

LABORATORIO MATERIALI DA COSTRUZIONE
LABORATORIO TERRE E ROCCE
INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE

GEOPROVE
S.R.L.

COMUNE DI ROVIANO

(PROV. DI RM)

COMMITTENTE: ACEA ELABORI SPA

INDAGINI GEOFICHE PROPEDEUTICA
ALLA PROGETTAZIONE DEL
“NUOVO ACQUEDOTTO MARCIO”.

“VECCHIA FERROVIA LATO OVEST”

Ruffano, luglio 2021

IL DIRETTORE TECNICO
Dott. Geol. **MARCELLO DE DONATIS**



Autorizzazione ministeriale ad effettuare e certificare prove su materiali da costruzione DM 275 del 12 giugno 2018.

Autorizzazione ministeriale ad effettuare e certificare prove su terre, rocce e prove in sito DM 278 del 14 giugno 2018.



ISO 14001:2015, n. SA.00014/19
OHSAS 18001:2007, n. SA.00015/19



SOA 08208 II Livello



Organismo di Certificazione
AZIENDA CON SISTEMA DI GESTIONE CERTIFICATO
UNI EN ISO 9001

GEOPROVE S.R.L. P. IVA 03940580750 • Capitale Sociale € 500.000,00 • Iscrizione alla CCIAA 255978

Sede Legale e Laboratorio Terre e Rocce Via Il Giugno 2, 73049 Ruffano (LE) • Laboratorio Materiali Via Benedetto Falcone snc ZI 73049 Ruffano (LE) •

Unità Locale Via Olanda, Zona Industriale Surbo, 73010 Lecce (LE) • Telefono e Fax 0833 692992 • Cell. 329 359 9093 | www.geoprove.eu • info@geoprove.eu

INDICE

| | |
|---|-----------|
| 1 PREMESSA | 3 |
| 2 MISURE GPS | 4 |
| 3 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE | 5 |
| 3.1 Cenni sulla metodologia di sismica a rifrazione..... | 5 |
| 3.2 Metodo adottato..... | 7 |
| 3.3 Tomografia Sismica..... | 9 |
| 3.4 Attrezzature e tecniche operative..... | 10 |
| 3.5 Risultati..... | 11 |
| 4 PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE | 12 |
| 4.1 Cenni sulla metodologia di sismica a riflessione..... | 12 |
| 4.2 Principi Generali..... | 13 |
| 4.3 Configurazione adottata..... | 16 |
| 4.4 Attrezzature utilizzate..... | 17 |
| 4.5 Data Processing..... | 17 |
| 4.5.1 Correzione statica dei Tempi sulle Tracce..... | 17 |
| 4.5.2 Analisi Spettrale..... | 18 |
| 4.5.3 Filtraggio di Frequenza..... | 18 |
| 4.5.4 Muting..... | 18 |
| 4.5.5 Analisi di Velocità..... | 19 |
| 4.5.6 Filtraggio di Velocità..... | 19 |
| 4.5.7 Deconvoluzione..... | 20 |
| 4.6 tecniche operative..... | 20 |
| 4.7 Analisi dei dati..... | 21 |
| 4.8 Risultati..... | 22 |
| 5 CONCLUSIONI | 23 |

Ubicazione area d’indagine (da CTR) - scala 1:8.000

Ubicazione misure sismiche (da ortofoto) – scala 1:1.000

Ubicazione misure sismiche (da CTR) – scala 1:1.000

Allegato “Prospezione sismica profilo 1”

Prospezione a rifrazione

- *Sismogrammi sismica a rifrazione onde P*
- *Dromocrone onde P*
- *Sezione tomografica*

Prospezione a riflessione

- *Esempi di sismogramma a 48 tracce (sismica a riflessione)*
- *Sismogrammi a 24 tracce utilizzati per l’analisi in Common Mid Point*
- *Analisi prospezione sismica a riflessione*

1 PREMESSA

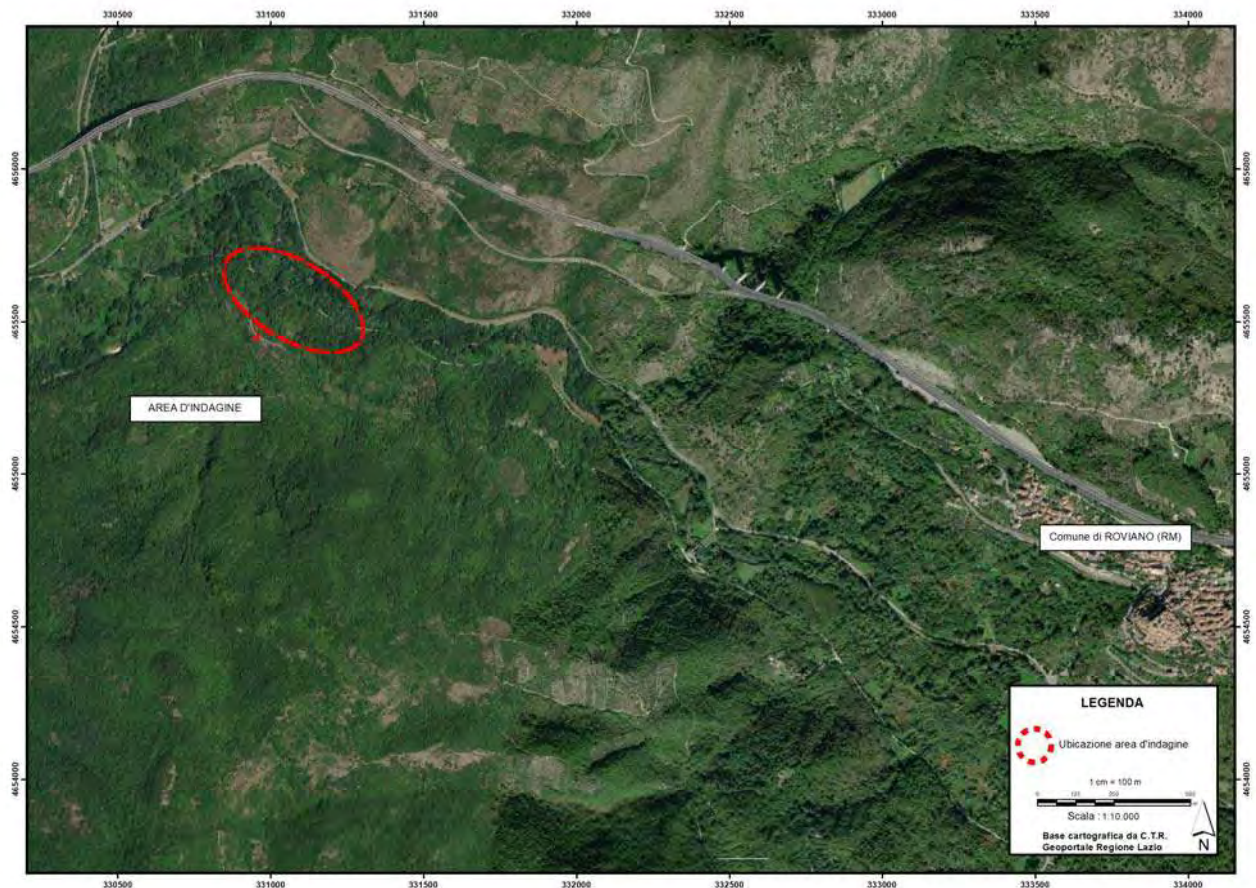
Per incarico conferito alla “GeoProve S.r.l.” da “ACEA ELABORI S.p.a.”, è stata eseguita una prospezione geofisica propedeutica alla progettazione del “Nuovo Acquedotto Marcio”.

Scopo dell’indagine è stato quello di definire la stratigrafia del sottosuolo. A tal fine sono state effettuate le seguenti indagini:

N° 1 profilo sismico a rifrazione in onde P;

N° 1 profilo sismico a riflessione.

Di seguito, ed in tavola 1, in scala 1:10.000, viene riportata l’ubicazione dell’area d’indagine.



Ubicazione area d’indagine

2 MISURE GPS

Tutte le misure effettuate sono state ubicate con sistema GPS Leica, modello GS15. Di seguito viene riportata la scheda tecnica dello strumento.

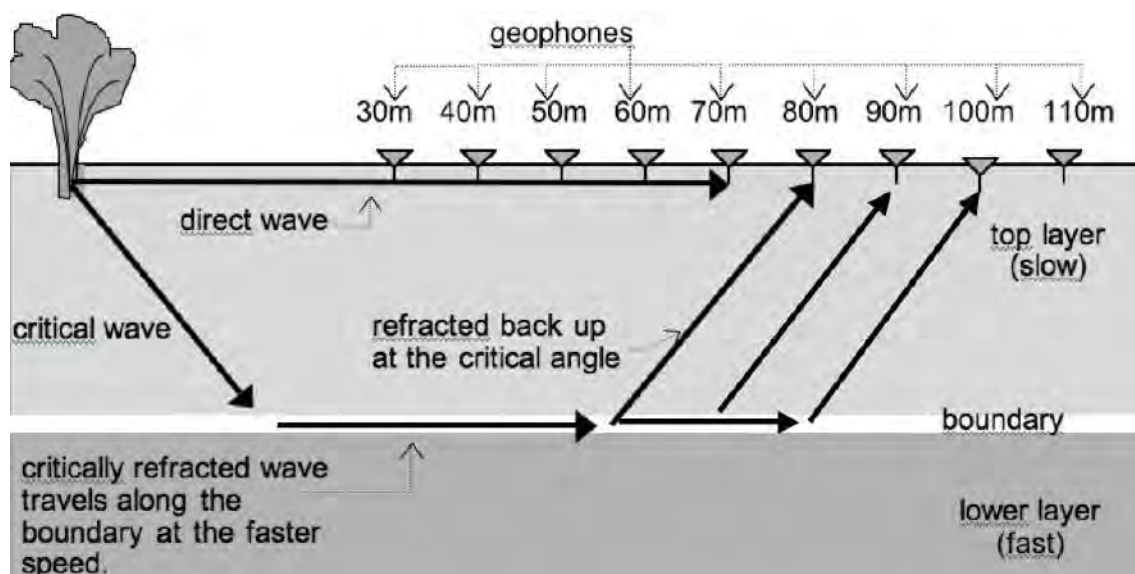
| Leica Viva GS15 | | | |
|--|---|--|----------------------|
| PRESTAZIONI GNSS | | | |
| Tecnologia GNSS | Leica SmartTrack | Tracciamento avanzato di quattro costellazioni | |
| Numero di canali | | 120 (fino a 60 satelliti simultaneamente su due frequenze) / 500+ ¹ | |
| Tracciamento del segnale | | GPS (L1, L2, L2C, L5), Glonass (L1, L2), BeiDou (B1, B2), Galileo (E1, E5a, E5b, Alt-BOC) QZSS (L1, L2, L5) ² , SBAS (WAAS, EGNOS, MSAS, CAGAN) | |
| PRESTAZIONI DELLA MISURA E PRECISIONI³ | | | |
| Tecnologia RTK | Leica SmartCheck RTK Network | Controllo continuo soluzioni RTK, affidabile 99.99% VRS, FKP, IMAX, MAC (RTCM SC 104) | |
| Differenza di codice | DGPS / RTCM | Tempo di inizializzazione Tipicamente 25cm | |
| Real-time cinematico | Baseline singola (< 30km) RTK Network | Orizzontale 8mm + 1ppm / Verticale 15mm + 1ppm Orizzontale 8mm + 0.5ppm / Verticale 15mm + 0.5ppm | |
| Post elaborazione | Statico (fase), lunghe osservazioni Statico e Statico rapido (fase) | Orizzontale: 3mm + 0.1ppm / Verticale: 3.5mm + 0.4ppm Orizzontale 3mm + 0.5ppm / Verticale 5mm + 0.5ppm | |
| COMUNICAZIONI | | | |
| Porte di comunicazione | Lemo Bluetooth® | Collegamento USB e seriale RS232 Bluetooth® v2.00 + EDR, class 2 | |
| Protocolli di comunicazione | Formato Dati RTK Output NMEA | Leica, Leica 4G, CMR, CMR+, RTCM 2.2, 2.3, 3.0, 3.1, 3.2 MSM NMEA 0183 V 4.00 e proprietario Leica | |
| Comunicazione dati integrata | Modem telefonico 3.5G Modem UHF | Completamente integrata, antenna interna o esterna Completamente integrata, riceve e trasmette, antenna esterna 403 - 470 MHz, potenza di uscita 1 W | |
| Comunicazione dati esterna | | GSM / GPRS / UMTS / CDMA e UHF / modem VHF | |
| GENERALE | | | |
| Interfaccia utente | Pulsanti e LED Web server | Tasto On/Off e tasto Funzione, 8 LED di indicazione stato Informazioni di stato complete e opzioni di configurazione | |
| Registrazione dati | Memoria Flash Tipo dati e velocità di registrazione | SD Card removibile da 1 GB Dati grezzi GNSS Leica e dati RINEX fino a 20 Hz | |
| Alimentazione | Alimentazione interna Alimentazione esterna Durata | 2 batterie Li-Ion ricaricabili e removibili (2,6 Ah / 7.4 V) Nominale 12 V CC; intervallo ammesso 10,5 - 28 V CC 10 h ricezione dati RTK con radio UHF 9 h trasmissione dati RTK con radio UHF (1W) 7,5 h ricezione / trasmissione dati RTK con modem telefonico | |
| Peso e Dimensioni | Peso Diametro x Altezza | 1.34 kg (GS15) / 3.30 kg configurazione rover RTK con l'utilizzo di palaia e zaino 196mm x 198mm | |
| Protezione | Temperatura Caduta Protezione contro acqua, sabbia e polvere Vibrazioni Umidità Shock | da -40 a 65°C (da -40°F a 80°C) Stoccaggio Resistente a ribalamenti da palaia di 2.0 m su superfici dure IP68 conforme a IEC60529 e MIL STD 810G Method 506.5 I, MIL STD 810G Method 510.5 I e MIL STD 810G Method 512.5 I Resiste alle forti vibrazioni (ISO9022-36-08 / MIL STD 810G 514.6 Cat.24) 100% (ISO9022-13-06 / ISO9022-12-04 / MIL STD 810G 507.5 I) 40g dai 15 al 23 ms, conforme a MIL STD 810G Method 516.6 I | |
| RICEVITORE GNSS LEICA GS15 | | | |
| SISTEMI GNSS SUPPORTATI | Singola frequenza | Prestazione | Professionale |
| GPS L2 / GPS L5 / GLONASS / Galileo / BeiDou | • / • / • / • / • | ✓ / • / • / • / • | ✓ / ✓ / ✓ / ✓ / • |
| PRESTAZIONI RTK | | | |
| DGPS/RTCM, RTK illimitato, RTK Network | • | ✓ | ✓ |
| SmartLink (L-band) | • | • | • |
| AGGIORNAMENTO POSIZIONE E REGISTRAZIONE DATI | | | |
| Aggiornamento posizione 5 Hz / 20 Hz | ✓ / • | ✓ / ✓ | ✓ / ✓ |
| Dati grezzi / registrazione dati RINEX | ✓ / • | ✓ / • | ✓ / ✓ |
| Output in formato NMEA | • | • | ✓ |
| FUNZIONALITÀ OPZIONALI | | | |
| Opzione stazione di riferimento RTK | • | ✓ | ✓ |
| | | | ✓Standard •Opzionale |
| 1) La serie Unlimited comprende l'aggiornamento gratuito a 500+ canali. 2) Il supporto QZSS è incorporato e fornito attraverso un prossimo aggiornamento firmware. | | 3) La precisione nelle misure, nella posizione planimetrica ed in quota sono legate a vari fattori tra i quali: il numero di satelliti, la loro geometria, tempo di osservazione, precisione delle effemeridi, condizioni ionosferiche, multipath ecc. Per i dati presenti si assumono condizioni da normali a favorevoli. Le costellazioni BeiDou e Galileo complete aumenteranno ulteriormente le prestazioni e precisione delle misure. 4) Può variare con la temperatura, con lo stato di conservazione delle batterie, con la potenza di trasmissione dell'apparato di comunicazione utilizzato. | |
| Il marchio Bluetooth® è di proprietà di Bluetooth SIG, Inc. Illustrazioni, descrizioni e specifiche tecniche non sono vincolanti. Tutti i diritti sono riservati. Stampato in Svizzera - Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2015. 774104it - 05.15 - INT | | | |

3 PROSPEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE

3.1 Cenni sulla metodologia di sismica a rifrazione

La sismica a rifrazione è la metodologia più speditiva nell’ambito delle prospezioni geofisiche e studia i tempi di arrivo delle prime onde sismiche.

