



COMUNE DI CATANZARO

PROGETTAZIONE



Via Belvedere 8/10
30035 Mirano (VE)
www.fm-ingegneria.com
fm@fm-ingegneria.com

tel 041-5785711
fax 041-4355933



Via Belvedere 8/10
30035 Mirano (VE)
www.fm-ingegneria.com
divisioneimpianti@fm-ingegneria.com

tel 041-5785711
fax 041-4355933



Napoli
Via Filangieri, 11
sispi.ced@sispinet.it

tel. +39 081 412641



80131 Napoli
Viale DEGLI ASTRONAUTI, 8
amministrazione@giaconsulting.it

tel. +39 081 0383761

PROGETTO

COMUNE DI CATANZARO
LAVORI DI COMPLETAMENTO DELLE OPERE
INTERNE DEL PORTO DI CATANZARO MARINA

EMISSIONE

PROGETTO DEFINITIVO

DISCIPLINA

GEOLOGIA

TITOLO

A - PARTE GENERALE
Relazione sulle indagini integrative

| REV. | DATA | FILE | OGGETTO | DIS. | APPR. |
|------|------|------|---------|------|-------|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

ELABORATO N.

A33

| | | | |
|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
| DATA: 22/07/2019 | SCALA: - | FILE: 1259_A33_0.doc | J.N. 1259/19 |
| PROGETTO R. Buccione | DISEGNO R. Buccione | VERIFICA R. Rolandi | APPROVAZIONE S. Costabile |

INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Premessa | 2 |
| 2 | Indagine integrativa n-1 - Prospezione sismica di tipo “MASW” | 2 |
| 2.1 | ATTREZZATURE E METODOLOGIE IMPIEGATE | 4 |
| 2.2 | ACQUISIZIONE MASW..... | 5 |
| 2.3 | ELABORAZIONE DATI | 7 |
| 2.4 | RISULTATI DELLE INDAGINI | 18 |
| 3 | Indagine integrativa n.2 - Indagine di Sismica a rifrazione | 18 |
| 3.1 | ACQUISIZIONE DATI - ATTREZZATURE IMPIEGATE..... | 21 |
| 3.2 | ELABORAZIONE DATI | 24 |
| 3.3 | RISULTATI DELLE INDAGINI | 34 |
| 4 | Indagine integrativa n.3 - Indagine Magnetometrica | 34 |
| 4.1 | INDAGINE MAGNETOMETRICA – ACQUISIZIONE DATI | 34 |
| 4.2 | RISULTATI DELLE INDAGINI | 39 |

1 Premessa

Il sottoscritto Ph.D. Geol. Roberto Buccione, iscritto all'Albo dell'Ordine dei Geologi della Regione Campania al n° 2721, per conto della G.I.A. Consulting S.r.l., in raggruppamento con F&M Ingegneria S.p.A., SISPI S.r.l. e F&M divisione impianti S.r.l., a seguito della Procedura aperta per l'affidamento dei servizi di architettura e ingegneria concernenti la progettazione definitiva compresa valutazione di impatto ambientale, progettazione esecutiva, CSP dell'intervento denominato “ **Lavori di completamento delle opere interne del Porto di Catanzaro Marina**” del Comune di Catanzaro (Fig.1) – Settore Urbanistica e Pianificazione, ha redatto la presente relazione tecnica riportante i risultati di n.3 indagini integrative.

Tali indagini integrative sono:

- ✓ Indagine sismica di tipo MASW
- ✓ Indagine sismica a rifrazione
- ✓ Indagine magnetometrica



Figura 1 Ortofoto (Google Maps 2019) dell'area indagata

2 Indagine integrativa n-1 - Prospezione sismica di tipo “MASW”

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame sono state effettuate tre acquisizioni sismiche di tipo MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves), utili a definire il profilo verticale della VS e quindi alla definizione del parametro VS_{eq} (velocità di propagazione delle onde di taglio).

Nel loro insieme, le procedure adottate sono state eseguite in accordo alle Norme tecniche per le costruzioni del DM 17 gennaio 2018 (ex DM 14/01/2008), che, in buona misura, fanno risalire la stima dell'effetto di sito alle caratteristiche del profilo di velocità delle onde di taglio (VS).

La classificazione dei terreni è stata svolta sulla base del valore della $V_{S,eq}$ (il valore medio della V_S fino alla profondità di individuazione del substrato di riferimento) è stata eseguita una campagna di prospezione sismica di tipo "MASW", volta alla caratterizzazione sismica del sito oggetto di intervento.

Tale tipologia di indagine si propone di individuare il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali (onde di Rayleigh), che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde stesse. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè sono onde con diverse lunghezze d'onda che si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione (da "Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves - Ing. Vitantonio Roma).

Le onde di Rayleigh presentano una velocità del 90% circa rispetto a quella delle onde di taglio; in presenza di un semispazio omogeneo, la velocità di tali onde non varia in funzione della frequenza, non si ha cioè dispersione, la deformazione di un treno di onde dovuta alla variazione della velocità di propagazione in funzione della frequenza.

Questa deformazione si manifesta invece quando il terreno presenta una stratificazione; la velocità di propagazione per una certa lunghezza d'onda viene influenzata dalle proprietà che il mezzo possiede fino a una profondità dell'ordine di $\lambda/2$ circa.

Le componenti a bassa frequenza (lunghezze d'onda maggiori), sono caratterizzate da forte energia e grande capacità di penetrazione, mentre le componenti ad alta frequenza (lunghezze d'onda corte), hanno meno energia e una penetrazione superficiale.

Quindi una metodologia che utilizzi le onde superficiali è in grado di rilevare variazioni delle

proprietà elastiche dei materiali prossimi alla superficie al variare della profondità.

Nel caso che l'obiettivo sia di verificare le caratteristiche delle velocità delle onde S nel terreno, questo tipo di indagine è molto utile, in quanto la V_s è il fattore che governa le caratteristiche della dispersione; inoltre il metodo non è limitato dalla presenza di inversioni di velocità, e presenta una buona risoluzione.

La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano e quindi interessano e caratterizzano gli strati più profondi del suolo (Fig.2).

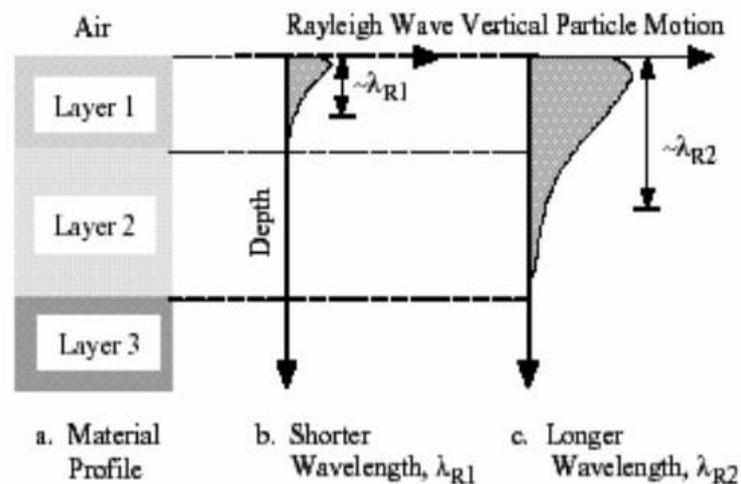


Figura 2 La profondità investigata dalle onde di Rayleigh dipende dalla lunghezza d'onda, dalla velocità delle onde di taglio V_s e dalla frequenza. (Stokoe II and Santamarina, 2000).

L'indagine secondo la tecnica MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves) prevede l'energizzazione mediante sorgente attiva, con registrazione simultanea su 12 o più canali; vengono utilizzati geofoni a componente verticale sensibili alle basse frequenze (un valore tipico sono 4,5 Hz).

La distanza dalla sorgente di energizzazione e il primo ricevitore condiziona I_{max} e quindi la profondità di indagine; anche la lunghezza dello stendimento geofonico è in relazione alla profondità di indagine, mentre la distanza intergeofonica condiziona lo spessore dello strato più sottile rilevabile.

È importante osservare che nel sismogramma possono comparire diversi tipi di onde: onde di corpo, onde superficiali non piane, onde riverberate dalle disomogeneità superficiali, oltre al rumore ambientale e quello imputabile alle attività umane.

Questo comporta una difficoltà aggiuntiva nella “lettura” dello spettro di velocità e quindi nella successiva individuazione della curva di dispersione.

Nella figura seguente (Fig.3) è riportato lo schema tipo della procedura di campagna seguito per la realizzazione della prospezione MASW attiva.

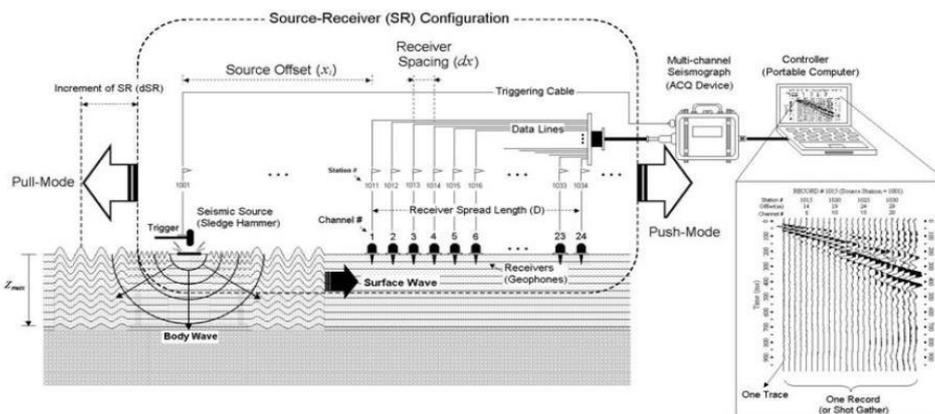


Figura 3 Schema della tecnica di indagine eseguita

Le onde di corpo sono di solito riconoscibili; le onde superficiali riverberate (back scattered) possono risultare prevalenti in un sismogramma quando siano presenti discontinuità orizzontali; le ampiezze relative di ciascuna tipologia di rumore generalmente cambiano con la frequenza e la distanza dalla sorgente.

Ciascun rumore, inoltre, ha diverse velocità e proprietà di attenuazione che possono essere identificate sulla registrazione multicanale grazie all'utilizzo di modelli di coerenza e in base ai tempi di arrivo e all'ampiezza di ciascuno.

In sintesi l'indagine comporta:

- l'acquisizione delle onde superficiali (ground roll);
- la determinazione di uno spettro di velocità, con velocità di fase in funzione della frequenza;
- l'identificazione della curva di dispersione, cioè la determinazione dei punti che, sullo spettro di velocità, appartengono a un certo modo di propagazione dell'onda superficiale di Rayleigh;
- l'inversione della curva di dispersione, al fine di ottenere il profilo verticale delle Vs.

L'inversione della curva di dispersione viene realizzata iterativamente, utilizzando come riferimento la curva di dispersione precedentemente ottenuta; per ottenere il profilo verticale Vs dalla curva di dispersione è necessaria l'assunzione di valori approssimati per il rapporto di Poisson e per la densità.

La procedura di inversione utilizzata dal software Easy MASW della GeoStru è legata agli “algoritmi genetici”, il quale approccio consente di ottenere risultati più affidabili rispetto ai metodi di inversione basati sulla matrice Jacobiana.

2.1 ATTREZZATURE E METODOLOGIE IMPIEGATE

Per l'acquisizione è stato impiegato il sismografo digitale Echo 48/2014 della Ambrogeo, che permette di misurare con estrema precisione ed accuratezza le vibrazioni del terreno in modo completamente automatico, memorizzando le misure su file SEG-Y o Ascii. Per la ricezione delle onde e come sorgente energizzante delle onde R (Rayleigh) è stata utilizzata una mazza da 8 kg battente su piastra energizzante in metallo.

Inoltre tutte le misure che vengono effettuate sono visibili sul touch screen dotato di grafica comprensibile ed intuitiva. Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

- Numero di canali: 48
- Range dinamico: 130db@1ms PG = 0dB; 120db@1ms PG = 18dB
- Gain di pre-amplificazione: 0,6,12,18,24,30,36,42,48,54,60,66,72 dB
- Intervallo di campionamento: 32, 64, 128, 256, 478, 956 ms
- Registrazione: 16000 campioni
- Accuratezza stacking del trigger: 1/32 dell'intervallo di campionamento
- Distorsione (THD): 0,0004%
- Segnale massimo in input: 5Vpp, 0dB
- CMR: 110 dB (fCM=60Hz fDATA = 30kSPS)
- Convertitore: 24 bit
- Noise: 0,25uV, 2ms 36dB
- Reiezione modo comune: >90dB
- Delay: 0-15 sec @1kSPS (max 1600 campioni)
- Potenza: 12 Volt
- Formato di output: SEGY/SAF (SESAME ASCII)

2.2 ACQUISIZIONE MASW

All'interno del porto di Catanzaro Lido, sulla base delle indicazioni fornite dalla committenza, sono state eseguite tre prospezioni sismiche MASW (Fig. 4) utilizzando una configurazione a 24 geofoni verticali da 4.5 Hz con interasse tra i geofoni pari a 2.0 m, per una lunghezza complessiva di 48.00 m (Fig.5).



Figura 4 Ubicazione degli stendimenti MASW

L'indagine è consistita nell'acquisizione del segnale prodotto percuotendo con una mazza del peso di circa 8 kg una piastra metallica posta a diretto contatto con il terreno. L'avvio dell'acquisizione è stato realizzato mediante la posa in prossimità della piastra metallica di battuta di un geofono detto "di trigger" o "starter", collegato a sua volta all'apparecchiatura per la registrazione del segnale, a una distanza di 2 m dal primo geofono.

Le registrazioni avvenute in campagna sono state ottenute, in fase di acquisizione, utilizzando la medesima sensibilità per ciascun geofono e senza l'utilizzo di filtraggio delle frequenze.

Poiché l'area oggetto di indagine è ubicata in un contesto semi-urbano, al fine di limitare l'effetto del rumore sismico di fondo e di conseguenza aumentare il Rapporto S/N (Segnale/Rumore), è stata attivata la procedura di "vertical stacking" in corrispondenza di ciascun punto sorgente di onde, che consiste nell'eseguire più scoppi reiterando la misura e sommando i valori registrati di volta in volta.

