0	25.6782
65.0	24.7272
70.0	22.8251
75.0	19.0209
80.0	15.2167
85.0	5.7063
90.0	5.7063
95.0	10.4615
100.0	17.1188
105.0	19.9720
110.0	21.8741
115.0	22.8251

## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



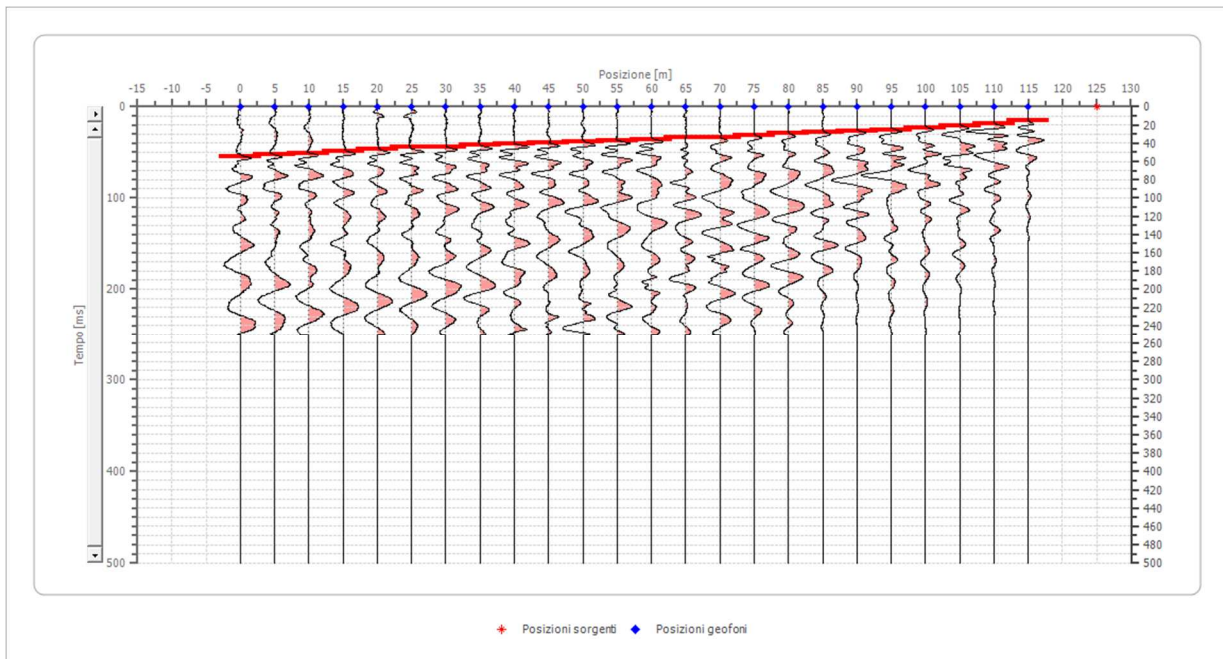
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	53.2586
5.0	52.3075
10.0	51.3565
15.0	50.4054
20.0	48.5033
25.0	47.5523
30.0	45.6502
35.0	43.7481
40.0	40.8950
45.0	39.9439
50.0	38.0418
55.0	37.0908
60.0	36.1397
65.0	34.2376
70.0	33.2866
75.0	31.3845
80.0	29.4824
85.0	27.5803
90.0	25.6782
95.0	24.7272
100.0	22.8251
105.0	19.9720
110.0	17.1188
115.0	10.4615



## Battuta 7

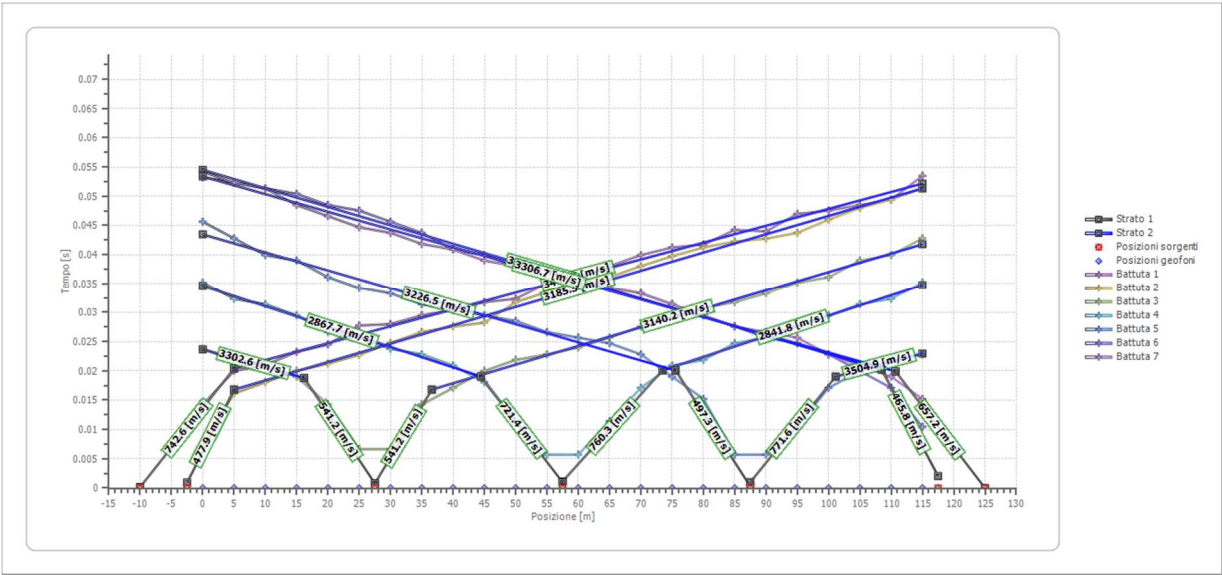
Posizione sorgente X 125 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

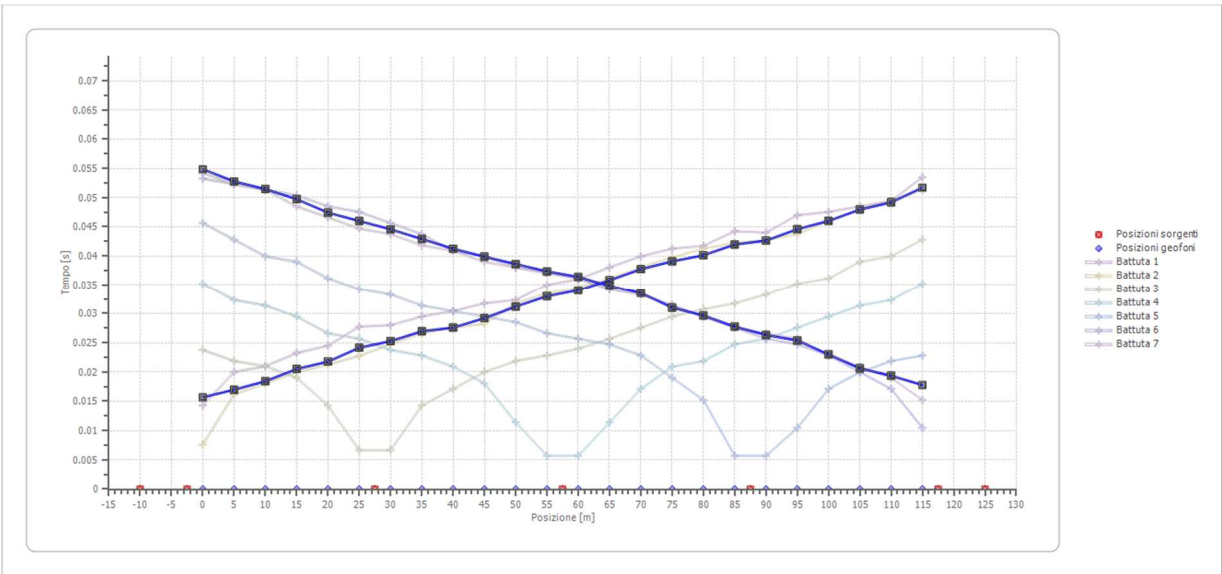


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	54.2096
5.0	52.3075
10.0	51.3565
15.0	48.5033
20.0	46.6012
25.0	44.6991
30.0	43.7481
35.0	41.8460
40.0	40.8950
45.0	38.9929
50.0	38.0418
55.0	37.0908
60.0	36.1397
65.0	34.2376
70.0	33.2866
75.0	31.3845
80.0	29.4824
85.0	27.5803
90.0	26.6293
95.0	25.6782
100.0	22.8251
105.0	20.9230
110.0	19.0209
115.0	15.2167

# Dromocrone



# Dromocrone traslate

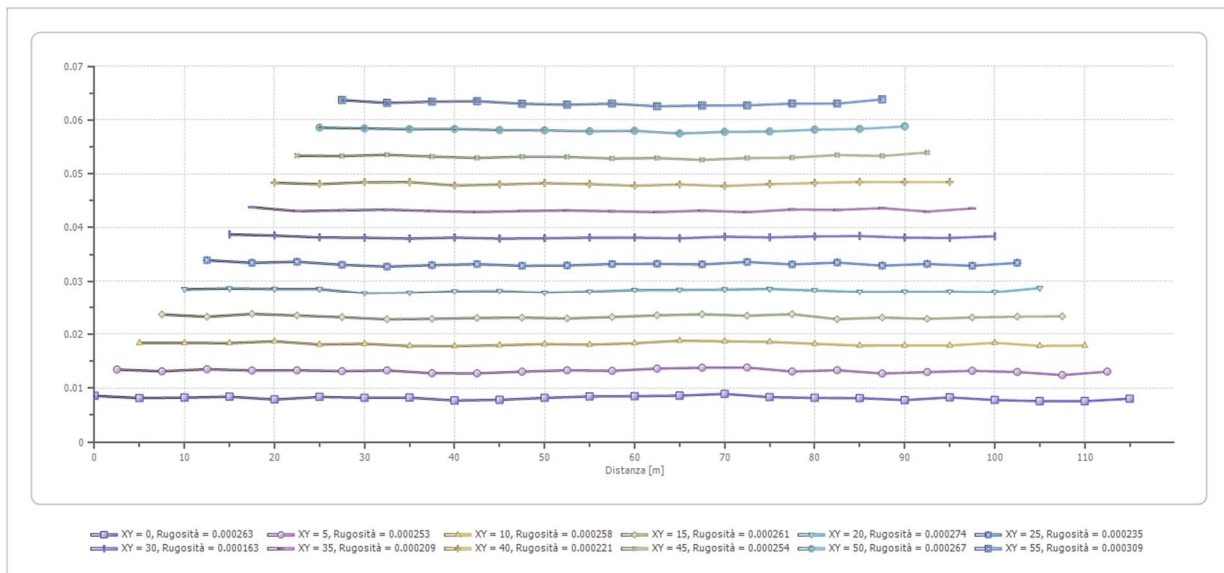
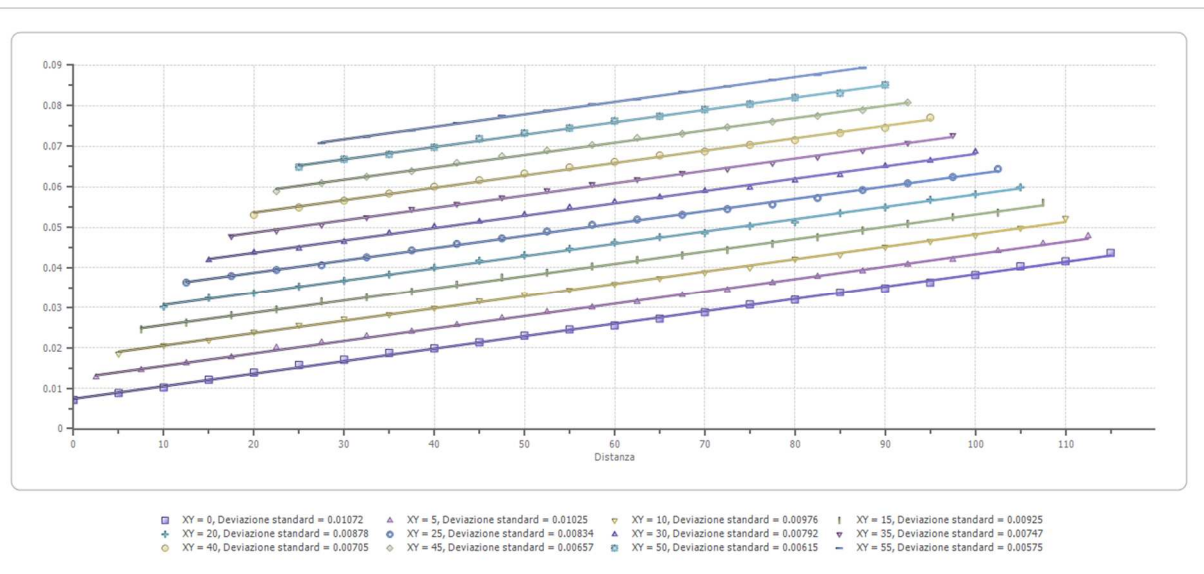


---

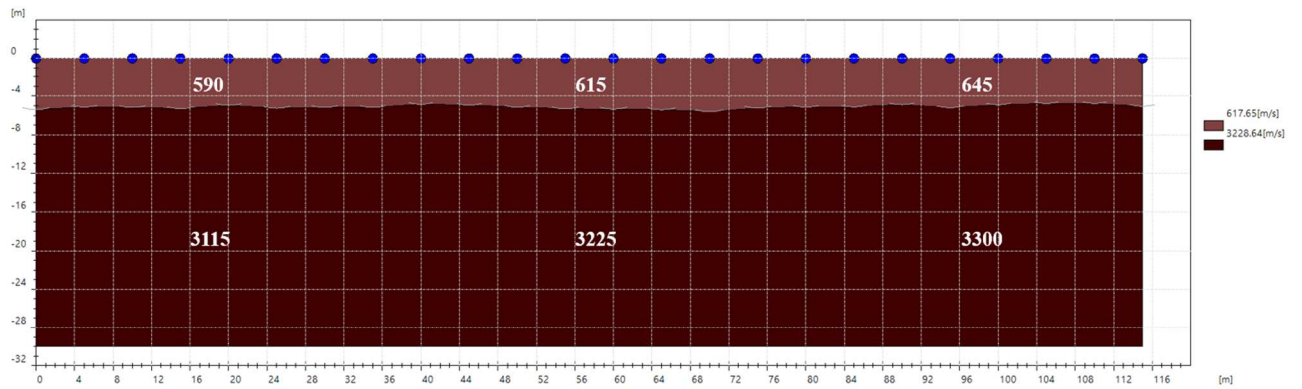
**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	5.4	--
G= 5.0 [m]	5.1	--
G= 10.0 [m]	5.2	--
G= 15.0 [m]	5.3	--
G= 20.0 [m]	5.0	--
G= 25.0 [m]	5.3	--
G= 30.0 [m]	5.2	--
G= 35.0 [m]	5.2	--
G= 40.0 [m]	4.8	--
G= 45.0 [m]	4.9	--
G= 50.0 [m]	5.2	--
G= 55.0 [m]	5.3	--
G= 60.0 [m]	5.3	--
G= 65.0 [m]	5.4	--
G= 70.0 [m]	5.6	--
G= 75.0 [m]	5.2	--
G= 80.0 [m]	5.1	--
G= 85.0 [m]	5.1	--
G= 90.0 [m]	4.9	--
G= 95.0 [m]	5.2	--
G= 100.0 [m]	4.9	--
G= 105.0 [m]	4.8	--
G= 110.0 [m]	4.8	--
G= 115.0 [m]	5.1	--
Velocità [m/sec]	617.6	3228.6
Descrizione		



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

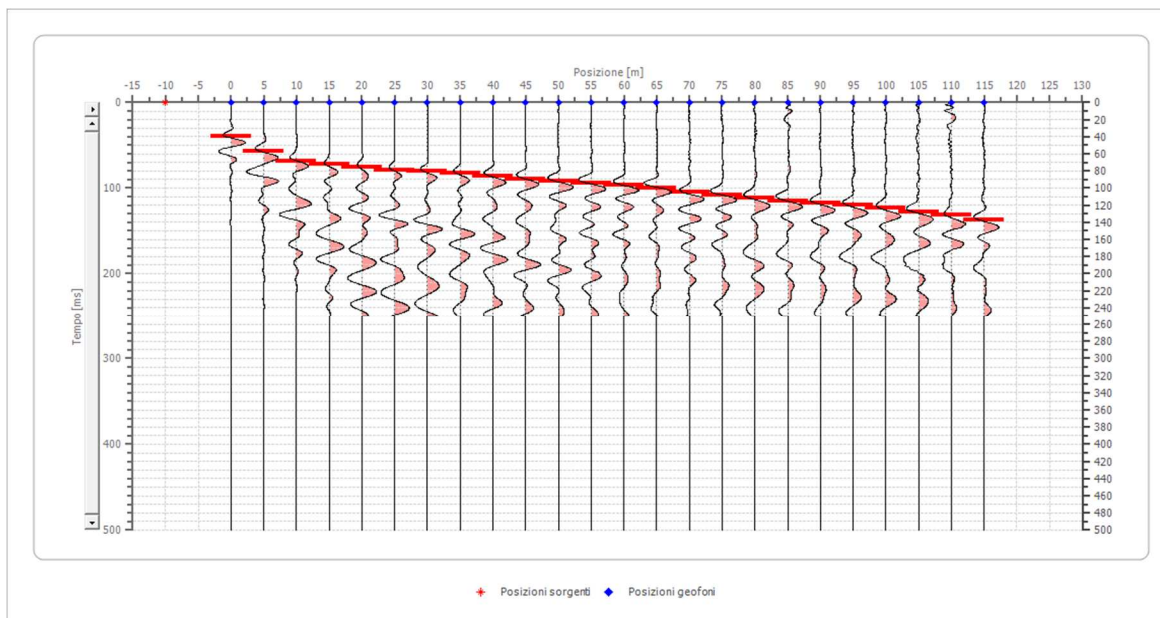


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -10 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]



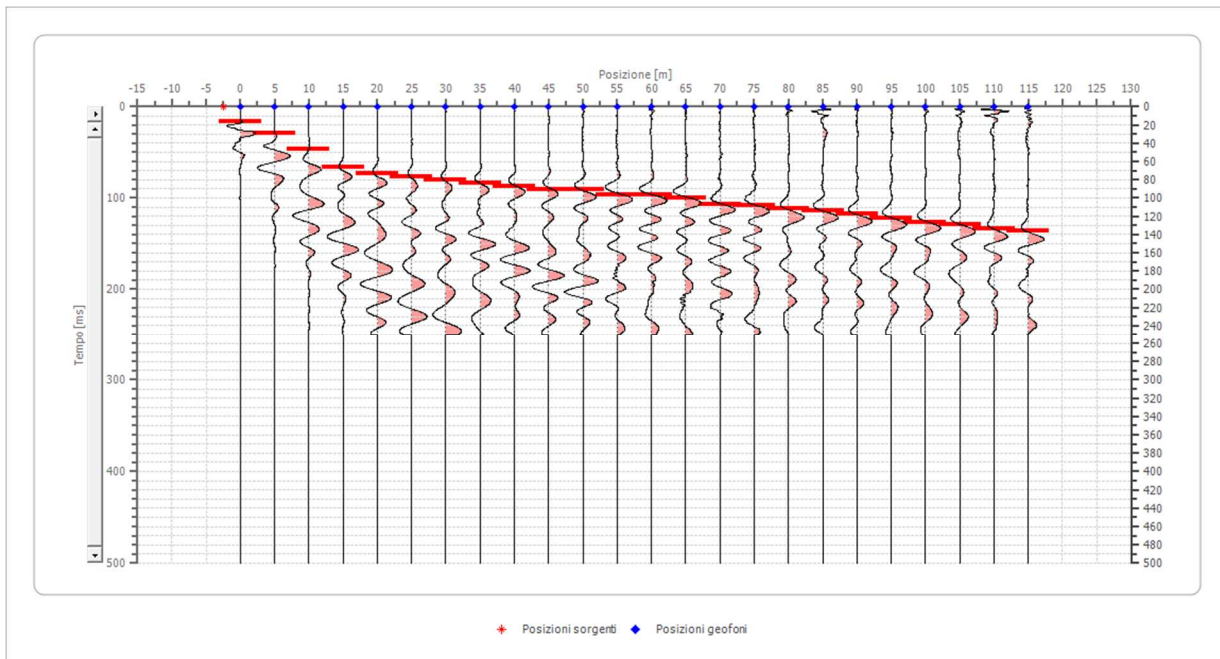
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	38.9734
5.0	57.0342
10.0	68.4411
15.0	72.2433
20.0	75.0951
25.0	78.8973
30.0	80.7985
35.0	82.6996
40.0	86.5019
45.0	89.3536
50.0	92.2053
55.0	94.1065
60.0	96.9582
65.0	99.8099
70.0	104.5627
75.0	108.3650
80.0	111.2167
85.0	115.0190
90.0	117.8707
95.0	119.7719
100.0	123.5741
105.0	128.3270
110.0	131.1787
115.0	136.8821



## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

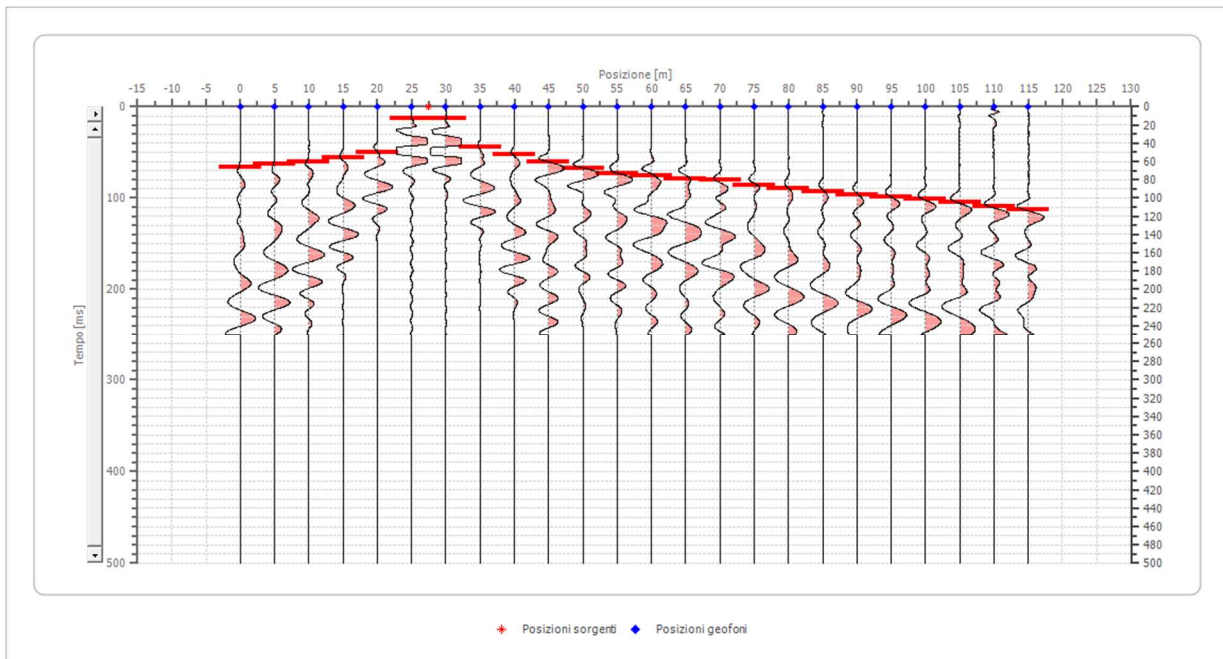
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	16.1597
5.0	29.4677
10.0	46.5779
15.0	66.5399
20.0	73.1939
25.0	76.9962
30.0	79.8479
35.0	83.6502
40.0	87.4525
45.0	91.2548
50.0	91.2548
55.0	96.0076
60.0	96.9582
65.0	99.8099
70.0	107.4144
75.0	108.3650
80.0	112.1673
85.0	114.0684
90.0	117.8707
95.0	121.6730
100.0	126.4259
105.0	129.2776
110.0	134.0304
115.0	135.9316

### Battuta 3

Posizione sorgente X      27.5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]



