

Committente:

**Dott. Geol. Roberto Giacometti**

Sito:

**Col Checrouit - Courmayeur**

**Realizzazione nuova stazione di arrivo della funivia**



**Indagine geofisica per la caratterizzazione litostratigrafica e la classificazione sismica del suolo**

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| Relazione n:    | 3445/16                 |
| Redatto da:     | Ing. Fabrizio Fantini   |
| Controllato da: | Dott. Geol. Mario Naldi |
| Data:           | Ottobre 2016            |
| Revisione:      | 0                       |

## Sommario

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE .....   | 2  |
| 2. UBICAZIONE INDAGINI .....  | 3  |
| 3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA ED ELABORAZIONE DATI.....  | 4  |
| 4. PROVE DI CLASSIFICAZIONE SISMICA.....  | 5  |
| 4.1 ZONA SISMICA .....  | 5  |
| 4.2 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SOTTOSUOLO .....  | 5  |
| 4.3 Risultati prove MASW .....  | 7  |
| 5. RISULTATI DELL'INDAGINE GEOELETTRICA MULTI-ELETTRODO E GEOSISMICA A RIFRAZIONE IN CORRISPONDENZA DEL NUOVO SOSTEGNO..... | 8  |
| 6. RISULTATI DELL'INDAGINE GEOSISMICA IN CORRISPONDENZA DELLA STAZIONE.....   | 9  |
| 7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....  | 10 |

In allegato:

|             |  |
|-------------|--|
| TAVOLE      | 1÷6  |
| APPENDICE A | Cenni sulla metodologia geoelettrica multi-elettrodo |
| APPENDICE B | Cenni sulla metodologia sismica a rifrazione         |
| APPENDICE C | Cenni sulla metodologia MASW                         |

## 1. INTRODUZIONE

La presente relazione illustra e descrive le indagini geofisiche realizzate nel mese di Ottobre 2016 per conto del Dott. Geol. Roberto Giacometti in due aree del Col Checrouit (Courmayeur, AO), in corrispondenza della stazione di arrivo della funivia (oggetto di rifacimento) e di un sostegno di un nuovo pilone.

La campagna di indagini ha il compito di fornire la caratterizzazione litostratigrafica e la classificazione sismica dei terreni nell'ambito del progetto di rinnovamento degli impianti di risalita a fune .

Il piano di indagine (concordato con la Committenza) ha previsto l'utilizzo di più metodologie di indagine:

1. Metodo geoelettrico multi-elettrodo (modello tomografico della resistività elettrica del sottosuolo);
2. Metodo sismico a rifrazione in onde di compressione (modello tomografico delle velocità sismiche);
3. Metodo MASW (profilo di rigidità in onde di taglio del sottosuolo).

L'utilizzo combinato di più metodologie d'indagine riduce notevolmente l'ambiguità interpretativa (propria dei metodi di indagine indiretta) e consente di verificare e valutare i parametri del sottosuolo in modo completo. Più in dettaglio:

- Il modello geoelettrico tomografico fornisce una caratterizzazione litostratigrafica del sottosuolo;
- Il modello sismico tomografico permette di valutare sia l'assetto stratigrafico del sottosuolo e sia il grado di addensamento (o fratturazione nel caso di substrato lapideo);
- La sezione MASW consente di valutare la variazione verticale della velocità delle onde di taglio, correlando le stesse al parametro  $V_{S30}$  richiesto dalla Normativa (T.U. delle costruzioni);
- La combinazione del modello sismico e della metodologia MASW permette (attraverso una correlazione incrociata) di pervenire al modello geologico e geotecnico del sottosuolo di riferimento per la progettazione delle strutture interagenti con il sottosuolo stesso (scavi, fondazioni, drenaggi, ecc.).

I risultati delle indagini sono illustrati nelle Tavole allegate e commentati nelle pagine seguenti.

## 2. UBICAZIONE INDAGINI

Come detto nel capitolo introduttivo, le indagini geofisiche hanno interessato due subaree dell'arrivo dell'impianto di risalita di Col Checrouit: in Figura 1 e nella Tavola 1 allegata si localizzano le prove eseguite:

1. Due sezioni sismiche a rifrazione (SIS), denominate A-A' e C-C'
2. Una sezione geoelettrica multi-elettrodo (ERT), denominata B-B'
3. Due prove MASW, denominate MASW1 e MASW2.