A partire dai dati registrati in sito il programma ricostruisce l'immagine di dispersione, detta anche "Overtone", che indica la distribuzione della velocità di fase (asse delle ordinate) delle onde sismiche rispetto alla frequenza d'onda.



Figura 5 Stendimento MASW n.1



Figura 6 Stendimento MASW n.2



Figura 7 Stendimento MASW n.3

2.3 ELABORAZIONE DATI

L'elaborazione dei dati e l'inversione della curva di dispersione della velocità di fase delle onde superficiali di Rayleigh, per entrambi i profili, sono state effettuate con il programma EASY MASW della GeoStru, che ha permesso di eseguire l'intero processo di elaborazione di una sezione sismostratigrafica delle VS. Gli elaborati relativi alle prospezioni sismiche MASW effettuate nel sito di specifico interesse sono di seguito riportati in dettaglio.

Con i dati di velocità delle onde S relativi a ciascun sismostrato individuato, si può determinare il parametro $V_{S,eq}$, utile per la definizione delle categorie di sottosuolo, in riferimento al D.M. 17/01/2018, mediante la formula:

$$V_{S,eq} = H / \sum (h_i / V_{s,i})$$

dove:

h_i spessore dell' i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

2.3.1 Indagine MASW n. 1

Tabella 1 Dati iniziali per l'acquisizione sismica

| | |
|--|--------|
| N. tracce | 24 |
| Durata acquisizione [msec] | 1001.1 |
| Interdistanza geofoni [m] | 2.0 |
| Periodo di campionamento [msec] | 0.479 |

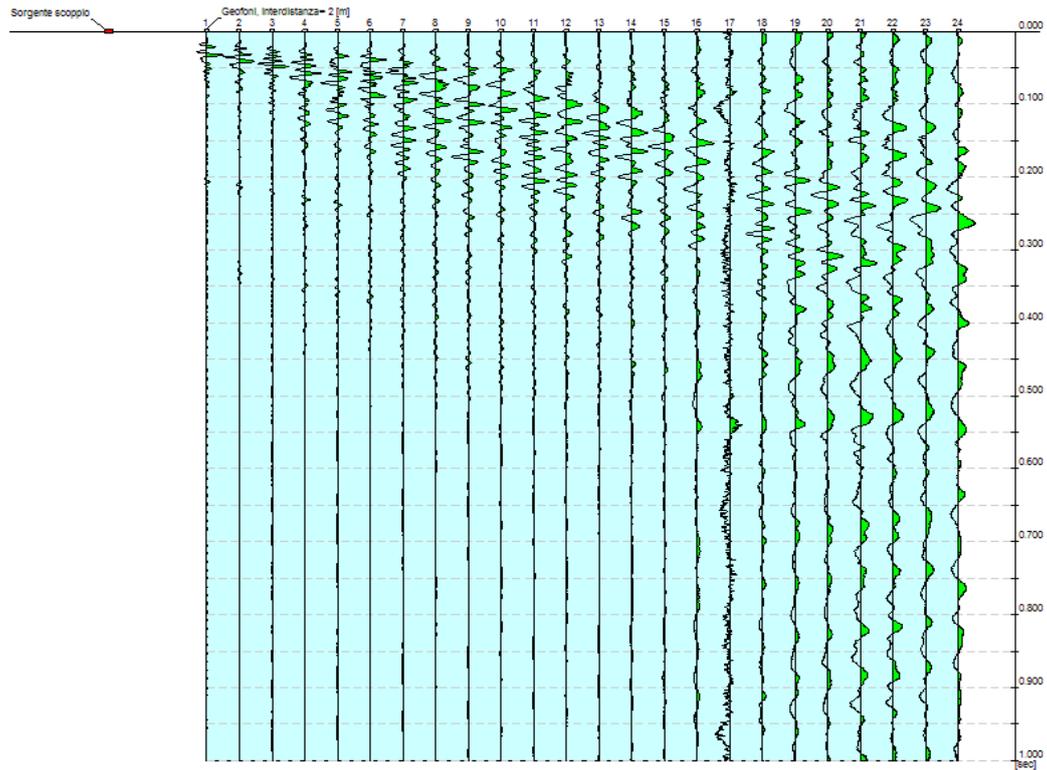


Figura 8 Traccia di acquisizione MASW n.1

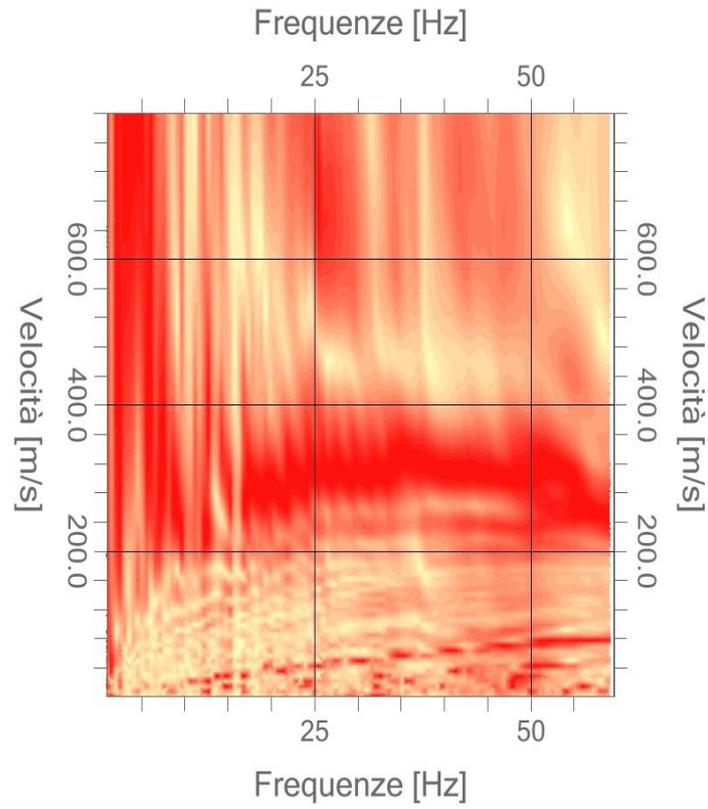


Figura 9 Spettro di dispersione MASW n.1

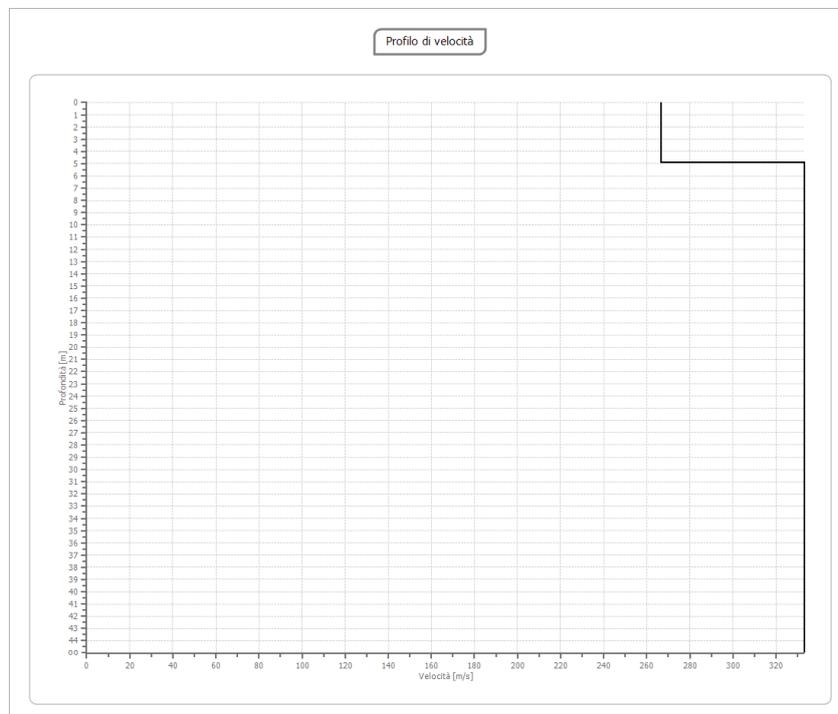


Figura 10 Profilo di velocità delle onde VS MASW n.1

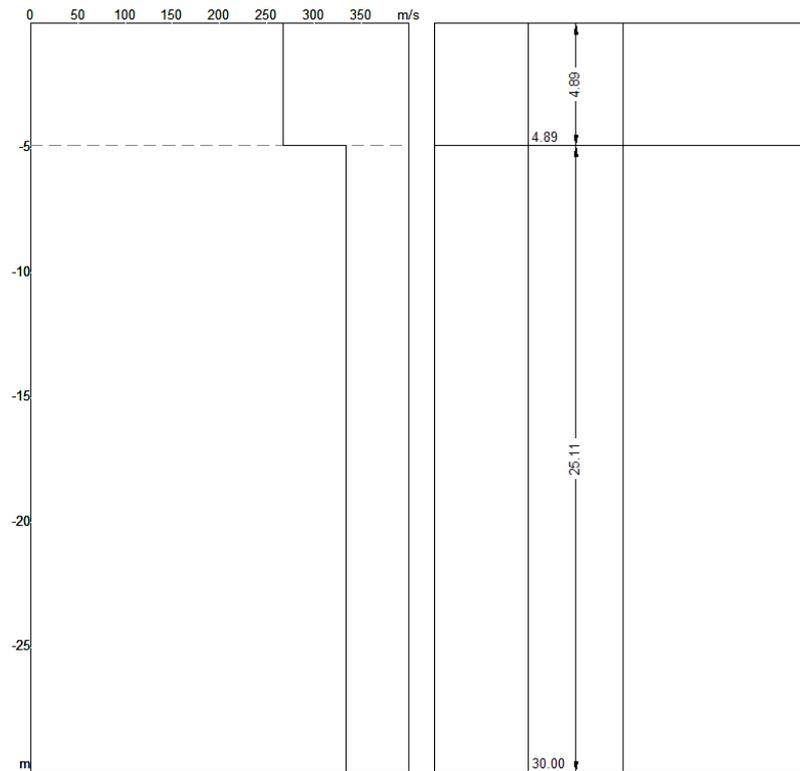


Figura 11 Sismostratigrafia MASW 1

Tabella 2 Risultati dell'elaborazione MASW n.1

| n. | Profondità [m] | Spessore [m] | Peso unità volume [kg/mc] | Coefficiente Poisson | Vp [m/sec] | Vs [m/sec] |
|----|-------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| 1 | 4.89 | 4.89 | 1800.0 | 0.3 | 498.9 | 266.7 |
| 2 | oo | oo | 1800.0 | 0.3 | 623.6 | 333.3 |

Tabella 3 Categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC/2018

| | |
|----------------------------|--|
| VS, eq [m/sec] | 320.27 |
| Categoria del suolo | C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |

2.3.2 Indagine MASW n. 2

Tabella 4 Dati iniziali per l'acquisizione sismica

| | |
|--|--------|
| N. tracce | 24 |
| Durata acquisizione [msec] | 1001.1 |
| Interdistanza geofoni [m] | 2.0 |
| Periodo di campionamento [msec] | 0.479 |