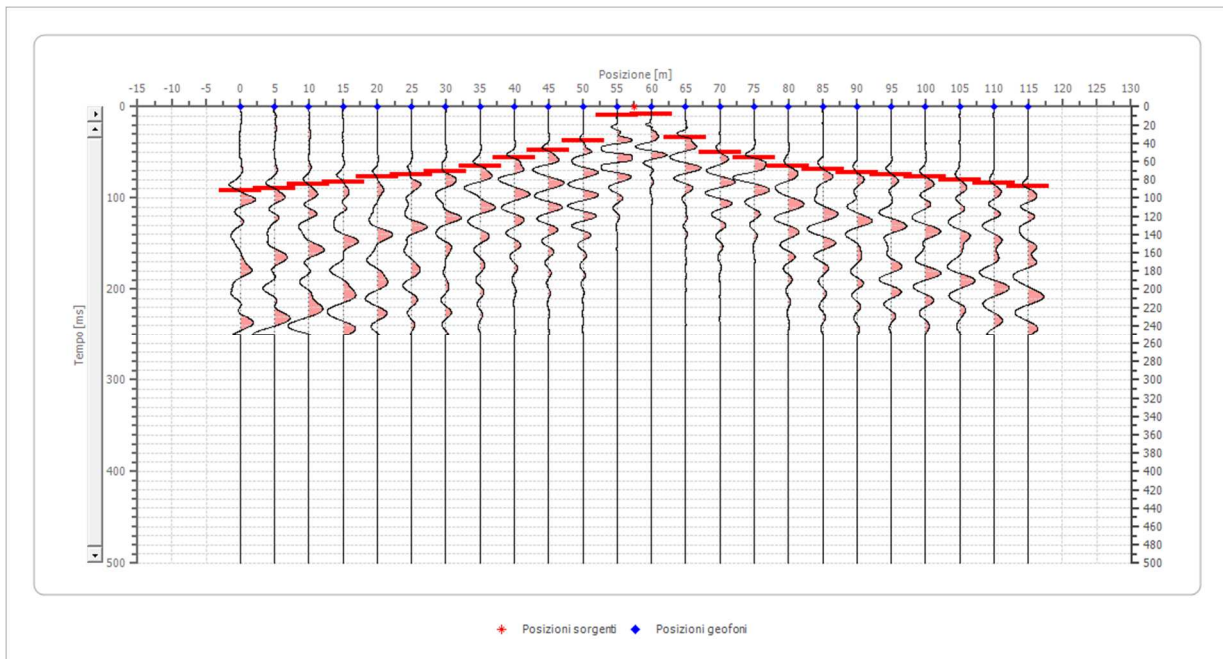
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	66.5399
5.0	62.7376
10.0	60.8365
15.0	56.0837
20.0	49.4297
25.0	12.3574
30.0	12.3574
35.0	44.6768
40.0	52.2814
45.0	60.8365
50.0	67.4905
55.0	73.1939
60.0	75.0951
65.0	78.8973
70.0	80.7985
75.0	85.5513
80.0	89.3536
85.0	93.1559
90.0	96.9582
95.0	98.8593
100.0	100.7605
105.0	104.5627
110.0	109.3156
115.0	113.1179



#### Battuta 4

Posizione sorgente X 57.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

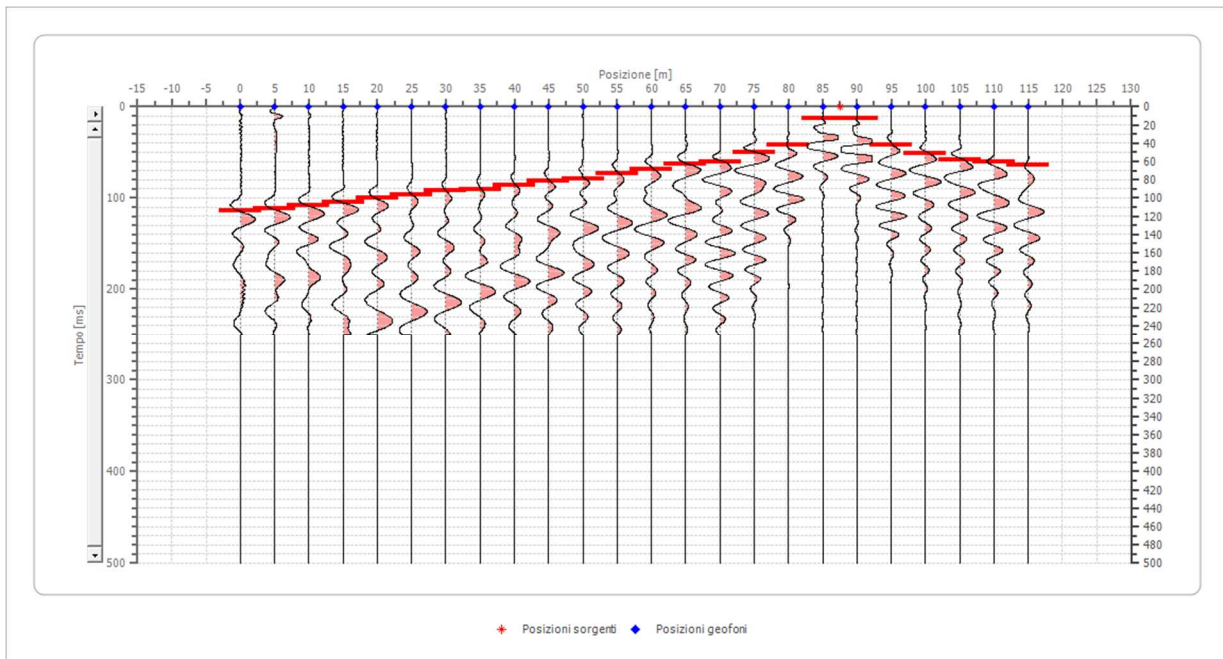


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	92.2053
5.0	89.3536
10.0	84.6008
15.0	82.6996
20.0	76.9962
25.0	74.1445
30.0	71.2928
35.0	64.6388
40.0	56.0837
45.0	47.5285
50.0	37.0722
55.0	9.5057
60.0	8.5551
65.0	34.2205
70.0	50.3802
75.0	56.0837
80.0	64.6388
85.0	68.4411
90.0	72.2433
95.0	74.1445
100.0	76.9962
105.0	80.7985
110.0	83.6502
115.0	87.4525

## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

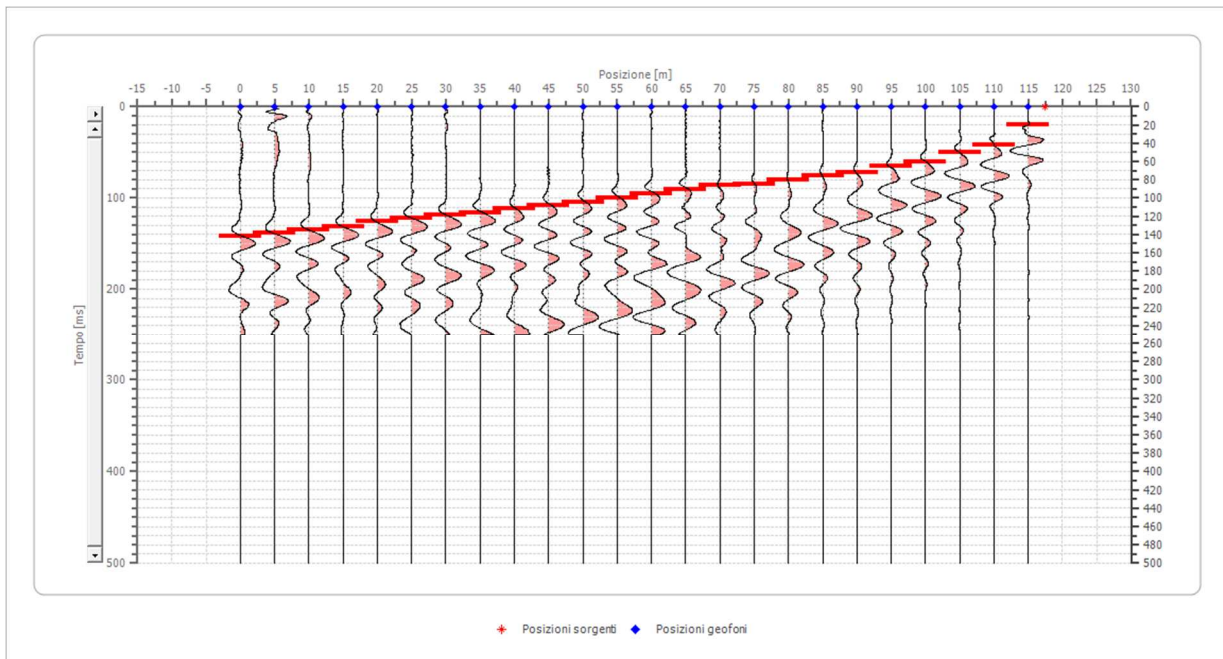


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	114.0684
5.0	111.2167
10.0	108.3650
15.0	104.5627
20.0	99.8099
25.0	96.0076
30.0	92.2053
35.0	90.3042
40.0	86.5019
45.0	81.7490
50.0	78.8973
55.0	73.1939
60.0	68.4411
65.0	62.7376
70.0	59.8859
75.0	50.3802
80.0	41.8251
85.0	12.3574
90.0	12.3574
95.0	41.8251
100.0	51.3308
105.0	57.9848
110.0	60.8365
115.0	63.6882

## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

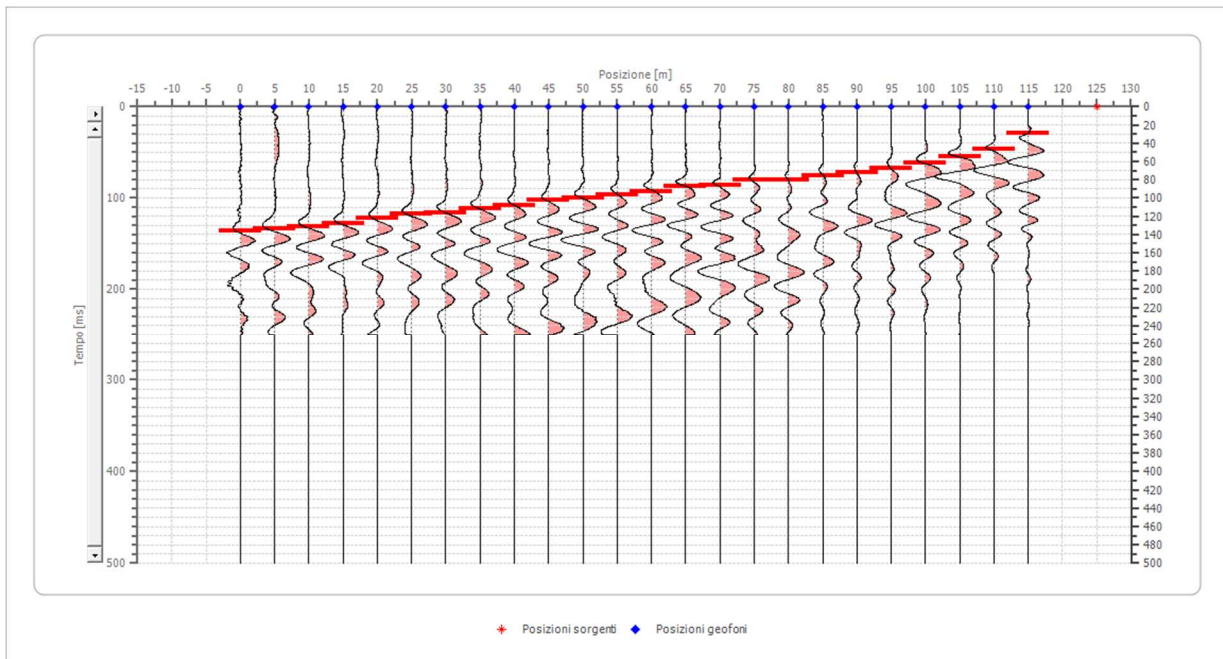


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	141.6350
5.0	137.8327
10.0	134.9810
15.0	131.1787
20.0	125.4753
25.0	121.6730
30.0	118.8213
35.0	115.9696
40.0	112.1673
45.0	108.3650
50.0	104.5627
55.0	99.8099
60.0	95.0570
65.0	90.3042
70.0	86.5019
75.0	84.6008
80.0	80.7985
85.0	76.0456
90.0	72.2433
95.0	65.5894
100.0	60.8365
105.0	50.3802
110.0	41.8251
115.0	19.9620

## Battuta 7

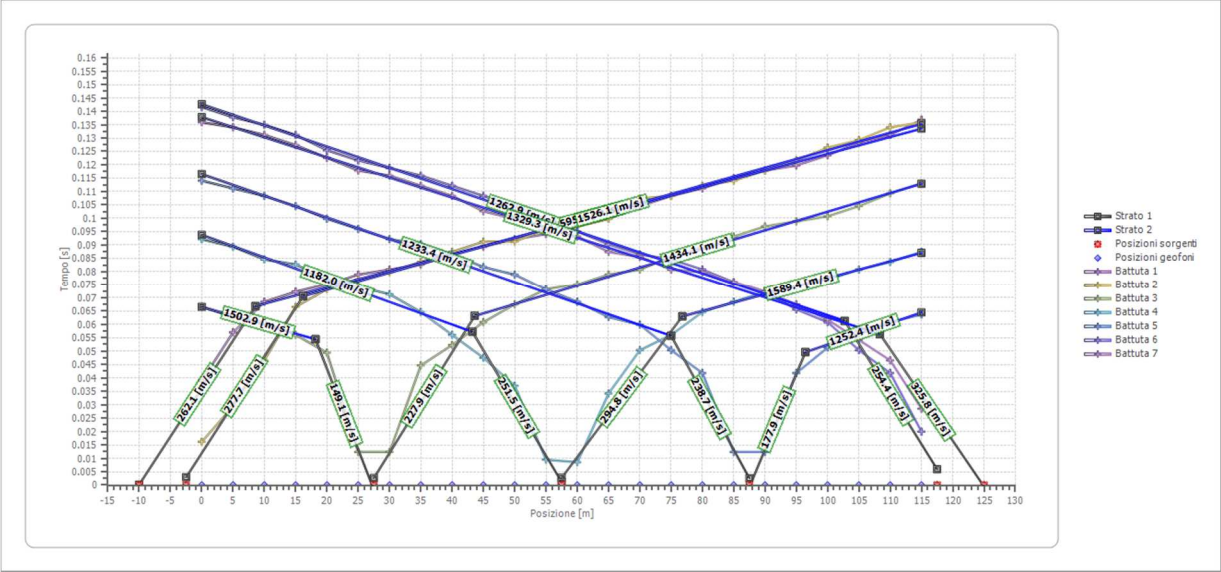
Posizione sorgente X 125 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

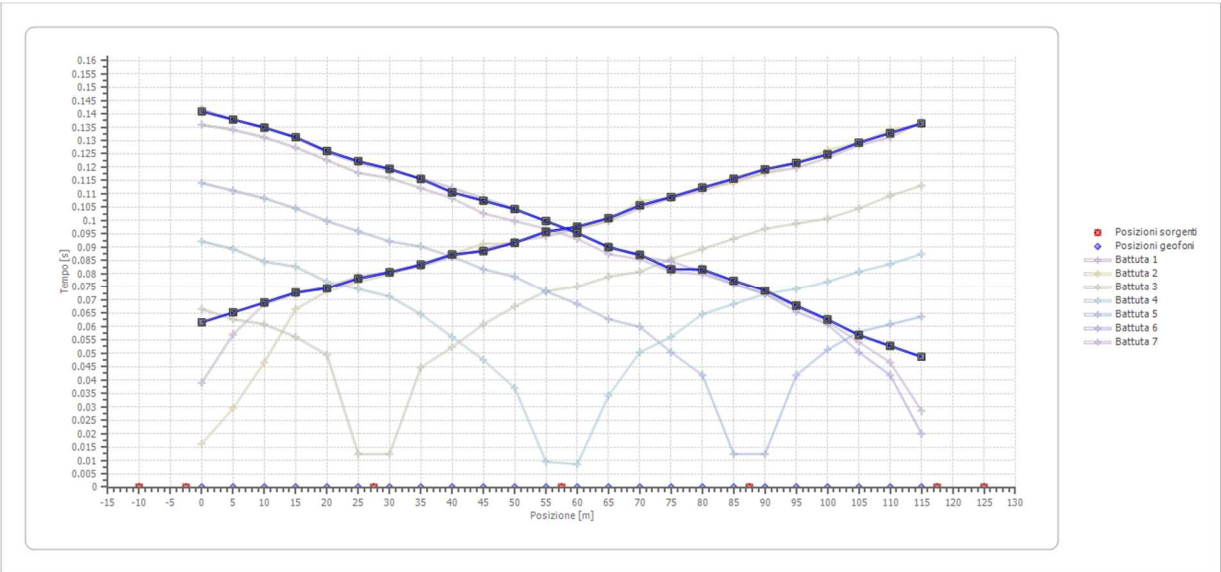


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	135.9316
5.0	134.0304
10.0	131.1787
15.0	127.3764
20.0	122.6236
25.0	117.8707
30.0	115.9696
35.0	112.1673
40.0	108.3650
45.0	102.6616
50.0	99.8099
55.0	96.9582
60.0	93.1559
65.0	87.4525
70.0	85.5513
75.0	80.7985
80.0	79.8479
85.0	76.0456
90.0	72.2433
95.0	67.4905
100.0	61.7871
105.0	54.1825
110.0	46.5779
115.0	28.5171

# Dromocrone



# Dromocrone traslate



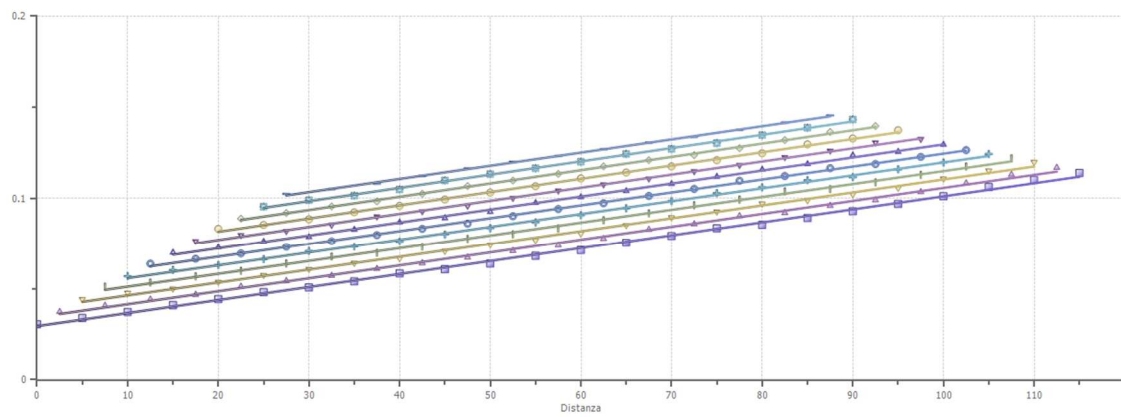
---

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

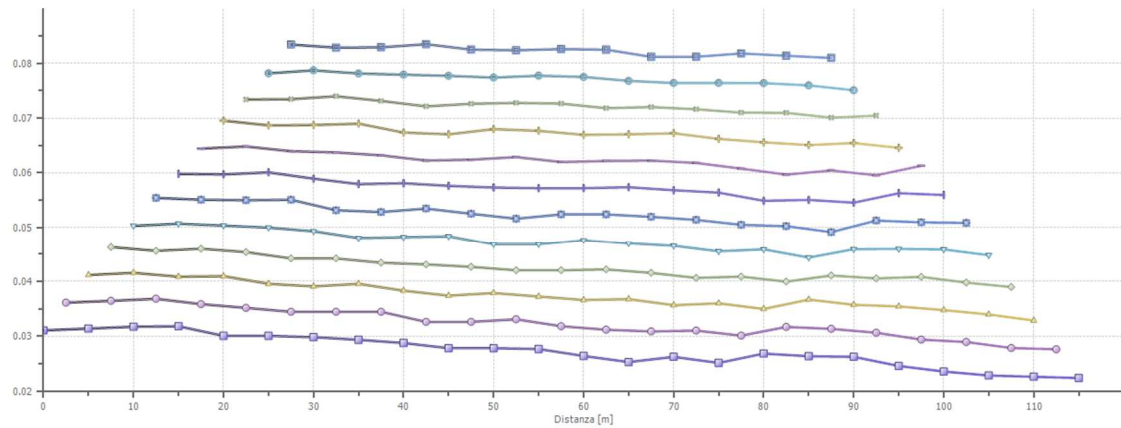
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	7.8	--
G= 5.0 [m]	7.8	--
G= 10.0 [m]	7.9	--
G= 15.0 [m]	8.0	--
G= 20.0 [m]	7.5	--
G= 25.0 [m]	7.5	--
G= 30.0 [m]	7.5	--
G= 35.0 [m]	7.3	--
G= 40.0 [m]	7.2	--
G= 45.0 [m]	7.0	--
G= 50.0 [m]	7.0	--
G= 55.0 [m]	6.9	--
G= 60.0 [m]	6.6	--
G= 65.0 [m]	6.3	--
G= 70.0 [m]	6.6	--
G= 75.0 [m]	6.3	--
G= 80.0 [m]	6.7	--
G= 85.0 [m]	6.6	--
G= 90.0 [m]	6.6	--
G= 95.0 [m]	6.1	--
G= 100.0 [m]	5.9	--
G= 105.0 [m]	5.7	--
G= 110.0 [m]	5.6	--
G= 115.0 [m]	5.6	--
Velocità [m/sec]	246.0	1393.5
Descrizione		





XY = 0, Deviazione standard = 0.02484    XY = 5, Deviazione standard = 0.02371    XY = 10, Deviazione standard = 0.0226    XY = 15, Deviazione standard = 0.02149  
 XY = 20, Deviazione standard = 0.02048    XY = 25, Deviazione standard = 0.01947    XY = 30, Deviazione standard = 0.01858    XY = 35, Deviazione standard = 0.01767  
 XY = 40, Deviazione standard = 0.01679    XY = 45, Deviazione standard = 0.01576    XY = 50, Deviazione standard = 0.01469    XY = 55, Deviazione standard = 0.01353



XY = 0, Rugosità = 0.002456    XY = 5, Rugosità = 0.002261    XY = 10, Rugosità = 0.002023    XY = 15, Rugosità = 0.00179    XY = 20, Rugosità = 0.001619    XY = 25, Rugosità = 0.001424  
 XY = 30, Rugosità = 0.001255    XY = 35, Rugosità = 0.001177    XY = 40, Rugosità = 0.001143    XY = 45, Rugosità = 0.000938    XY = 50, Rugosità = 0.000853    XY = 55, Rugosità = 0.000723

## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

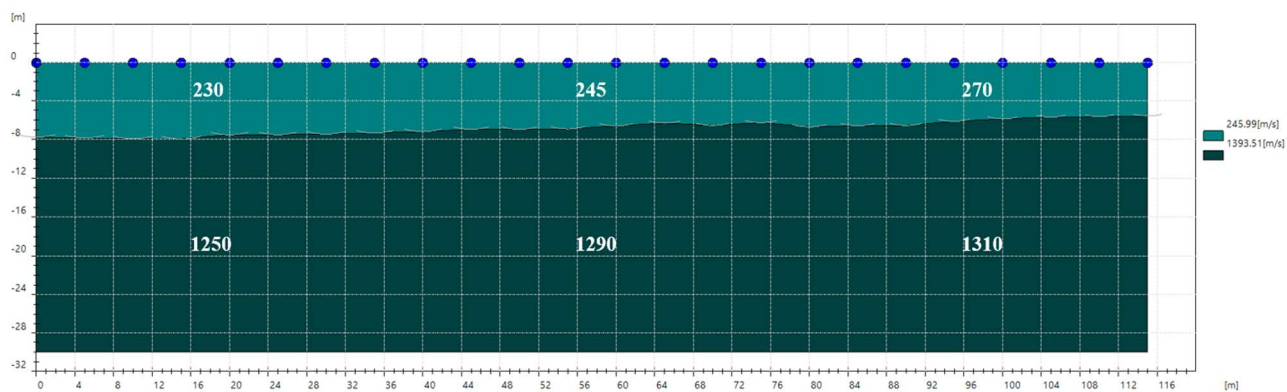






Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_1

**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

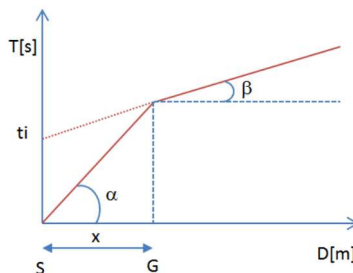
$$T = x_i / V_1$$

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

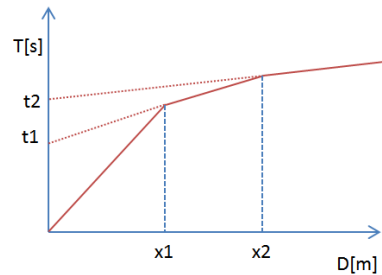
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