Presupposto fondamentale perché possa essere impiegata è che la velocità di propagazione delle onde sismiche aumenti con la profondità. I raggi rifratti viaggiano, infatti, parallelamente alla superficie di discontinuità con la stessa velocità dello strato “più veloce” rifrangendo l’energia elastica verso lo strato “più lento”.

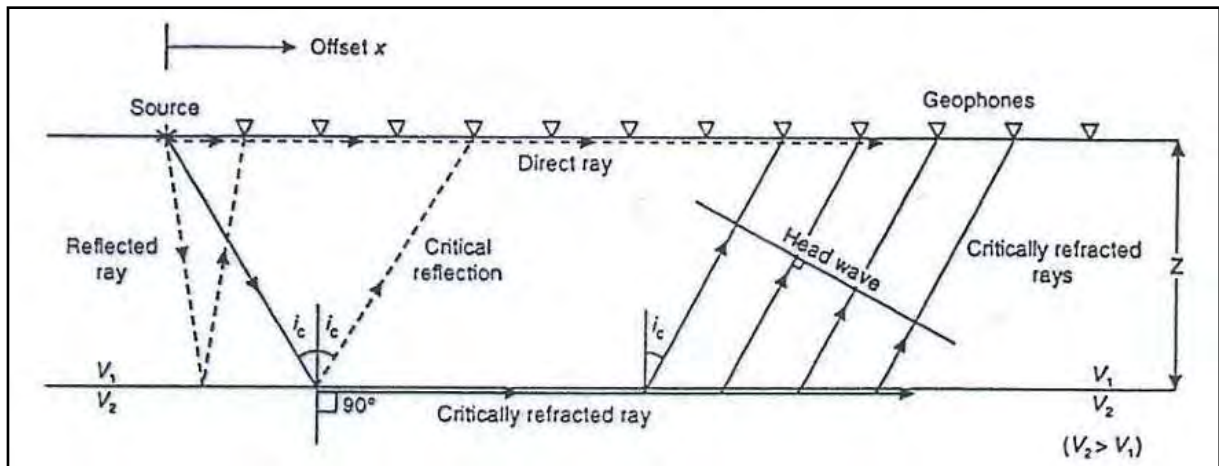


Percorso del raggio rifratto lungo la superficie di discontinuità in strati con velocità crescente verso il basso

Uno dei principi su cui si basa lo studio dei fenomeni di rifrazione è il principio di Fermat che stabilisce che un raggio d'onda nello spostarsi da un punto (sorgente) ad un altro punto (ricevente) attraverso un insieme qualsiasi di mezzi (strati), percorre, tra tutti i possibili cammini, quello che implica il minor tempo possibile, il quale risulta essere non sempre il cammino più breve in termini di lunghezza. Secondo la Prima Legge di Snell questo percorso è contenuto in un piano perpendicolare a quello del rifrattore che contiene sia la sorgente che il ricevitore ed è espresso dalla seguente relazione:

$$V_2 \sin i = V_1 \sin r$$

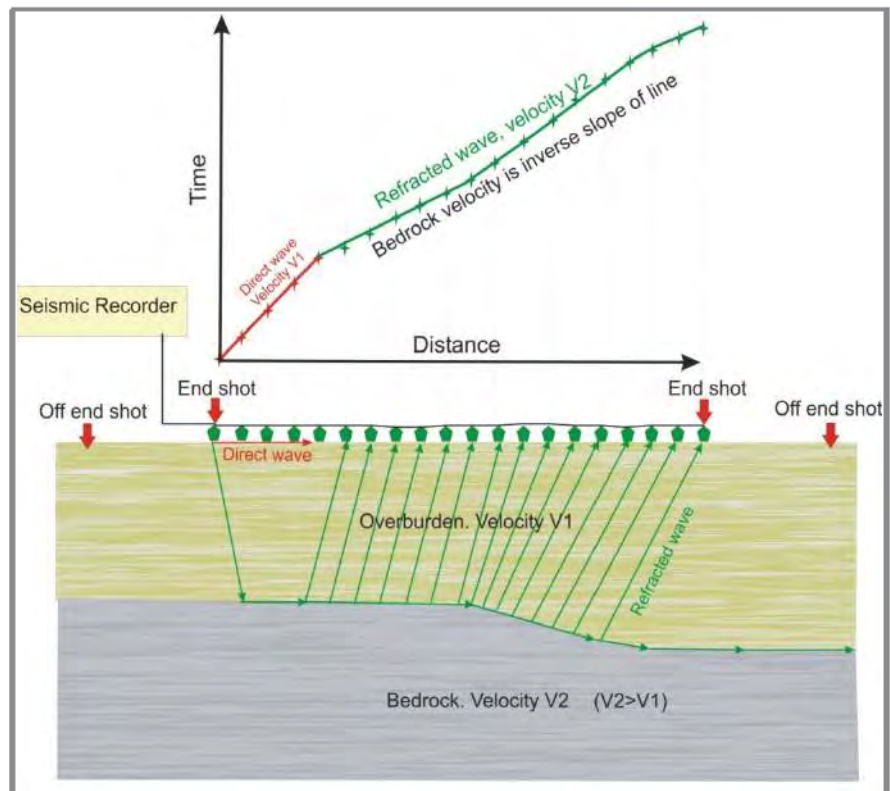
dove V_2 e V_1 sono le velocità degli strati, con $V_2 > V_1$, i è l’angolo di incidenza ed r è l’angolo di rifrazione del raggio sismico.



Percorso raggi diretti, rifratti e riflessi in strati dove $V_1 < V_2$ (da Reynolds, 1997).

Ad ogni geofono infatti arrivano tutte le onde generate dalla sorgente (dirette, riflesse, rifratte). L'onda che arriva per prima al ricevitore è sempre quella diretta che viaggia nel primo strato con velocità V_1 . Ma in punto posto ad una certa distanza dalla sorgente, detto punto di ginocchio, arriveranno contemporaneamente anche le onde rifratte che avranno compiuto un percorso sufficiente con velocità V_2 . Da questo punto in poi arriveranno sempre per prime le onde rifratte. La distanza dalla sorgente del punto di ginocchio aumenta con lo spessore dello strato indagato e con il diminuire del contrasto di velocità tra i due mezzi.

Conoscendo la distanza tra la sorgente e ciascun geofono ed i tempi di percorrenza delle onde è possibile costruire un grafico distanza - tempo che indica appunto i tempi di propagazione di un'onda sismica in funzione della distanza e prende il nome di dromocrona.



Dromocrona onde rifratte (<http://www.cflhd.gov>).

Ciascun segmento della dromocrona è caratterizzato da un'inclinazione sull'asse delle ascisse, che equivale all'inverso della velocità delle onde nello strato a cui esso si riferisce. Questi segmenti consentono il calcolo degli spessori e delle profondità degli strati.

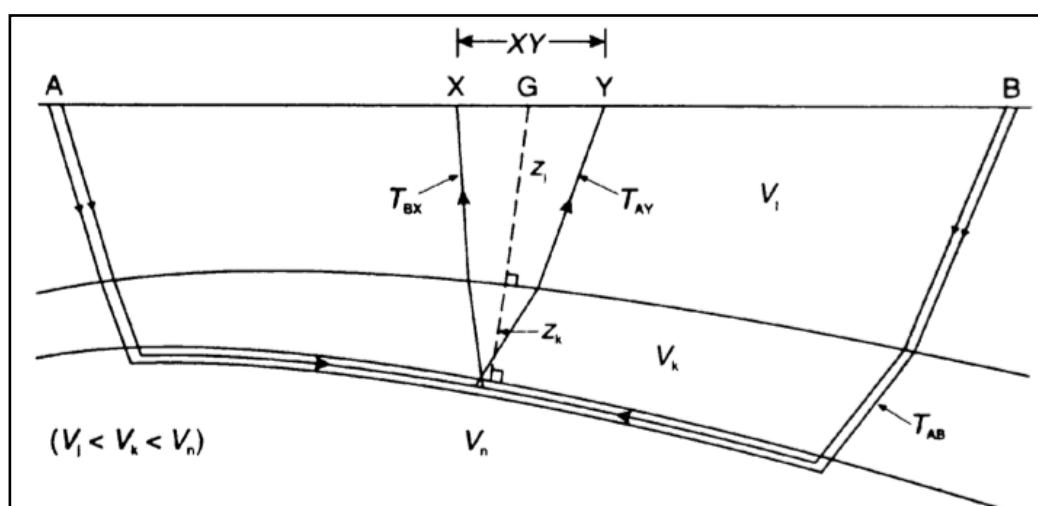
3.2 Metodo adottato

Per il calcolo degli spessori degli strati si possono impiegare vari metodi quali il Metodo delle “Intercette” valido per strati paralleli orizzontali o sub-orizzontali con inclinazione uniforme; il Metodo del Reciproco Generalizzato (G.R.M.) per strati con morfologie articolate e inclinazioni $> 20^\circ$; il Metodo del Reciproco di Hawkins o Delay Time per strati con morfologie articolate e inclinazioni $< 20^\circ$. Di seguito si tratterà il **metodo del G.R.M.** essendo quello impiegato nell'ambito di questa indagine.

METODO DEL RECIPROCO GENERALIZZATO (G.M.R.):

Introdotta da Palmer nel 1980, si applica nei casi in cui le geometrie dei rifrattori sono molto articolate e ha come vantaggio quello di prescindere dall'assunzione che la velocità resti costante per ciascuno strato.

E' una tecnica di inversione che presuppone che vengano effettuati più scoppi da entrambi gli estremi dello stendimento e che raggiungono due ricevitori posti ad una distanza XY. Lo scopo è quello di calcolare con precisione la distanza XY ottimale per cui ai ricevitori arrivi il segnale proveniente dallo stesso punto del rifrattore. In questo modo è possibile valutare tutte le variazioni laterali di velocità del rifrattore e ricostruire morfologie complesse.



Schema dei parametri usati nel metodo G.R.M. (da Reynolds, 1997).

Si effettuano gli scoppi in più punti in modo da individuare lungo tutto lo stendimento i tempi relativi allo stesso rifrattore e plottare correttamente la relativa dromocrona.

$$T_v = \frac{(T_{AY} - T_{BX}) - T_{AB}}{2}$$

Si procede quindi con il calcolo della funzione analisi - velocità definita dall'equazione:

Il valore di questa funzione si riferisce ad un punto intermedio tra X e Y per ogni distanza XY considerata ottenendo tante curve quante sono le distanze analizzate e si ricava la velocità del rifrattore dalla pendenza della dromocrona più lineare.

Si calcola poi la funzione tempo - profondità che fornisce la profondità del rifrattore in unità di tempo:

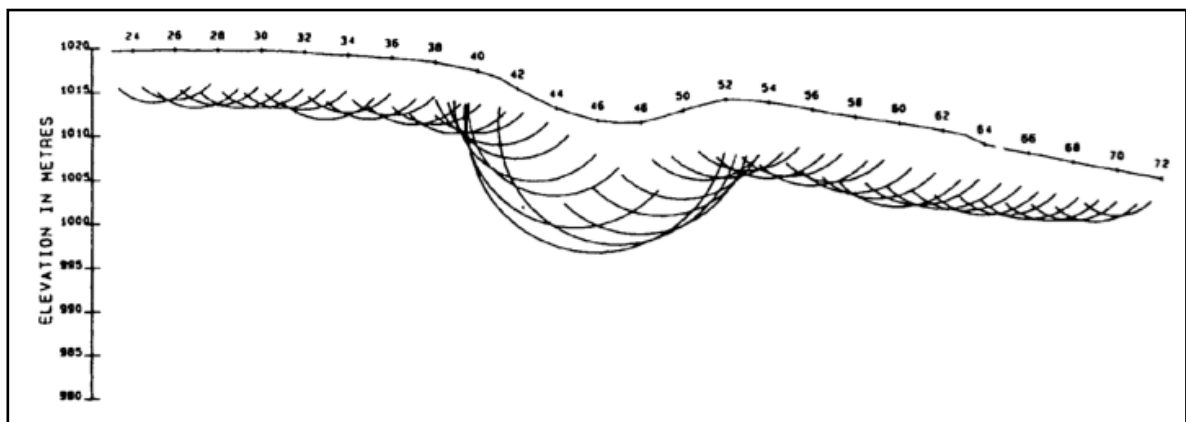
$$T_G = \frac{(T_{AY} - T_{BX}) - \left(T_{AB} + \frac{XY}{V_m}\right)}{2}$$

Analogamente a quanto visto per la velocità si ottengono una serie di curve, per ogni valore XY considerato, di cui la più articolata è relativa alla distanza ottimale e rappresenta meglio la morfologia del rifrattore.

Una volta definita la funzione tempo - profondità si calcola mediante un fattore di conversione la profondità in metri del rifrattore al di sotto di ogni geofono:

$$z = T_G \sqrt{\frac{V_m XY}{2T_G}}$$

L'esatta morfologia del rifrattore, infine, è individuata dall'involuppo delle semicirconferenze di raggio z.



Esempio morfologia del rifrattore dall'involuppo delle circonferenze (da Reynolds, 1997).

3.3 Tomografia Sismica

La tomografia permette di individuare anomalie nella velocità di propagazione delle onde sismiche e di ricostruire la stratigrafia, con alto potere risolutivo, anche in situazioni complesse.

Si ottengono rappresentazioni bi-tridimensionali di oggetti mediante un numero definito di proiezioni monodimensionali variamente orientate. Attraverso fasi di calcolo successive si elabora un modello di velocità del sottosuolo che aumenta la qualità del dato e della risoluzione attraverso iterazioni di un processo di sovrapposizione tra dati sperimentali e sintetici fino al raggiungimento del “fitting” ottimale. A partire dalle sole misure dei tempi di arrivo è possibile tramite software ricavare la distribuzione delle velocità delle onde sismiche nel semispazio considerato e ricostruire immagine bi-tridimensionali verosimili del sottosuolo indagato.