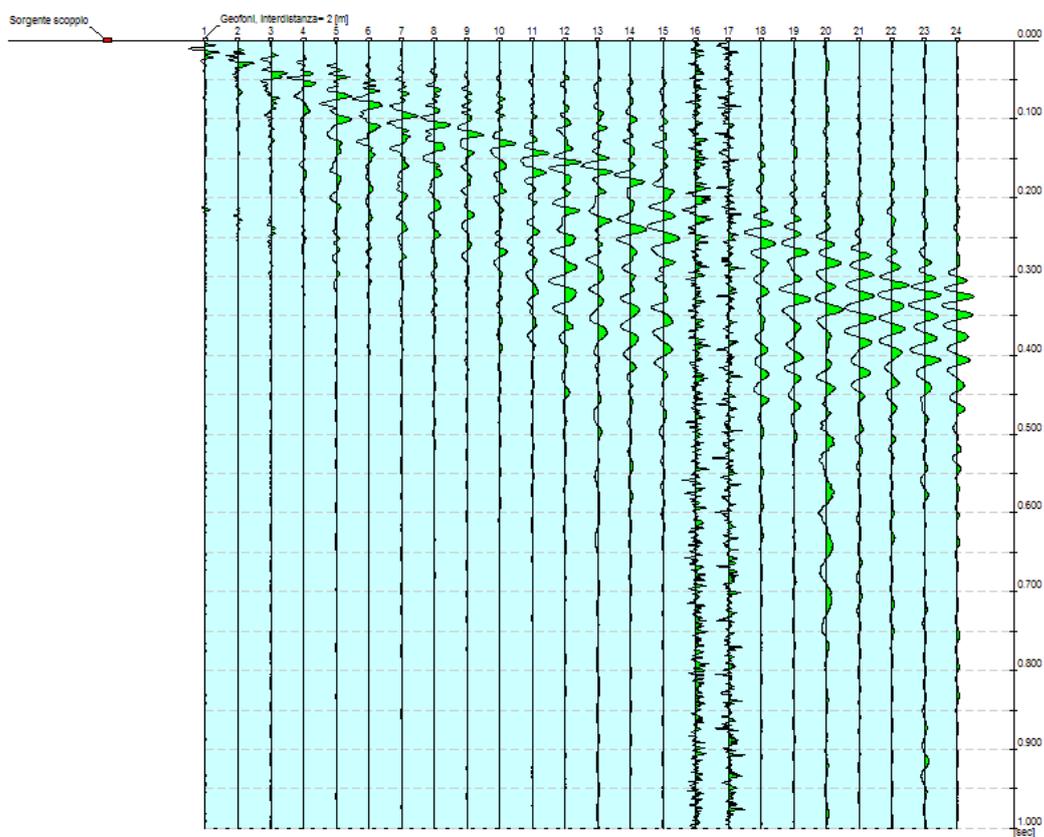


Figura 12 Traccia di acquisizione MASW n.2

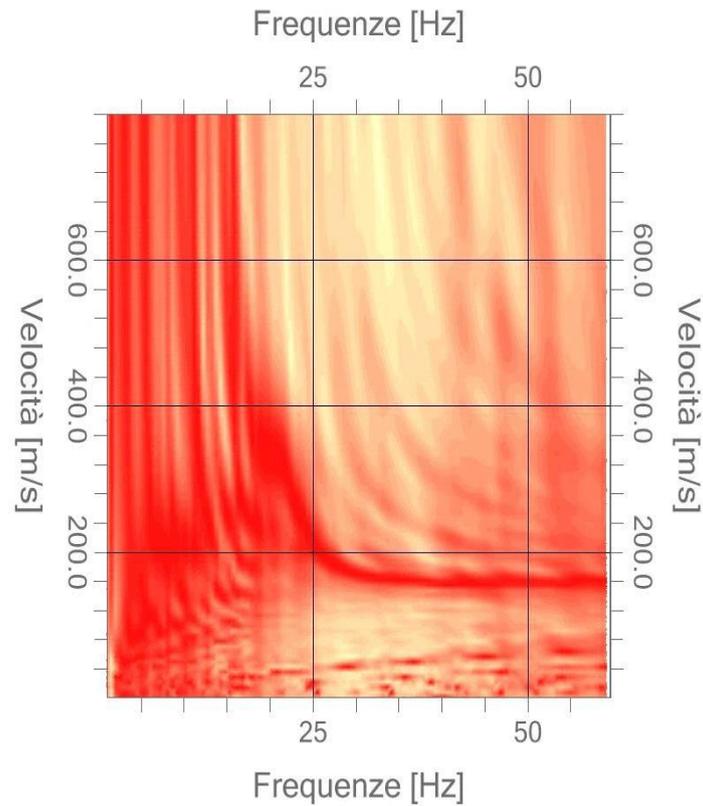


Figura 13 Spettro di dispersione MASW n.2

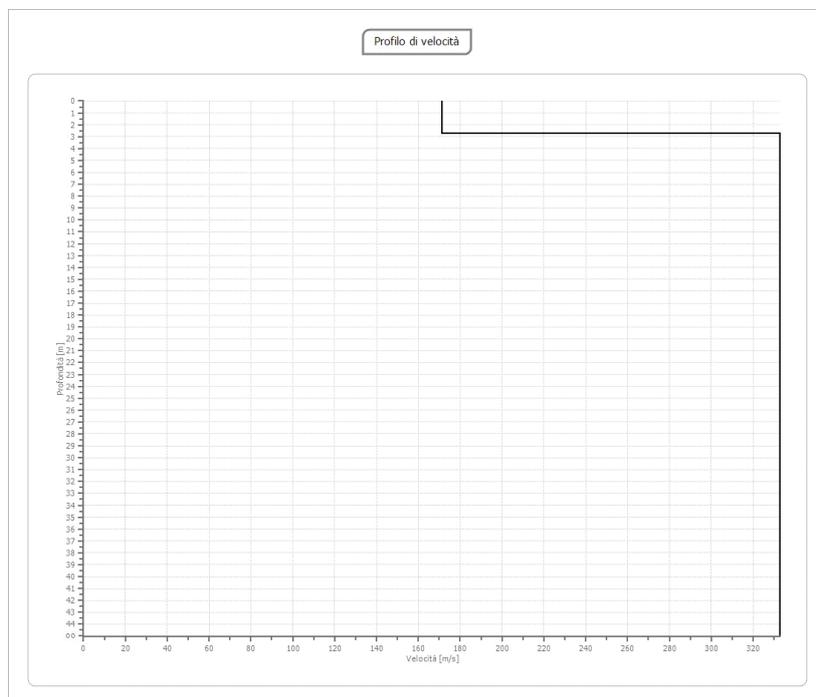


Figura 14 Profilo di velocità delle onde VS relativo alla MASW n.2

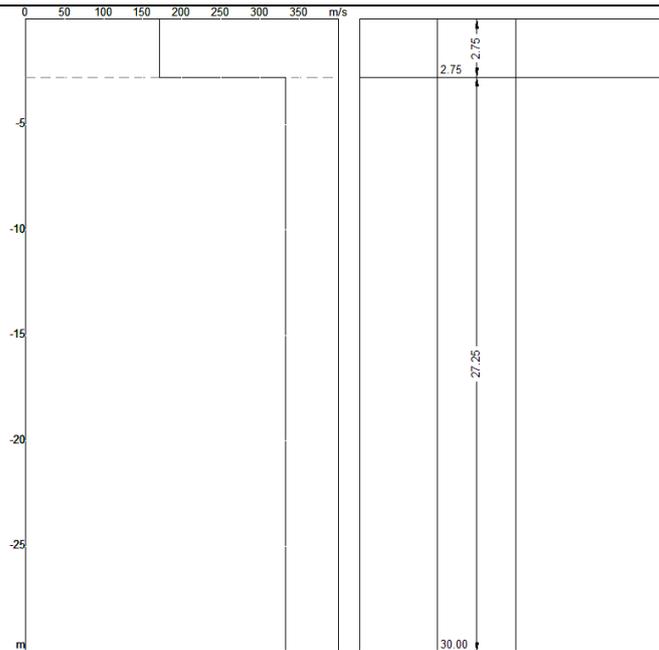


Figura 15 Sismostratigrafia relativa alla MASW n.2

Tabella 5 Risultati dell'elaborazione MASW n.2

| n. | Profondità [m] | Spessore [m] | Peso unità volume [kg/mc] | Coefficiente Poisson | Vp [m/sec] | Vs [m/sec] |
|----|----------------|--------------|---------------------------|----------------------|------------|------------|
| 1 | 2.75 | 2.75 | 1800.0 | 0.3 | 320.4 | 171.3 |
| 2 | oo | oo | 1800.0 | 0.3 | 622.9 | 332.9 |

Tabella 6 Categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC/2018

| | |
|----------------------------|--|
| VS, eq [m/sec] | 306.46 |
| Categoria del suolo | C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |

2.3.3 Indagine MASW n. 3

Tabella 7 Dati iniziali per l'acquisizione sismica

| | |
|------------------|----|
| N. tracce | 24 |
|------------------|----|

| | |
|--|--------|
| Durata acquisizione [msec] | 1001.1 |
| Interdistanza geofoni [m] | 2.0 |
| Periodo di campionamento [msec] | 0.479 |

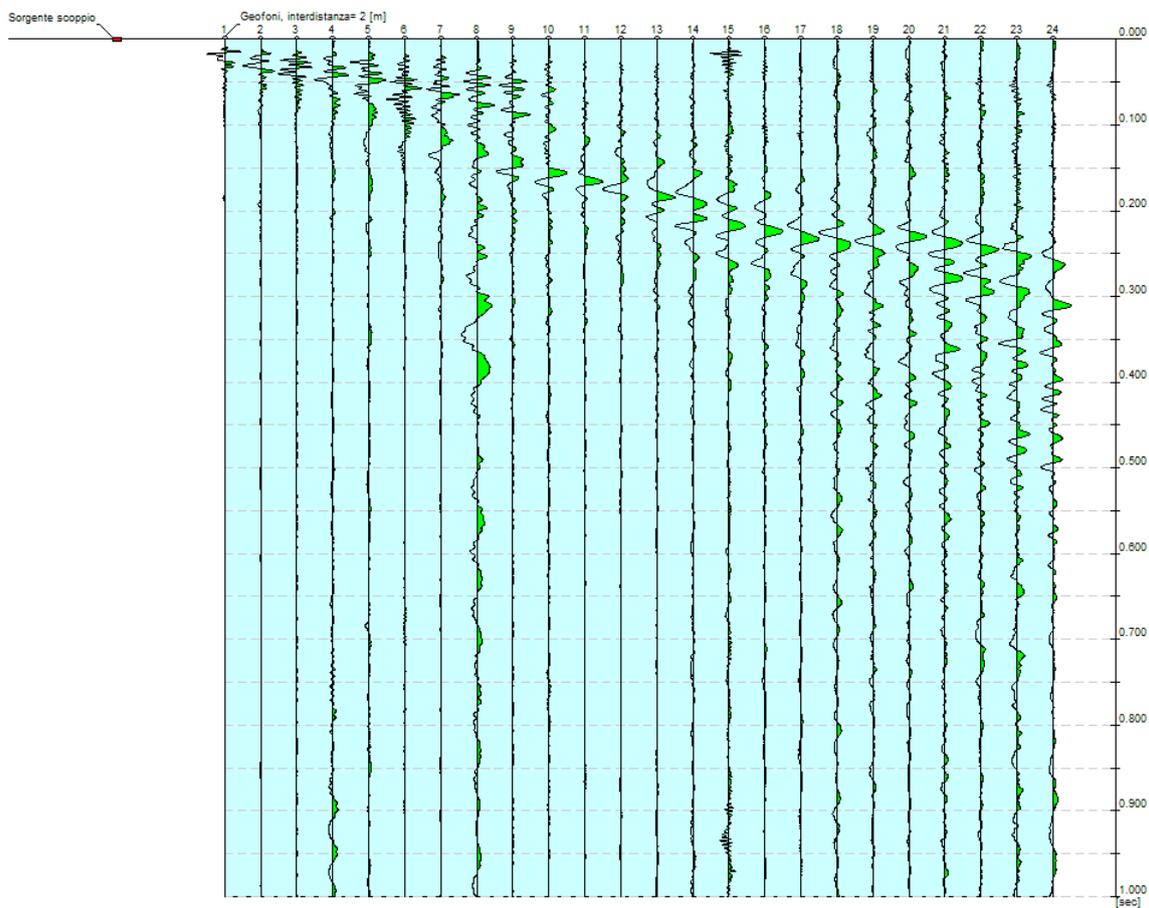


Figura 16 Traccia di acquisizione MASW n.3

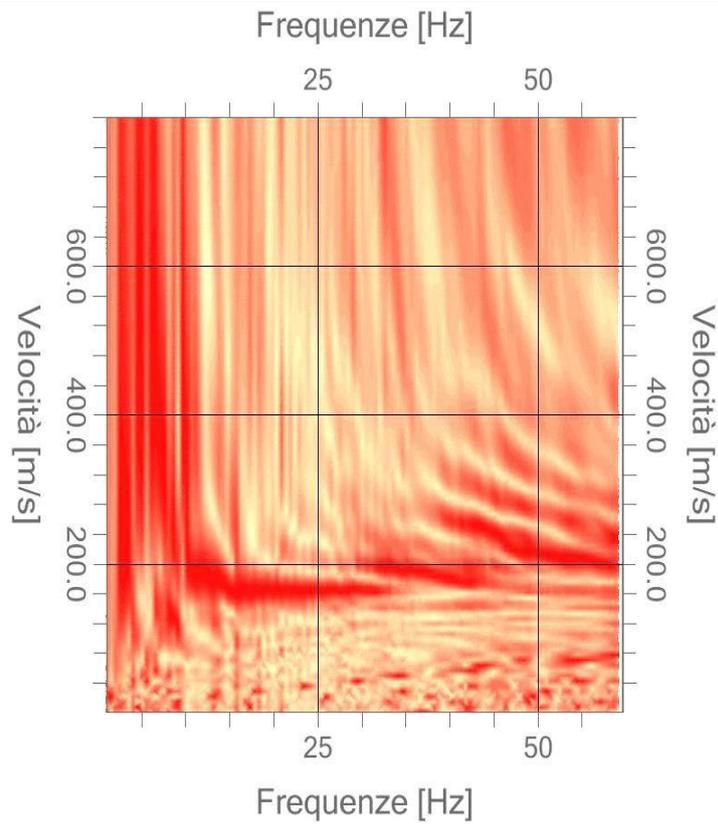


Figura 17 Spettro di dispersione MASW n.3

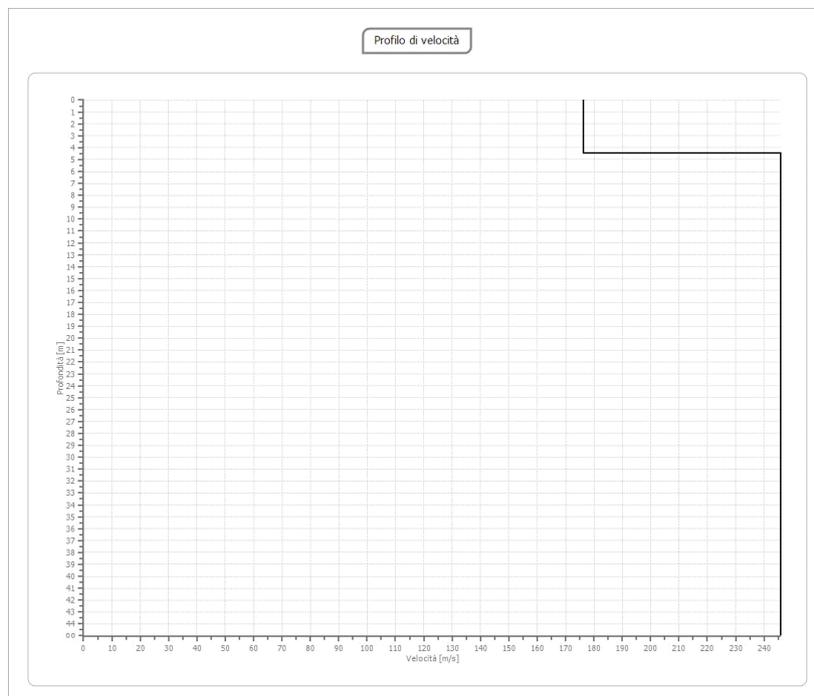


Figura 18 Profilo di velocità delle onde VS relativo alla MASW n.3

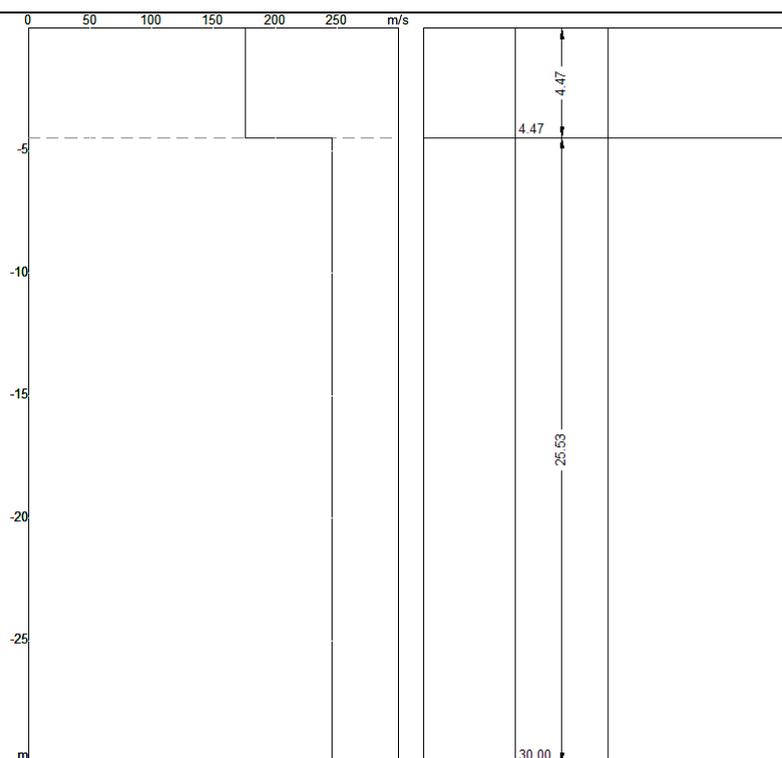


Figura 19 Sismostratigrafia relativa alla MASW n.3

Tabella 8 Risultati dell'elaborazione MASW n.3

| n. | Profondità [m] | Spessore [m] | Peso unità volume [kg/mc] | Coefficiente Poisson | Vp [m/sec] | Vs [m/sec] |
|----|-------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
| 1 | 4.47 | 4.47 | 1800.0 | 0.3 | 329.7 | 176.2 |
| 2 | oo | oo | 1800.0 | 0.3 | 460.2 | 246.0 |