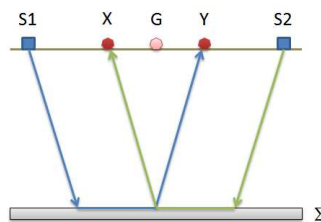


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

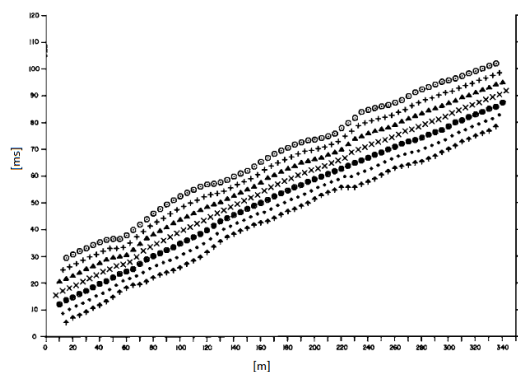
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



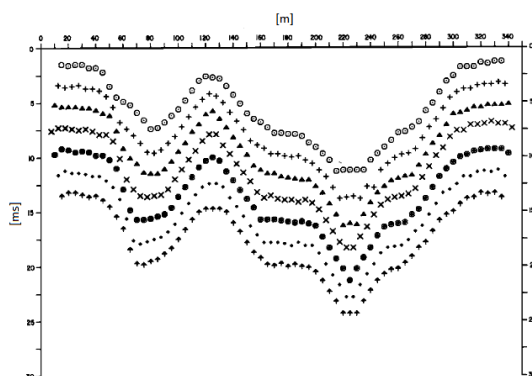
dove  $T_{S1Y}$  e  $T_{S2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S1S2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è il tempo 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:

$$T_G = \frac{T_{S1Y} + T_{S2X} - \left( T_{S1S2} + \frac{XY}{V_n} \right)}{2}$$

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:

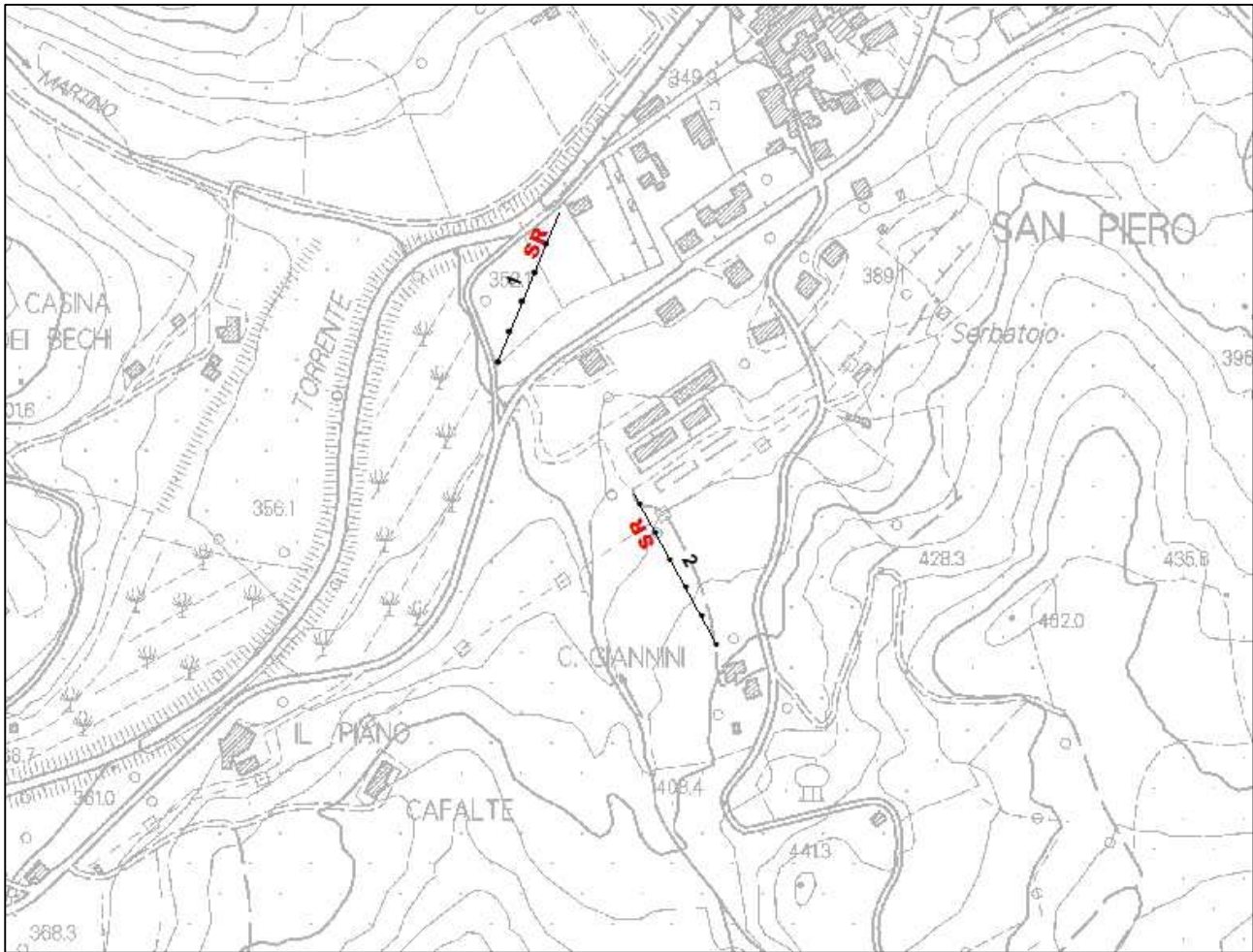
$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

---

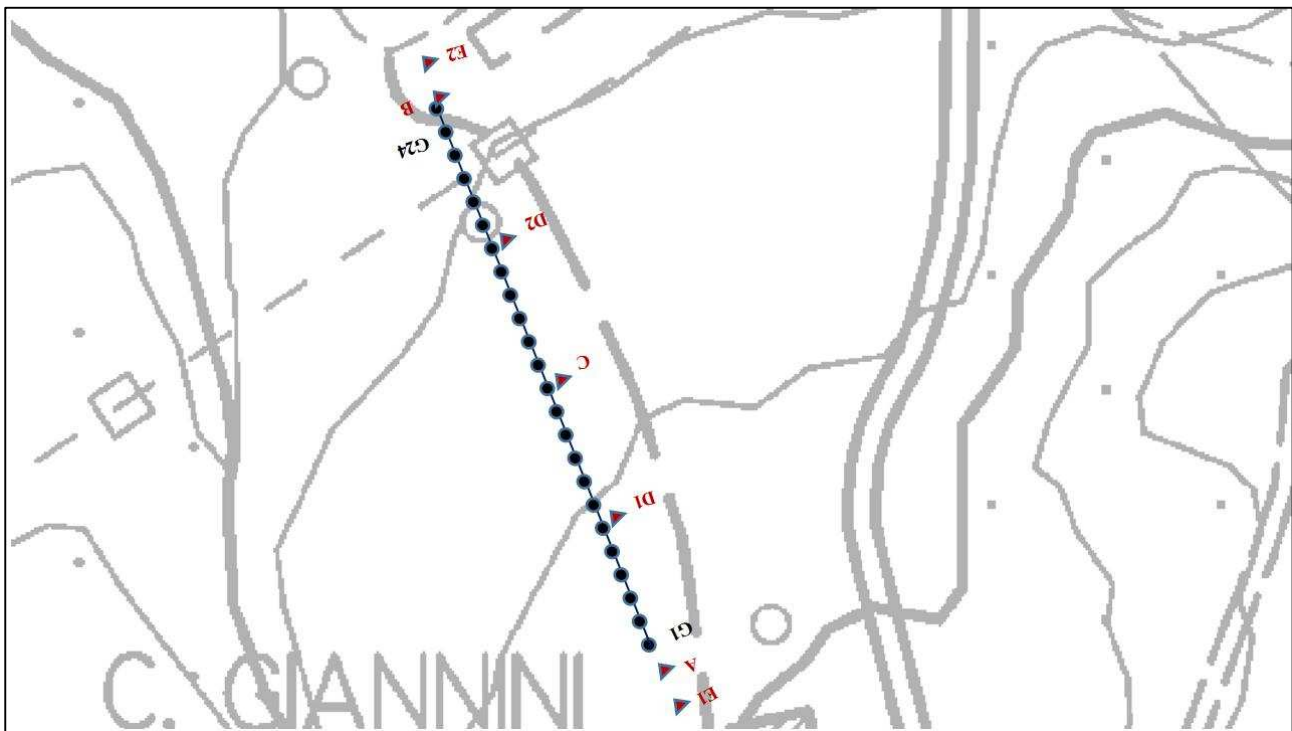
$h$  rappresenta la profondità minima dal geofono  $G$  dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio  $h$ .

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): 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	15.4
2	5.0	14.7
3	10.0	13.8
4	15.0	13.0
5	20.0	12.4
6	25.0	11.6
7	30.0	10.9
8	35.0	10.3
9	40.0	9.5
10	45.0	8.7
11	50.0	8.0
12	55.0	7.2
13	60.0	6.6
14	65.0	6.1
15	70.0	5.6
16	75.0	5.1
17	80.0	4.6
18	85.0	4.0
19	90.0	3.5
20	95.0	2.9
21	100.0	2.4
22	105.0	2.0
23	110.0	1.5
24	115.0	1.0

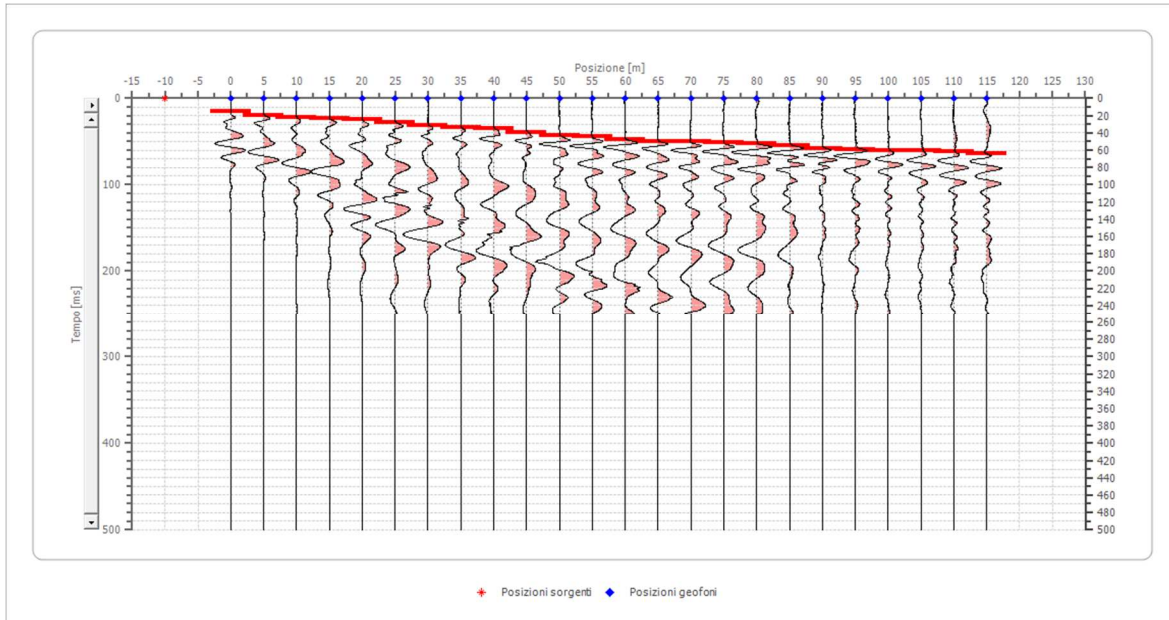


## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -10 [m]

Posizione sorgente Z 17 [m]

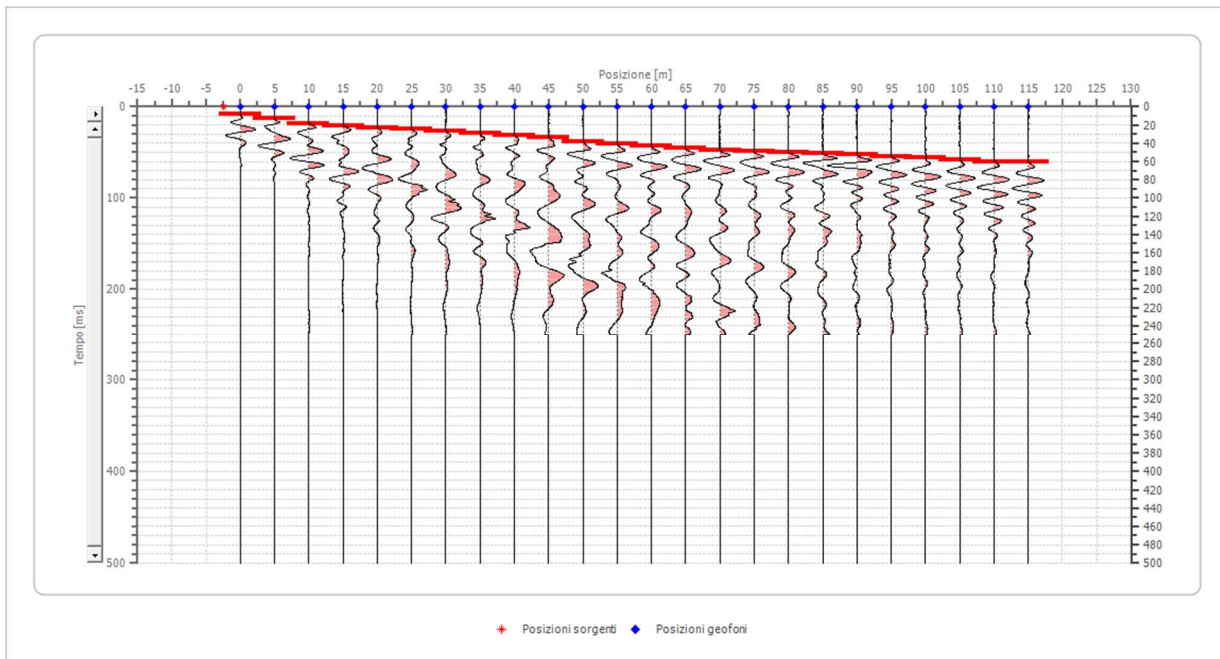


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	15.2167
5.0	19.9720
10.0	21.8741
15.0	23.7761
20.0	24.7272
25.0	27.5803
30.0	31.3845
35.0	34.2376
40.0	35.1887
45.0	38.9929
50.0	42.7971
55.0	44.6991
60.0	47.5523
65.0	49.4544
70.0	50.4054
75.0	51.3565
80.0	52.3075
85.0	55.1607
90.0	58.0138
95.0	58.9648
100.0	59.9159
105.0	60.8669
110.0	61.8180
115.0	63.7201

## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

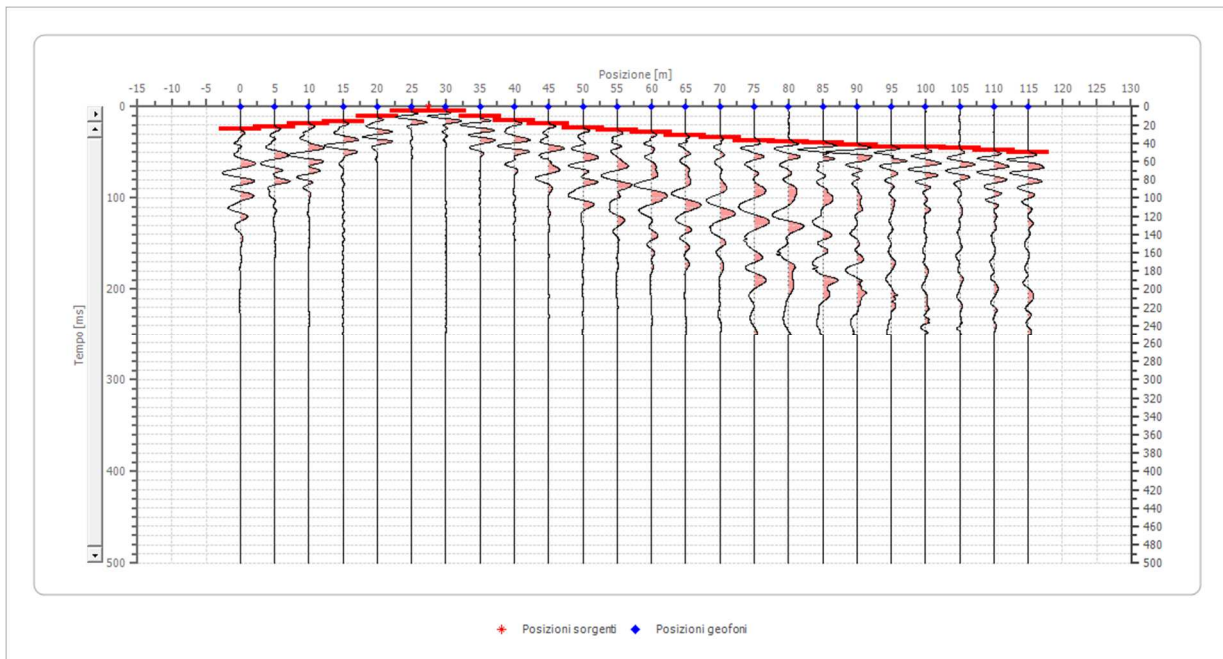
Posizione sorgente Z 16 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	7.6084
5.0	12.3636
10.0	19.0209
15.0	20.9230
20.0	22.8251
25.0	24.7272
30.0	26.6293
35.0	28.5314
40.0	31.3845
45.0	34.2376
50.0	38.0418
55.0	40.8950
60.0	42.7971
65.0	45.6502
70.0	47.5523
75.0	48.5033
80.0	49.4544
85.0	51.3565
90.0	52.3075
95.0	54.2096
100.0	56.1117
105.0	58.0138
110.0	59.9159
115.0	60.8669

### Battuta 3

Posizione sorgente X      27.5 [m]  
Posizione sorgente Z      12 [m]

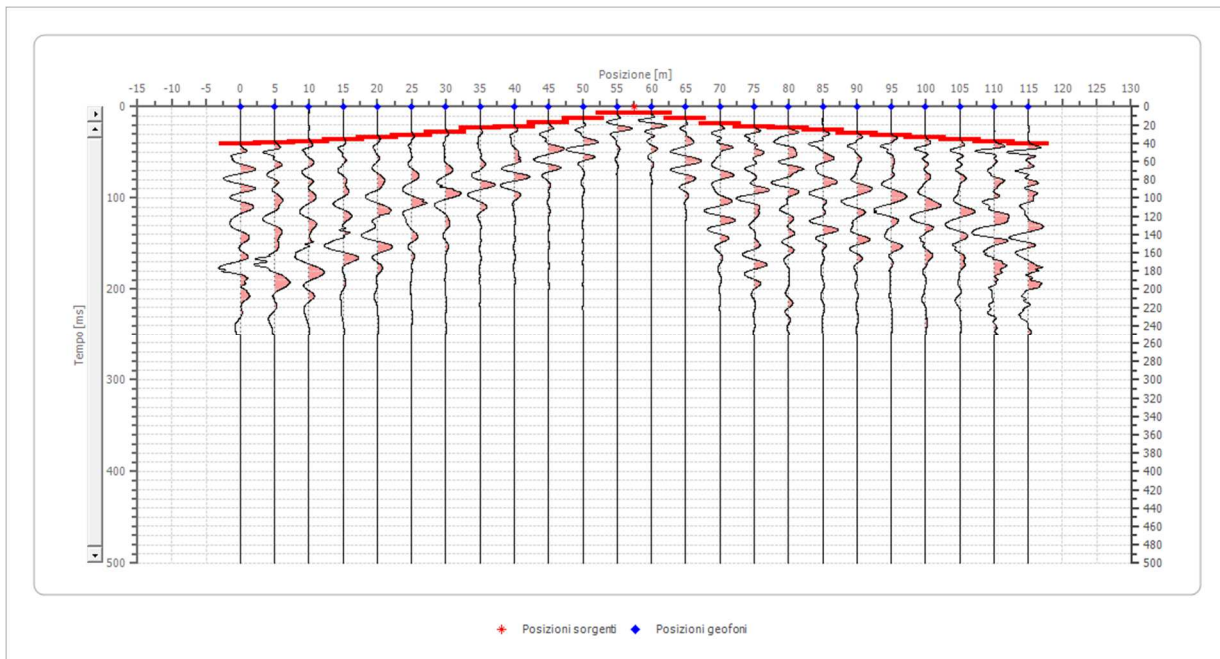


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	24.7272
5.0	21.8741
10.0	19.0209
15.0	16.1678
20.0	10.4615
25.0	4.7552
30.0	4.7552
35.0	10.4615
40.0	15.2167
45.0	19.0209
50.0	22.8251
55.0	25.6782
60.0	27.5803
65.0	31.3845
70.0	34.2376
75.0	37.0908
80.0	38.0418
85.0	39.9439
90.0	41.8460
95.0	43.7481
100.0	44.6991
105.0	45.6502
110.0	47.5523
115.0	49.4544

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 57.5 [m]

Posizione sorgente Z 7 [m]

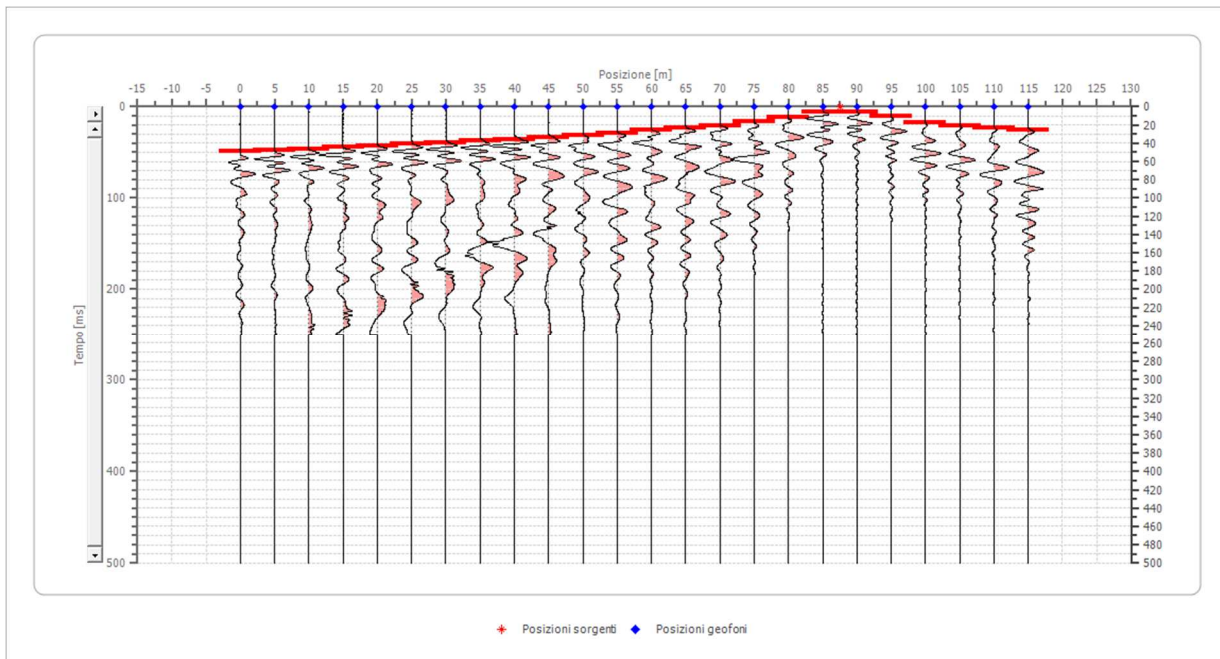


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	40.8950
5.0	38.9929
10.0	38.0418
15.0	36.1397
20.0	33.2866
25.0	31.3845
30.0	27.5803
35.0	23.7761
40.0	21.8741
45.0	17.1188
50.0	12.3636
55.0	6.6573
60.0	6.6573
65.0	12.3636
70.0	18.0699
75.0	21.8741
80.0	23.7761
85.0	25.6782
90.0	29.4824
95.0	31.3845
100.0	34.2376
105.0	36.1397
110.0	38.0418
115.0	40.8950

## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]

Posizione sorgente Z 4 [m]



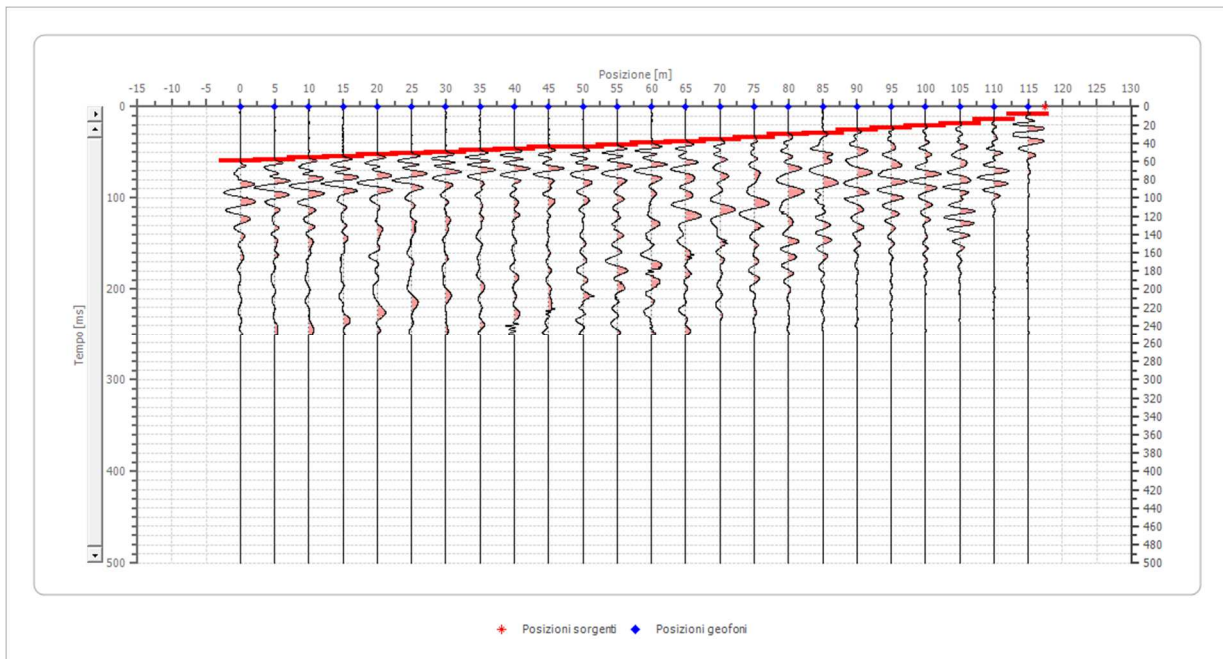
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	48.5033
5.0	47.5523
10.0	46.6012
15.0	44.6991
20.0	42.7971
25.0	40.8950
30.0	38.9929
35.0	37.0908
40.0	36.1397
45.0	33.2866
50.0	31.3845
55.0	28.5314
60.0	25.6782
65.0	23.7761
70.0	20.9230
75.0	16.1678
80.0	11.4125
85.0	5.7063
90.0	5.7063
95.0	10.4615
100.0	17.1188
105.0	20.9230
110.0	22.8251
115.0	25.6782



## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

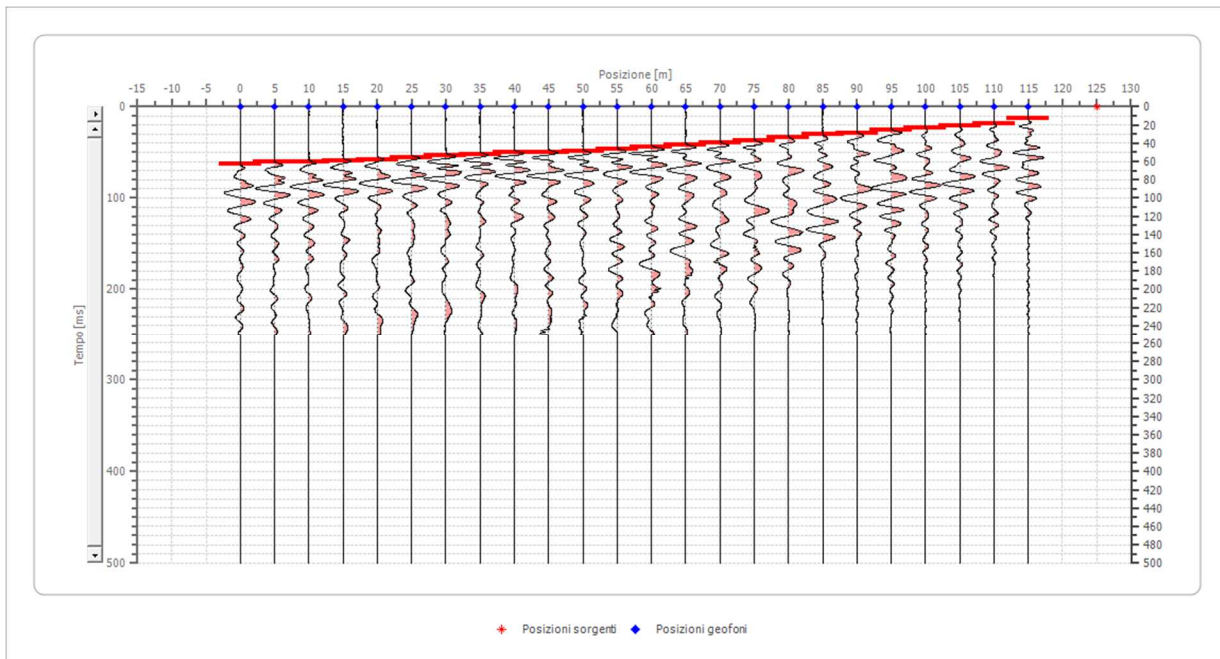


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	58.9648
5.0	58.0138
10.0	56.1117
15.0	54.2096
20.0	52.3075
25.0	51.3565
30.0	49.4544
35.0	47.5523
40.0	46.6012
45.0	44.6991
50.0	43.7481
55.0	41.8460
60.0	39.9439
65.0	38.0418
70.0	36.1397
75.0	34.2376
80.0	30.4335
85.0	28.5314
90.0	25.6782
95.0	23.7761
100.0	20.9230
105.0	18.0699
110.0	14.2657
115.0	7.6084

## Battuta 7

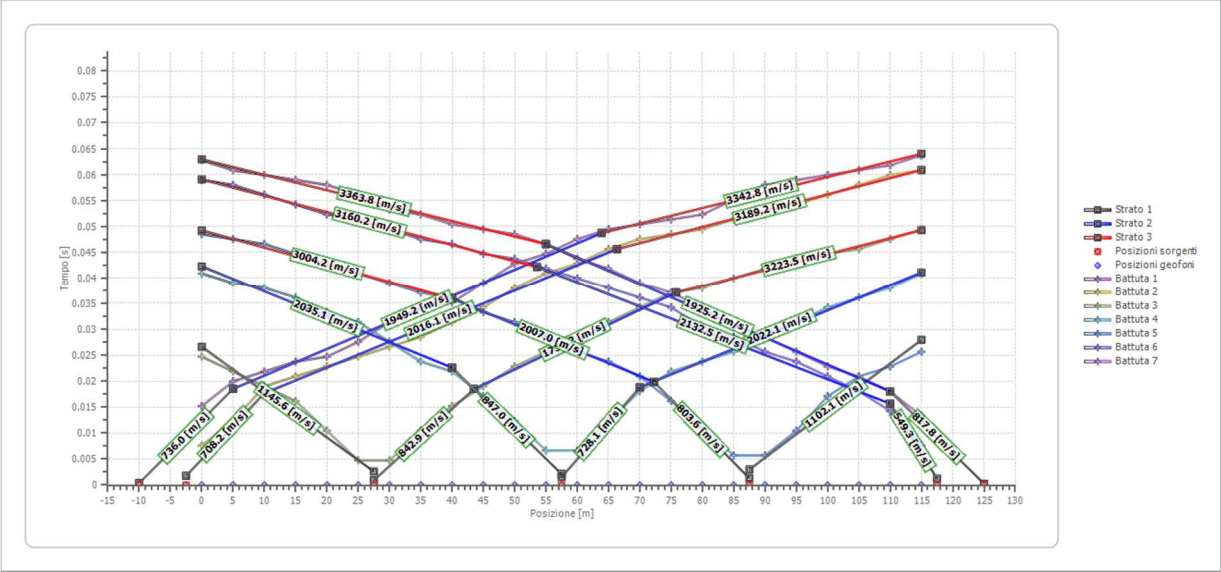
Posizione sorgente X 125 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

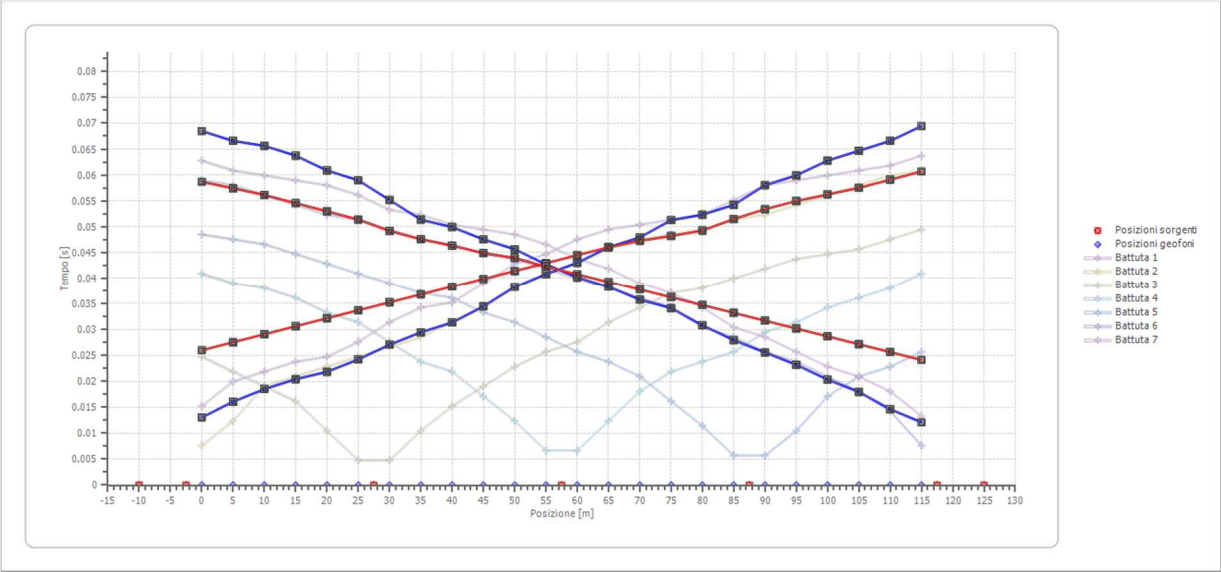


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	62.7690
5.0	60.8669
10.0	59.9159
15.0	58.9648
20.0	58.0138
25.0	56.1117
30.0	53.2586
35.0	52.3075
40.0	50.4054
45.0	49.4544
50.0	48.5033
55.0	46.6012
60.0	43.7481
65.0	41.8460
70.0	38.9929
75.0	37.0908
80.0	34.2376
85.0	30.4335
90.0	28.5314
95.0	25.6782
100.0	22.8251
105.0	20.9230
110.0	18.0699
115.0	13.3146

# Dromocrone



# Dromocrone traslate



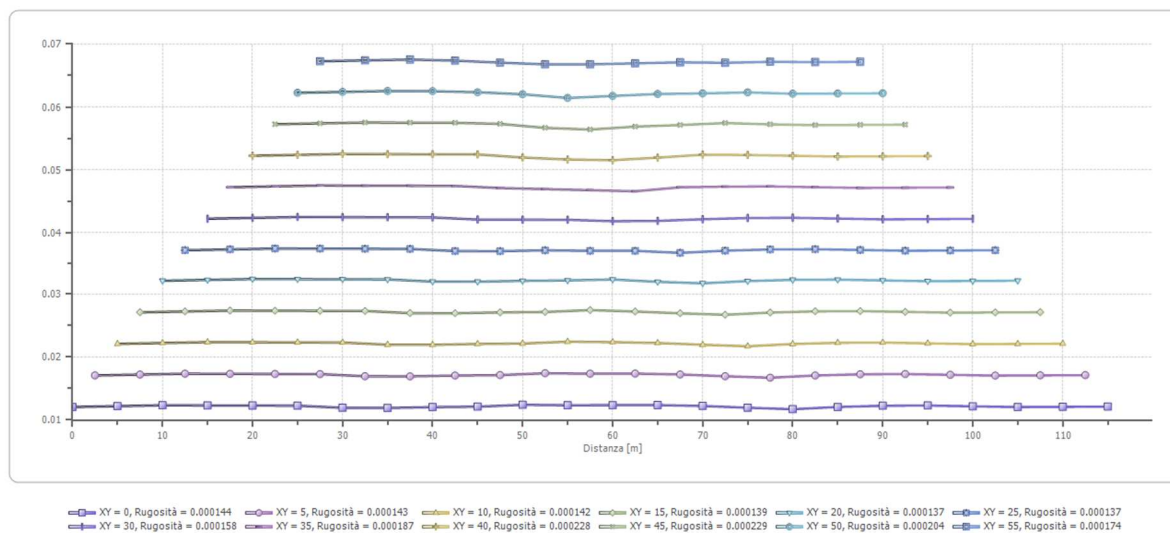
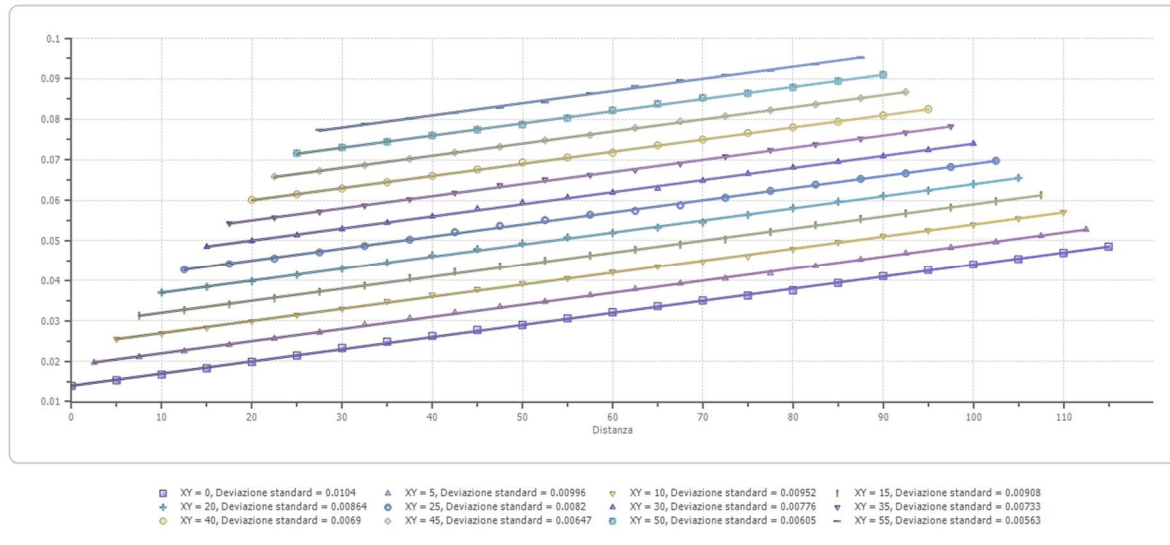


---

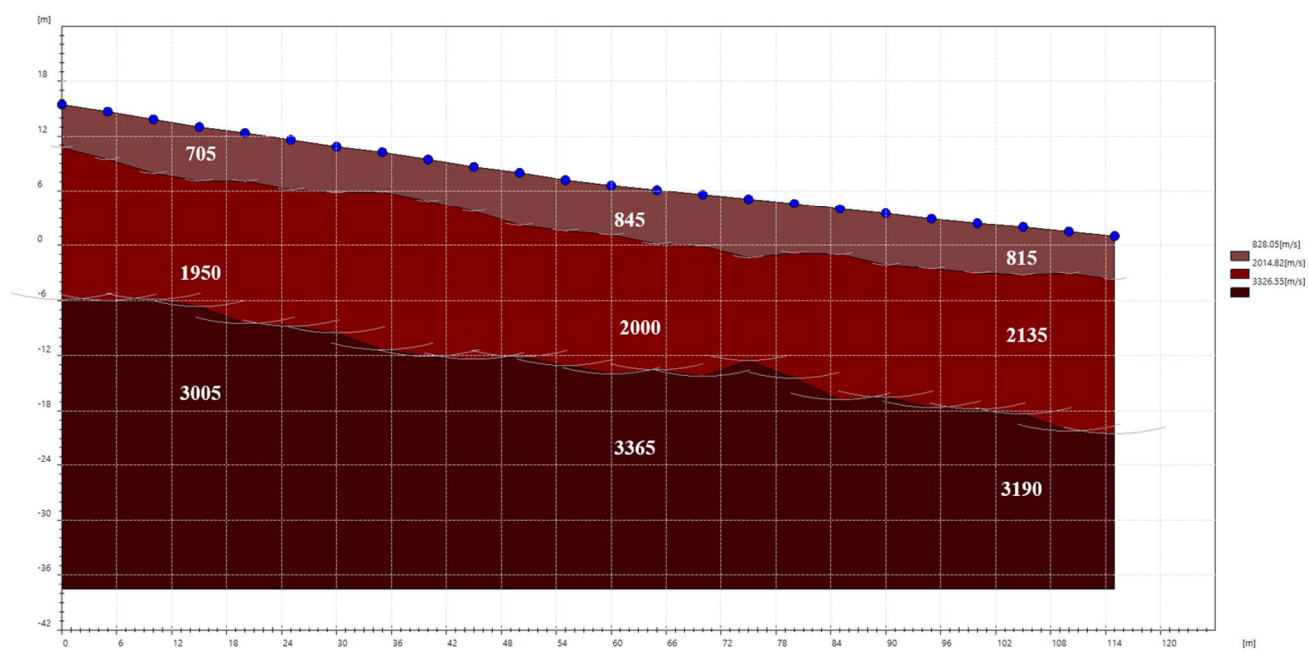
**Interpretazione col metodo G.,R.M.**

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2	Strato n. 3
G= 0.0 [m]	4.7	21.3	--
G= 5.0 [m]	5.2	20.7	--
G= 10.0 [m]	5.9	19.7	--
G= 15.0 [m]	5.9	19.7	--
G= 20.0 [m]	5.2	20.9	--
G= 25.0 [m]	5.4	20.4	--
G= 30.0 [m]	5.0	20.4	--
G= 35.0 [m]	4.4	21.6	--
G= 40.0 [m]	4.6	21.5	--
G= 45.0 [m]	4.9	21.0	--
G= 50.0 [m]	5.8	20.1	--
G= 55.0 [m]	5.6	20.3	--
G= 60.0 [m]	5.5	20.6	--
G= 65.0 [m]	6.0	19.6	--
G= 70.0 [m]	5.7	19.8	--
G= 75.0 [m]	6.4	17.6	--
G= 80.0 [m]	5.4	19.1	--
G= 85.0 [m]	5.0	20.8	--
G= 90.0 [m]	5.6	20.0	--
G= 95.0 [m]	5.4	20.5	--
G= 100.0 [m]	5.4	20.2	--
G= 105.0 [m]	5.2	20.3	--
G= 110.0 [m]	4.6	21.7	--
G= 115.0 [m]	4.7	21.5	--
Velocità [m/sec]	828.1	2014.8	3326.6
Descrizione			



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

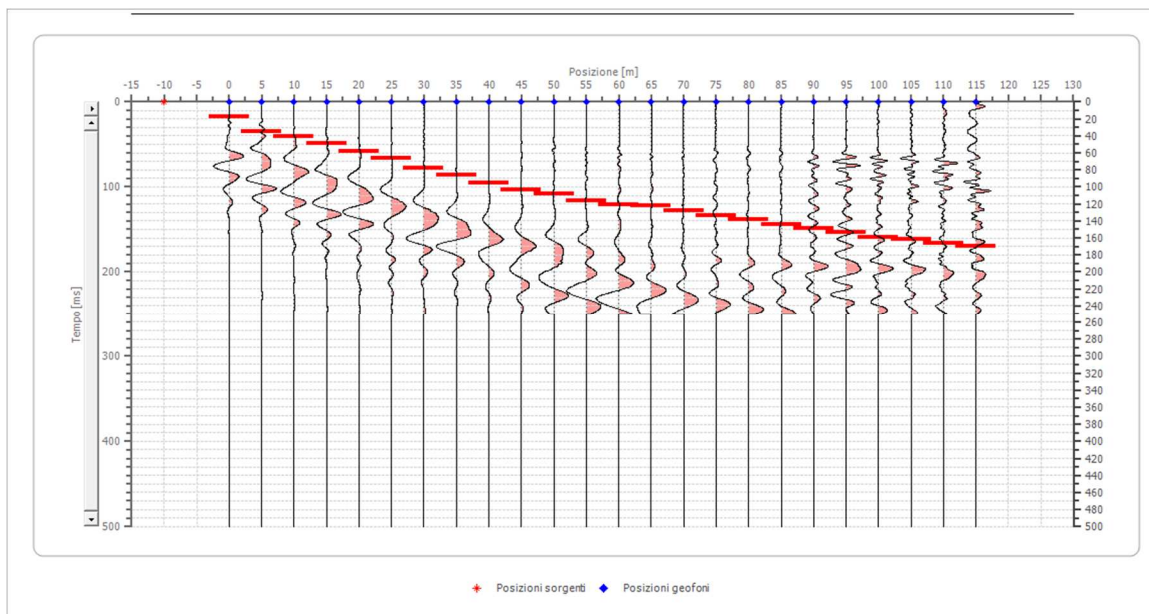


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -10 [m]

Posizione sorgente Z 17 [m]