Il grande vantaggio di questa tecnica rispetto alle altre è quello di prescindere dal modello di sottosuolo a strati regolari e con proprietà elastiche costanti cosa che consente di gestire situazioni con forti variazioni laterali di velocità e morfologie complesse e dominate dalla tettonica.

Il software impiegato per l’elaborazione è il **Rayfract version 2.71** (della Intelligent Resources Inc) che opera in modo da combinare ogni raggio di inversione con un raggio rifratto reale e che questi emergano dal un punto comune del rifrattore.

L’algoritmo implementato utilizza un codice di modellizzazione tomografica chiamato WET (Wavepath Eikonal Traveltime) che opera attraverso le soluzioni alle differenze finite dell’equazione che descrive le modalità di propagazione di un’onda in un mezzo isotropo (Schuster e Quintus - Bosz, 1993). Con questa tecnica la velocità di propagazione viene sostituita dal suo reciproco che indica la capacità di assorbimento dell’onda sismica da parte dello strato attraversato. Il percorso seguito dal raggio sismico viene suddiviso in celle e per ogni cella viene calcolata la velocità del percorso e viene assegnato un peso a ciascuna traiettoria. Si discretizza il calcolo attraverso un numero finito di celle pesate e si risolve il problema di sovrapposizione tra dati reali e sintetici mediante iterazioni di un modello di velocità di partenza, iterazione che si arresta nel momento in cui viene soddisfatto l’algoritmo che individua il fitting ottimale.

Alla fine di questo processo il software elabora i risultati sotto forma di un’immagine bidimensionale che rappresenta il modello di velocità del sottosuolo, distinguendo i diversi valori di velocità per mezzo di una scala cromatica.

3.4 Attrezzature e tecniche operative

Per l’acquisizione dei dati sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Due sismografi DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



Strumentazione utilizzata

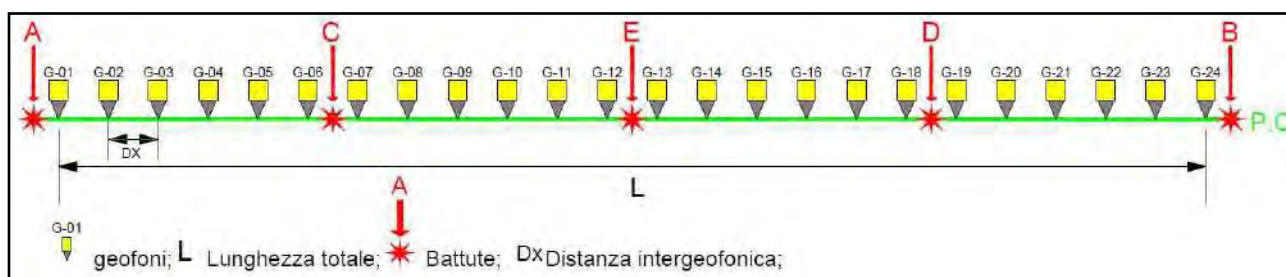
- Due cavi con 24 collegamenti per i geofoni;
- Quarantotto geofoni a componente verticale a frequenza di 14 Hz;
- Sorgente sismica onde longitudinali ad energia propulsiva (PEG-40);

Di seguito è mostrato lo schema geometrico di acquisizione:

| Denominazione | Lunghezza (metri) | Distanza geofonica (metri) | n. battute | n. geofoni |
|---------------|-------------------|----------------------------|------------|------------|
| Profilo 3 | 360 | 3.0 | 23 | 120 |

I dati di campagna sono stati acquisiti sulla stessa linea sismica ed in tre fasi successive: in prima fase sono stati energizzati i primi 48 geofoni; in seconda fase sono stati energizzati i 48 geofoni posti in posizione intermedia, infine gli ultimi 24 geofoni.

Successivamente, in fase interpretativa, il picking delle onde sismiche è stato effettuato sui sismogrammi sperimentali (vedi allegato) mediante il software TomTime della Geotom, LCC, dopo un opportuno filtraggio in frequenza delle tracce. I primi arrivi sono riportati nei diagrammi tempo-distanza “dromocrone” (vedi allegato).



Esempio di schema geometrico per un profilo a 5 battute

3.5 Risultati

L’elaborazione dei dati ha permesso di ricostruire il sottosuolo secondo 2 principali “sismostrati”, così caratterizzati:

- 1. Il primo sismostrato** (con una profondità compresa tra 12-24 m dal p.c.) ha velocità media V_p di circa 1100 m/s;
- 2. Il substrato rifrattore** ha velocità media V_p di circa 2300 m/s.

Tra i punti sorgente U ed Y sono presenti terreni superficiali più areati e con velocità media di 550 m/s.

Scopo dell’indagine sismica a rifrazione è stato quello di affiancare, nella fase di interpretazione dei dati, l’indagine sismica a riflessione, per ciò che riguarda l’analisi delle velocità sismiche negli strati più superficiali del sottosuolo.

4 PROSPEZIONE SISMICA A RIFLESSIONE

4.1 Cenni sulla metodologia di sismica a riflessione

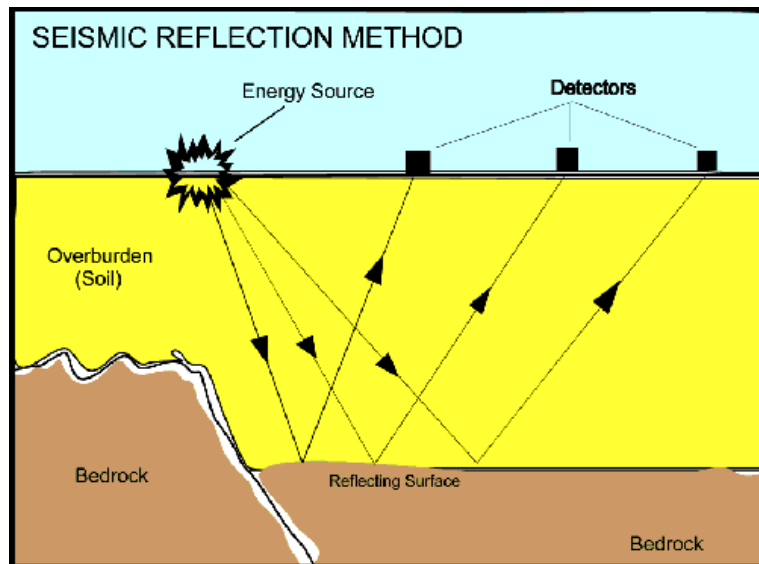
La sismica a riflessione è una metodologia largamente utilizzata nell'esplorazione del sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici: geometrie deposizionali, stratificazione, superfici di discordanza, faglie, sovrascorrimenti, etc. Essa permette di effettuare una ricostruzione, talora molto fedele, delle porzioni sepolte della superficie terrestre e può essere applicata in qualsiasi ambiente: terrestre, marino e di transizione (fluviale, lacustre, deltizio, ecc.).

La sismica a riflessione si è sviluppata a grandi passi a partire dagli anni '50 con il sostegno delle grandi compagnie petrolifere, direttamente interessate all'individuazione dei giacimenti di idrocarburi e spesso uniche detentrici della costosa strumentazione necessaria. Negli ultimi decenni la dilagante diffusione della tecnologia digitale ed il conseguente abbattimento dei costi strumentali hanno consentito sempre maggiori e più valide applicazioni in svariati campi (dall'ingegneria civile, agli studi ambientali, alla ricerca di base).

La sismica a riflessione è un metodo di prospezione di tipo attivo che consiste nel generare onde sismiche nel sottosuolo e misurare i tempi di arrivo delle onde riflesse dagli strati posti a diverse profondità. Questo tempo viene definito come Two-way Travel Time (TWTT) poiché si considerano insieme tempo di andata e tempo di ritorno.

Viene inoltre effettuata una accurata analisi dei treni d'onda ricevuti, attraverso la quale è possibile riconoscere i segnali provenienti dalle superfici di separazione di terreni caratterizzati da differenti velocità sismiche. I dati vengono quindi elaborati per risalire alla profondità delle diverse superfici incontrate e stabilire con esattezza la geometria, l'estensione e le reciproche relazioni tra i corpi che esse suddividono. Si ottengono quindi profili sismici ed immagini che descrivono le geometrie e gli spessori del sottosuolo, strutture, variabilità litologiche e composizionali.

La strumentazione è costituita da una sorgente, che può essere una massa battente o una carica esplosiva; uno stendimento di ricevitori (geofoni o idrofon) ed un sismografo multicanale per l'acquisizione e registrazione dei dati.

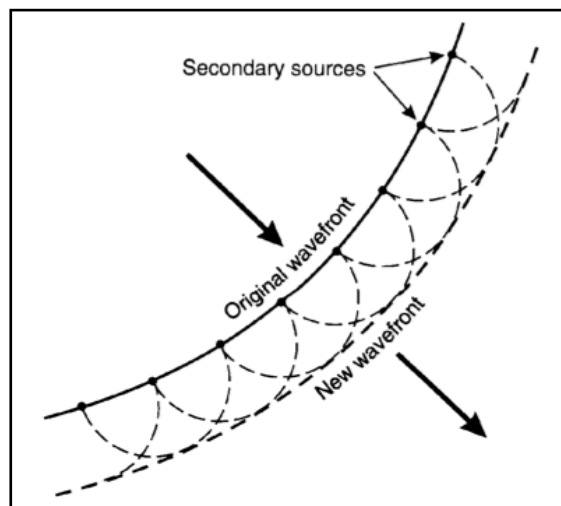


Schema rappresentativo di una prospezione sismica a riflessione

4.2 Principi Generali

Uno dei principi basilari nello studio delle onde sismiche e dei fenomeni di riflessione in terreni stratificati è quello di Huyghens.

Principio di Huyghens: data una superficie generica investita da un fronte d'onda, tutti i punti diventano sorgenti di onde sferiche elementari. Per cui il nuovo fronte d'onda è dato dalla superficie di involuppo alle onde elementari.



Involuppo fronti d'onda secondo il principio di Huyghens (da Reynolds, 1997).

Per questo, al fine di semplificare la trattazione analitica, piuttosto che riferirsi ai fronti d'onda si fa riferimento ai relativi raggi sismici lungo cui si propaga l'energia, intesi come le normali ai fronti d'onda. In questo modo è possibile operare in termini di tempo e spazio, tralasciando trattazioni più complesse che coinvolgerebbero ampiezze, frequenze e fasi.

All’interfaccia tra due strati la velocità di propagazione delle onde sismiche varia nel momento in cui incontra diverse proprietà fisiche. L’energia viene in parte trasmessa, rifratta e riflessa. L’ampiezza dell’onda riflessa dipenderà non solo dall’angolo dell’onda incidente sulla superficie di separazione, ma anche dalle velocità e densità degli strati stessi. Si definisce quindi **l’impedenza acustica** come: $Z = \rho V$, cioè il prodotto tra la densità (ρ) e la velocità (V).

Tale grandezza quantifica la diversità tra i due mezzi a contatto e quanto maggiore è la differenza tra le caratteristiche fisiche dei due mezzi tanto maggiore è la differenza tra le relative impedenze acustiche.

Il grado di riflessione per un raggio che incide normalmente o con basso angolo sulla superficie di separazione, è descritto dal coefficiente di riflessione (R) che rappresenta il rapporto di ampiezza tra raggio incidente e raggio riflesso. In termini di impedenza acustica corrisponde al rapporto tra la differenza e la somma delle impedenze: $R = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$. Il **coefficiente di riflessione** assume quindi valori che sono minori o uguali a ± 1 .

$R < 0.1$ riflessione debole

$0.1 < R < 0.2$ riflessione moderata

$R > 0.2$ riflessione elevata

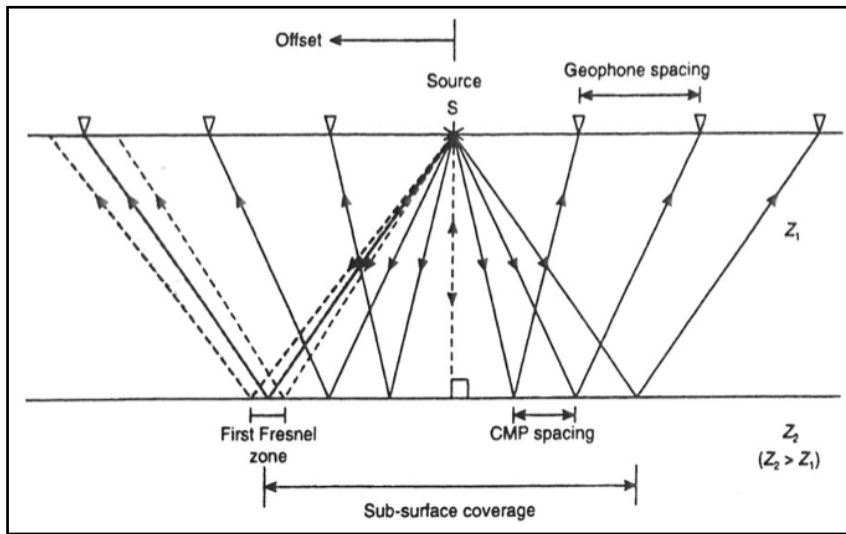
Bisogna inoltre considerare che la somma dell’energia riflessa e di quella trasmessa deve essere pari a 1. Pertanto se il coefficiente di riflessione risulta essere ± 1 o l’energia riflessa è pari ad 1 si deduce che tutta l’energia incidente è riflessa e non viene trasmessa. Viceversa se $R=0$, o l’energia riflessa è pari a 0, tutta l’energia viene trasmessa. Questo implica che all’interfaccia tra gli strati non cambia il valore dell’impedenza acustica, ma non implica che non cambino le velocità e i valori di densità.

In realtà la riflessione non è generata da un punto dell’interfaccia tra strati, come si semplifica nelle trattazioni, ma da un’area finita nota come prima zona di Fresnel, pertanto il coefficiente di riflessione per una data superficie è la risposta media della zona di Fresnel. La dimensione di tale zona è definita dal suo raggio: $r \approx (\lambda h/2)^{1/2}$ dove λ è la lunghezza d’onda e h la distanza tra la sorgente e il riflettore. Si ha quindi che le dimensioni della zona di Fresnel aumentano con la profondità e la lunghezza d’onda e quindi col decremento della frequenza.

Tutte le onde che incidono al di sopra di questa zona vengono riflesse in superficie. Se si effettua uno scoppio in un punto S , le onde riflesse verranno rilevate dai geofoni in linea a destra e sinistra dello scoppio. La distanza tra la sorgente ed un qualsiasi geofono dello stendimento è detta offset.