Tabella 9 Categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC/2018

| | |
|----------------------------|--|
| VS, eq [m/sec] | 278.68 |
| Categoria del suolo | C - Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |

2.4 RISULTATI DELLE INDAGINI

Sono state effettuati 3 stendimenti sismici di tipo MASW utilizzando 24 geofoni con interdistanza di 2 m per una lunghezza complessiva di 48.00 m.

Sulla base dei risultati dell'indagine sismica di tipo MASW effettuata nell'area di interesse risulta evidente la presenza di 2 sismostrati. In particolare si osserva la presenza di uno strato più superficiale rappresentato da una sabbia grossolana ghiaiosa, allo stato sciolto con uno spessore che va dai 3 ai 5 m, poggiante su uno strato più addensato che consiste in una sabbia fine leggermente limosa con intercalazioni di sabbie grossolane ghiaiose e ciottolose. In particolare osservando i risultati dell'elaborazione MASW, si osserva che per tutti i 3 stendimenti effettuati, sulla base del valore delle VS, eq, la categoria di sottosuolo risulta essere la medesima.

Infatti i valori delle VS, eq risultano essere i seguenti:

VS, eq Stendimento 1 = 320,27 m/s

VS, eq Stendimento 2 = 306,46 m/s

VS, eq Stendimento 3 = 278,69 m/s

Pertanto, l'intera zona analizzata ricade, ai sensi delle NTC/2018, nella categoria di sottosuolo

C (Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s).

3 Indagine integrativa n.2 - Indagine di Sismica a rifrazione

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.

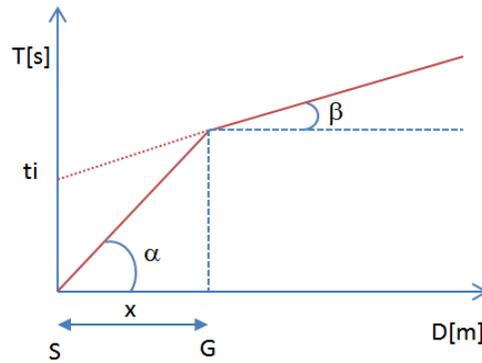
Vanno sotto il nome di **sismica a rifrazione** una serie di tecniche utilizzate nel ramo della geofisica che consente di interpretare la stratigrafia del sottosuolo, basate sul principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità individuata fra due corpi rocciosi aventi proprietà meccaniche diverse (orizzonte rifrattorio).

L'unica condizione per eseguire studi di sismica a rifrazione è che la successione rocciosa da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità: in questo caso si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

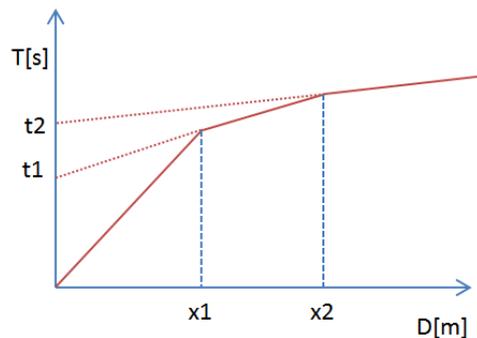
Il metodo di sismica a rifrazione si basa sul principio che quando un'onda sismica (Onda P e/o Onda S) incide su una superficie attraverso la quale c'è un contrasto di velocità, la direzione di viaggio di quell'onda cambia quando entra nel nuovo mezzo.

Sulla superficie si posizionano i geofoni ad una certa distanza dalla sorgente sismica (esplosione). I geofono situati vicino alla sorgente rilevano prima l'onda diretta che arriva viaggiando alla velocità del primo strato, mentre quelli più lontani rilevano prima le onde rifratte che viaggiano a velocità più elevata.

Conoscendo i tempi di primo arrivo e la distanza geofono-sorgente, tramite l'analisi delle dromocrone si può determinare la velocità dei vari strati, e da qui produrre una stratigrafia sismica ed infine risalire alle formazioni che compongono la serie investigata nel sottosuolo.



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.

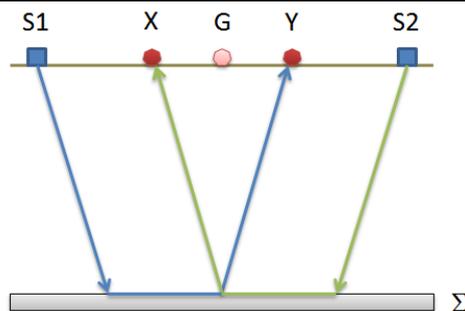


Infine, dalla conoscenza dei tempi t_i è possibile ricavare gli spessori dei rifrattori mediante la relazione:

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

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

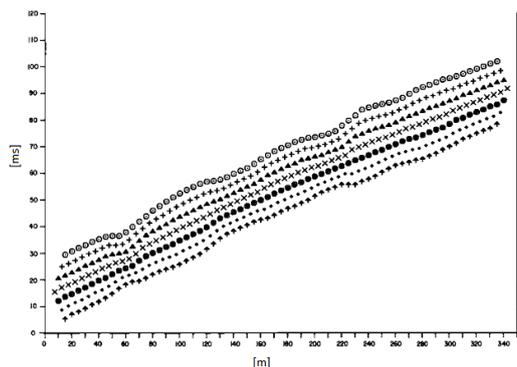
Il metodo è basato sulla ricerca di una distanza intergeofonica virtuale XY tale che i raggi sismici che partono da punti di energizzazione simmetrici rispetto allo stendimento, arrivino al geofono posto in posizione X e a quello posto in posizione Y provenendo da un medesimo punto del rifrattore.



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

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



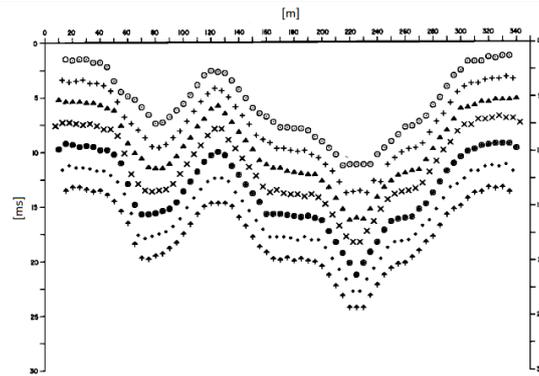
dove T_{S_1Y} e T_{S_2X} sono i tempi di percorrenza dei raggi sismici per giungere, rispettivamente, dalla sorgente S1 ad X e dalla sorgente S2 ad Y mentre $T_{S_1S_2}$ è il tempo di tragitto tra i due punti di scoppio S1 ed S2, esternamente simmetrici rispetto allo stendimento. T_v è il tempo calcolato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

3.1 ACQUISIZIONE DATI - ATTREZZATURE IMPIEGATE

L'indagine è stata effettuata tramite uno stendimento sismico (Fig.2) composto da 24 geofoni da 4.5 Hz con una spaziatura di 2 m, pertanto la lunghezza totale degli stendimenti è di 48 m (Fig.3, 4).

Per l'acquisizione è stato impiegato il sismografo digitale Echo 48/2014 della Ambrogeo, che permette di misurare con estrema precisione ed accuratezza le vibrazioni del terreno in modo completamente automatico, memorizzando le misure su file SEG-Y o Ascii. Inoltre tutte le misure che vengono effettuate sono visibili sul touch screen dotato di grafica comprensibile ed intuitiva. L'attrezzatura è completata una sorgente energizzante delle onde R (Rayleigh) composta da una mazza da 8 kg battente su piastra energizzante in metallo.

Di seguito vengono elencate le caratteristiche tecniche:

- Numero di canali: 48
- Range dinamico: 130db@1ms PG = 0dB; 120db@1ms PG = 18dB
- Gain di pre-amplificazione: 0,6,12,18,24,30,36,42,48,54,60,66,72 dB
- Intervallo di campionamento: 32, 64, 128, 256, 478, 956 s
- Registrazione: 16000 campioni
- Accuratezza stacking del trigger: 1/32 dell'intervallo di campionamento
- Distorsione (THD): 0,0004%
- Segnale massimo in input: 5Vpp, 0dB

- CMR: 110 dB (fCM=60Hz fDATA = 30kSPS)
- Convertitore: 24 bit
- Noise: 0,25uV, 2ms 36dB
- Reiezione modo comune: >90dB
- Delay: 0-15 sec @1kSPS (max 1600 campioni)
- Potenza: 12 Volt
- Formato di output: SEGY/SAF (SESAME ASCII)



Figura 20 Ubicazione degli stendimenti sismici

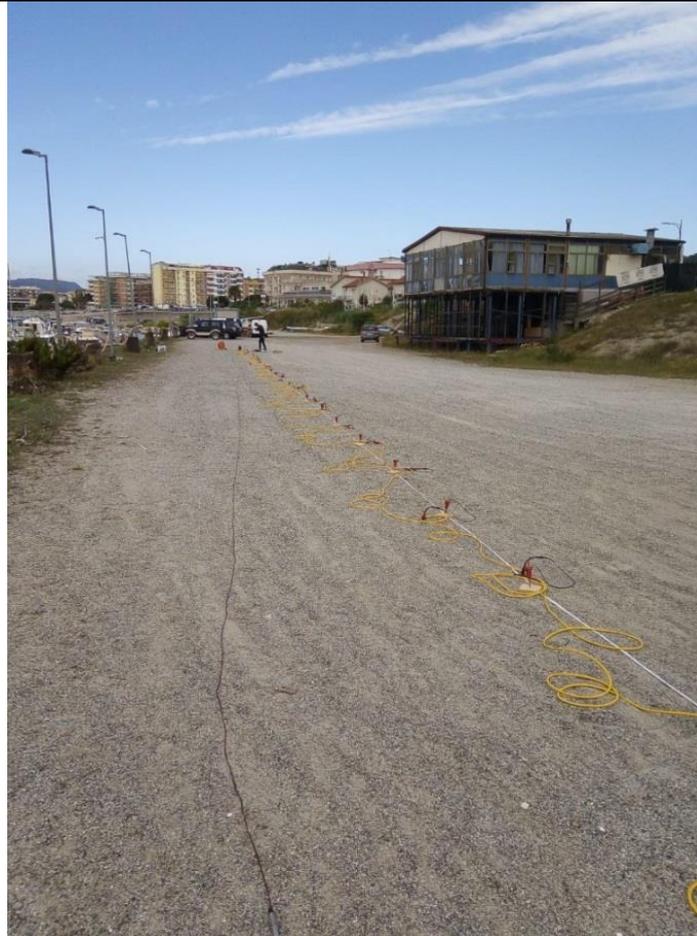


Figura 21 Stendimento sismico n.1

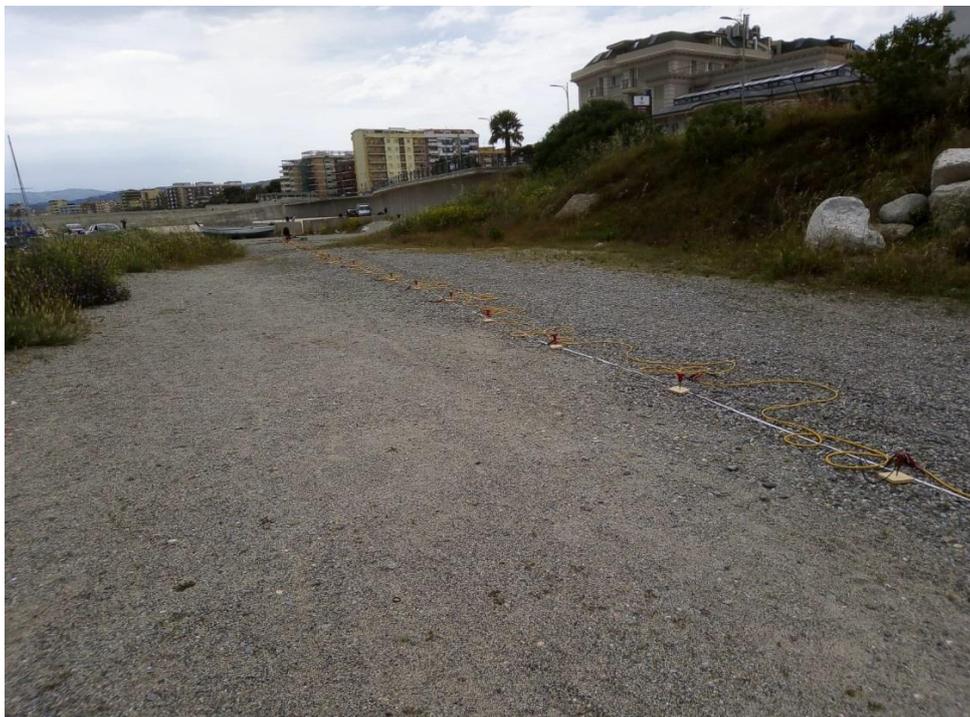


Figura 22 Stendimento sismico n.2

3.2 ELABORAZIONE DATI

3.2.1 Stendimento 1

Battuta 1 (Sorgente 0 m)