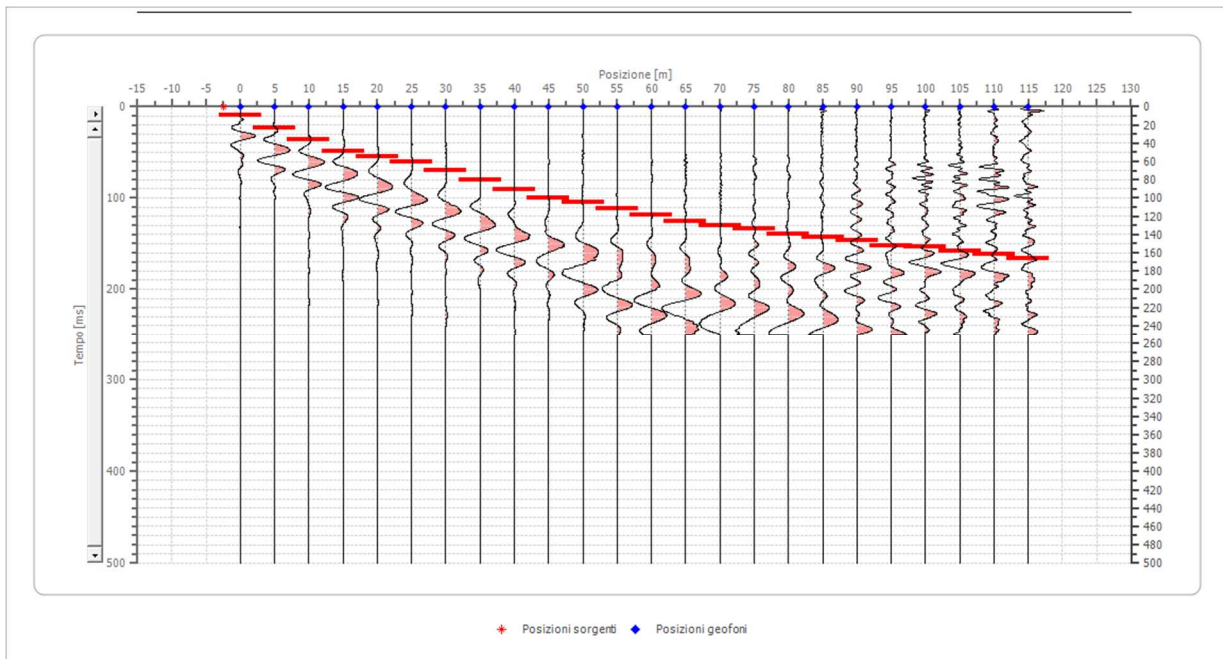


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	17.1188
5.0	35.1887
10.0	40.8950
15.0	48.5033
20.0	58.0138
25.0	66.5732
30.0	77.9857
35.0	85.5941
40.0	95.1046
45.0	103.6640
50.0	108.4192
55.0	116.0276
60.0	120.7828
65.0	122.6849
70.0	127.4401
75.0	134.0974
80.0	138.8527
85.0	144.5589
90.0	149.3142
95.0	154.0694
100.0	158.8246
105.0	161.6778
110.0	166.4330
115.0	170.2372

## Battuta 2

Posizione sorgente X -2.5 [m]

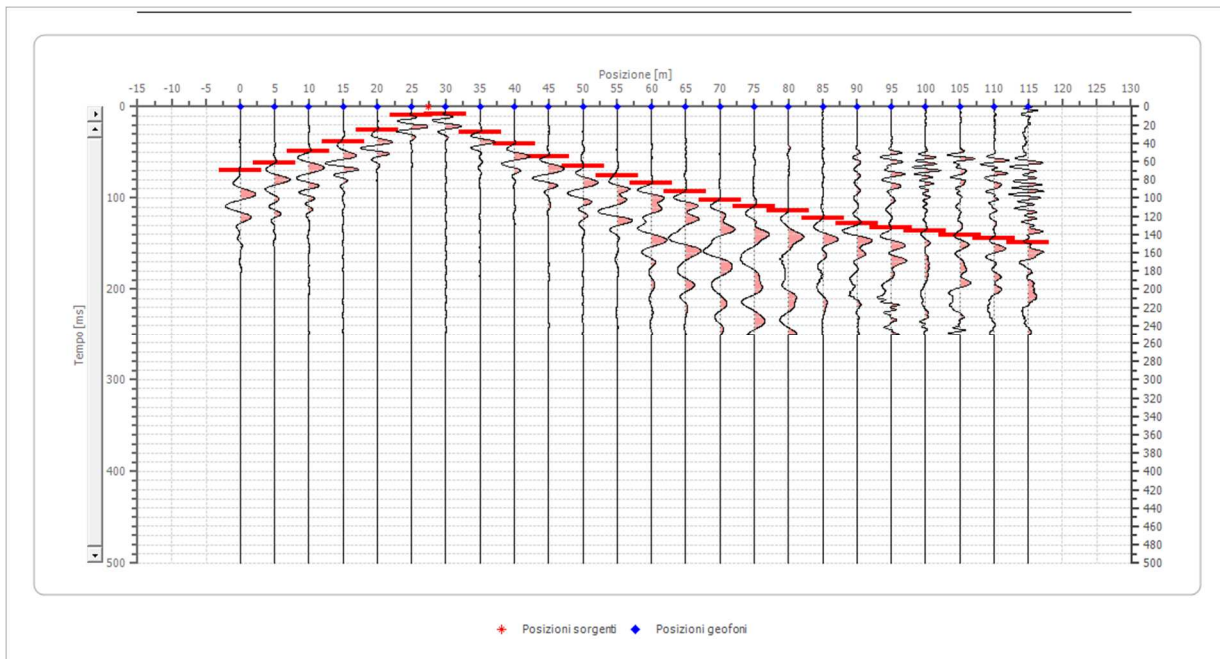
Posizione sorgente Z 16 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	9.5105
5.0	22.8251
10.0	36.1397
15.0	48.5033
20.0	55.1606
25.0	60.8669
30.0	69.4263
35.0	79.8878
40.0	90.3493
45.0	99.8598
50.0	104.6150
55.0	112.2234
60.0	118.8807
65.0	125.5380
70.0	130.2932
75.0	134.0974
80.0	139.8037
85.0	143.6079
90.0	146.4610
95.0	152.1673
100.0	154.0694
105.0	157.8736
110.0	161.6778
115.0	166.4330

### Battuta 3

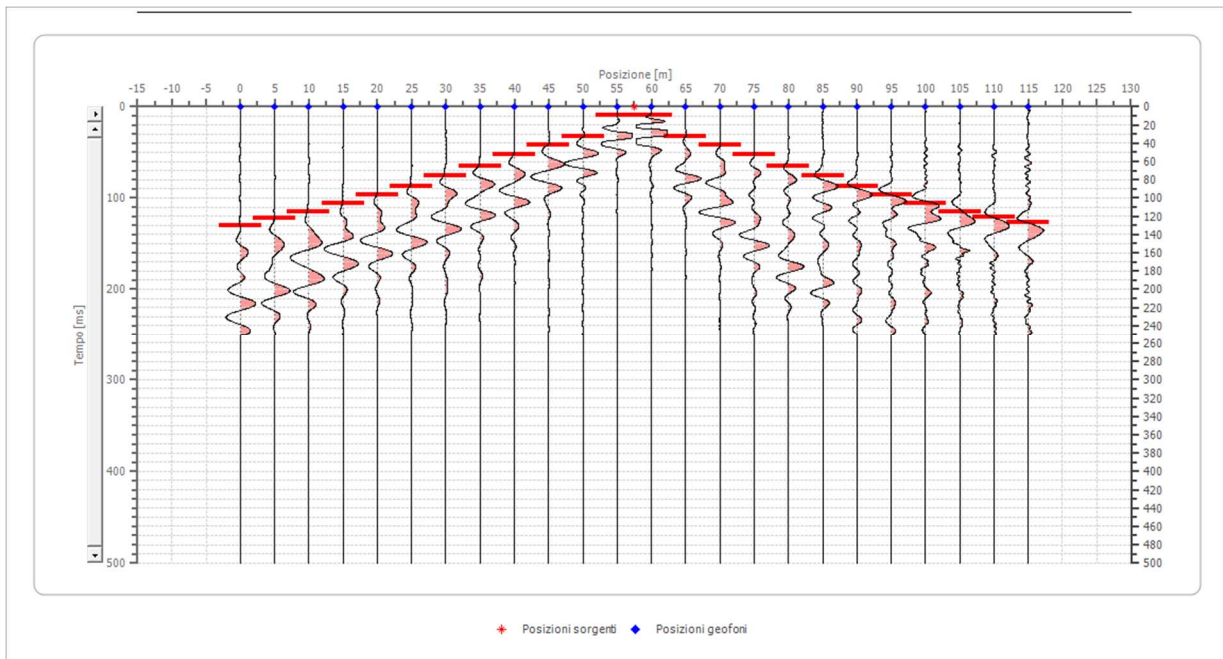
Posizione sorgente X      27.5 [m]  
 Posizione sorgente Z      12 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	70.3774
5.0	61.8180
10.0	48.5033
15.0	38.0418
20.0	25.6782
25.0	9.5105
30.0	8.5594
35.0	27.5803
40.0	40.8950
45.0	54.2096
50.0	65.6221
55.0	76.0836
60.0	83.6920
65.0	93.2025
70.0	102.7129
75.0	109.3702
80.0	114.1255
85.0	122.6849
90.0	128.3912
95.0	132.1953
100.0	135.9995
105.0	140.7547
110.0	144.5589
115.0	149.3142

#### Battuta 4

Posizione sorgente X      57.5 [m]  
 Posizione sorgente Z      7 [m]



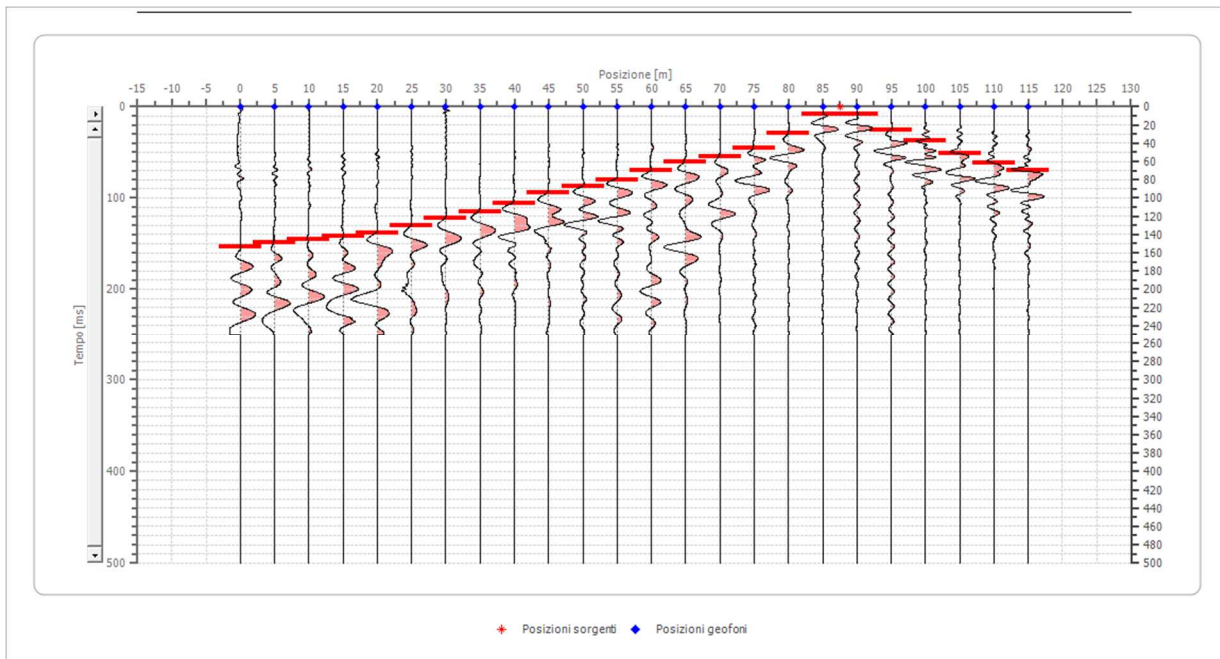
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	130.2932
5.0	122.6849
10.0	115.0765
15.0	105.5661
20.0	97.0067
25.0	87.4962
30.0	76.0836
35.0	64.6711
40.0	52.3075
45.0	41.8460
50.0	32.3356
55.0	9.5105
60.0	9.5105
65.0	32.3300
70.0	41.8400
75.0	52.3000
80.0	64.6700
85.0	76.0800
90.0	87.4900
95.0	97.0000
100.0	105.5600
105.0	115.0700
110.0	120.7828
115.0	126.4891



## Battuta 5

Posizione sorgente X 87.5 [m]

Posizione sorgente Z 4 [m]



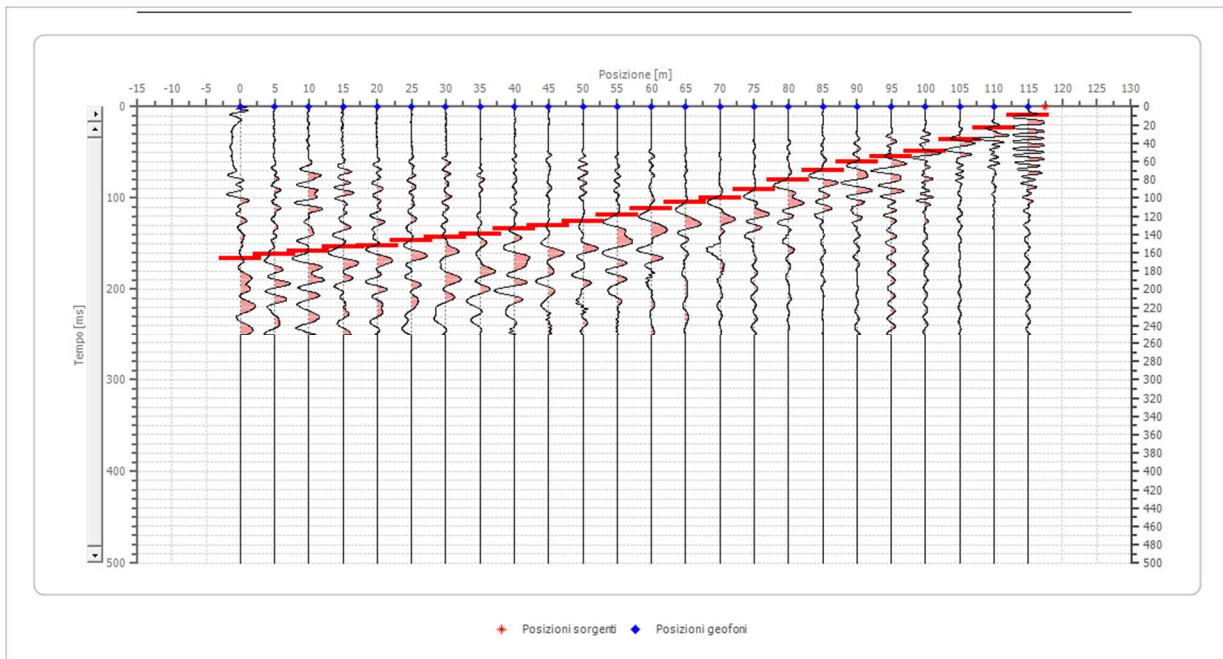
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	153.1183
5.0	148.3631
10.0	145.5100
15.0	141.7058
20.0	137.9016
25.0	130.2932
30.0	121.7338
35.0	115.0765
40.0	105.5661
45.0	94.1535
50.0	87.4962
55.0	79.8878
60.0	70.3774
65.0	60.8669
70.0	55.1606
75.0	45.6502
80.0	28.5314
85.0	7.6084
90.0	8.5594
95.0	25.6782
100.0	37.0908
105.0	51.3565
110.0	61.8180
115.0	69.4263



## Battuta 6

Posizione sorgente X 117.5 [m]

Posizione sorgente Z 0 [m]

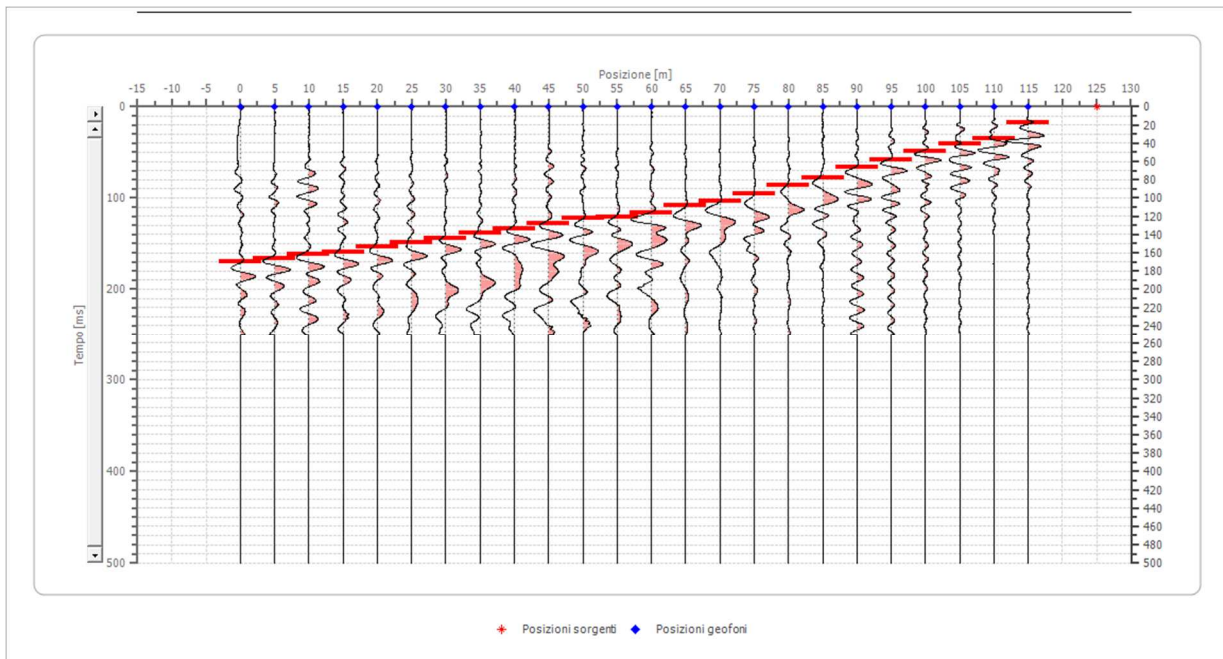


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	166.4330
5.0	161.6778
10.0	157.8736
15.0	154.0694
20.0	152.1673
25.0	146.4610
30.0	143.6079
35.0	139.8037
40.0	134.0974
45.0	130.2932
50.0	125.5380
55.0	118.8807
60.0	112.2234
65.0	104.6150
70.0	99.8598
75.0	90.3493
80.0	79.8878
85.0	69.4263
90.0	60.8669
95.0	55.1606
100.0	48.5033
105.0	36.1397
110.0	22.8251
115.0	9.5105

## Battuta 7

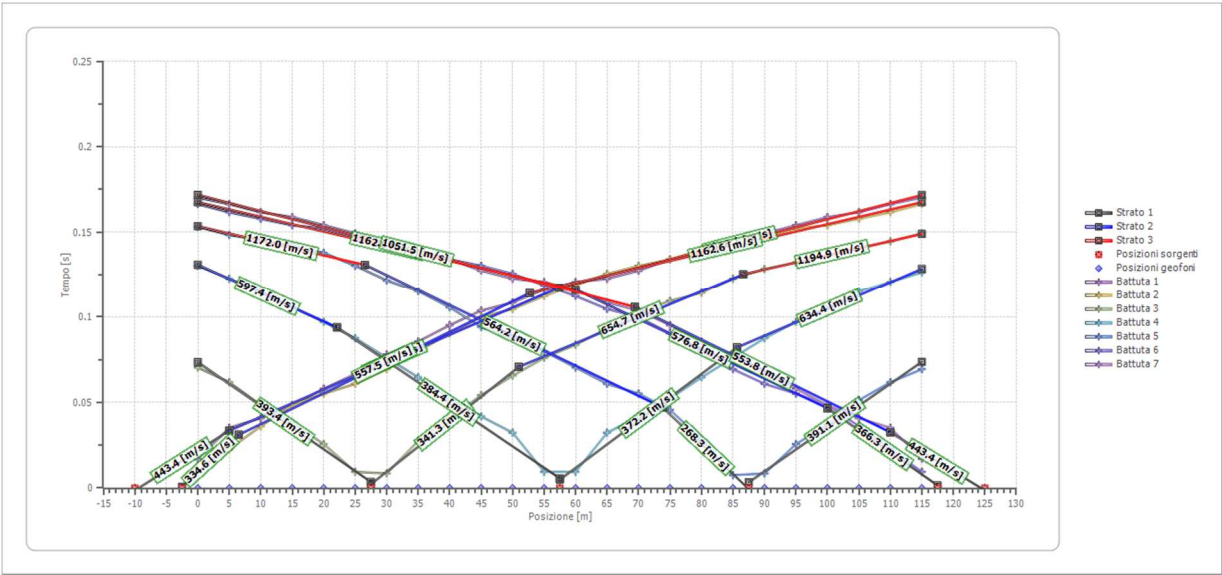
Posizione sorgente X 125 [m]

Posizione sorgente Z -1 [m]

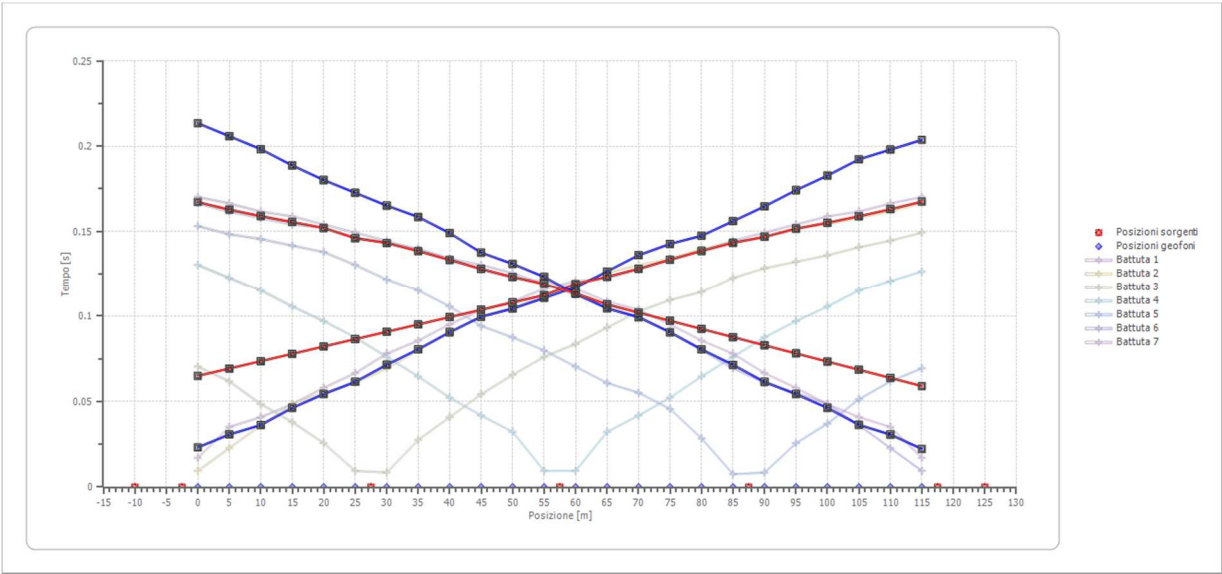


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	170.2372
5.0	166.4330
10.0	161.6778
15.0	158.8246
20.0	154.0694
25.0	149.3142
30.0	144.5589
35.0	138.8527
40.0	134.0974
45.0	127.4401
50.0	122.6849
55.0	120.7828
60.0	116.0276
65.0	108.4192
70.0	103.6640
75.0	95.1046
80.0	85.5941
85.0	77.9857
90.0	66.5732
95.0	58.0138
100.0	48.5033
105.0	40.8950
110.0	35.1887
115.0	17.1188

# Dromocrone



# Dromocrone traslate

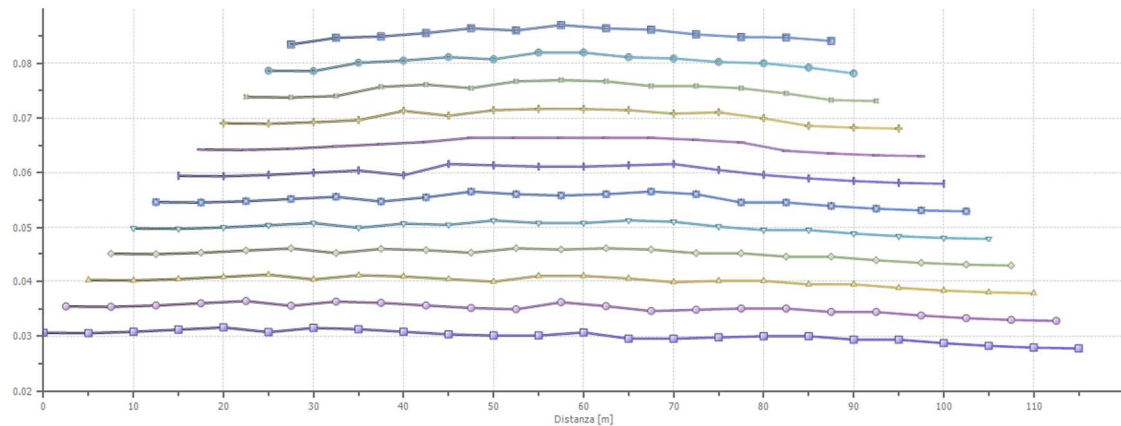
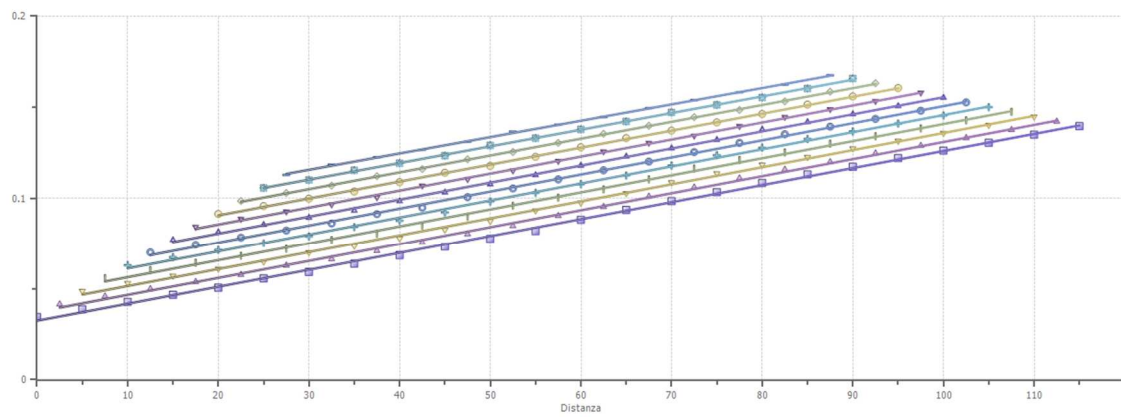