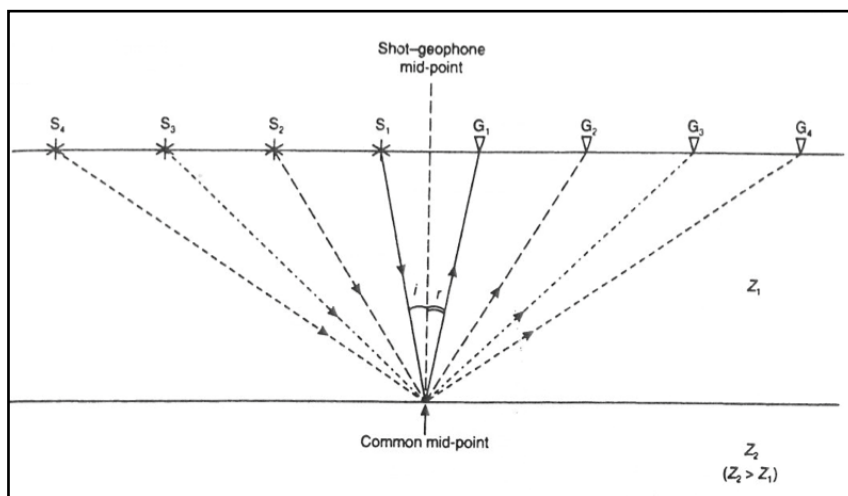
Nel caso di una superficie di separazione orizzontale i raggi riflessi seguiranno le geometrie della seguente figura da cui è facile notare come il raggio incidente venga riflesso dal substrato in un punto situato a metà strada tra la sorgente dello scoppio S ed il geofono che registra il relativo raggio riflesso.

Pertanto i punti di riflessione lungo l'interfaccia disteranno tra loro di uno spazio pari a metà della distanza intergeofonica. Risulta inoltre evidente che l'estensione totale della superficie indagata dipende direttamente dalle dimensioni dello stendimento, ovvero la sua lunghezza corrisponderà sempre a metà della lunghezza di quest'ultimo.



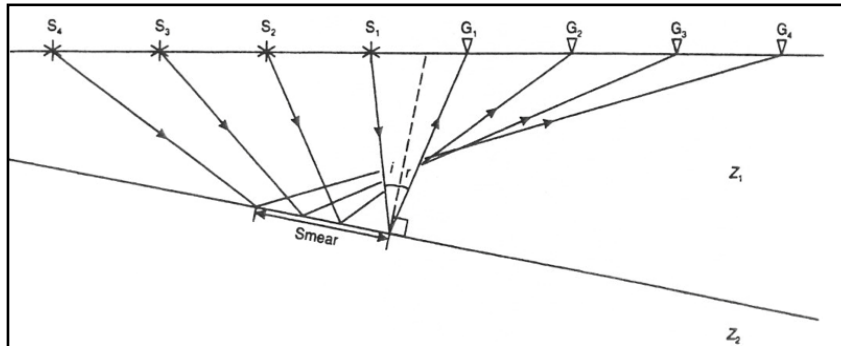
Geometria raggi riflessi da un'interfaccia orizzontale (da Reynolds, 1997).

Nel caso in cui vengano effettuati più scoppi in presenza di un'interfaccia orizzontale, i raggi riflessi da uno stesso punto saranno rilevati da geofoni diversi. Si definisce così il Common Mid-Point (CMP) come punto comune di riflessione.



Common Mid-Point (da Reynolds, 1997).

Nel caso si abbia, invece, un'interfaccia inclinata, i punti di riflessione saranno distribuiti lungo la stessa e aumentando l'offset si sposteranno verso posta a minore profondità.



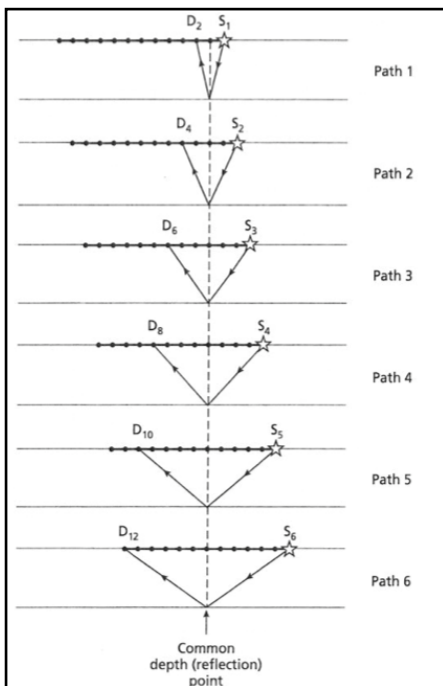
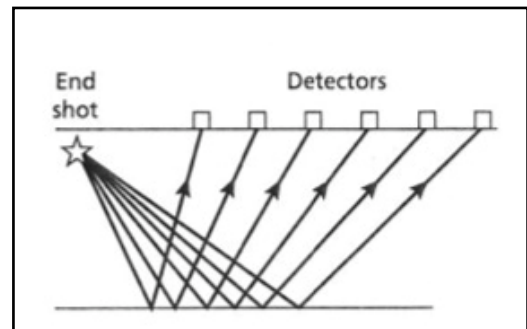
Geometria raggi riflessi da un'interfaccia inclinata (da Reynolds, 1997).

Con il termine “fold of coverage” si indica il numero di volte che viene registrato un impulso proveniente dallo stesso punto.

4.3 Configurazione adottata

Nei profili a riflessione (prospezioni in due dimensioni), i dati vengono campionati lungo una linea che comprende i punti di scoppio e i geofoni. A seconda dell'estensione dell'area da indagare e del range di profondità che si deve indagare, si dispongono i punti di scoppio e i ricevitori in base a diverse configurazioni.

Nella presente indagine i punti di scoppio sono stati collocati secondo la **configurazione single-ended spread** che prevede che il punto di scoppio sia collocato da un solo estremo dello stendimento dei ricevitori.



È stata adottata la tecnica **Common Mid Point (CMP)** che permette per diversi valori di offset, di acquisire tracce che registrano gli impulsi dei raggi riflessi da un punto comune del riflettore posto ad una certa profondità.

Nel nostro caso la “copertura” del riflettore è stata 600%, disponendo un punto sorgente ogni due stazioni geofoniche.

Single - ended spread (da Kearey, 1991).

4.4 Attrezzature utilizzate

Per l’acquisizione dei dati sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Due sismografi DAQ LINK – III a 24 bit della “Seismic Source Co” con intervallo minimo di campionamento di 0.0208 ms e altissima risoluzione (118 db).



- Due cavi con 24 collegamenti per i geofoni;
- Quarantotto geofoni a componente verticale a frequenza di 14 Hz con shunt (filtri passivi);
- Sorgente sismica onde longitudinali ad energia propulsiva (PEG-40);
- Massa battente da 8 Kg;
- Piattello in alluminio.

4.5 Data Processing

Per ottenere delle sezioni sismiche che siano una rappresentazione reale della situazione geologica delle aree di studio, è stato effettuato un processing dei dati consistito in una serie di operazioni volte ad eliminare i disturbi che complicano la lettura e l’interpretazione dei sismogrammi. Per le elaborazioni di calcolo è stato necessario disporre delle informazioni derivanti dalla sismica a rifrazione.

4.5.1 Correzione statica dei Tempi sulle Tracce

La correzione statica dei tempi di riflessione si applica lì dove si riscontrano delle differenze dei travel times introdotte da irregolarità topografiche. Queste irregolarità sono principalmente dovute a differenze di quota tra i punti di scoppio e i geofoni o alla presenza di uno strato alterato a bassa velocità sismica che determina un ritardo nelle onde che lo attraversano.

Per effettuare il calcolo della correzione è necessario conoscere la velocità e lo spessore dello strato alterato e di quello sottostante, per questo si effettuano misure sismiche a rifrazione.

4.5.2 Analisi Spettrale

Il segnale sismico si può considerare come una funzione variabile nel tempo, per tanto può essere scomposto in un numero caratteristico di funzioni sinusoidali di cui è possibile stabilire il contributo in ampiezza e in frequenza.

Nell’analisi dei dati è molto utile effettuare tale scomposizione per studiare il segnale non solo nel dominio del tempo, ma anche in quello delle frequenze. Per passare in questo dominio si utilizza la trasformata di Fourier che consente quindi di rappresentare tutte le frequenze del segnale sismico con relative ampiezze.

Studiando lo spettro di ampiezza del segnale si stabiliscono i limiti di frequenza entro i quali i geofoni amplificano allo stesso modo tutte le frequenze proprie del segnale in esame.

Questo permette di ottimizzare la successiva scelta del filtro che deve eliminare le altre frequenze che costituiscono disturbo.

4.5.3 Filtraggio di Frequenza

Il filtraggio di frequenza permette di mettere maggiormente in risalto le frequenze proprie del segnale che si sta studiando eliminando quelle che creano disturbo.

Esistono diversi tipi di filtro:

- ✓ filtro passa alta: taglia le basse frequenze e lascia passare quelle al di sopra di un limite scelto;
- ✓ filtro passa bassa: taglia le alte frequenze e fa passare quelle al di sotto di un certo limite;
- ✓ filtro passa banda: è l’unione dei primi due, lascia passare una banda di frequenze comprese tra due limiti scelti;
- ✓ filtro arresta banda: blocca una particolare banda di frequenza (50Hz).

A questi filtri si aggiungono anche i filtri anti-alias che eliminano il disturbo indotto da un cattivo campionamento delle frequenze noto come aliasing temporale.

4.5.4 Muting

È un’operazione che consente di eliminare dal sismogramma i primi arrivi, cioè quelli relativi alle onde dirette e rifratte. Di conseguenza tutte le successive elaborazioni non saranno influenzate dalla presenza di questi segnali. Questo limita le eventuali interferenze con il segnale delle onde riflesse e ne migliora la visibilità.

4.5.5 Analisi di Velocità

Per rimuovere la differenza di travel time sugli offset più lunghi, per angoli di incidenza perpendicolari, ovvero l'effetto del normal moveout (NMO), si effettua una correzione che è funzione dell'offset e della velocità e profondità del riflettore numericamente pari proprio al valore del normal move out.

Nelle indagini in common mid-point il valore del NMO si ricava attraverso l'analisi computerizzata di gruppi di tracce relative allo stesso common mid-point. Si elabora uno spettro di velocità stabilendo un valore di semblance che correla le velocità di più tracce in modo da garantirne la coerenza dei valori di velocità computati rispetto ai valori reali. Dal grafico si individuano i picchi di velocità relativi alle riflessioni e si importa il valore del normal moveout da implementare nella correzione.

4.5.6 Filtraggio di Velocità

Il filtraggio di velocità si usa per rimuovere i disturbi in base all'angolo d'inclinazione che li caratterizza. Quest'angolo è determinato dalla velocità apparente con cui i segnali si propagano lungo lo stendimento dei ricevitori. L'impulso sismico infatti che viaggia lungo la direzione dello stendimento con una velocità v e con un angolo α , si propagherà con una velocità apparente $v_a = v / \sin \alpha$. Scomponendo tale impulso nelle sue componenti sinusoidali è possibile considerare tutte le frequenze in funzione del rispettivo numero d'onda apparente (k_a): $f = v_a k_a$.

Mettendo in grafico questi valori si ottiene una retta la cui inclinazione corrisponde al valore v_a , pertanto per ogni impulso si ha una curva $f - k$ inclinata del valore della velocità apparente con cui è stato registrato l'evento. È così possibile filtrare i dati in base alla velocità apparente. Tramite la trasformata di Fourier si commutano i dati sismici dal dominio del tempo in quello delle frequenze in modo da scegliere il filtro $f - k$ più opportuno per rimuovere gli eventi di disturbo con velocità apparente che complica il segnale ed una volta effettuato il filtraggio si ritorna nel dominio $t - x$. Questo filtro è utile soprattutto per rimuovere il noise dovuto ground roll (effetto delle onde che viaggiano con grande ampiezza e bassa frequenza e mascherano i segnali riflessi e rifratti).

4.5.7 Deconvoluzione

Il segnale sismico man mano che si propaga nel sottosuolo subisce una perdita progressiva delle alte frequenze, poiché il terreno agisce come un filtro passa banda che lascia passare più agevolmente le basse frequenze. Questo fenomeno comporta una riduzione del potere risolutivo del segnale dato dall’allungamento del periodo centrale e quindi dal conseguente aumento della lunghezza d’onda.

Con la deconvoluzione si elabora un filtraggio inverso che cerca di attribuire al segnale le alte frequenze per accorciare il periodo e ottenere un guadagno in termini di risoluzione. In questo modo vengono rimossi anche gli effetti delle multiple (segnali che vengono riflessi da più interfacce generalmente caratterizzati da frequenze più basse rispetto alle riflessioni primarie).

4.6 tecniche operative

È stato effettuato un profilo sismico a riflessione utilizzando geofoni a 14 Hz shuntati con filtro passivo, in grado di spostare la banda di risposta dei geofoni verso frequenze più alte. Le tracce sono state registrate con i seguenti parametri:

| frequenza di campionamento | Lunghezza registrazioni | sorgente |
|----------------------------|-------------------------|----------|
| 0.0625 millisecondi | 1 secondo | Peg-40 |

Di seguito sono tabellate le caratteristiche del profilo acquisito:

| Denominazione | Lunghezza | Distanza geofonica | Numero scoppi | N. Stazioni |
|---------------|-----------|--------------------|---------------|-------------|
| Profilo 3 | 393 m | 3.0 m | 65 | 132 |



Schema geometrico di acquisizione

4.7 Analisi dei dati

I dati della sismica a riflessione sono stati trattati col software Seistrix 3 (Interpex L.t.d., 1993). Uno dei grandi vantaggi di questo software è la capacità di gestire le geometrie complesse, dovendo trattare dati acquisiti secondo la tecnica del Common Mid Point Multi-Offset.

Sono stati acquisiti sismogrammi a 48 tracce, in allegato vengono riportati due soli sismogrammi acquisiti lungo la linea effettuata.

Per prima cosa sono stati caricati nel programma tutti i file a 24 tracce con punto sorgente a distanza uguale e impostate le geometrie di ogni profilo.

Si è poi proceduto all’analisi delle linee sismiche per ogni singolo offset, in seguito è stato esaminato solo il profilo ad offset più indicativo (offset a 24 metri).

Sono state impostate le geometrie è stato effettuato il “sort” dei dati. Questa operazione serve a riorganizzare i dati secondo le geometrie di common mid-point e nel rispetto delle distanze di offset. Infatti al momento dell’acquisizione i dati sono memorizzati in base alle posizioni degli scoppi e dei ricevitori, con il sorting vengono riorganizzati in modo da raggruppare per ogni coppia scoppio-ricevitore le tracce relative ai segnali provenienti dallo stesso mid-point.

Successivamente le operazioni di processing sui dati sono le seguenti:

- ✓ Correzione Statica dei Tempi sulle Tracce
- ✓ Filtro Passa Banda
- ✓ Mute
- ✓ Normal Move Out
- ✓ Filtraggio f - k
- ✓ Trace Mix

Esse sono state ampiamente descritte nella relazione generale.

4.8 Risultati

Dall’analisi delle “sezioni tempo”, riportate in allegato “**Analisi profilo 3 sismica a riflessione**”, si evince la presenza **di due principali riflettori**, piuttosto energetici: il primo riflettore è posto tra circa **30-70 millisecondi**; il secondo riflettore è posizionato tra circa **100 e 190 millisecondi**. È presente, anche, **una piccola riflessione superficiale**, a partire dalla stazione 100 fino a fine sezione, riscontrata anche nella sismica a rifrazione.

Per ciò che concerne le profondità associabili alle sezioni tempo, queste sono state ottenute utilizzando, per i terreni superficiali, velocità e spessori ricavati dall’elaborazione tomografica del sottosuolo effettuata con la sismica a rifrazione e, per i sedimenti più profondi, effettuando un’analisi di velocità dei sismogrammi relativi alla sismica a riflessione.