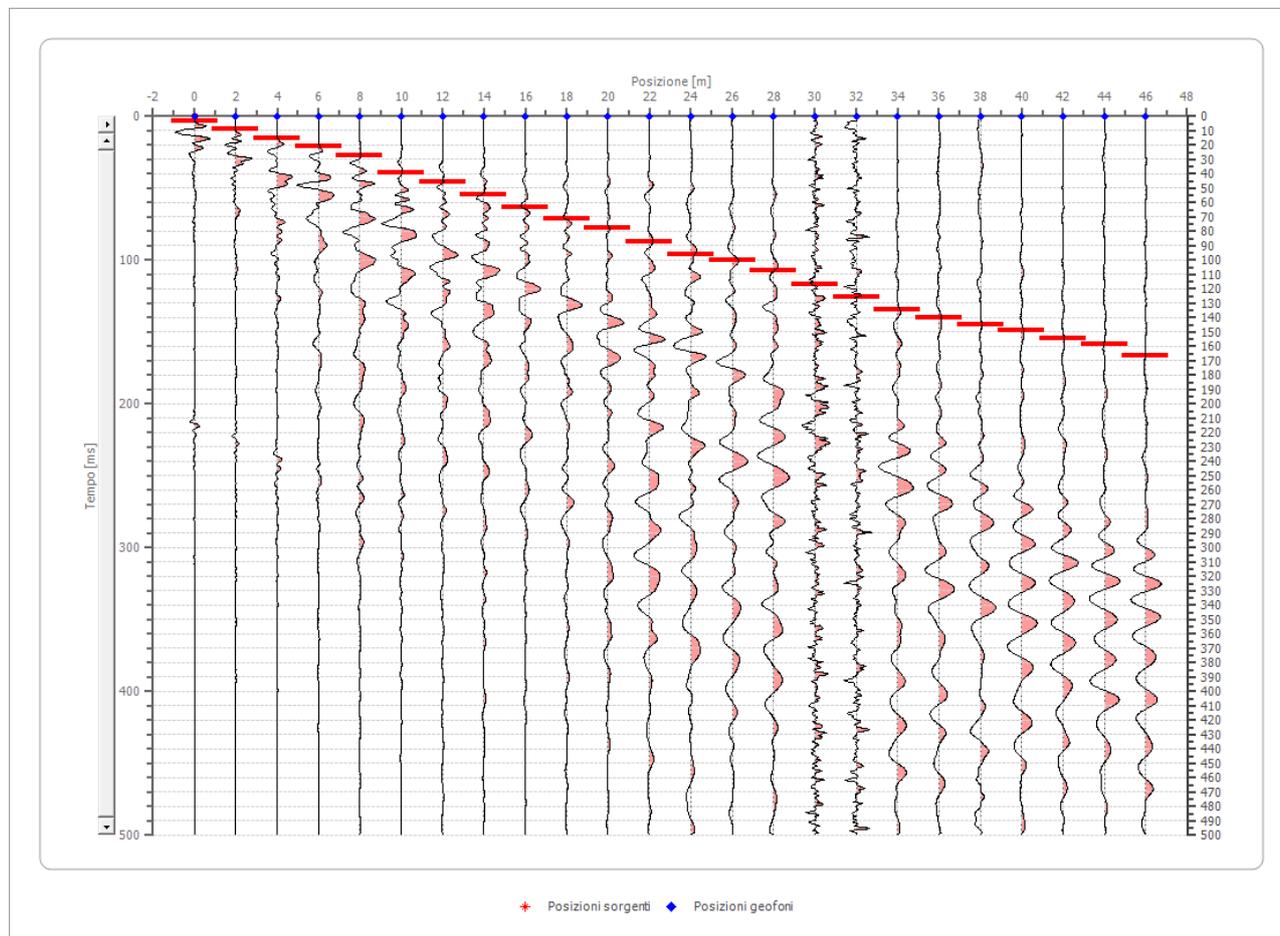


Figura 23 Grafico delle tracce sismiche acquisite

Tabella 10 Tempi di arrivo delle onde P

| Posizione geofono [m] | Tempo [ms] |
|--------------------------|---------------|
| 0.0 | 3.2002 |
| 2.0 | 8.8006 |
| 4.0 | 15.2010 |
| 6.0 | 20.8014 |
| 8.0 | 27.2018 |
| 10.0 | 39.2025 |
| 12.0 | 45.6030 |
| 14.0 | 54.4035 |
| 16.0 | 63.2041 |
| 18.0 | 71.2046 |
| 20.0 | 77.6050 |

| | |
|------|----------|
| 22.0 | 87.2057 |
| 24.0 | 96.0062 |
| 26.0 | 100.0065 |
| 28.0 | 107.2070 |
| 30.0 | 116.8076 |
| 32.0 | 125.6082 |
| 34.0 | 134.4087 |
| 36.0 | 140.0091 |
| 38.0 | 144.8094 |
| 40.0 | 148.8097 |

Battuta 2 (Sorgente 24 m)

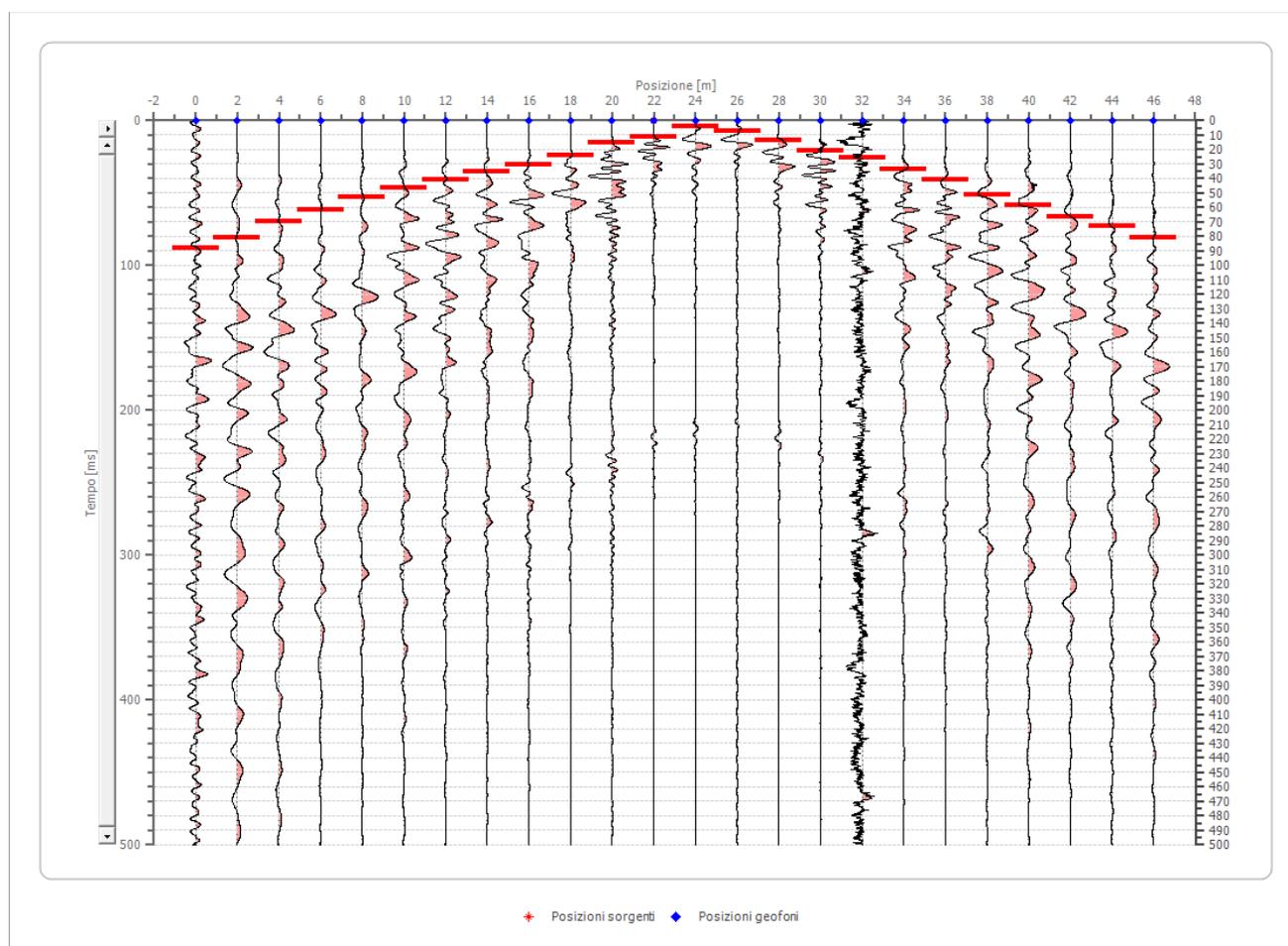


Figura 24 Grafico delle tracce sismiche acquisite

Tabella 11 Tempi di arrivo delle onde P

| Posizione geofono [m] | Tempo [ms] |
|-----------------------|------------|
| 0.0 | 140.8091 |
| 2.0 | 134.4087 |
| 4.0 | 127.2083 |
| 6.0 | 119.2077 |
| 8.0 | 112.8073 |

| | |
|------|----------|
| 10.0 | 108.0070 |
| 12.0 | 100.0065 |
| 14.0 | 95.2062 |
| 16.0 | 90.4059 |
| 18.0 | 85.6056 |
| 20.0 | 78.4051 |
| 22.0 | 76.8050 |
| 24.0 | 72.0047 |
| 26.0 | 68.0044 |
| 28.0 | 61.6040 |
| 30.0 | 53.6035 |
| 32.0 | 48.0031 |
| 34.0 | 40.8027 |
| 36.0 | 36.0023 |
| 38.0 | 28.0018 |
| 40.0 | 18.4012 |
| 42.0 | 14.4009 |
| 44.0 | 8.0005 |
| 46.0 | 4.0003 |

Battuta 3 (Sorgente 46 m)

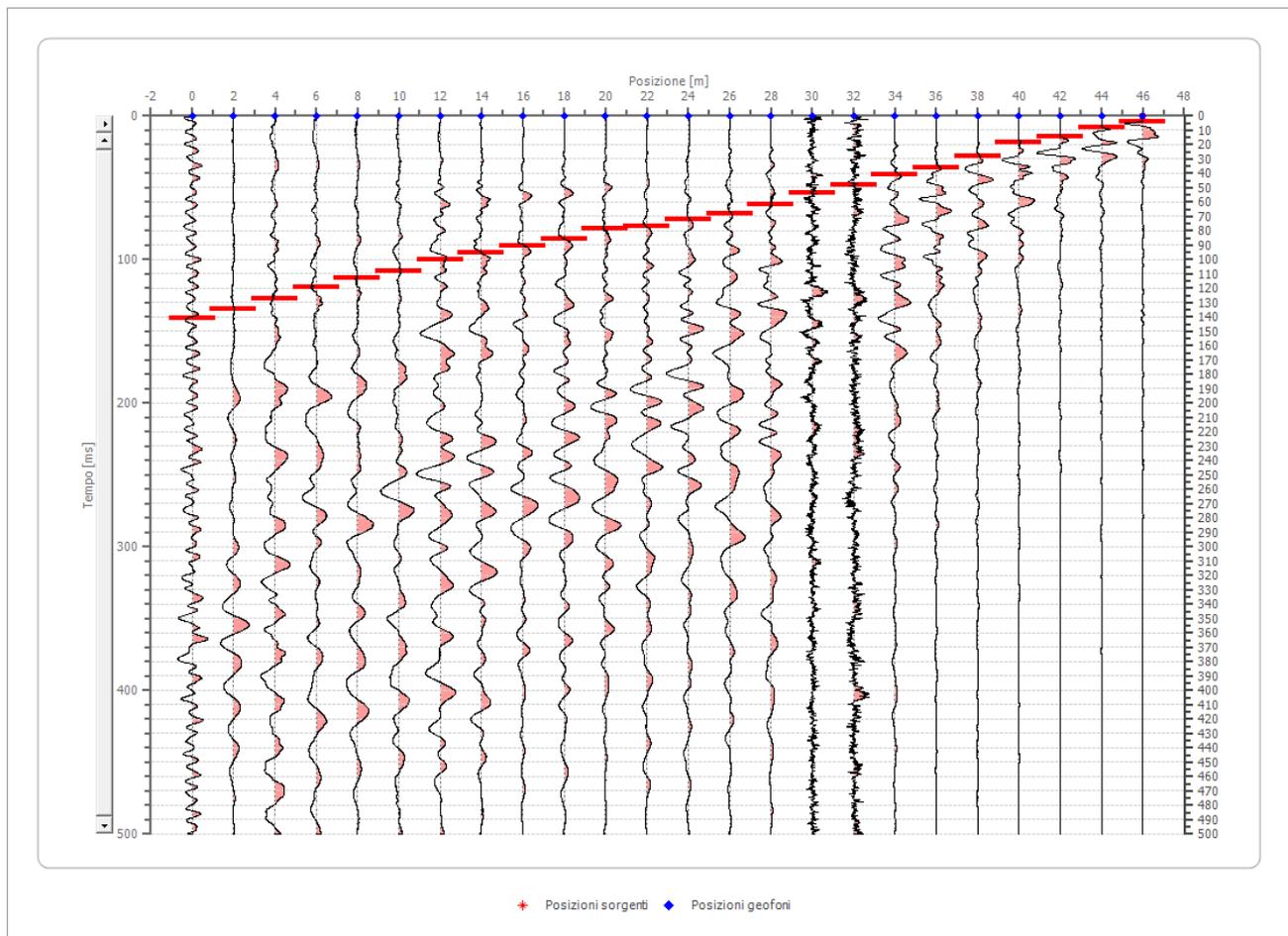


Figura 25 Grafico delle tracce sismiche acquisite

Tabella 12 Tempi di arrivo delle onde P

| Posizione geofono [m] | Tempo [ms] |
|--------------------------|---------------|
| 0.0 | 140.8091 |
| 2.0 | 134.4087 |
| 4.0 | 127.2083 |
| 6.0 | 119.2077 |
| 8.0 | 112.8073 |
| 10.0 | 108.0070 |
| 12.0 | 100.0065 |
| 14.0 | 95.2062 |
| 16.0 | 90.4059 |
| 18.0 | 85.6056 |
| 20.0 | 78.4051 |
| 22.0 | 76.8050 |
| 24.0 | 72.0047 |
| 26.0 | 68.0044 |
| 28.0 | 61.6040 |
| 30.0 | 53.6035 |
| 32.0 | 48.0031 |
| 34.0 | 40.8027 |
| 36.0 | 36.0023 |
| 38.0 | 28.0018 |
| 40.0 | 18.4012 |
| 42.0 | 14.4009 |
| 44.0 | 8.0005 |
| 46.0 | 4.0003 |