---

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

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2	Strato n. 3
G= 0.0 [m]	5.3	18.3	--
G= 5.0 [m]	5.2	18.3	--
G= 10.0 [m]	4.8	18.9	--
G= 15.0 [m]	4.9	19.1	--
G= 20.0 [m]	4.8	19.5	--
G= 25.0 [m]	4.7	18.9	--
G= 30.0 [m]	5.3	19.0	--
G= 35.0 [m]	5.8	18.3	--
G= 40.0 [m]	5.9	17.8	--
G= 45.0 [m]	5.4	18.0	--
G= 50.0 [m]	4.9	18.2	--
G= 55.0 [m]	4.6	18.5	--
G= 60.0 [m]	3.7	19.7	--
G= 65.0 [m]	3.9	18.7	--
G= 70.0 [m]	4.9	17.8	--
G= 75.0 [m]	4.4	18.4	--
G= 80.0 [m]	3.2	19.6	--
G= 85.0 [m]	3.1	19.7	--
G= 90.0 [m]	2.8	19.5	--
G= 95.0 [m]	3.3	19.0	--
G= 100.0 [m]	3.5	18.5	--
G= 105.0 [m]	3.4	18.2	--
G= 110.0 [m]	3.4	17.9	--
G= 115.0 [m]	2.7	18.3	--
Velocità [m/sec]	373.8	612.3	1067.5
Descrizione			



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

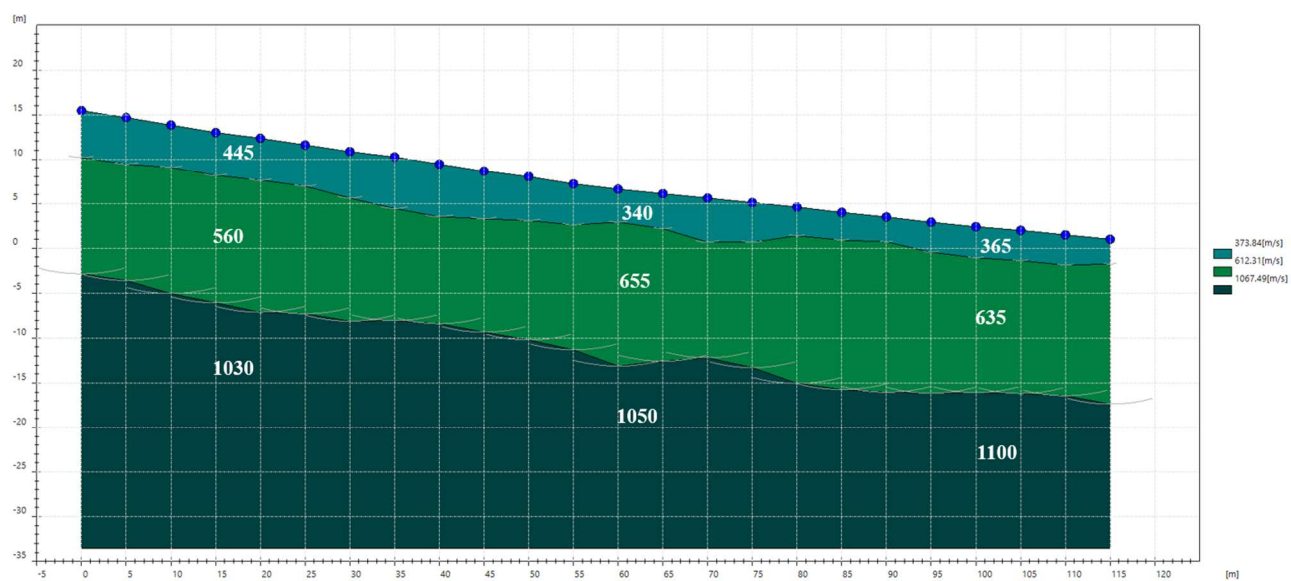




Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_2

**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

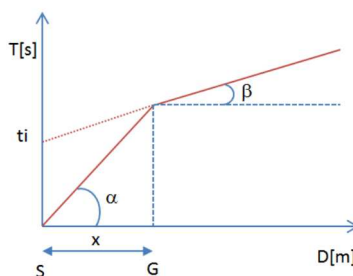
$$T = x_i / V_1$$

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

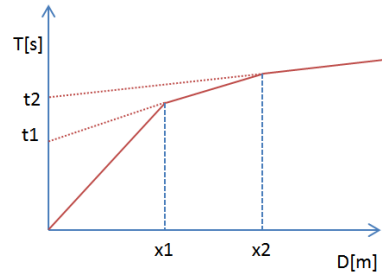
$$V_1 = 1 / \tan \alpha$$

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.

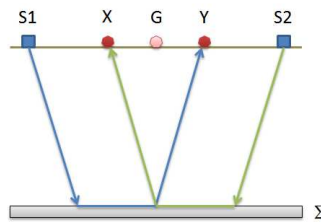


Infine, dalla conoscenza dei tempi  $t_i$  è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

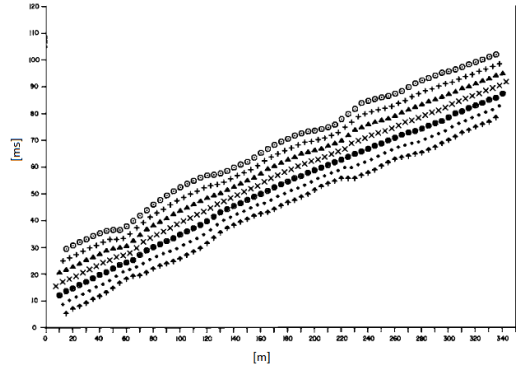
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



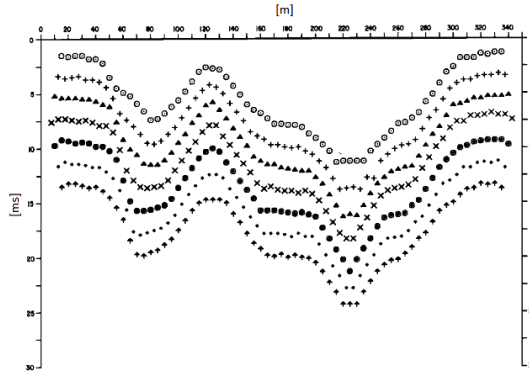
dove  $T_{S_1Y}$  e  $T_{S_2X}$  sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre  $T_{S_1S_2}$  è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento.  $T_V$  è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

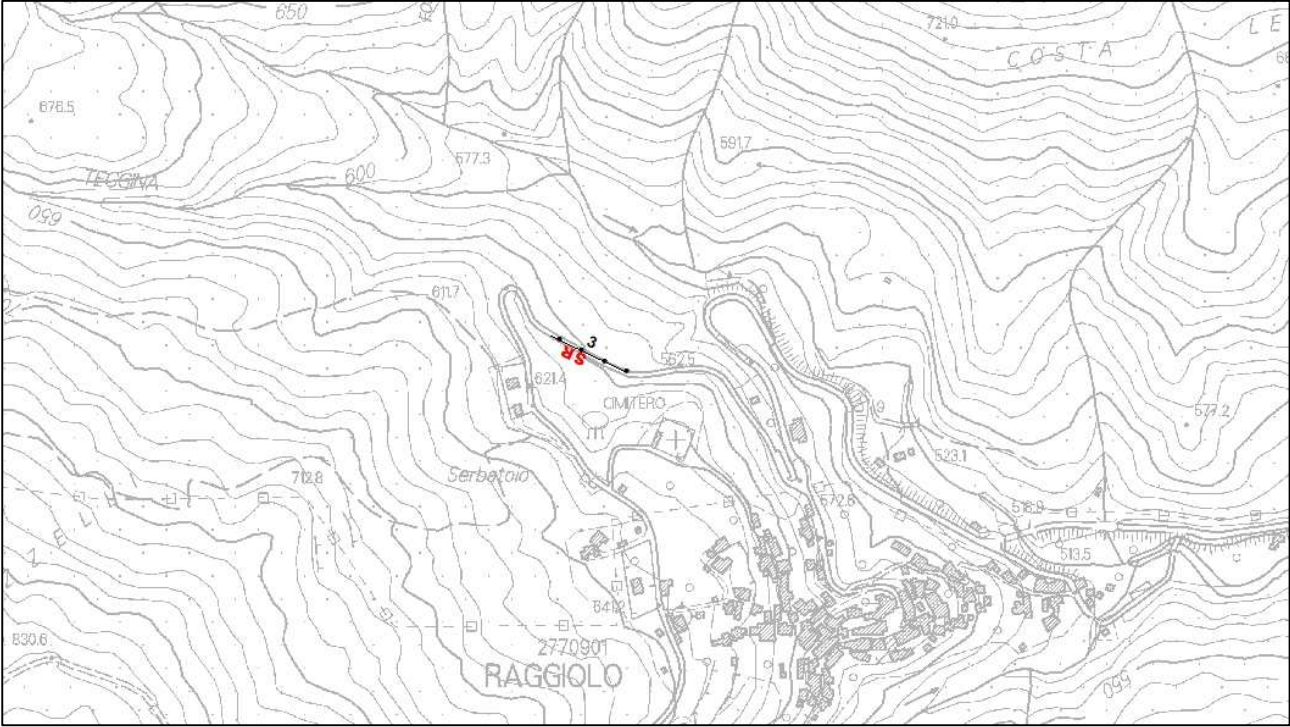
$$h = T_G \sqrt{\frac{V_n XY}{2T_G}}$$

---

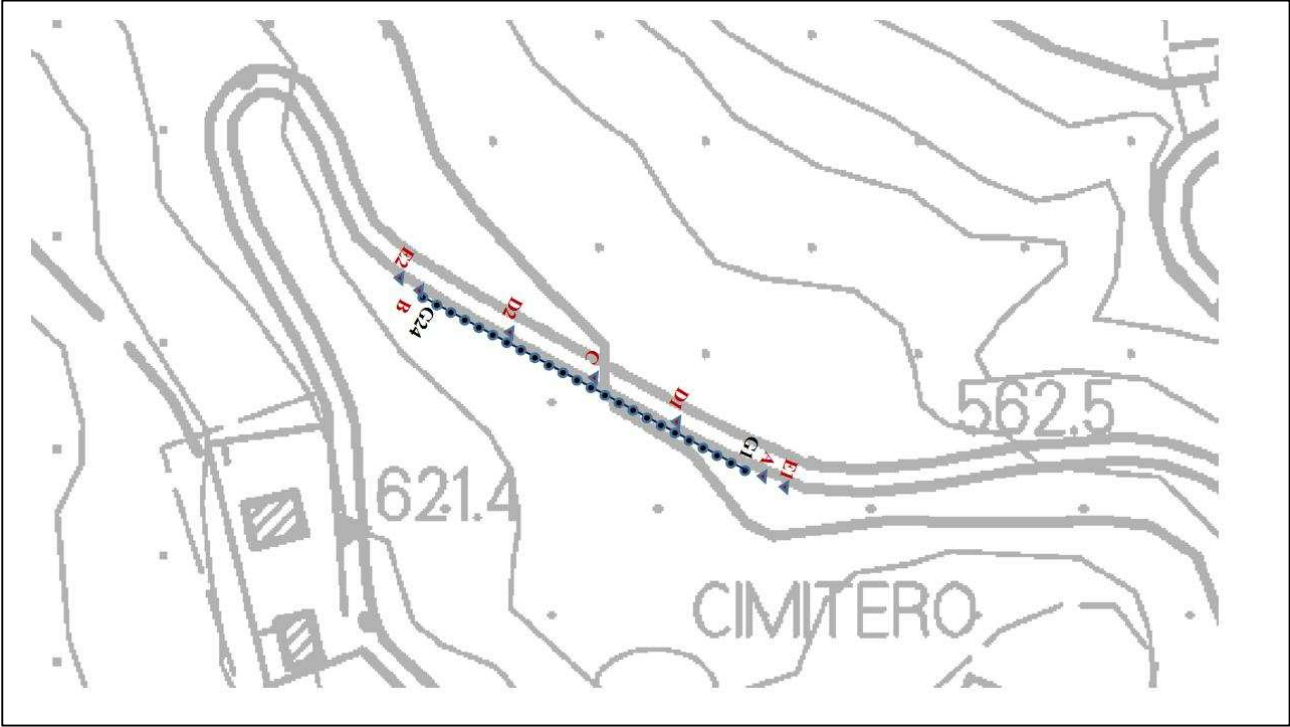
$h$  rappresenta la profondità minima dal geofono  $G$  dunque la morfologia del rifrattore è definita dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio  $h$ .

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

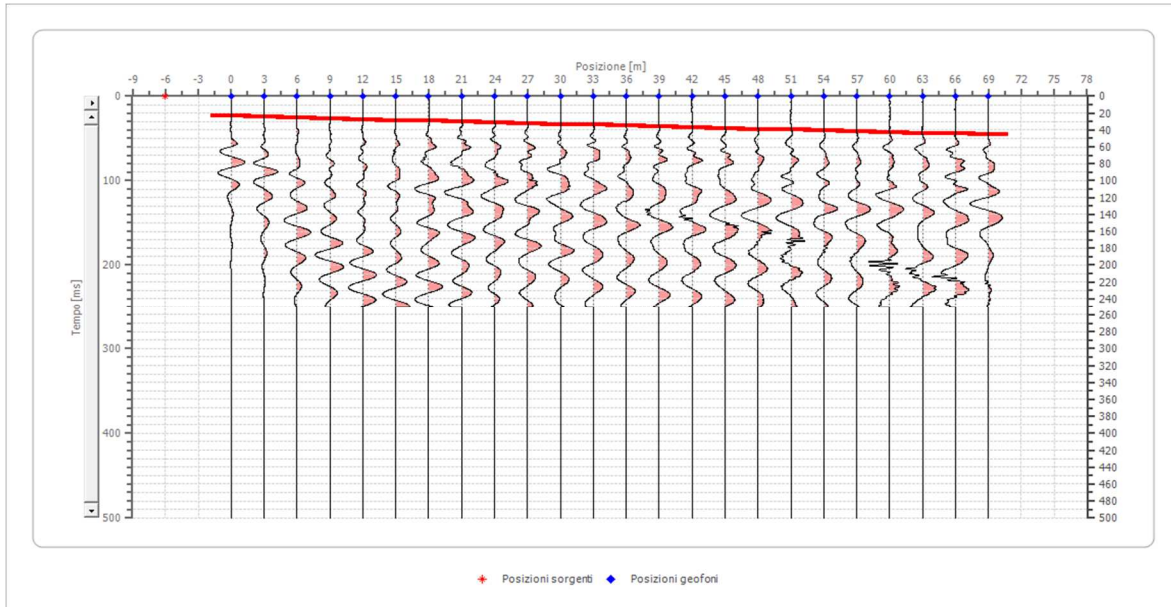
## Geometria geofoni

	Posizione X [m]	Posizione Z [m]
1	0.0	-0.6
2	3.0	-1.0
3	6.0	-1.3
4	9.0	-1.6
5	12.0	-1.9
6	15.0	-2.3
7	18.0	-2.6
8	21.0	-2.9
9	24.0	-3.3
10	27.0	-3.6
11	30.0	-3.9
12	33.0	-4.2
13	36.0	-4.4
14	39.0	-4.8
15	42.0	-5.1
16	45.0	-5.4
17	48.0	-5.8
18	51.0	-6.2
19	54.0	-6.5
20	57.0	-6.9
21	60.0	-7.1
22	63.0	-7.4
23	66.0	-7.7
24	69.0	-8.0

## Dati battute – ONDE P

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]  
Posizione sorgente Z 0 [m]

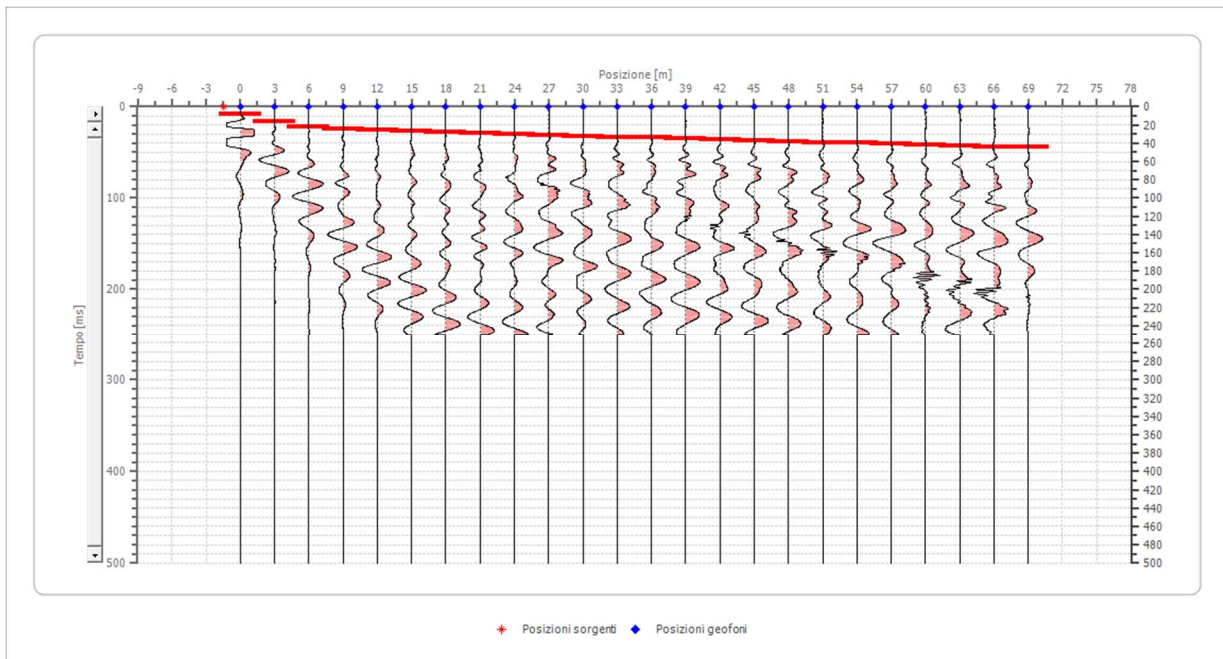


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	22.8251
3.0	24.7272
6.0	25.6782
9.0	26.6293
12.0	27.5803
15.0	28.5314
18.0	29.4824
21.0	30.4335
24.0	31.3845
27.0	32.3356
30.0	33.2866
33.0	34.2376
36.0	35.1887
39.0	36.1397
42.0	37.0908
45.0	38.0418
48.0	38.9929
51.0	39.9439
54.0	40.8950
57.0	41.8460
60.0	42.7971
63.0	43.7481
66.0	44.6991
69.0	45.6502



## Battuta 2

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



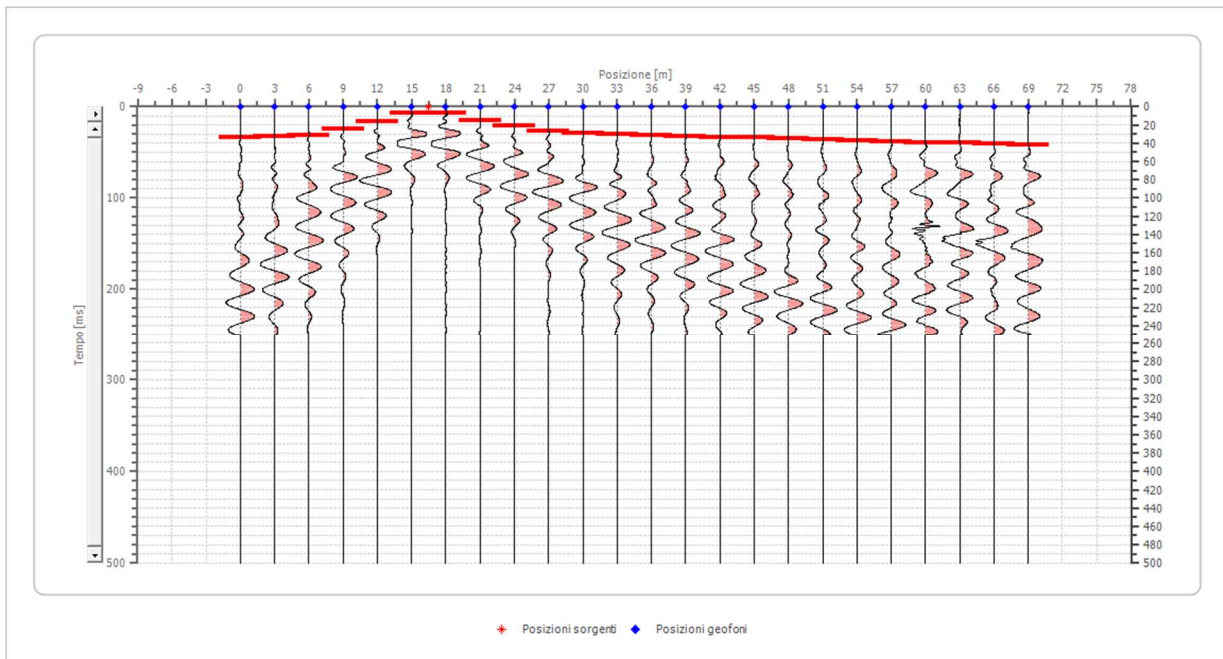
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	7.6084
3.0	16.1678
6.0	21.8741
9.0	24.7272
12.0	25.6782
15.0	26.6293
18.0	27.5803
21.0	29.4824
24.0	30.4335
27.0	31.3845
30.0	32.3356
33.0	33.2866
36.0	34.2376
39.0	35.1887
42.0	36.1397
45.0	37.0908
48.0	38.0418
51.0	38.9929
54.0	39.9439
57.0	40.8950
60.0	41.8460
63.0	42.7971
66.0	43.7481
69.0	44.6991



### Battuta 3

Posizione sorgente X 16.5 [m]