In virtù delle considerazioni fatte, e, quindi, passando da sezioni tempo a sezione profondità, la prima riflessione individuata risulta posizionabile tra circa **12 e 32 metri di profondità**; la seconda riflessione si posiziona tra circa **100 e 115 metri di profondità**. Infine, la riflessione superficiale individuata, dalla stazione 100 fino a fine sezione, ha una profondità massima di circa 6-7 metri. Inoltre, sono state individuate una serie di discontinuità subverticali, alcune delle quali interessano il substrato con $V_p > 2300$ m/s. Per la loro ubicazione e geometria si rimanda all’allegato “Analisi profilo 3 sismica a riflessione”.

5 CONCLUSIONI

Riassumendo quanto esposto **l'indagine di sismica a rifrazione** ha messo in evidenza la presenza di un principale rifratore che suddividono il sottosuolo in 2 sismostrati, le cui velocità sono così descrivibili:

- **Il primo sismostrato** (con una profondità compresa tra 12-24 m dal p.c.) ha velocità media V_p di circa 1100 m/s;
- **Il substrato rifratore** ha velocità media V_p di circa 2300 m/s.

Tra i punti sorgente U ed Y sono presenti terreni superficiali più areati e con velocità media di 550 m/s.

L'indagine sismica a rifrazione, oltre a descrivere dal punto di vista sismo-stratigrafico il sottosuolo, ha avuto lo scopo guidare la successiva interpretazione dei dati di sismica a riflessione. Infatti le velocità medie riscontrate sono state utilizzate, nell'indagine di sismica a riflessione, per la conversione dei tempi in profondità e, quindi, il giusto posizionamento dei riflettori più superficiali. Per ciò che riguarda i sedimenti più profondi, l'attribuzione delle profondità è stata effettuata sulla base dell'analisi di velocità relativa ai sismogrammi di sismica a riflessione.

L'indagine sismica a riflessione ha individuato 2 principali riflettori:


la prima riflessione individuata risulta posizionabile tra circa **12 e 32 metri** di profondità; **la seconda riflessione** si posiziona tra circa **100 e 115 metri** di profondità. È presente, anche, **una piccola riflessione superficiale**, a partire dalla stazione 100 fino a fine sezione, riscontrata anche nella sismica a rifrazione e con una profondità massima di circa 6-7 metri.

Inoltre, sono state individuate una serie di discontinuità subverticali, alcune delle quali interessano il substrato con $V_p > 2300$ m/s. Per la loro ubicazione e geometria si rimanda all'allegato “Analisi profilo 3 sismica a riflessione”.

Ubicazione area d'indagine (da CTR)

AREA D'INDAGINE

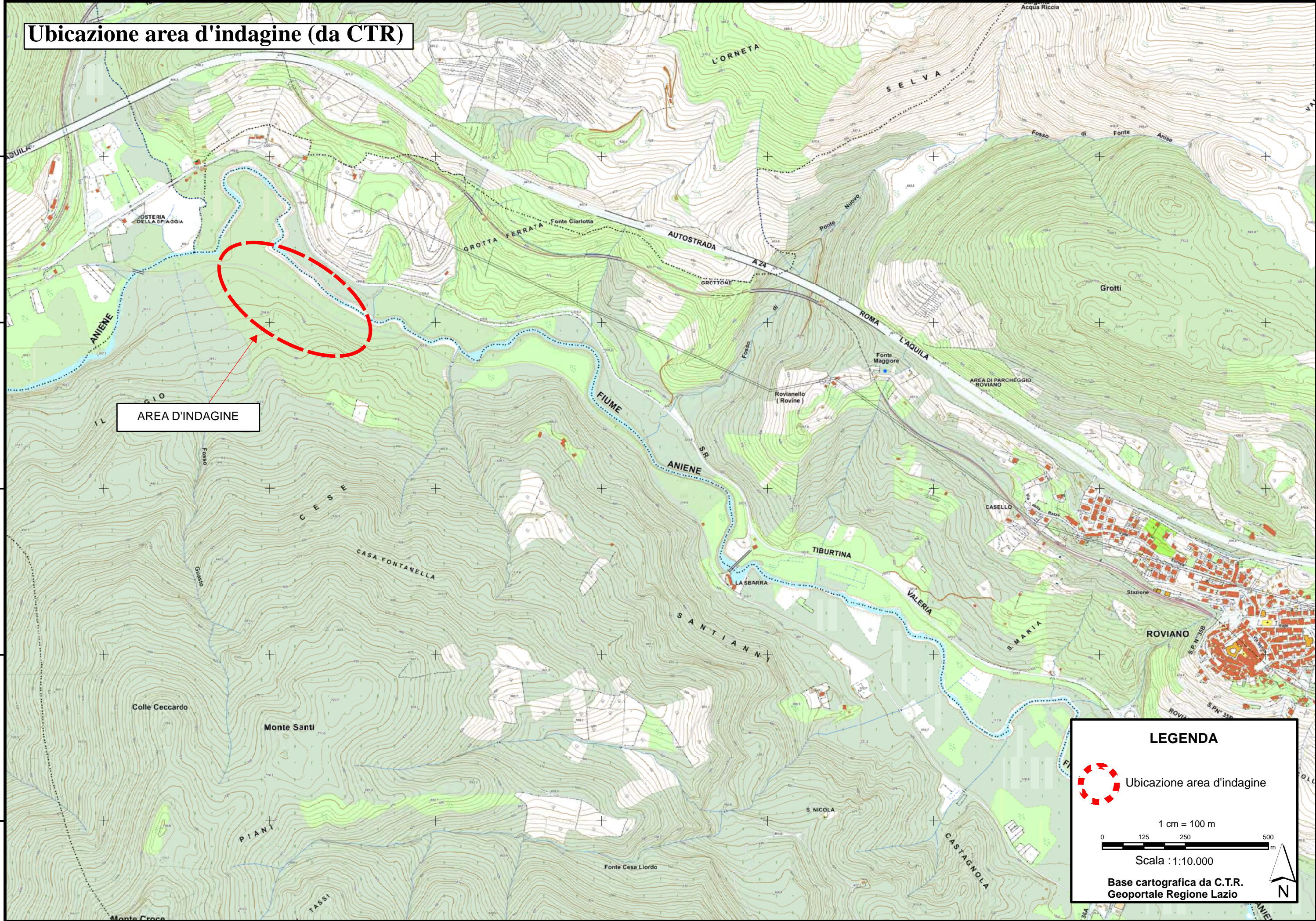
LEGENDA

 Ubicazione area d'indagine

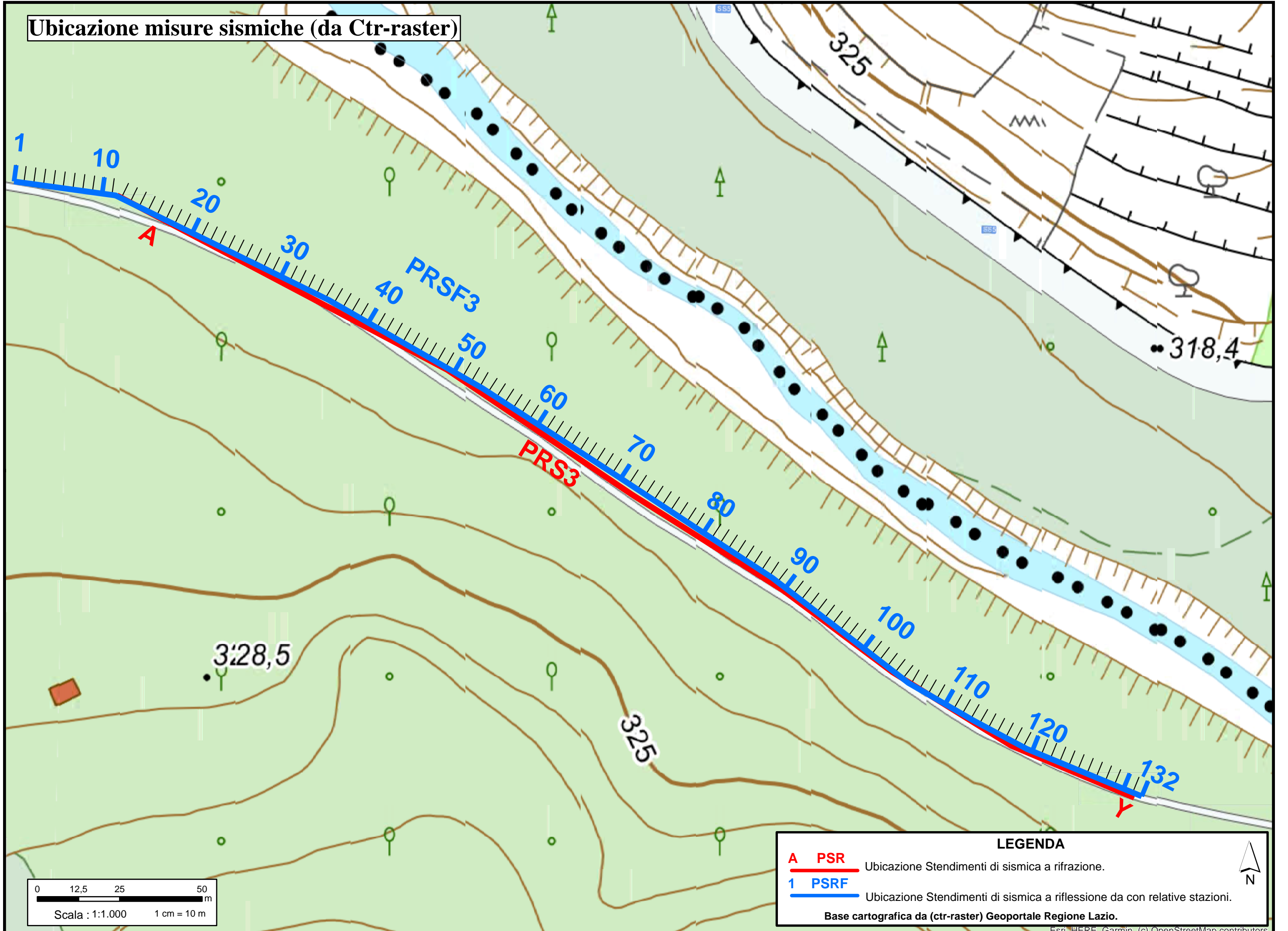
1 cm = 100 m
0 125 250 500 m

Scala : 1:10.000

Base cartografica da C.T.R.
Geoportale Regione Lazio



Ubicazione misure sismiche (da Ctr-raster)



0 12,5 25 50
m
Scala : 1:1.000 1 cm = 10 m

LEGENDA

A PSR Ubicazione Stendimenti di sismica a rifrazione.

1 PSRF Ubicazione Stendimenti di sismica a riflessione da con relative stazioni.

Base cartografica da (ctr-raster) Geoportale Regione Lazio.

Esri, HERE, Garmin, (c) OpenStreetMap contributors



ALLEGATO "PROSPEZIONE SISMICA PROFILO 3"

Prospezione a rifrazione

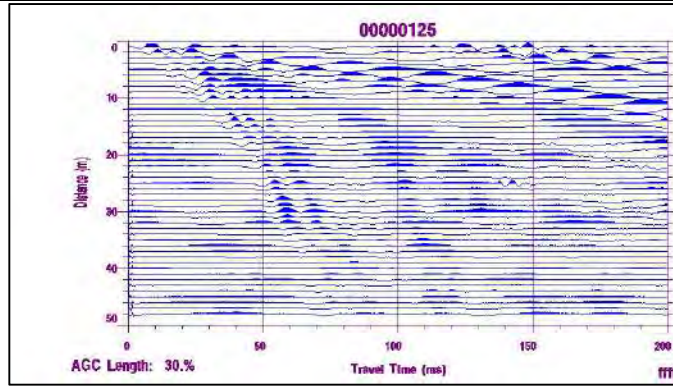
- *Sismogrammi sismica a rifrazione onde P*
- *Dromocrone onde P*
- *Sezione tomografica*

Prospezione a riflessione

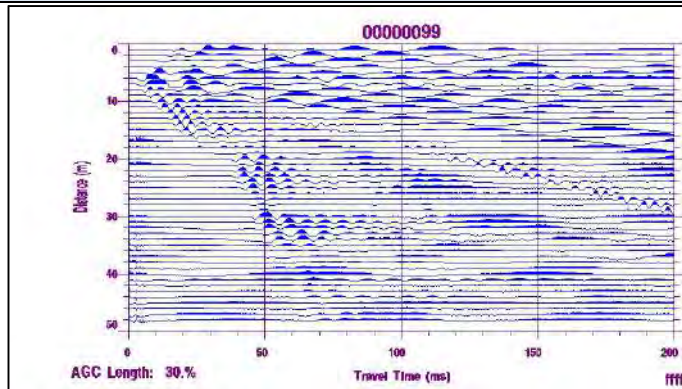
- *Esempio di sismogrammi] a 48 tracce*
- *Sismogrammi utilizzati per l'analisi CMP (sezione in common shot)*
- *Analisi profilo sismico a riflessione (dimensioni foglio 800x375mm)*

SISMOGRAMMI SISMICA A RIFRAZIONE ONDE LONGITUDINALI - PROFILO 3

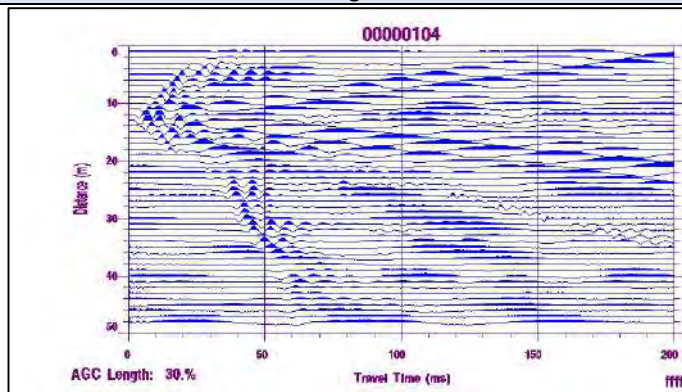
Punto sorgente "A"



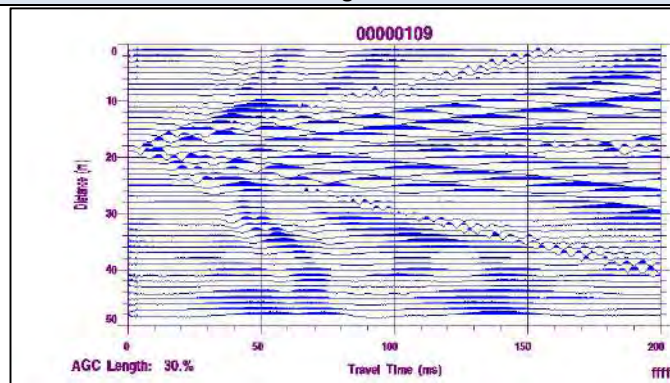
Punto sorgente "B"