3.2.2 Parametri geotecnici

Tabella 13 Parametri Geotecnici

| | Strato n. 1 | Strato n. 2 |
|------------------------------|-------------|-------------|
| Coefficiente Poisson | 0.35 | 0.35 |
| Densità [kg/m ³] | 1800.00 | 1800.00 |
| Vp [m/s] | 238.69 | 328.59 |
| Vs [m/s] | 114.66 | 157.85 |
| G0 [MPa] | 23.66 | 44.85 |
| Ed [Mpa] | 102.55 | 194.35 |
| M0 [MPa] | 78.88 | 149.50 |
| Ey [Mpa] | 63.90 | 121.10 |

G0: Modulo di deformazione al taglio;
Ed: Modulo edometrico;
M0: Modulo di compressibilità volumetrica;
Ey: Modulo di Young;

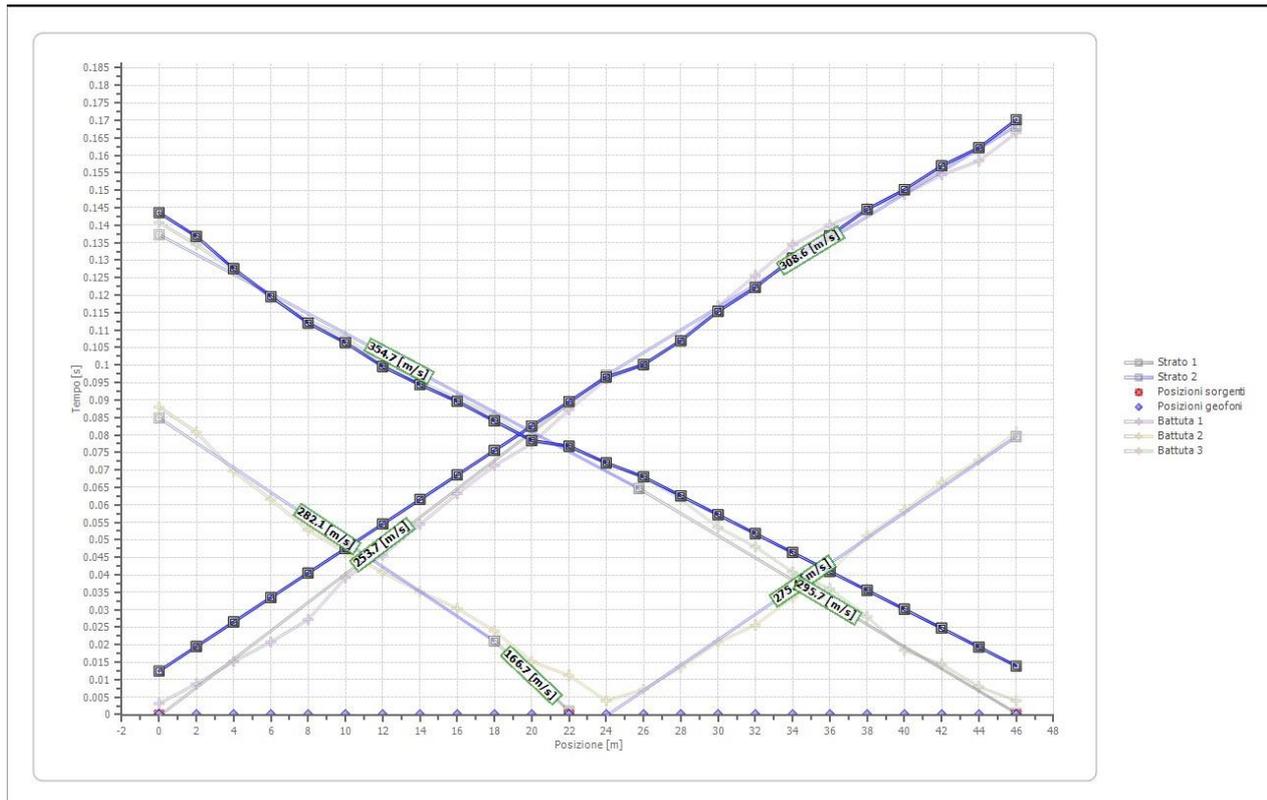


Figura 26 Grafico delle dromocrone

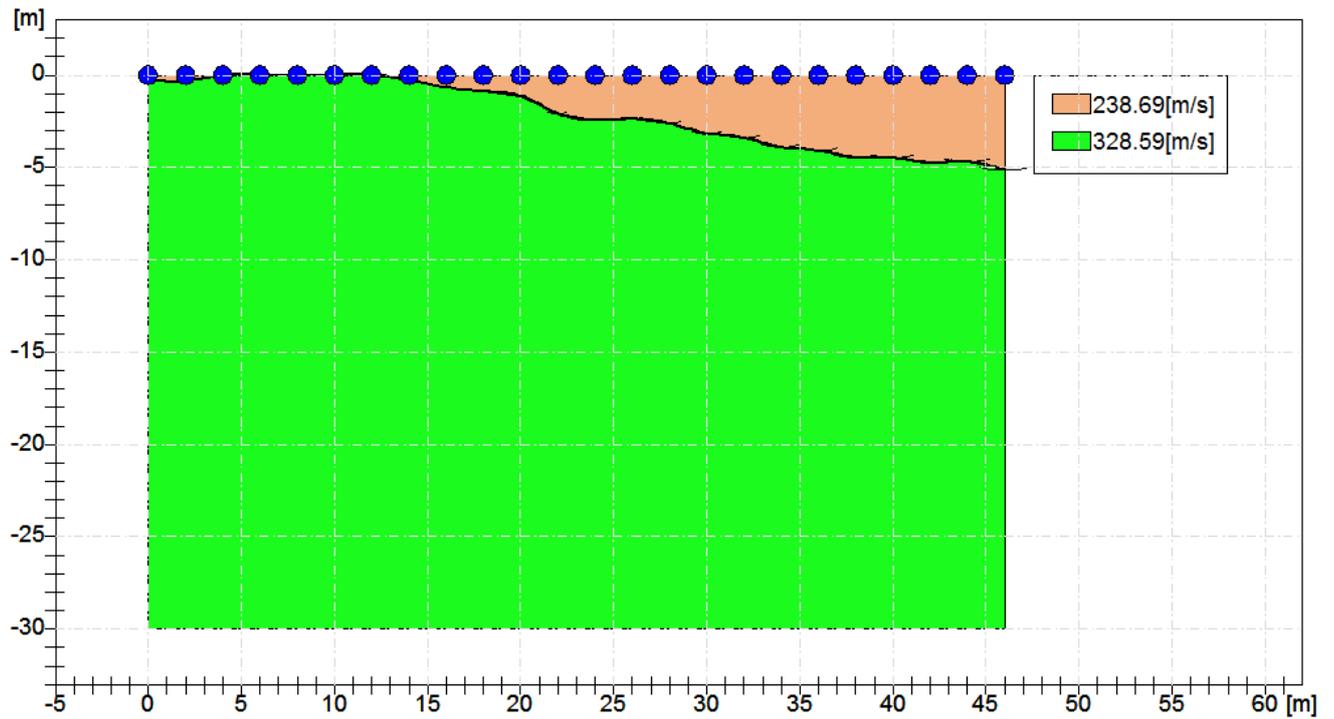


Figura 27 Profilo dei sismostrati con relativo valore di Vp

3.2.3 Stendimento n.2

Battuta 1 (Sorgente 0 m)

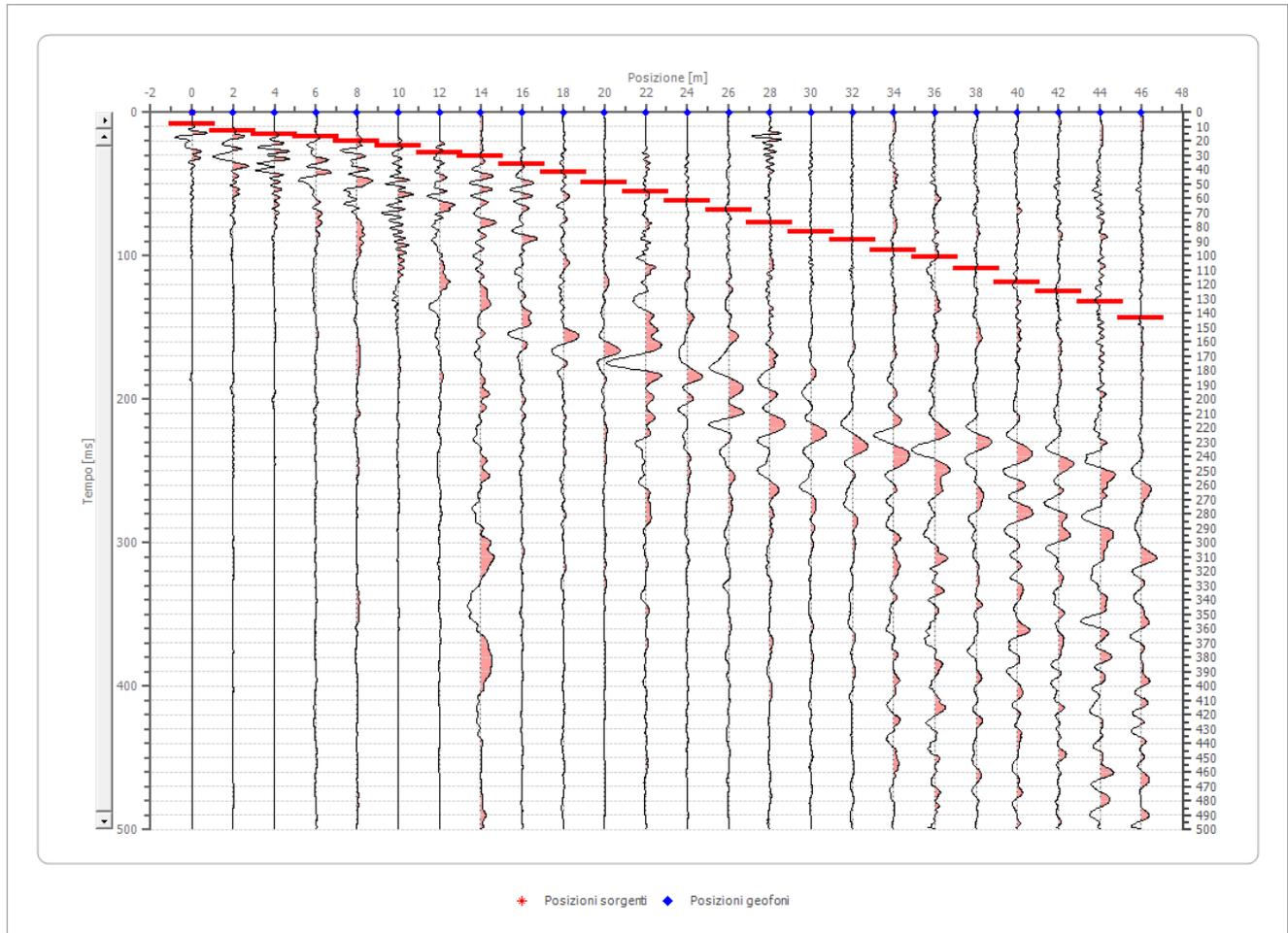


Figura 28 Grafico delle tracce sismiche acquisite

Tabella 14 Tempi di arrivo delle onde P

| Posizione geofono [m] | Tempo [ms] |
|--------------------------|---------------|
| 0.0 | 8.0005 |
| 2.0 | 12.8008 |
| 4.0 | 15.2010 |
| 6.0 | 16.8011 |
| 8.0 | 20.0013 |
| 10.0 | 23.2015 |
| 12.0 | 28.0018 |
| 14.0 | 30.4020 |
| 16.0 | 36.0023 |
| 18.0 | 41.6027 |
| 20.0 | 48.8032 |
| 22.0 | 55.2036 |
| 24.0 | 61.6040 |
| 26.0 | 68.0044 |

| | |
|------|----------|
| 28.0 | 76.8050 |
| 30.0 | 83.2054 |
| 32.0 | 88.8058 |
| 34.0 | 96.0062 |
| 36.0 | 100.8065 |
| 38.0 | 108.8071 |
| 40.0 | 118.4077 |
| 42.0 | 124.8081 |
| 44.0 | 132.0086 |
| 46.0 | 143.2093 |

Battuta 2 (Sorgente 24 m)