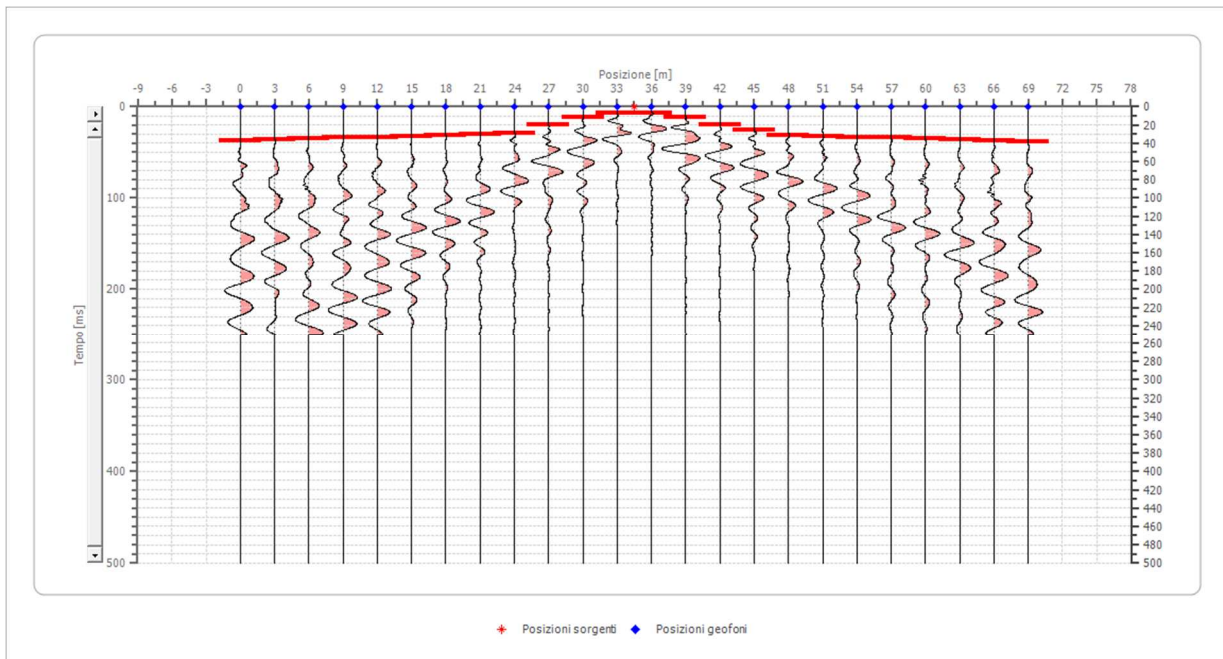
Posizione sorgente Z -2 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	33.2866
3.0	32.3356
6.0	31.3845
9.0	24.7272
12.0	16.1678
15.0	6.6573
18.0	6.6573
21.0	15.2167
24.0	20.9230
27.0	26.6293
30.0	28.5314
33.0	30.4335
36.0	31.3845
39.0	32.3356
42.0	33.2866
45.0	34.2376
48.0	35.1887
51.0	36.1397
54.0	37.0908
57.0	38.0418
60.0	38.9929
63.0	39.9439
66.0	40.8950
69.0	41.8460

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]  
Posizione sorgente Z -4 [m]

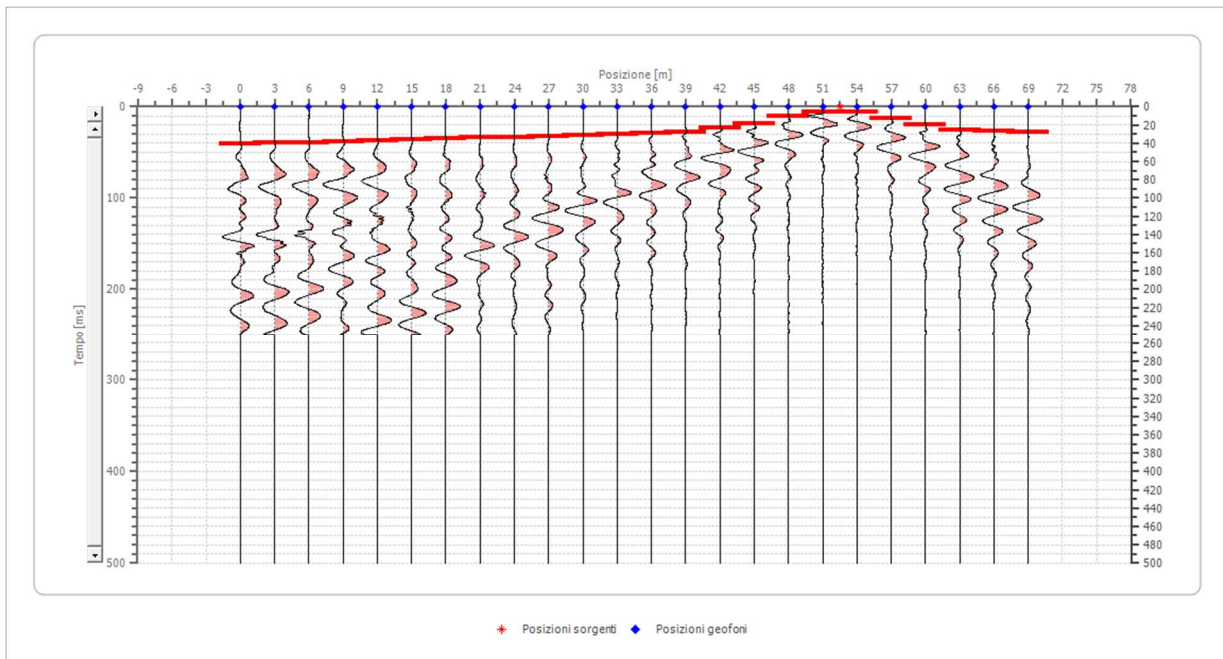


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	37.0908
3.0	36.1397
6.0	35.1887
9.0	34.2376
12.0	33.2866
15.0	32.3356
18.0	31.3845
21.0	30.4335
24.0	28.5314
27.0	19.9720
30.0	11.4125
33.0	6.6573
36.0	6.6573
39.0	11.4125
42.0	19.9720
45.0	25.6782
48.0	31.3845
51.0	32.3356
54.0	33.2866
57.0	34.2376
60.0	35.1887
63.0	36.1397
66.0	37.0908
69.0	38.0418

## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z -6 [m]

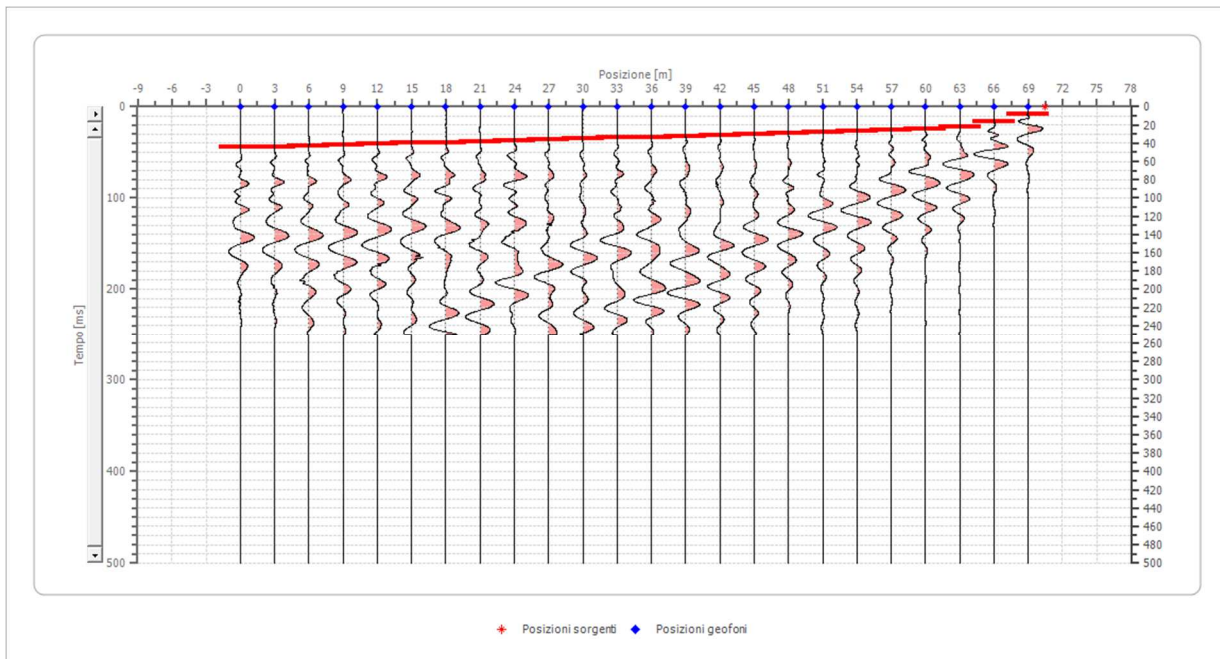


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	40.8950
3.0	39.9439
6.0	38.9929
9.0	38.0418
12.0	37.0908
15.0	36.1397
18.0	35.1887
21.0	34.2376
24.0	33.2866
27.0	32.3356
30.0	31.3845
33.0	30.4335
36.0	28.5314
39.0	27.5803
42.0	23.7761
45.0	18.0699
48.0	10.4615
51.0	5.7063
54.0	5.7063
57.0	13.3146
60.0	19.9720
63.0	25.6782
66.0	26.6293
69.0	27.5803

## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

Posizione sorgente Z -8 [m]

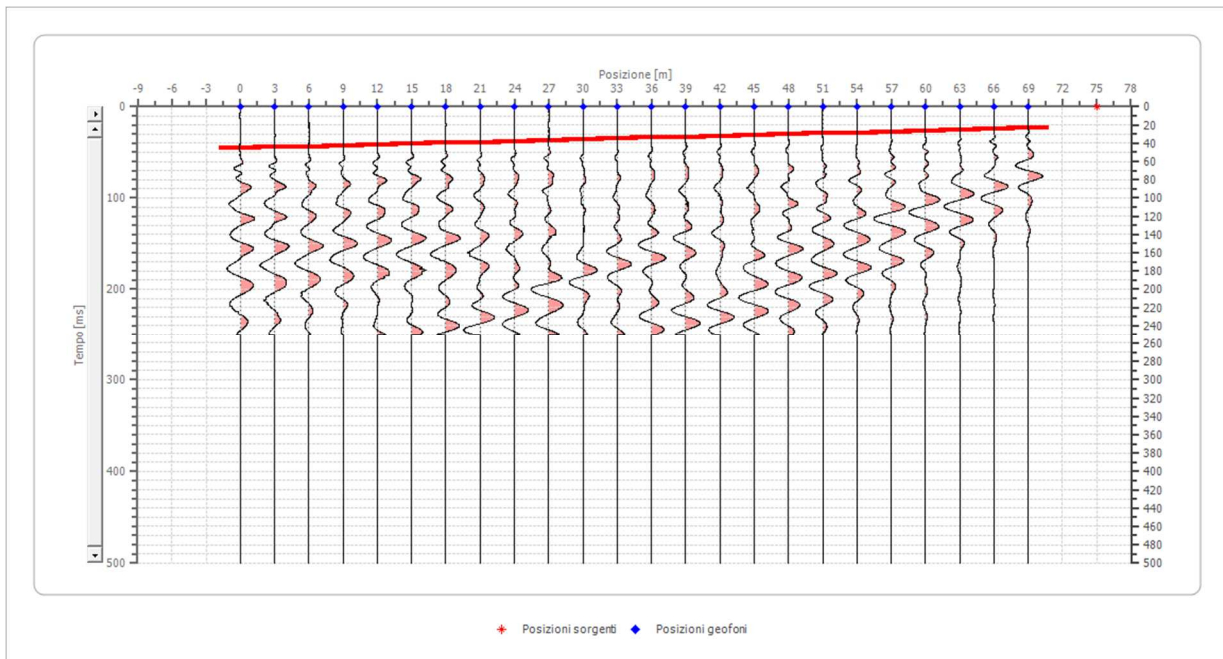


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	44.6991
3.0	43.7481
6.0	42.7971
9.0	41.8460
12.0	40.8950
15.0	39.9439
18.0	38.9929
21.0	38.0418
24.0	37.0908
27.0	36.1397
30.0	35.1887
33.0	34.2376
36.0	33.2866
39.0	32.3356
42.0	31.3845
45.0	30.4335
48.0	29.4824
51.0	27.5803
54.0	26.6293
57.0	25.6782
60.0	24.7272
63.0	21.8741
66.0	16.1678
69.0	7.6084

## Battuta 7

Posizione sorgente X 75 [m]

Posizione sorgente Z -9 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	45.6502
3.0	44.6991
6.0	43.7481
9.0	42.7971
12.0	41.8460
15.0	40.8950
18.0	39.9439
21.0	38.9929
24.0	38.0418
27.0	37.0908
30.0	36.1397
33.0	35.1887
36.0	34.2376
39.0	33.2866
42.0	32.3356
45.0	31.3845
48.0	30.4335
51.0	29.4824
54.0	28.5314
57.0	27.5803
60.0	26.6293
63.0	25.6782
66.0	24.7272
69.0	22.8251



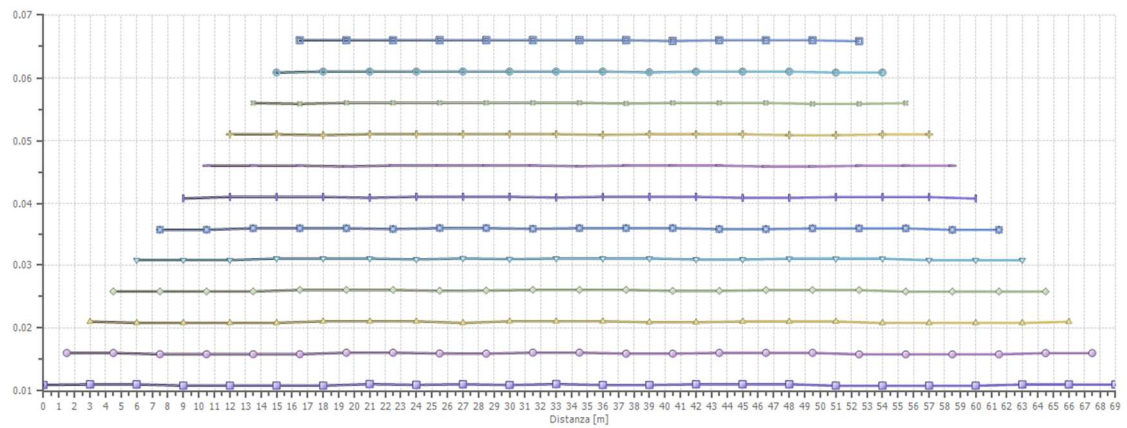
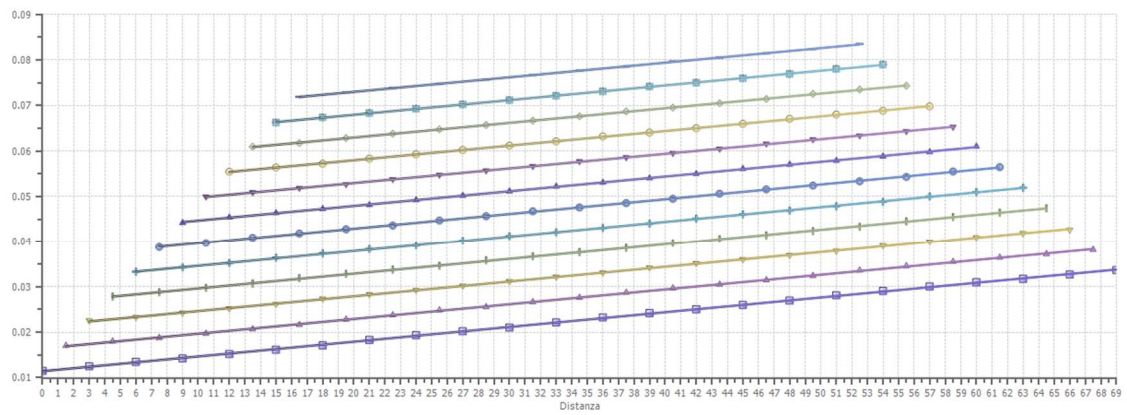


---

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

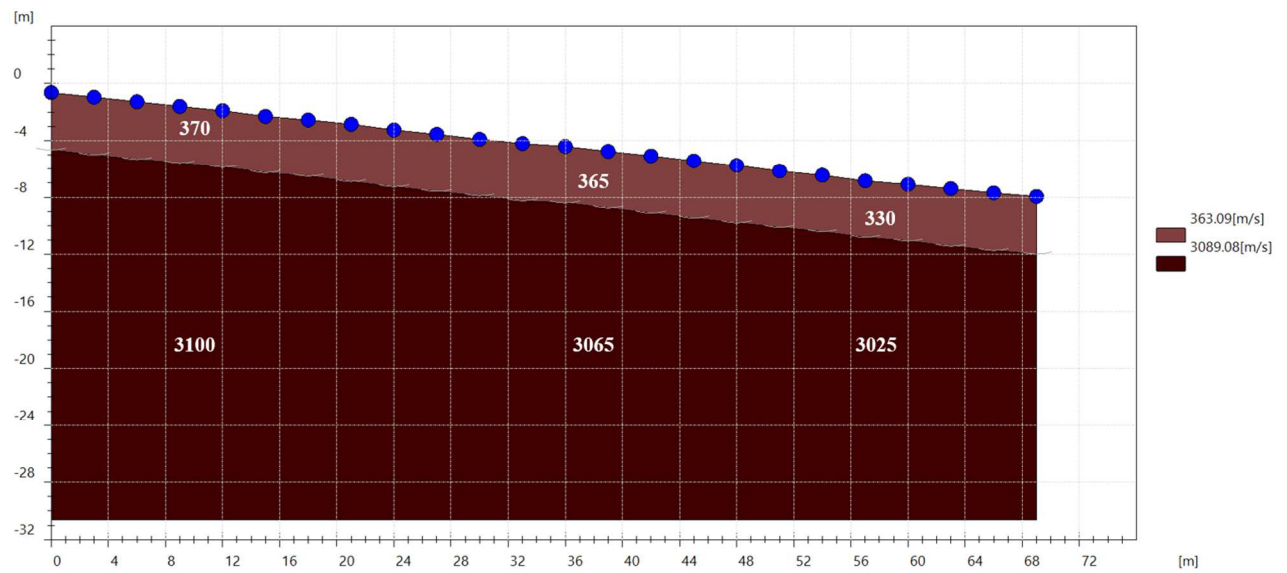
XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	4.0	--
G= 3.0 [m]	4.0	--
G= 6.0 [m]	4.0	--
G= 9.0 [m]	4.0	--
G= 12.0 [m]	4.0	--
G= 15.0 [m]	4.0	--
G= 18.0 [m]	4.0	--
G= 21.0 [m]	4.1	--
G= 24.0 [m]	4.0	--
G= 27.0 [m]	4.1	--
G= 30.0 [m]	4.0	--
G= 33.0 [m]	4.1	--
G= 36.0 [m]	4.0	--
G= 39.0 [m]	4.0	--
G= 42.0 [m]	4.0	--
G= 45.0 [m]	4.0	--
G= 48.0 [m]	4.0	--
G= 51.0 [m]	4.0	--
G= 54.0 [m]	4.0	--
G= 57.0 [m]	4.0	--
G= 60.0 [m]	4.0	--
G= 63.0 [m]	4.0	--
G= 66.0 [m]	4.0	--
G= 69.0 [m]	4.0	--
Velocità [m/sec]	363.1	3089.1
Descrizione		





## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE P

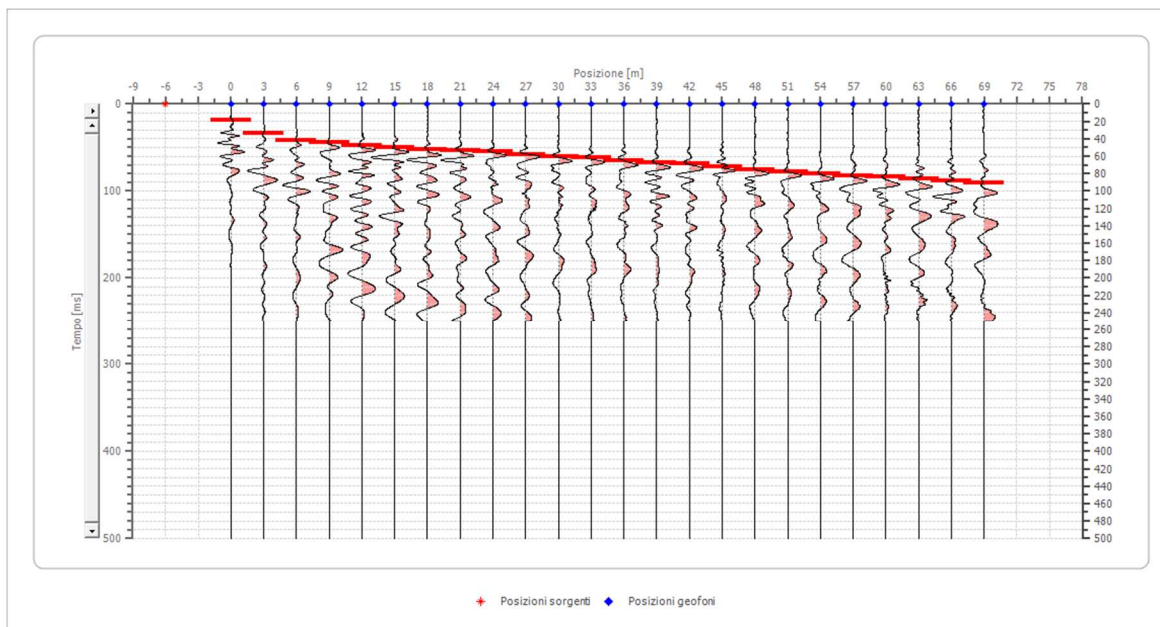


## Dati battute – ONDE SH

### Battuta 1

Posizione sorgente X -6 [m]

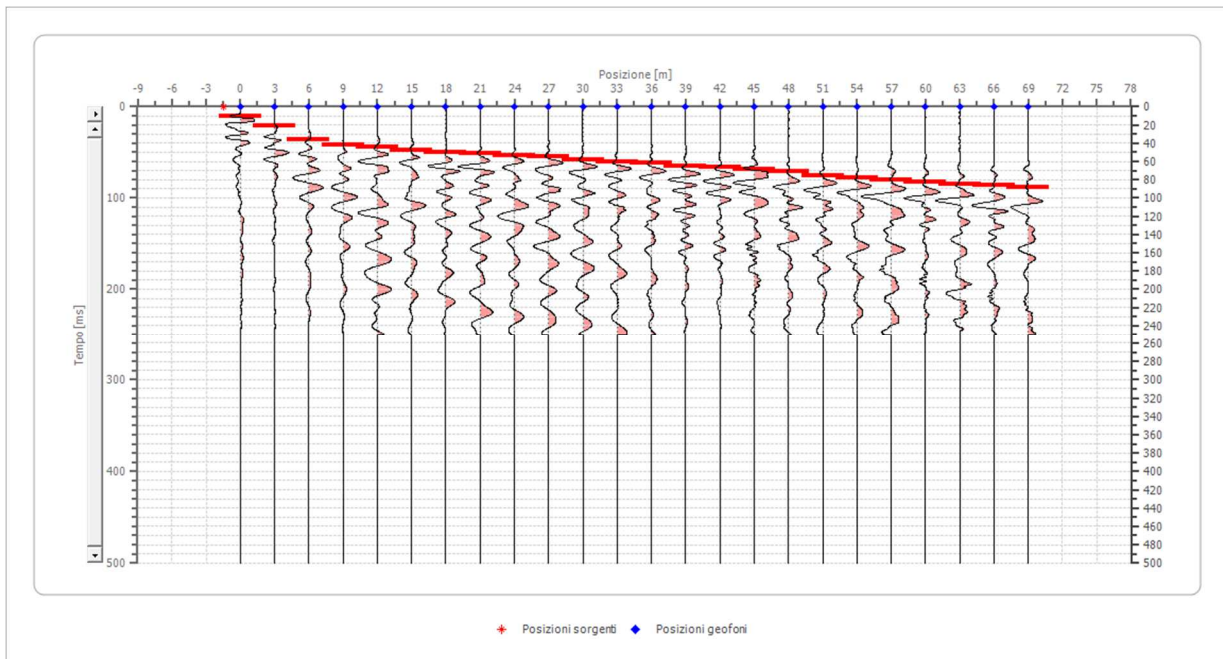
Posizione sorgente Z 0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	19.0209
3.0	33.2866
6.0	41.8460
9.0	44.6991
12.0	47.5523
15.0	49.4544
18.0	52.3075
21.0	53.2586
24.0	55.1607
27.0	58.0138
30.0	59.9159
33.0	61.8180
36.0	64.6711
39.0	67.5242
42.0	68.4753
45.0	72.2795
48.0	75.1326
51.0	77.9857
54.0	80.8389
57.0	82.7410
60.0	83.6920
63.0	86.5452
66.0	88.4473
69.0	91.3004