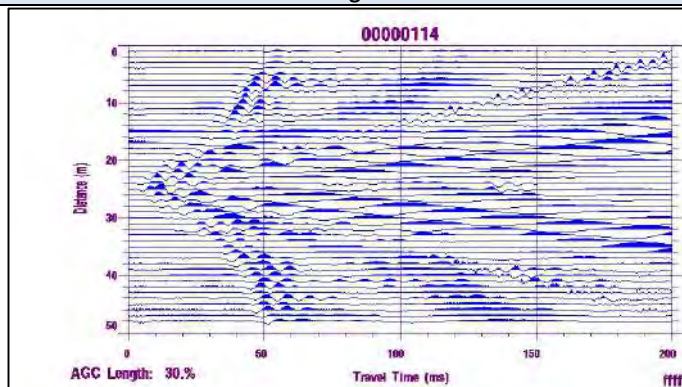
Punto sorgente "C"



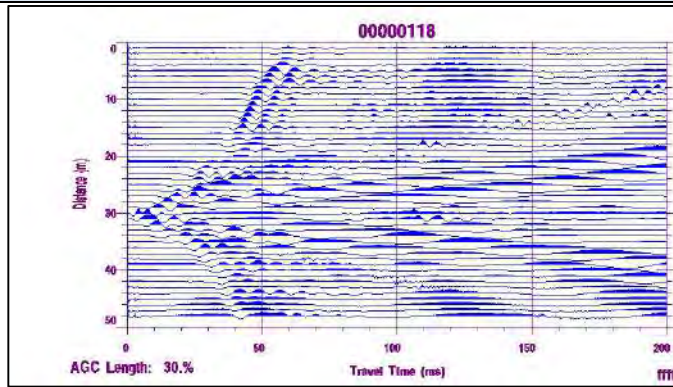
Punto sorgente "D"



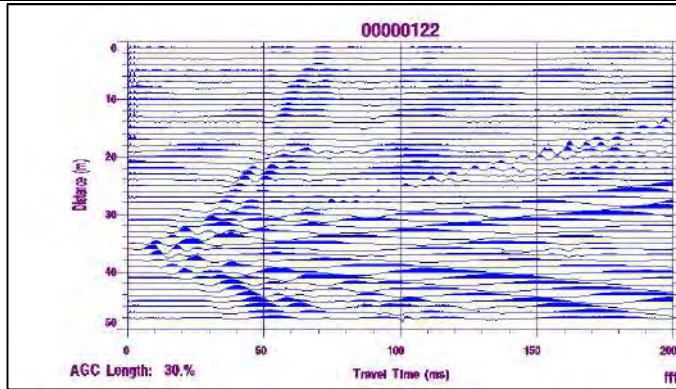
Punto sorgente "E"



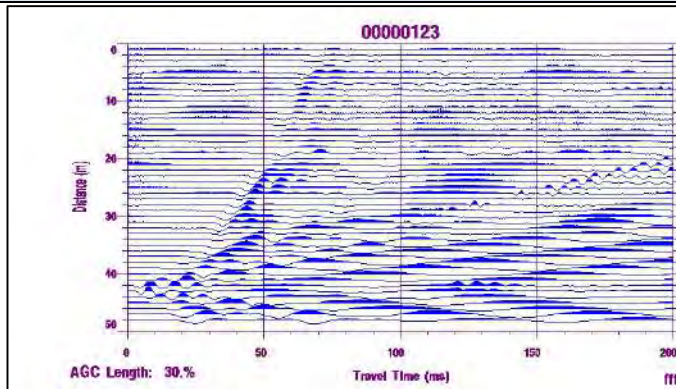
Punto sorgente "F"



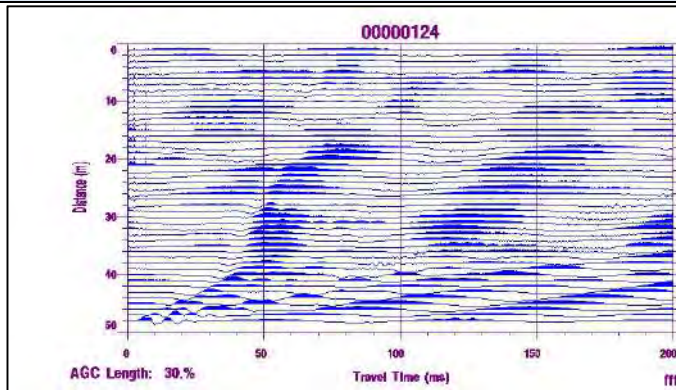
Punto sorgente "G"



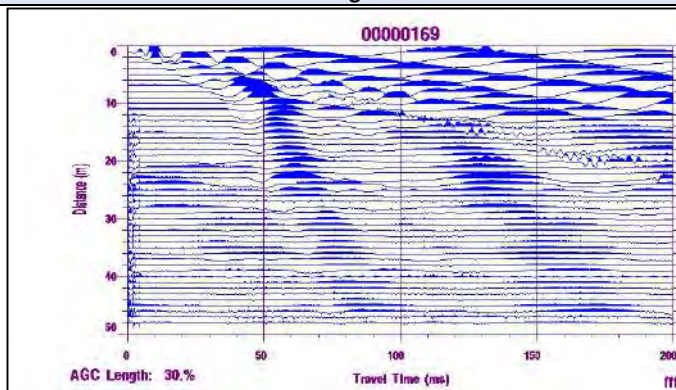
Punto sorgente "H"



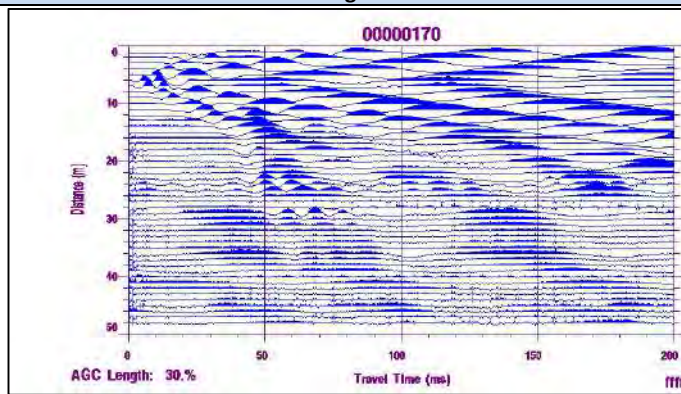
Punto sorgente "I"



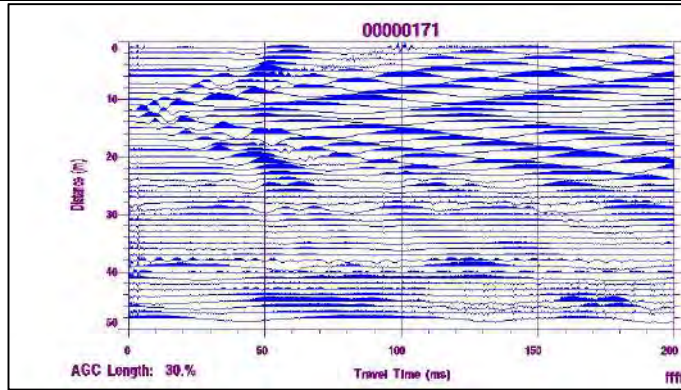
Punto sorgente "L"



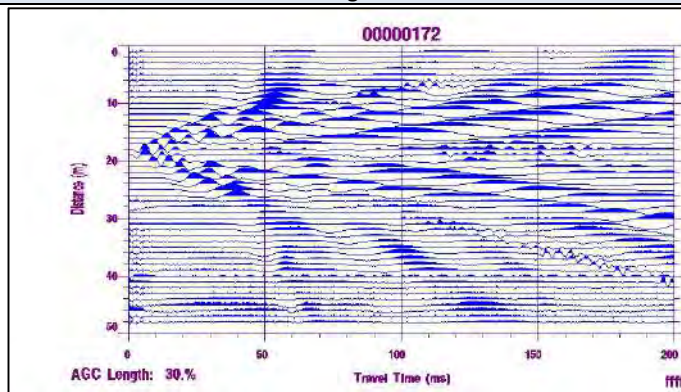
Punto sorgente "M"



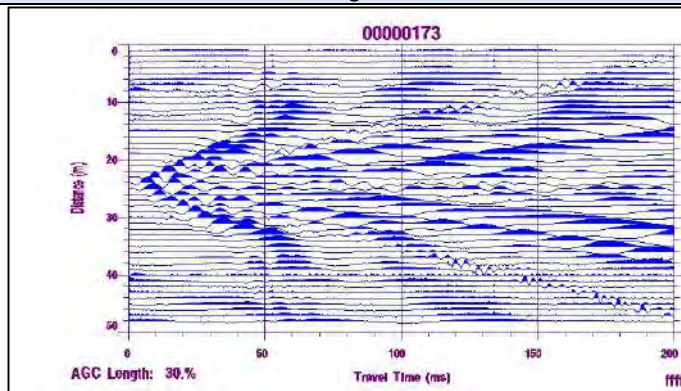
Punto sorgente "N"



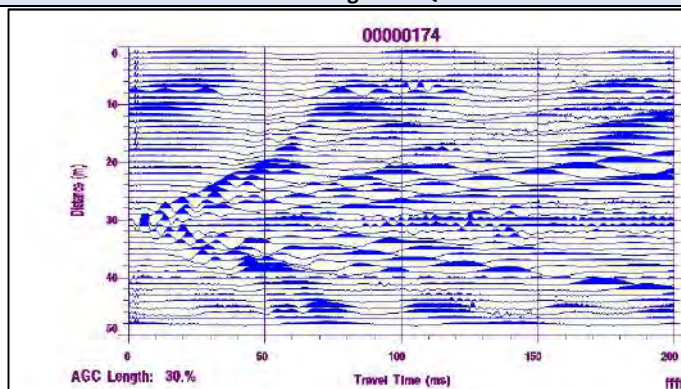
Punto sorgente "O"



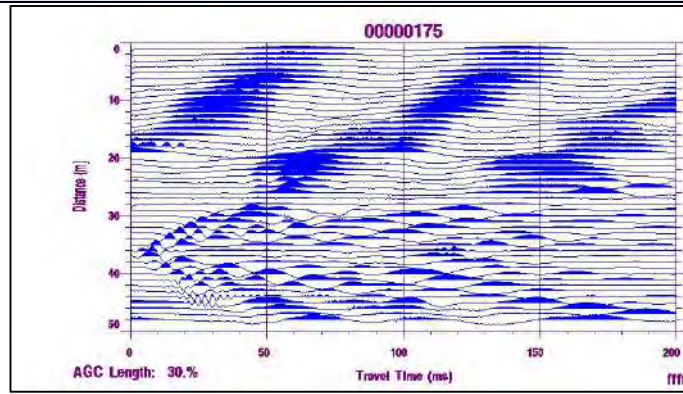
Punto sorgente "P"



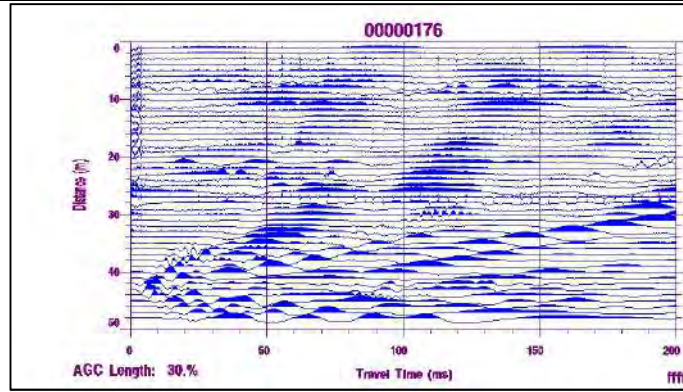
Punto sorgente "Q"



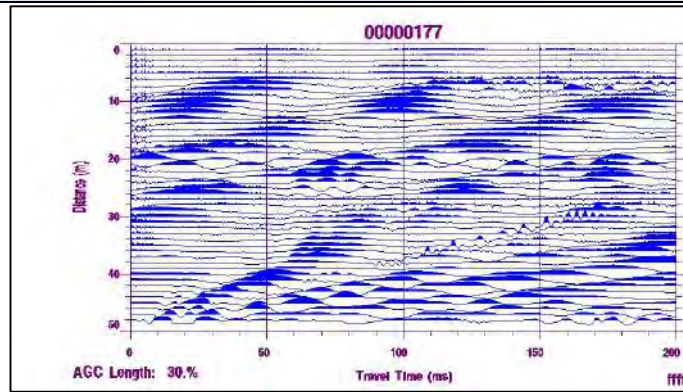
Punto sorgente "R"



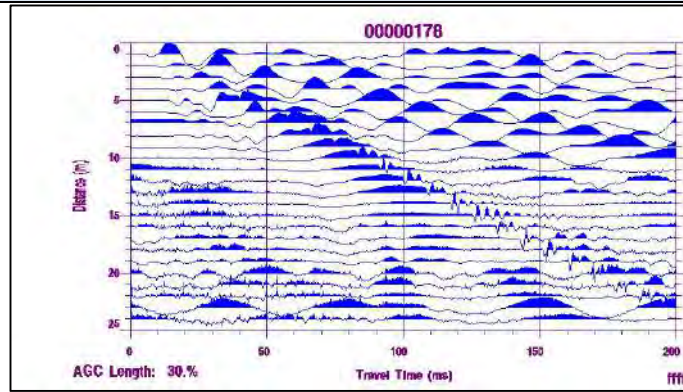
Punto sorgente "S"



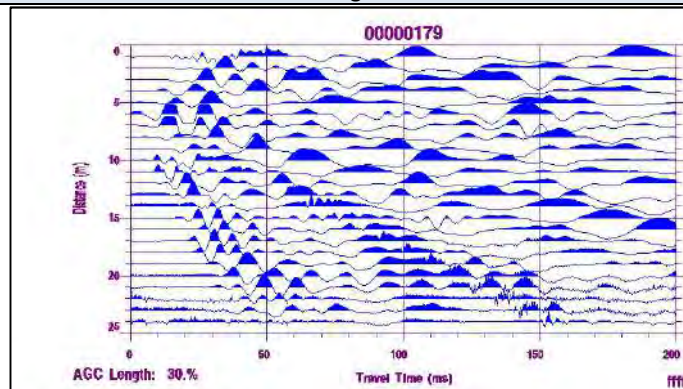
Punto sorgente "T"



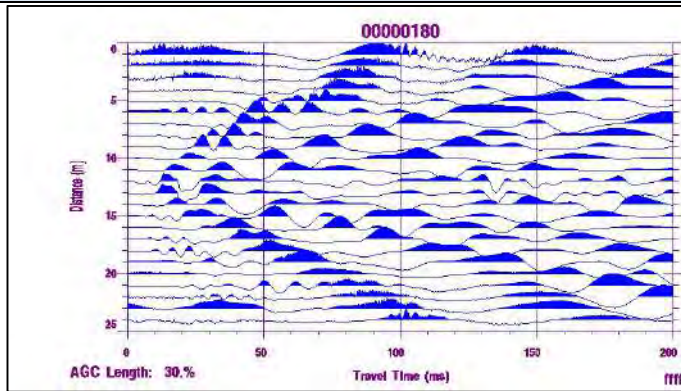
Punto sorgente "U"