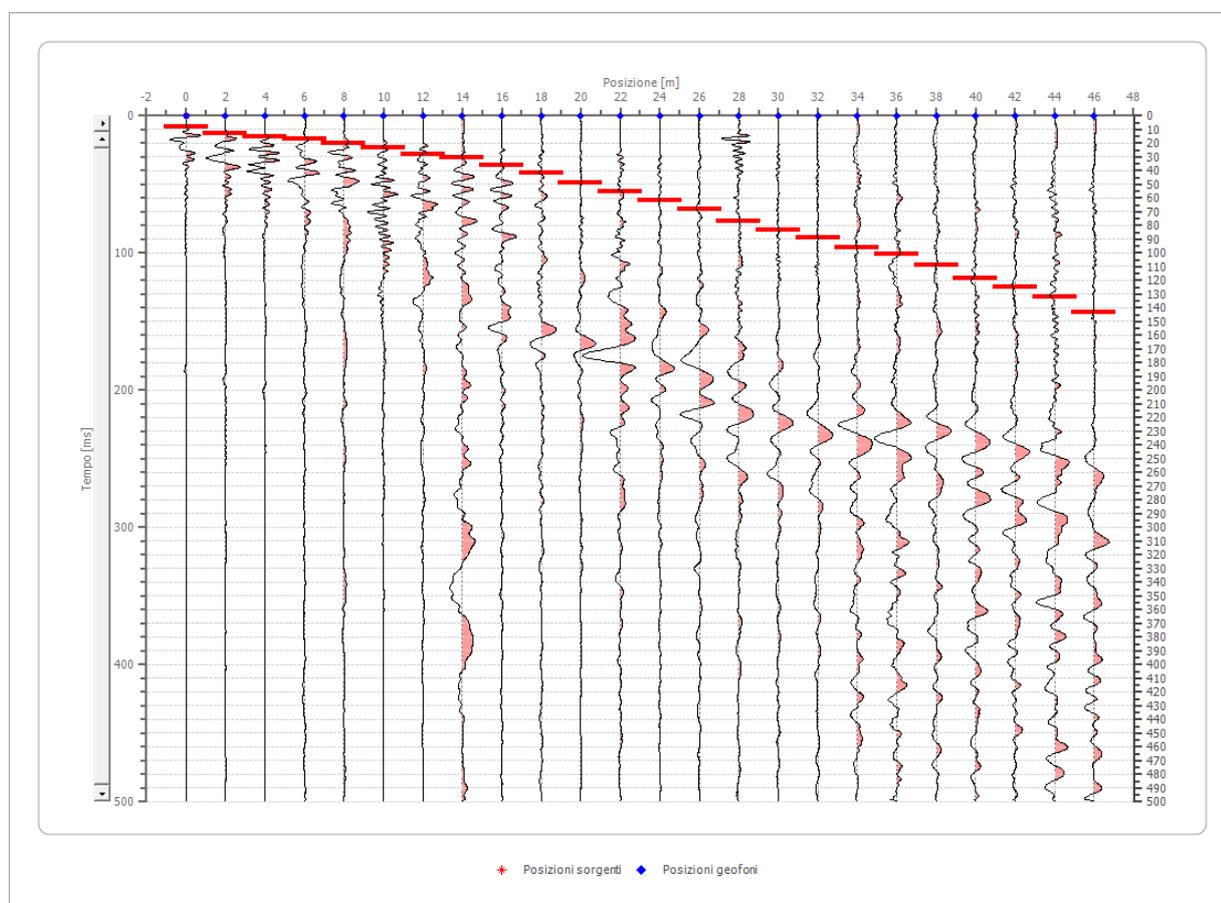


Figura 29 Grafico delle tracce sismiche acquisite

Tabella 15 Tempi di arrivo delle onde P

| Posizione geofono | Tempo [ms] |
|----------------------|---------------|
| 0.0 | 8.0005 |
| 2.0 | 12.8008 |
| 4.0 | 15.2010 |
| 6.0 | 16.8011 |
| 8.0 | 20.0013 |
| 10.0 | 23.2015 |
| 12.0 | 28.0018 |

| | |
|------|----------|
| 14.0 | 30.4020 |
| 16.0 | 36.0023 |
| 18.0 | 41.6027 |
| 20.0 | 48.8032 |
| 22.0 | 55.2036 |
| 24.0 | 61.6040 |
| 26.0 | 68.0044 |
| 28.0 | 76.8050 |
| 30.0 | 83.2054 |
| 32.0 | 88.8058 |
| 34.0 | 96.0062 |
| 36.0 | 100.8065 |
| 38.0 | 108.8071 |
| 40.0 | 118.4077 |
| 42.0 | 124.8081 |
| 44.0 | 132.0086 |
| 46.0 | 143.2093 |

Battuta 3 (Sorgente 46 m)

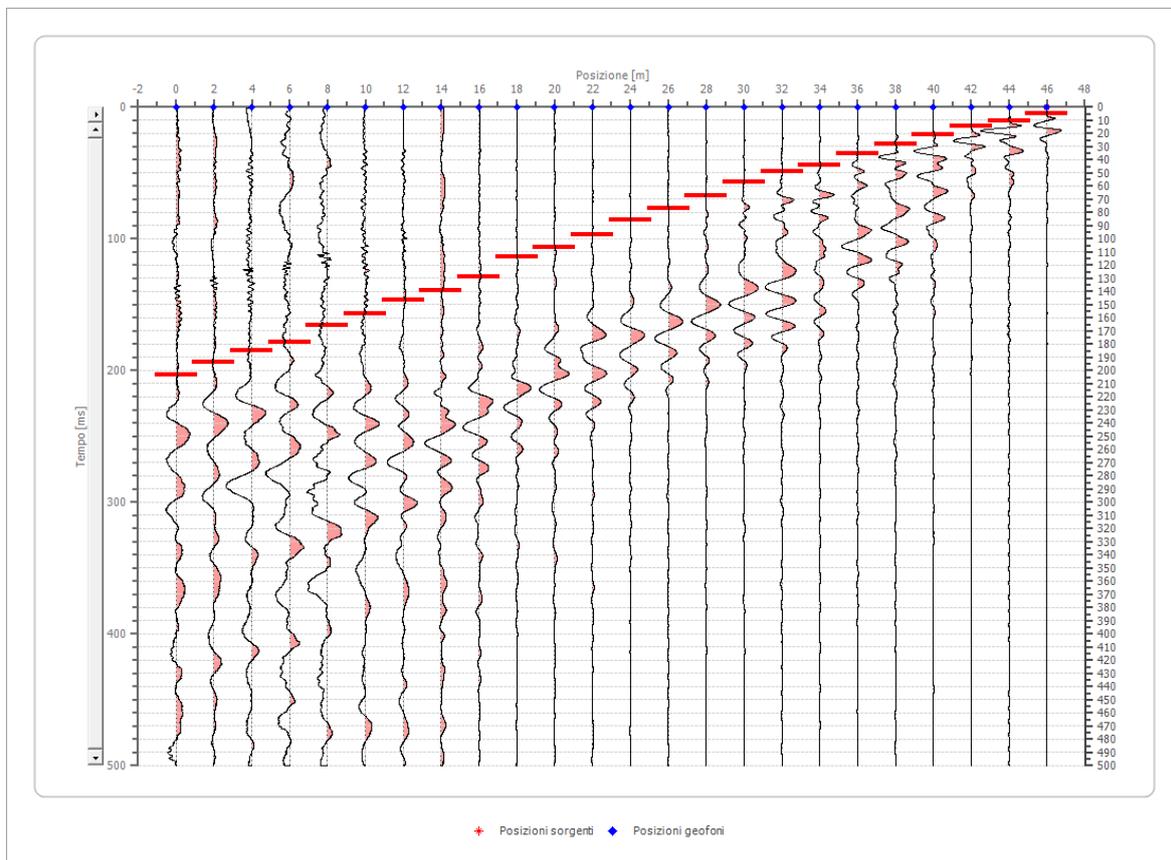


Figura 30 Grafico delle tracce sismiche acquisite

Tabella 16 Tempi di arrivo delle onde P

| Posizione geofono [m] | Tempo [ms] |
|-----------------------|------------|
|-----------------------|------------|

| | |
|------|----------|
| 0.0 | 203.2132 |
| 2.0 | 193.6126 |
| 4.0 | 184.8120 |
| 6.0 | 178.4116 |
| 8.0 | 165.6108 |
| 10.0 | 156.8102 |
| 12.0 | 146.4095 |
| 14.0 | 139.2090 |
| 16.0 | 128.8084 |
| 18.0 | 113.6074 |
| 20.0 | 106.4069 |
| 22.0 | 96.8063 |
| 24.0 | 85.6056 |
| 26.0 | 76.8050 |
| 28.0 | 67.2044 |
| 30.0 | 56.8037 |
| 32.0 | 48.8032 |
| 34.0 | 44.0029 |
| 36.0 | 35.2023 |
| 38.0 | 28.0018 |
| 40.0 | 20.8014 |
| 42.0 | 14.4009 |
| 44.0 | 10.4007 |
| 46.0 | 4.8003 |

3.2.4 Parametri geotecnici

Tabella 17 Parametri geotecnici

| | Strato n. 1 | Strato n. 2 |
|------------------------------|-------------|-------------|
| Coefficiente Poisson | 0.35 | 0.35 |
| Densità [kg/m ³] | 1800.00 | 1800.00 |
| Vp [m/s] | 246.63 | 312.62 |
| Vs [m/s] | 118.48 | 150.18 |
| G0 [MPa] | 25.27 | 40.60 |
| Ed [Mpa] | 109.49 | 175.91 |
| M0 [MPa] | 84.22 | 135.32 |
| Ey [Mpa] | 68.22 | 109.61 |

G0: Modulo di deformazione al taglio;

Ed: Modulo edometrico;

M0: Modulo di compressibilità volumetrica;

Ey: Modulo di Young;