## Battuta 2

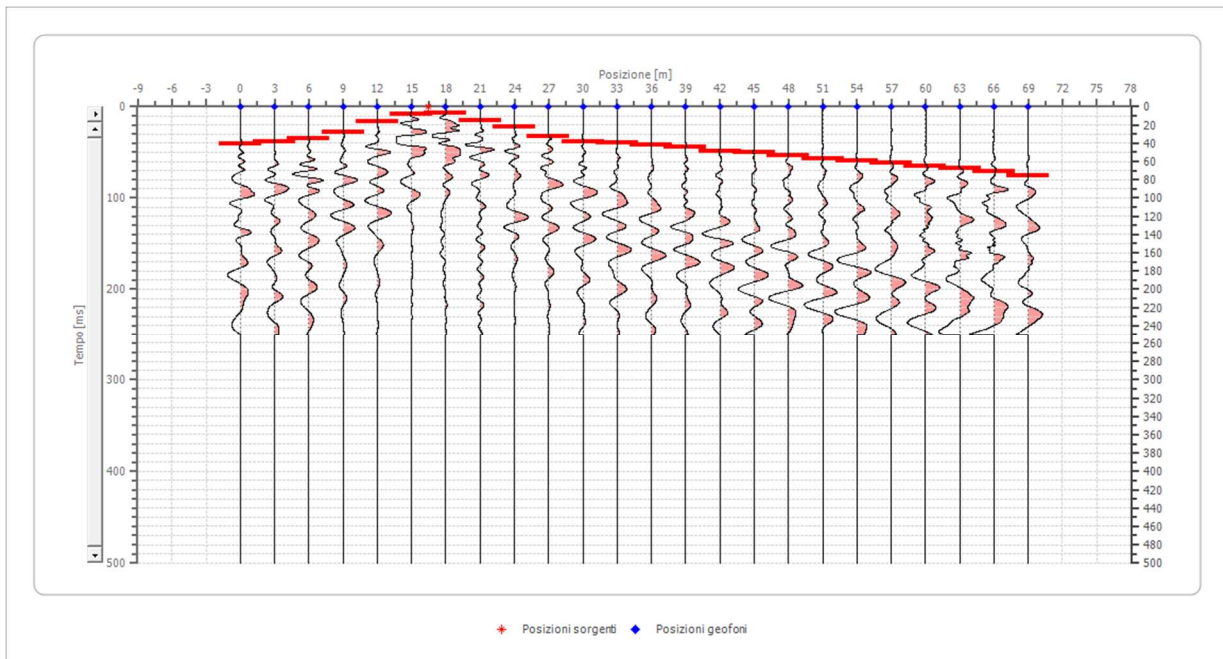
Posizione sorgente X      -1.5 [m]  
Posizione sorgente Z      0 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	10.4615
3.0	20.9230
6.0	36.1397
9.0	41.8460
12.0	44.6991
15.0	47.5523
18.0	49.4544
21.0	51.3565
24.0	53.2586
27.0	55.1607
30.0	58.0138
33.0	59.9159
36.0	61.8180
39.0	64.6711
42.0	66.5732
45.0	68.4753
48.0	71.3284
51.0	75.1326
54.0	77.9857
57.0	79.8878
60.0	82.7410
63.0	84.6431
66.0	86.5452
69.0	88.4473

### Battuta 3

Posizione sorgente X      16.5 [m]  
Posizione sorgente Z      -2 [m]

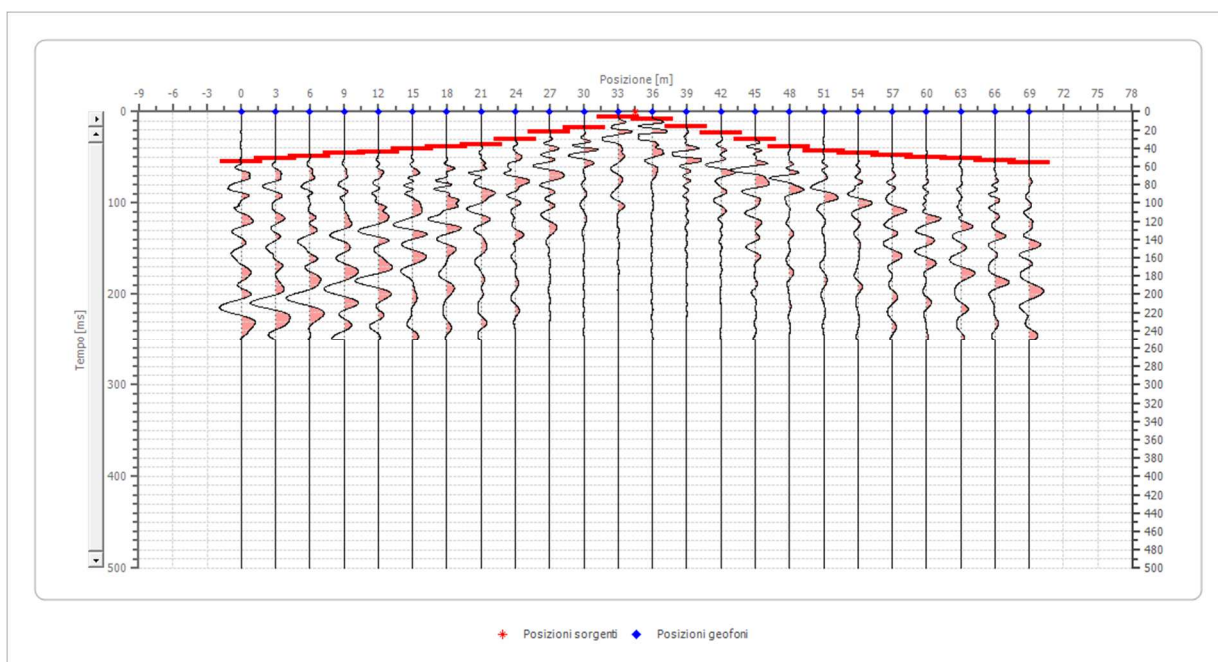


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	40.8950
3.0	38.0418
6.0	35.1887
9.0	27.5803
12.0	16.1678
15.0	7.6084
18.0	6.6573
21.0	15.2167
24.0	21.8741
27.0	32.3356
30.0	38.0418
33.0	39.9439
36.0	41.8460
39.0	44.6991
42.0	48.5033
45.0	50.4054
48.0	53.2586
51.0	57.0627
54.0	58.9648
57.0	61.8180
60.0	64.6711
63.0	67.5242
66.0	71.3284
69.0	75.1326

#### Battuta 4

Posizione sorgente X 34.5 [m]

Posizione sorgente Z -4 [m]

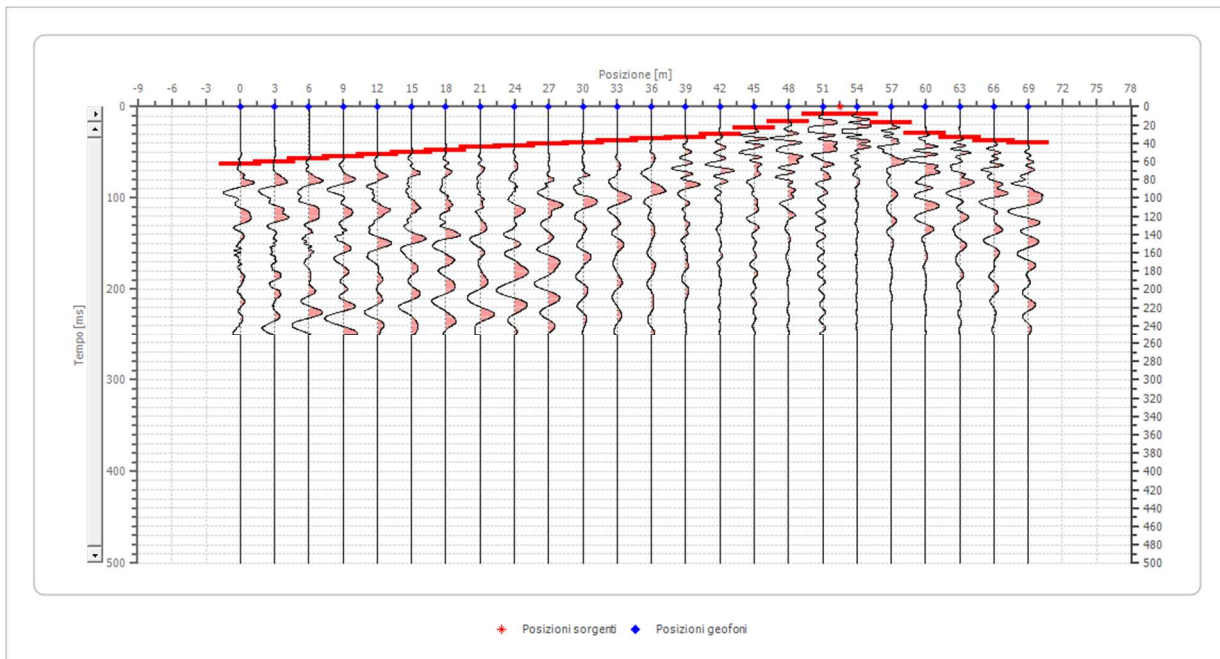


Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	55.1607
3.0	51.3565
6.0	48.5033
9.0	45.6502
12.0	43.7481
15.0	40.8950
18.0	38.0418
21.0	36.1397
24.0	30.4335
27.0	21.8741
30.0	17.1188
33.0	5.7063
36.0	7.6084
39.0	16.1678
42.0	23.7761
45.0	30.4335
48.0	38.0418
51.0	42.7971
54.0	45.6502
57.0	47.5523
60.0	49.4544
63.0	51.3565
66.0	53.2586
69.0	56.1117

## Battuta 5

Posizione sorgente X 52.5 [m]

Posizione sorgente Z -6 [m]



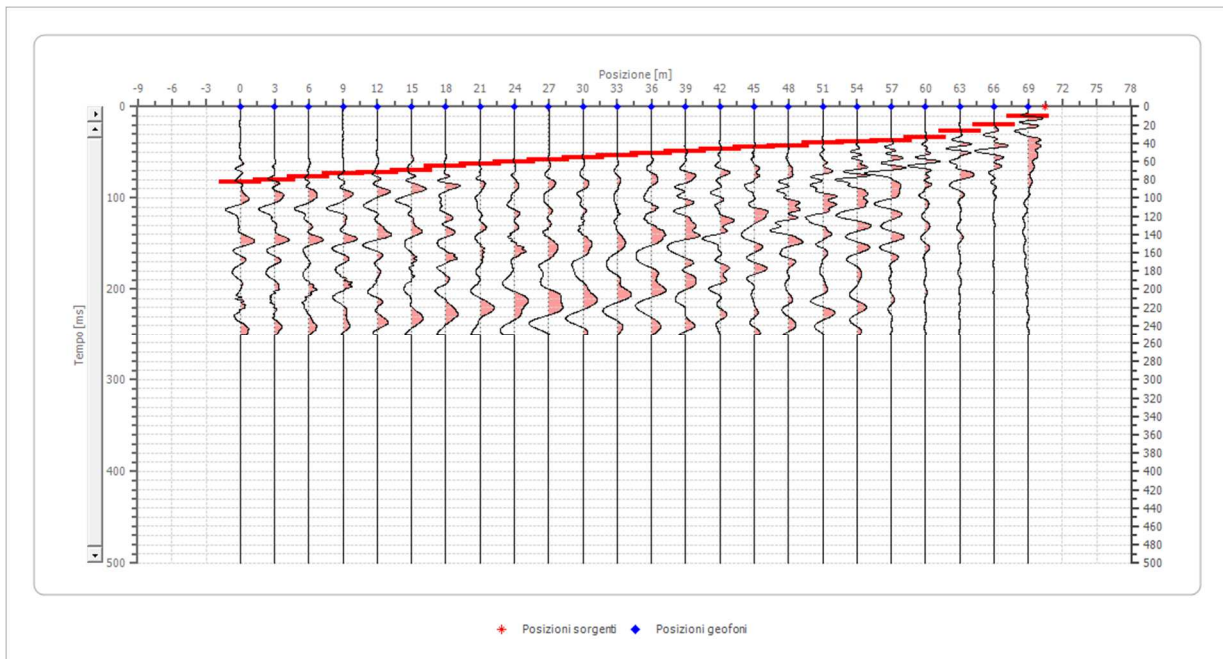
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	62.7690
3.0	59.9159
6.0	57.0627
9.0	55.1607
12.0	52.3075
15.0	50.4054
18.0	47.5523
21.0	44.6991
24.0	42.7971
27.0	40.8950
30.0	38.9929
33.0	37.0908
36.0	35.1887
39.0	33.2866
42.0	30.4335
45.0	23.7761
48.0	16.1678
51.0	8.5594
54.0	8.5594
57.0	17.1188
60.0	28.5314
63.0	34.2376
66.0	37.0908
69.0	38.9929



## Battuta 6

Posizione sorgente X 70.5 [m]

Posizione sorgente Z -8 [m]



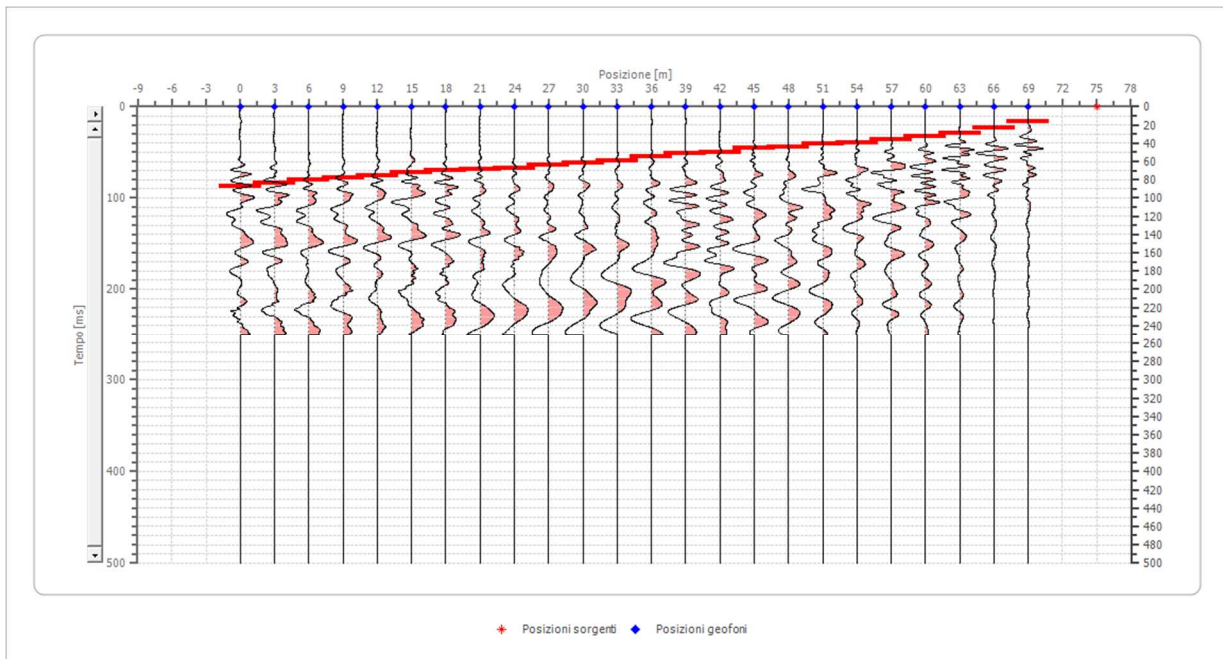
Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	82.7410
3.0	79.8878
6.0	77.0347
9.0	73.2305
12.0	72.2795
15.0	69.4263
18.0	65.6222
21.0	62.7690
24.0	59.9159
27.0	58.0138
30.0	56.1117
33.0	53.2586
36.0	51.3565
39.0	48.5033
42.0	46.6012
45.0	44.6991
48.0	42.7971
51.0	39.9439
54.0	38.0418
57.0	37.0908
60.0	34.2376
63.0	26.6293
66.0	19.9720
69.0	10.4615



## Battuta 7

Posizione sorgente X 75 [m]

Posizione sorgente Z -9 [m]



Posizione geofono [m]	Tempo [ms]
0.0	87.4962
3.0	83.6920
6.0	80.8389
9.0	77.9857
12.0	75.1326
15.0	72.2795
18.0	70.3774
21.0	68.4753
24.0	67.5242
27.0	63.7201
30.0	61.8180
33.0	58.9648
36.0	55.1607
39.0	51.3565
42.0	49.4544
45.0	45.6502
48.0	43.7481
51.0	40.8950
54.0	39.9439
57.0	36.1397
60.0	32.3356
63.0	28.5314
66.0	22.8251
69.0	16.1678

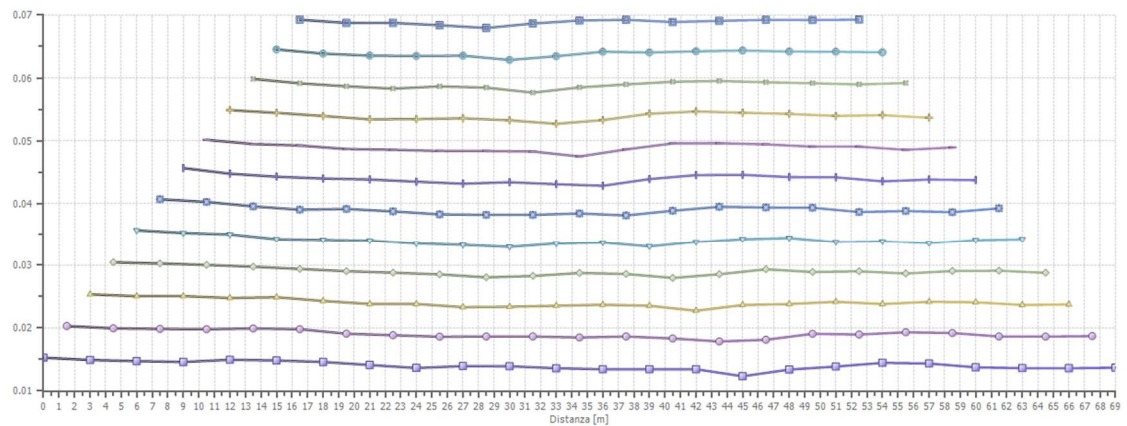
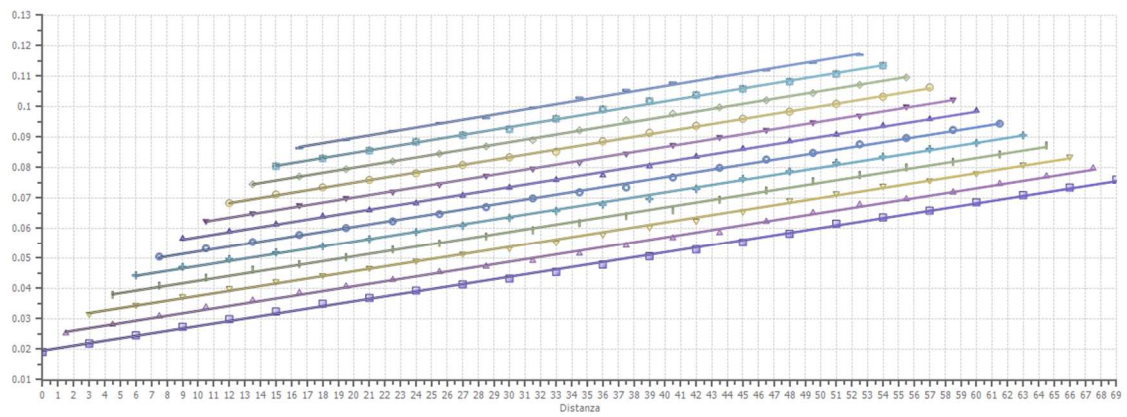


---

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

XY: 0

	Strato n. 1	Strato n. 2
G= 0.0 [m]	4.7	--
G= 3.0 [m]	4.6	--
G= 6.0 [m]	4.5	--
G= 9.0 [m]	4.5	--
G= 12.0 [m]	4.6	--
G= 15.0 [m]	4.5	--
G= 18.0 [m]	4.5	--
G= 21.0 [m]	4.3	--
G= 24.0 [m]	4.2	--
G= 27.0 [m]	4.3	--
G= 30.0 [m]	4.3	--
G= 33.0 [m]	4.2	--
G= 36.0 [m]	4.1	--
G= 39.0 [m]	4.1	--
G= 42.0 [m]	4.1	--
G= 45.0 [m]	3.8	--
G= 48.0 [m]	4.1	--
G= 51.0 [m]	4.2	--
G= 54.0 [m]	4.4	--
G= 57.0 [m]	4.4	--
G= 60.0 [m]	4.2	--
G= 63.0 [m]	4.2	--
G= 66.0 [m]	4.2	--
G= 69.0 [m]	4.2	--
Velocità [m/sec]	296.7	1232.4
Descrizione		



## SEZIONE SISMOSTRATIGRAFICA – ONDE SH

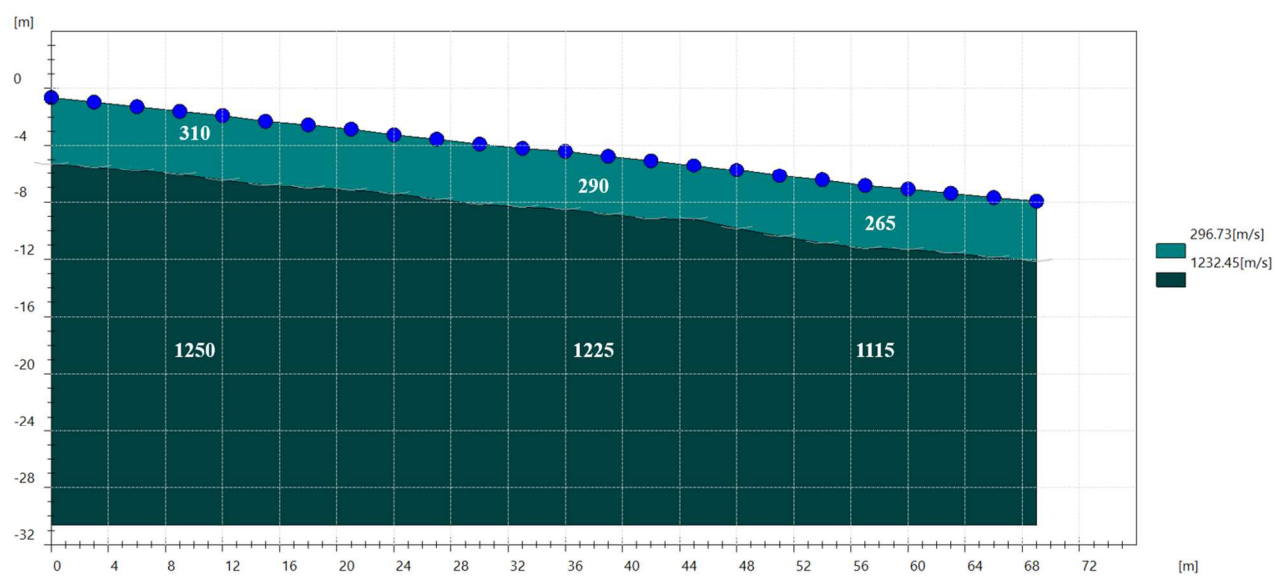


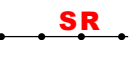


Foto – Indagine sismica a rifrazione SR\_3

- **ALLEGATO GRAFICO: UBICAZIONE DELLE INDAGINI**

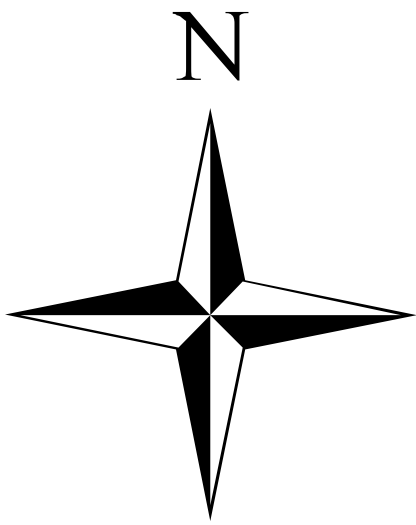


Legenda

 Sismica a Rifrazione in onde P-Sh



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



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