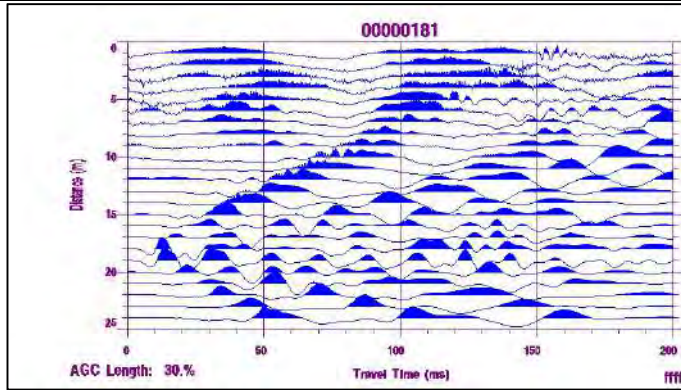
Punto sorgente "V"



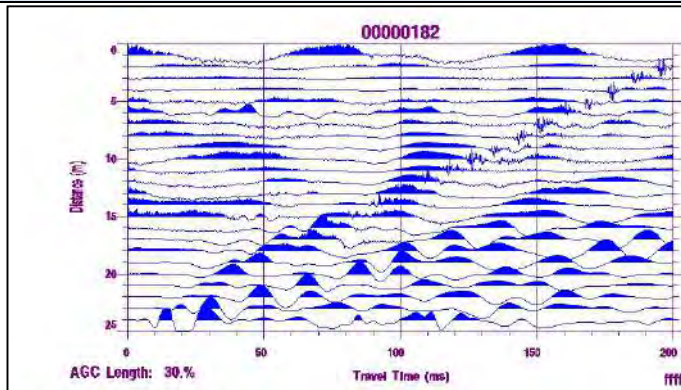
Punto sorgente "W"



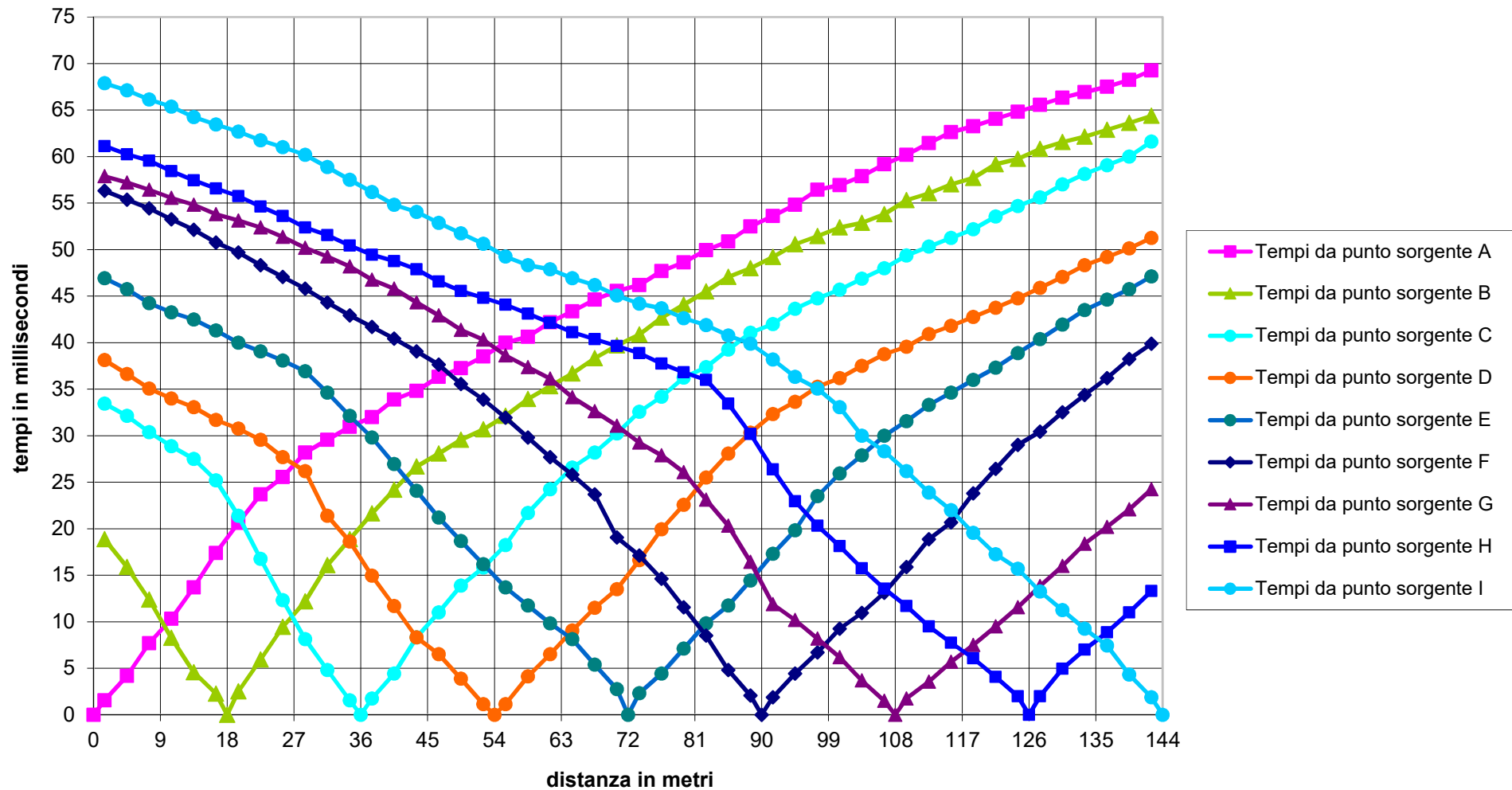
Punto sorgente "X"



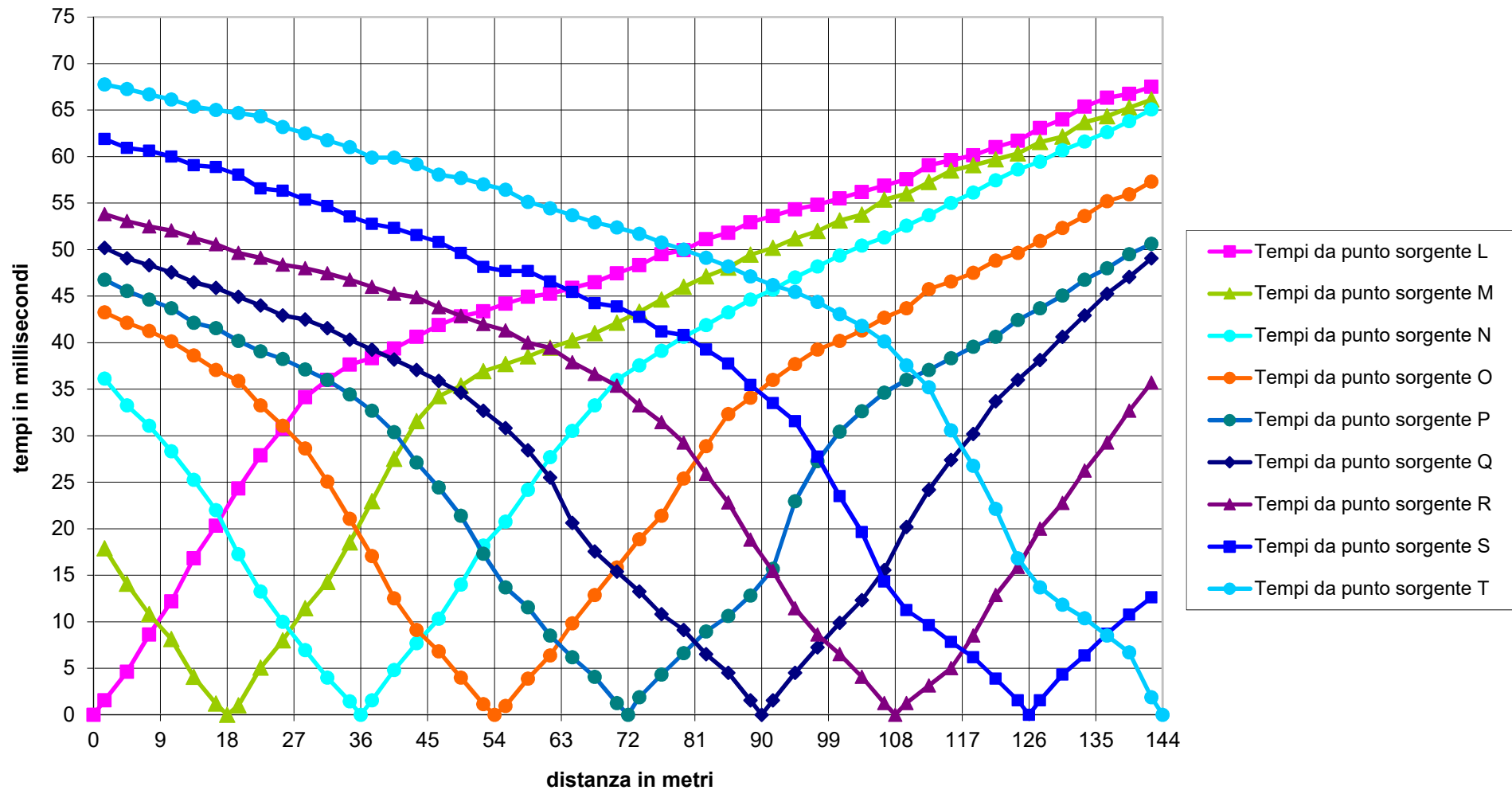
Punto sorgente "Y"



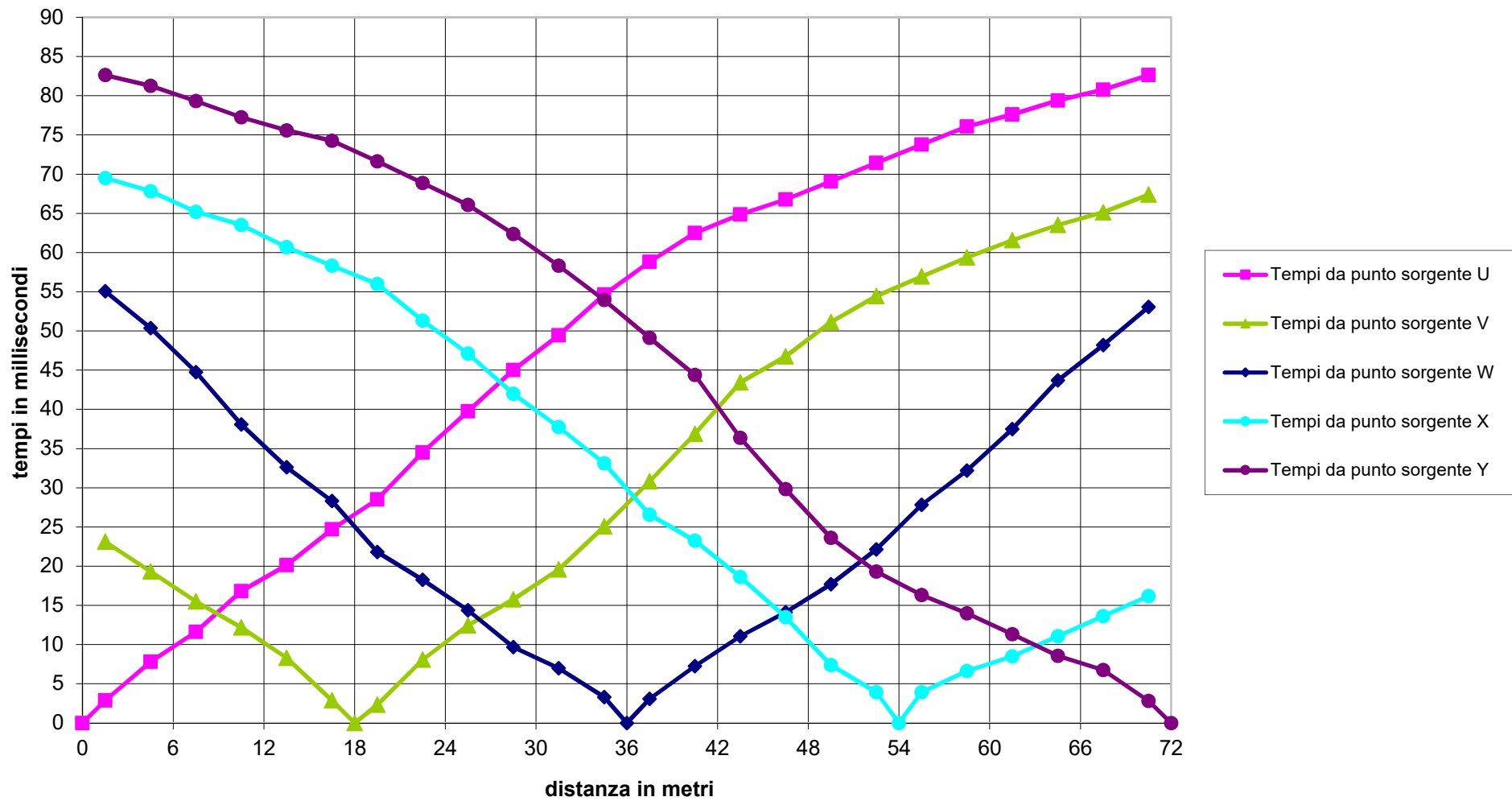
Profilo Sismico 3 - Dromocrone ONDE LONGITUDINALI - Scoppi A-I



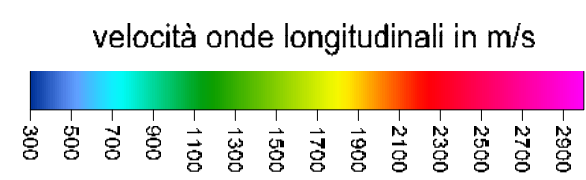
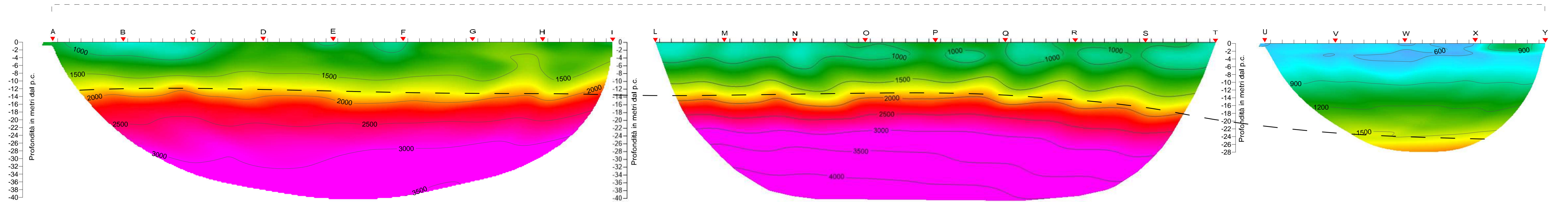
Profilo Sismico 3 - Dromocrone ONDE LONGITUDINALI - Scoppi L-T