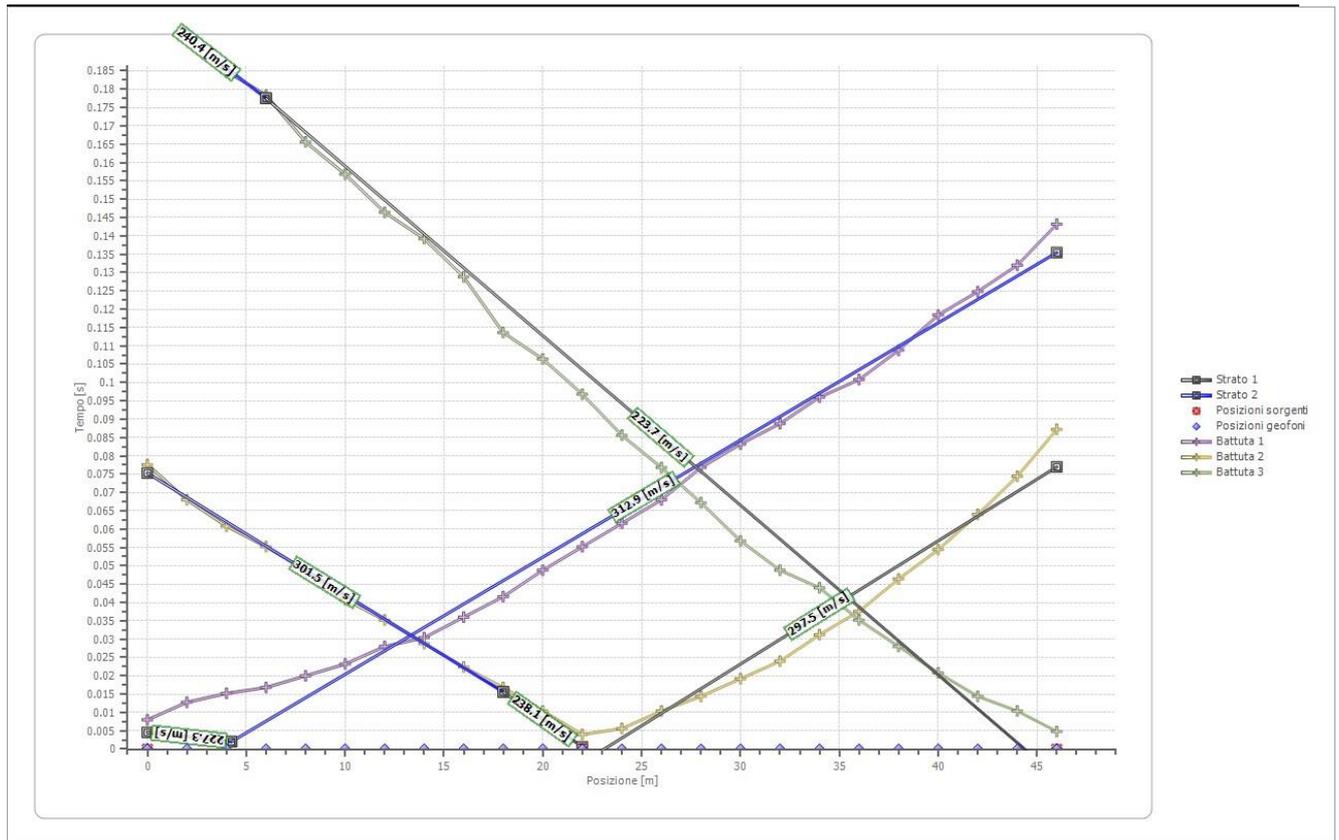


Figura 31 Grafico delle Dromocrone

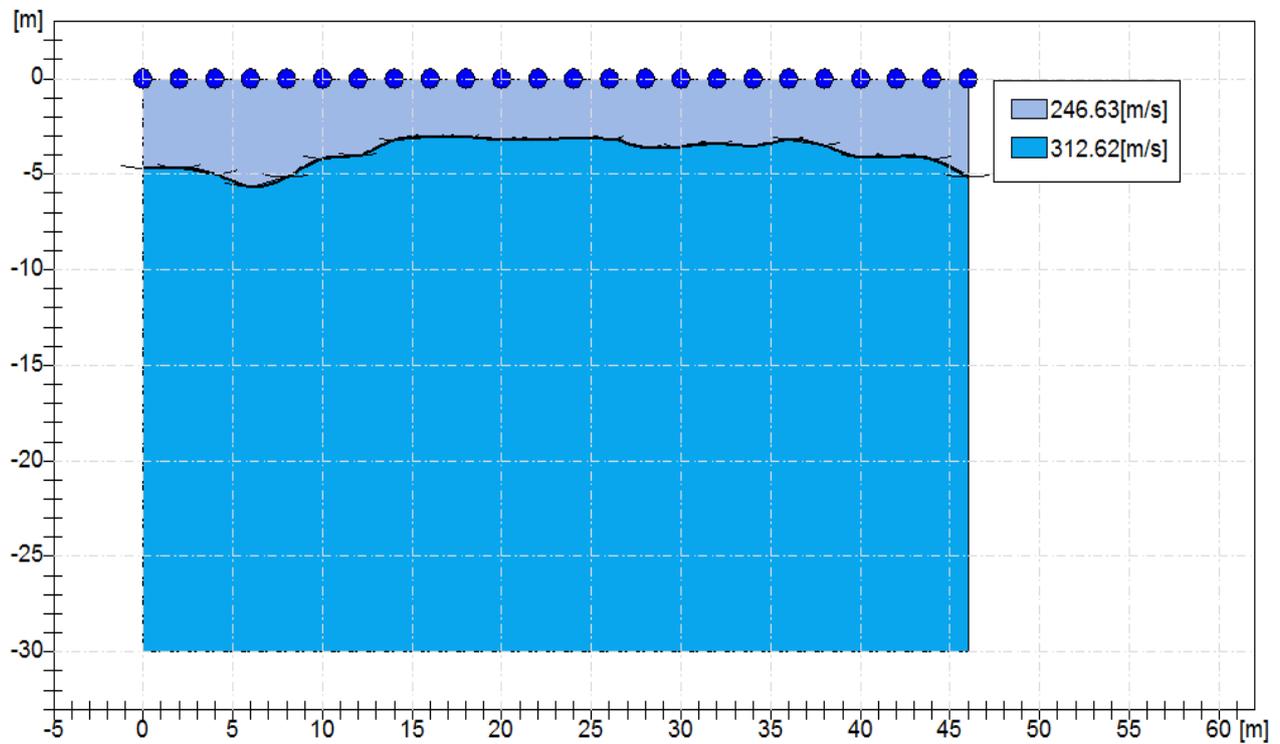


Figura 32 Profilo dei sismostrati con relativo valore delle V_p

3.3 RISULTATI DELLE INDAGINI

Sulla base dei risultati scaturiti dall'indagine di sismica a rifrazione effettuata nell'area di interesse risulta evidente la presenza di 2 sismostrati principali che sono stati individuati in virtù dei valori di velocità delle onde P (VP). In particolare si osserva un limite sismostratigrafico alla profondità di circa 5 m dove si osserva un cambiamento del valore di VP. Sulla base dei sondaggi pregressi effettuati nella medesima area, lo strato più superficiale corrisponderebbe ad una sabbia grossolana ghiaiosa, allo stato sciolto caratterizzato da un valore di VP di circa 244 m/s. Il secondo strato, più in profondità e maggiore grado di addensamento, consiste in una sabbia fine leggermente limosa con intercalazioni di sabbie grossolane ghiaiose e ciottolose che presenta un valore VP più elevato che si attesta sui 320 m/s circa.

Inoltre lo strato più profondo mostra valori dei parametri geotecnici superiori rispetto allo strato più superficiale. In particolare il Modulo di Young (E_y) passa da un valore di circa 65 MPa ad un valore di circa 115 MPa, il Modulo di deformazione al taglio (G_0) ha un incremento da circa 24 MPa a 42 MPa mentre il Modulo di compressibilità volumetrica (M_0) passa da circa 81 MPa a 142 MPa.

4 Indagine integrativa n.3 - Indagine Magnetometrica

L'intensità del campo magnetico terrestre varia considerevolmente, in base alla distanza dai poli. Alle nostre latitudini le variazioni possono avere valori di circa 50.000 gamma (γ) (1 gamma= 1 nano Tesla nT) e angoli d'inclinazione di circa 60-70° rispetto l'orizzontale.

In generale un magnetometro, misura l'intensità del campo magnetico terrestre, questa tecnica di solito viene impiegata efficacemente per l'individuazione di strutture geologiche a scala regionale, ma nella prospezione geofisica ambientale incrementando la sensibilità strumentale ed intensificando le misure rispetto l'area d'indagine, la tecnica viene adoperata per la localizzazione di tubazioni, di materiali metallici e di discontinuità sepolte.

L'eventuale presenza di materiale ferromagnetico crea delle variazioni nel campo magnetico locale che possono essere rilevate in superficie.

Usando un gradiometro si registrano elevatissime variazioni, a causa della elevata sensibilità strumentale. Parecchi fattori influenzano la risposta di un magnetometro in particolare la massa e la profondità. Inoltre, anche la forma e l'orientazione dell'oggetto metallico influenzano l'intensità e la forma dell'anomalia risultante.

Un altro fattore rilevante è l'influenza dovuta a materiale dotato di magnetizzazione residua che può innalzare o diminuire la risposta totale dell'oggetto al campo magnetico terrestre che risulta di difficile interpretazione.

4.1 INDAGINE MAGNETOMETRICA – ACQUISIZIONE DATI

All'interno, dell'area d'interesse (Fig.1) è stato eseguito un rilievo magnetometrico di circa 4 km di lunghezza su una superficie di circa 18.000 m² (Fig.3) in configurazione gradiometrica e modalità di registrazione in continuo.

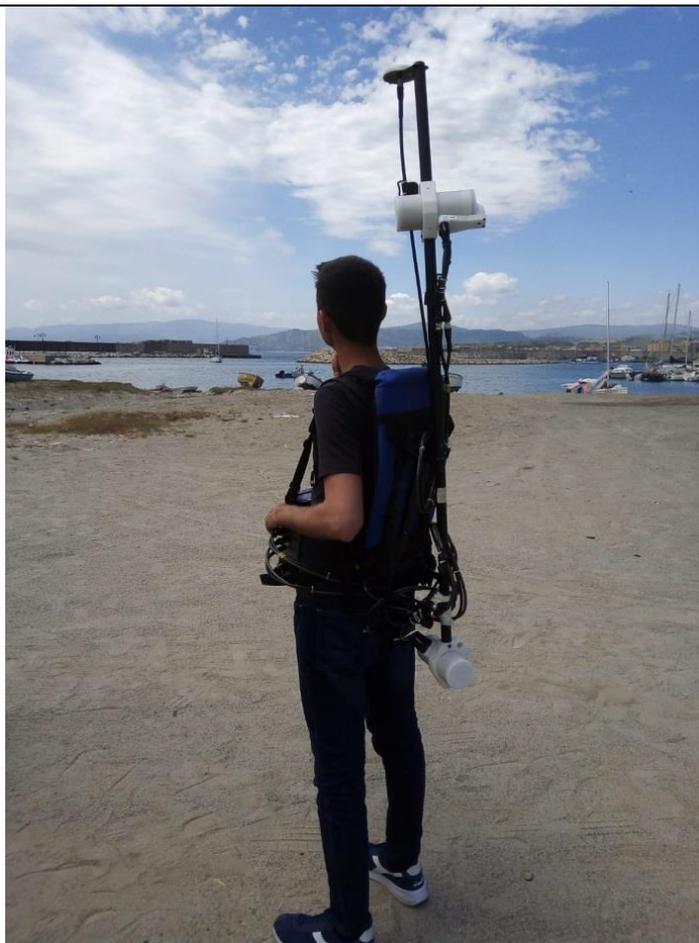


Figura 33 Operatore durante a fase di acquisizione

L'indagine magnetica risulta indicativa di una eventuale presenza di corpi metallici sepolti nei primi metri da piano campagna. In particolare il fine di tale indagine è legato alla eventuale presenza di oggetti metallici interrati.

In figura 3 è riportato uno schema dei profili realizzati sovrapposti all'area indagata.

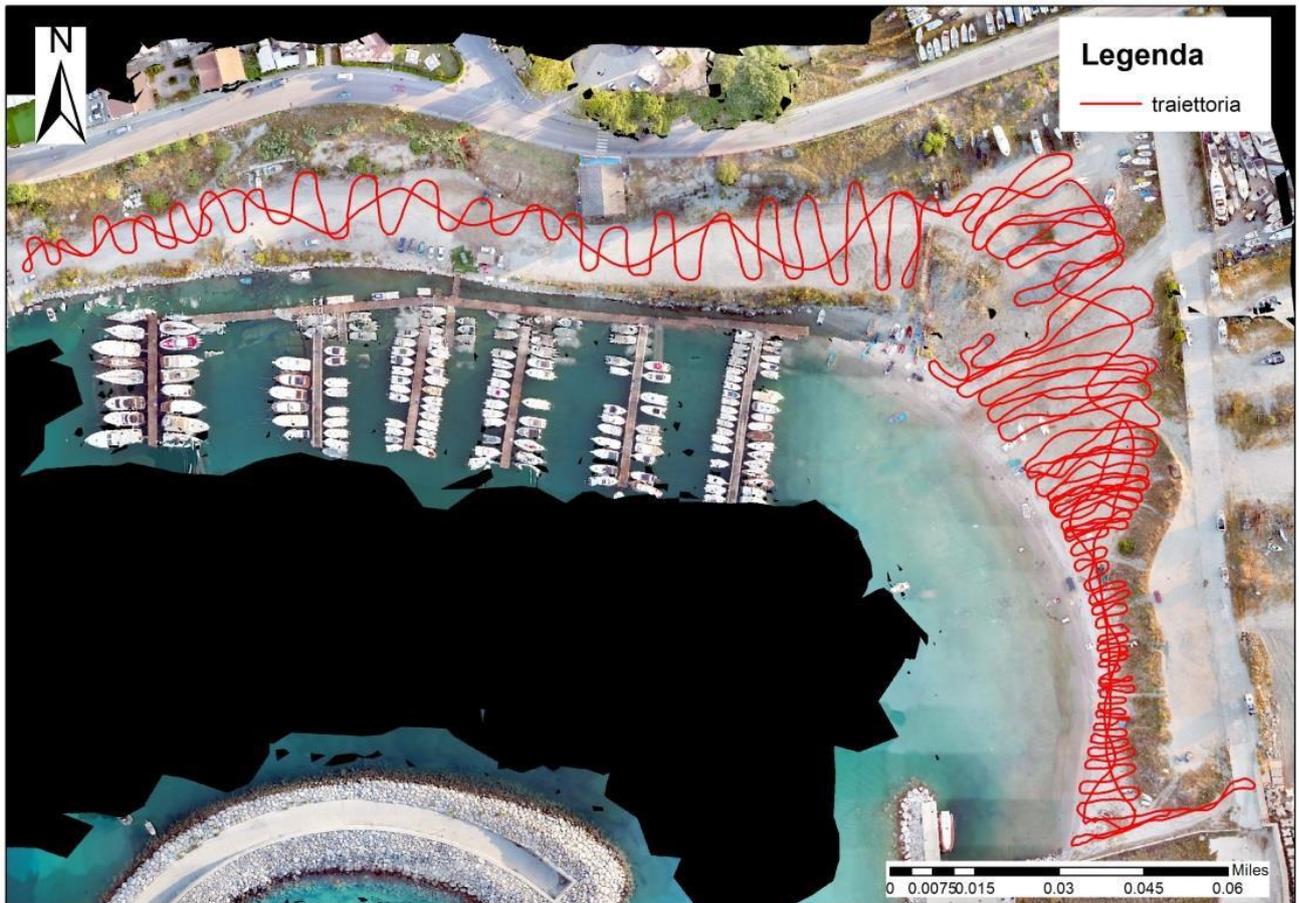


Figura 34 Profili realizzati durante l'indagine magnetometrica (base cartografica ortofoto 2012)

L'attività di campo è stata portata a termine utilizzando il magnetometro GSM 19 a precessione di protoni basato sull'effetto Overhauser (Fig.4, 5), della casa costruttrice GEM System Inc. le cui specifiche tecniche vengono elencate di seguito:

- Sensibilità: $< 0.015 \text{ nT} / (\text{Hz})^{1/2}$
- Risoluzione: 0.01 nT
- Accuratezza assoluta: $\pm 0.1 \text{ nT}$
- Range: $10,000 \text{ to } 120,000 \text{ nT}$
- Tolleranza di Gradiente: $> 10,000 \text{ nT/m}$
- Passo di campionamento: $60+, 5, 3, 2, 1, 0.5, 0.2 \text{ sec}$
- Temperatura operativa: $-40\text{C to } + 55\text{C}$



Figura 35 Magnetometro GSM 19



Figura 36 Magnetometro GSM 19

Il sistema magnetometrico è stato configurato per acquisire dati con passo di campionamento pari a 0.2 secondi. I dati registrati comprendono sia le misure di campo magnetico totale sia le misure del gradiente magnetico: lo strumento fornisce una misura simultanea del campo magnetico ai due sensori (inferiore e superiore) e la componente verticale del gradiente è approssimata dal rapporto incrementale, nota la distanza tra i due sensori magnetici (1.00 metri).

Il sensore inferiore è posto a circa 0.90 metri dal suolo di calpestio. Tale tipo di configurazione è ottimale per minimizzare già in fase di acquisizione gli effetti magnetici di corpi metallici superficiali e di piccole dimensioni correlabili a rumore ambientale ad alta frequenza. Inoltre, il sistema magnetometrico è equipaggiato con una scheda di acquisizione e antenna GPS, che consente di localizzare in maniera assoluta i punti di misura.



Figura 37 Mappa del gradiente magnetico

4.2 RISULTATI DELLE INDAGINI

La mappa in Fig.37 riporta i risultati ottenuti dall'indagine magnetometrica effettuata, dalla quale si evince la distribuzione dei valori del gradiente magnetico sull'intera area investigata. I valori del gradiente magnetico manifestano un range che va da un valore minimo di circa -2.300 nT/m fino ad un valore massimo di 1.325 nT/m.

Dall'osservazione della distribuzione del gradiente magnetico si individuano determinate zone con alti valori del gradiente magnetico ascrivibili tuttavia alla cospicua presenza di imbarcazioni tra le cui dotazioni sono state osservate componenti con delle evidenti proprietà ferro magnetiche.

In particolare è possibile osservare un valore anomalo nella parte Est della mappa che è dovuto alla presenza di una grossa imbarcazione che ha quindi fatto registrare un aumento del valore del gradiente magnetico.

Pertanto, per quanto riguarda l'individuazione di eventuali oggetti metallici sepolti, dalla mappa del gradiente magnetico non si individuano delle anomalie di particolare interesse.