Profilo Sismico 3 - Dromocrone ONDE LONGITUDINALI - Scoppi U-Y



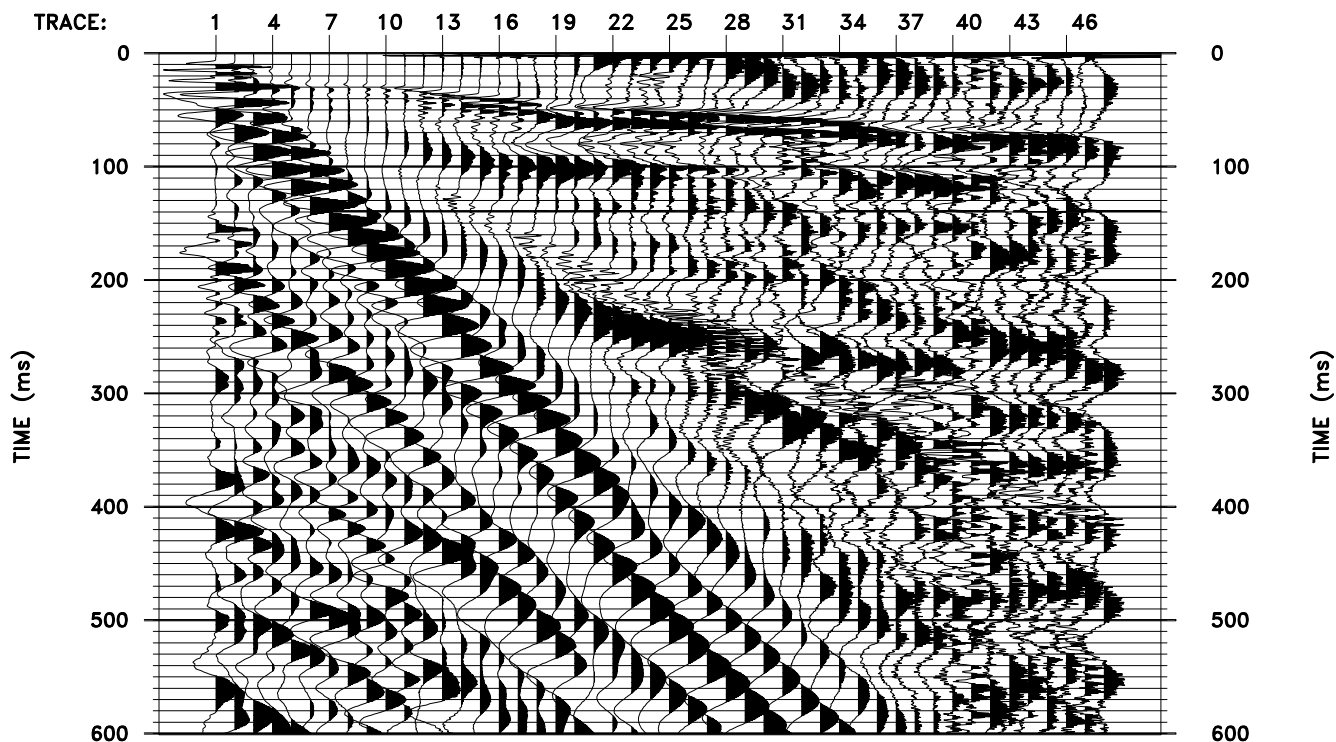
SEZIONE TOMOGRAFICA 3 - ONDE P



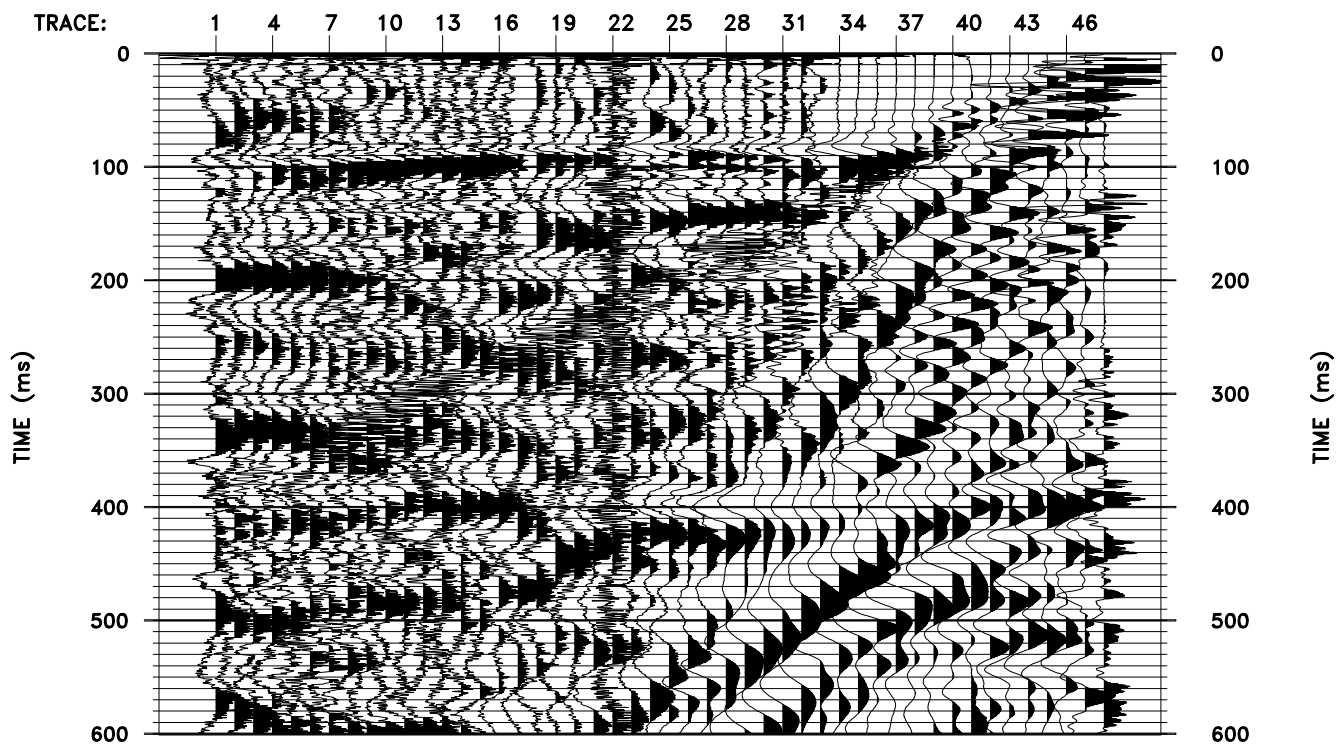
- PRINCIPALE RIFRATTORE
- | STAZIONE GEOFONICA
- ▼ PUNTO SORGENTE



Esempi di sismogrammi a 48 tracce Profilo 3

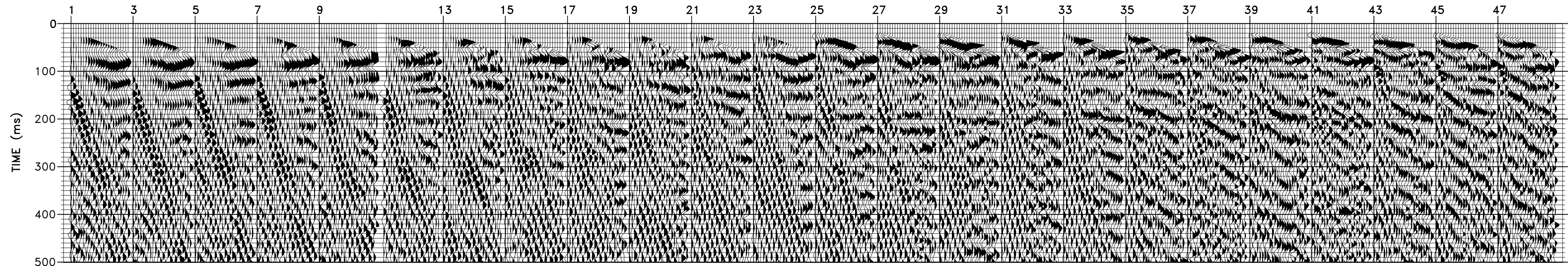


Sismogramma a 48 tracce (punto di energizzazione stazione 7)



Sismogramma a 48 tracce (punto di energizzazione stazione 128)

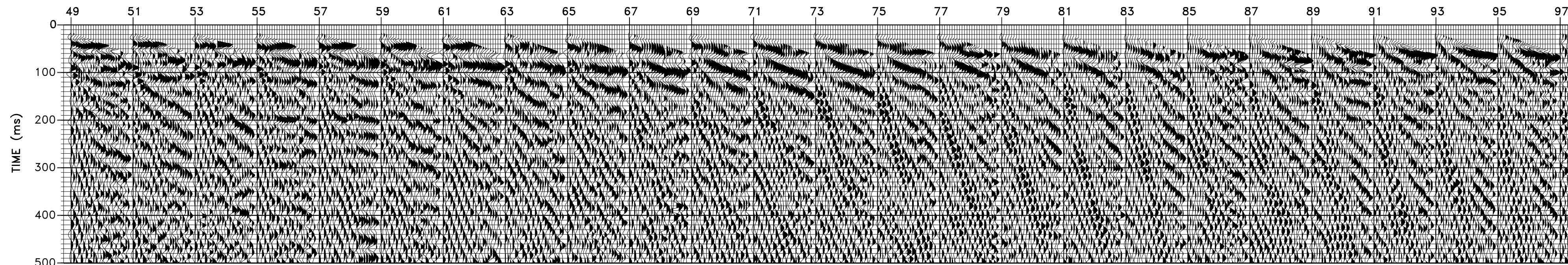
Stazioni sorgente sismica



PROFILO 3
SISMOGRAMMI UTILIZZATI
PER L'ANALISI IN C.M.P.
(SEZIONE IN SINGOL SHOT)

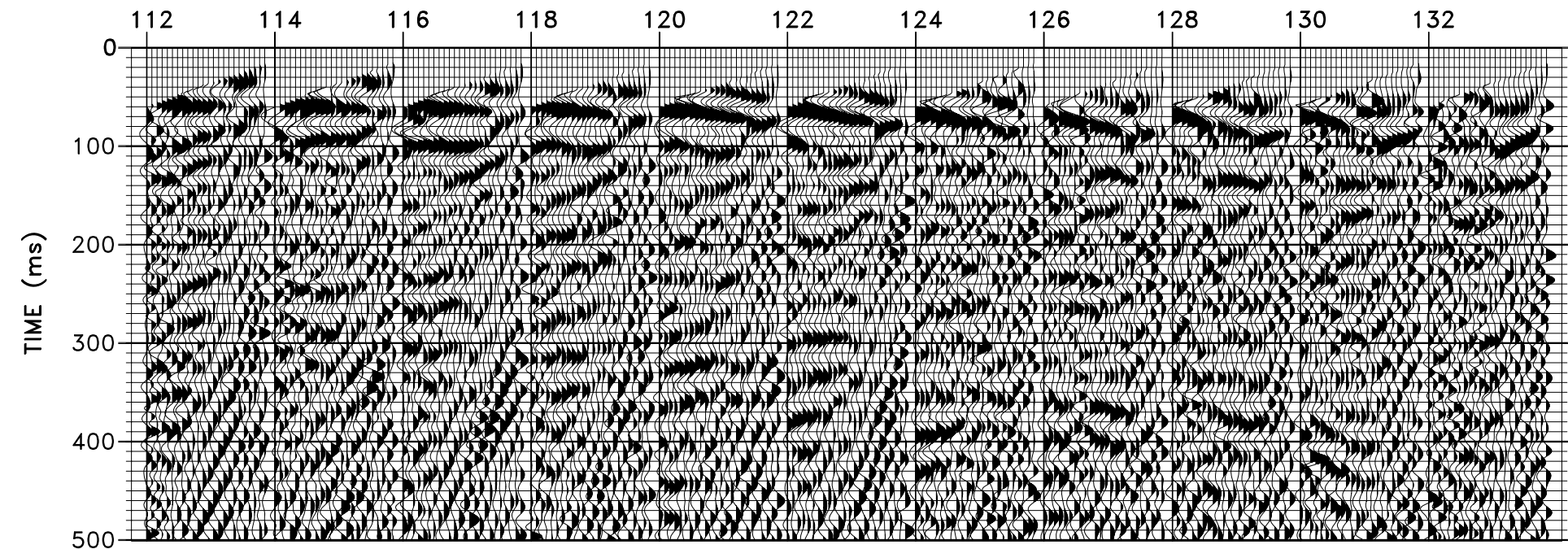
(PUSH)

TIME (ms)



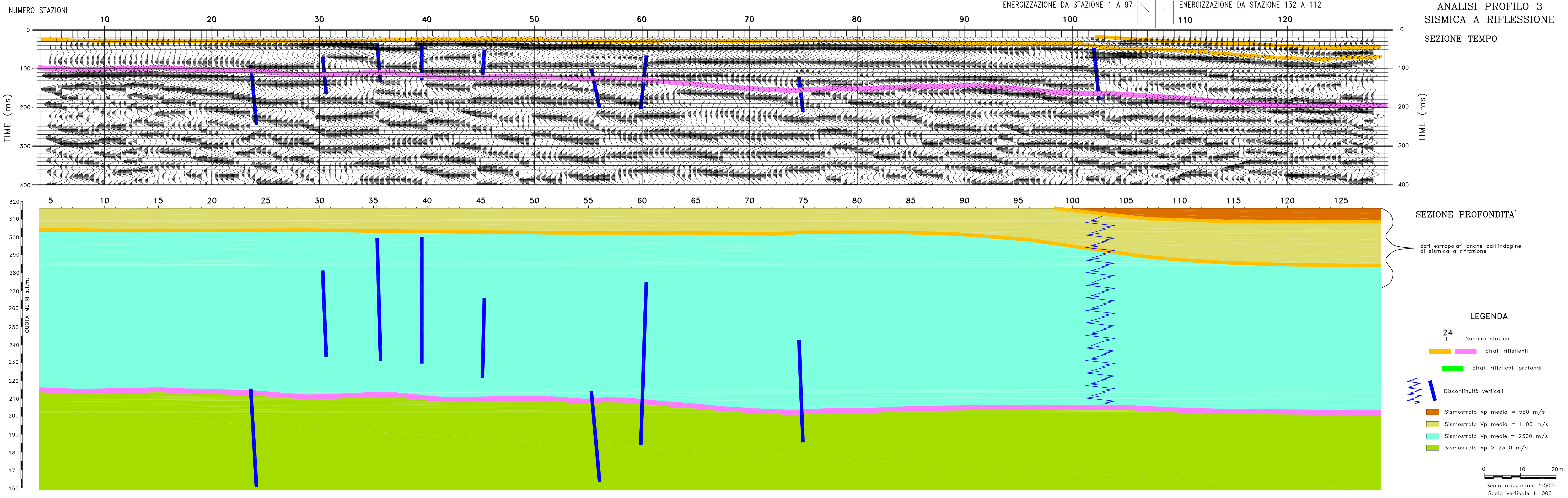
(PUSH)

TIME (ms)



(PULL)

TIME (ms)



ALLEGATO DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

FASI DI LAVORO INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE LONGITUDINALI (ONDE P) E IN ONDE TRASVERSALI (ONDE SH) E SISMICA A RIFLESSIONE



Acquisizione dati misure sismiche



Energizzazione onde longitudinale (Onde P) con generatore ad energia propulsiva di onde sismiche “Peg40” (Profilo sismica a riflessione)



Acquisizione dati misure sismiche



Acquisizione dati misure sismiche



Acquisizione dati misure sismiche



Georeferenziazioni stazioni geofoniche