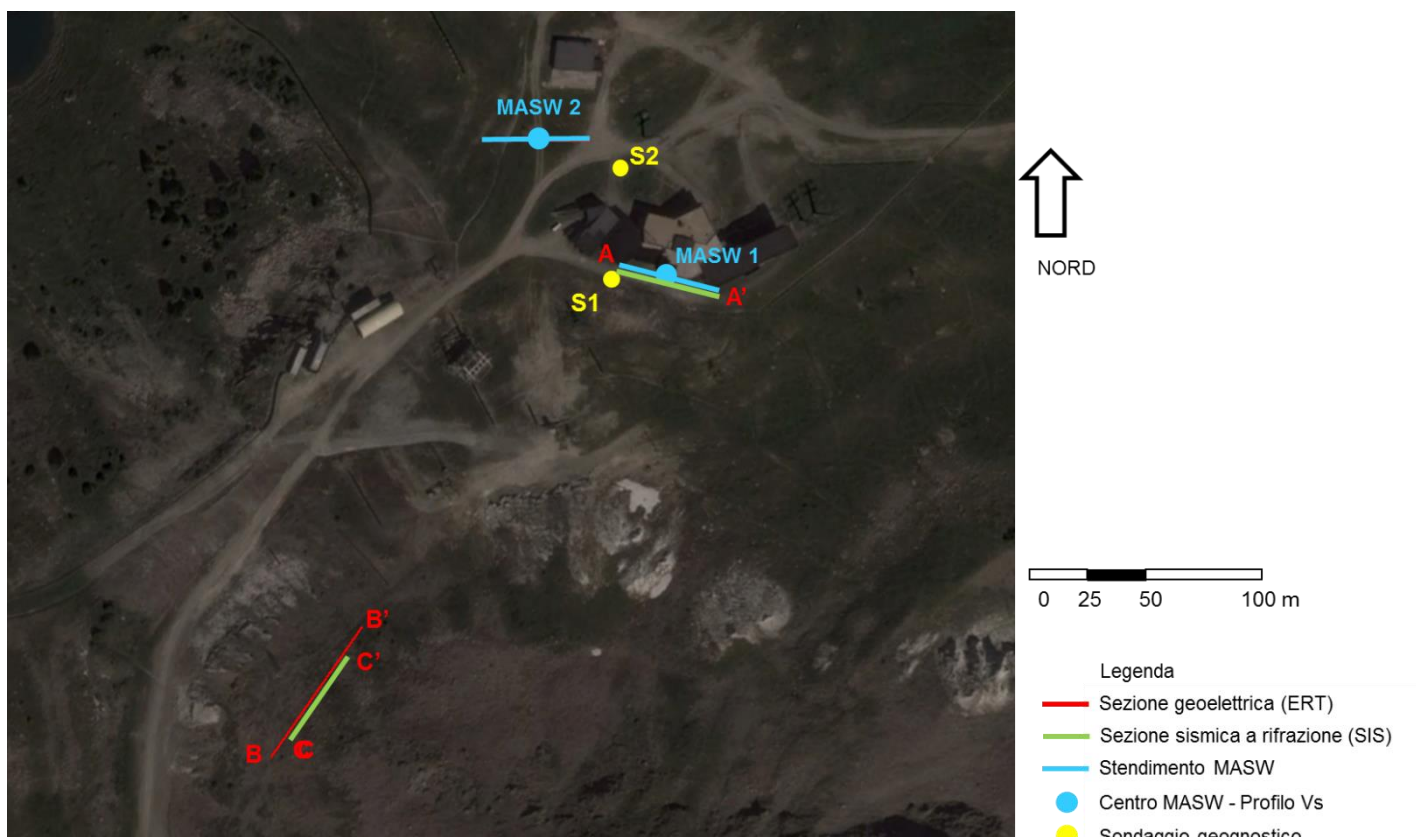


Figura 1 - Ubicazione delle indagini geofisiche e dei sondaggi geognostici

### 3. STRUMENTAZIONE UTILIZZATA ED ELABORAZIONE DATI

L'acquisizione dei dati geoelettrici è stata realizzata con un georesistivimetro Syscal Pro (Iris Instruments, F) a 72 canali e l'utilizzo di elettrodi in acciaio inox collegati mediante cavi multipolari con spaziatura tra le connessioni pari a 3 m. Per l'acquisizione dei dati di resistività elettrica sono state adottate delle sequenze miste Wenner-Schlumberger, predisposte mediante il software Electre Pro (Iris Instruments).

Per l'elaborazione dei dati sono stati utilizzati i programmi:

- *Prosys II* (Iris Instruments, Fr): consente l'elaborazione preliminare dei dati di resistività elettrica apparente (filtraggio e correzione topografica dei dati);
- *Res2DINV* (Geotomo Software, Mal): esegue l'inversione numerica dei dati e la restituzione della sezione tomografica di resistività elettrica reale.

L'acquisizione dei dati sismici a rifrazione e delle onde di superficie (MASW) è stata realizzata con sismografo Daq Link IV (Seismic Source, USA) a 24 canali. In entrambe le sezioni di indagine, per l'indagine a rifrazione sono stati utilizzati 36 geofoni (frequenza centrata di 40 Hz) con interasse 3 m (Tabella 2a), mentre per le prove MASW sono stati usati 24 geofoni (frequenza centrata di 4.5 Hz) con interasse 1.5 m (Tabella 2b). Le basi di energizzazione delle sezioni sismiche a rifrazione sono state posizionate ogni 4 geofoni (10 punti di scoppio per ogni sezione) e hanno previsto l'energizzazione mediante massa battente da 10 Kg su piastra metallica.

L'unità di acquisizione, dotata di un convertitore analogico/digitale a 24 bit (unità Daq Link III), è fornita di una connessione di rete standard 10/100 (base RJ45) per la comunicazione con un computer portatile su cui è installato un apposito programma (VibraScope ® v.2.4.40) che gestisce la visualizzazione, l'analisi e la memorizzazione delle forme d'onda registrate.

I dati sismici relativi all'indagine MASW sono stati elaborati con il software Surfseis V. 4.2 (Kansas University, USA), che analizza la curva di dispersione sperimentale per le onde di Rayleigh. L'inversione numerica della curva, secondo un processo iterativo ai minimi quadrati, consente di ottenere un profilo di velocità delle onde di taglio nel sottosuolo.

Per l'elaborazione dei dati sismici a rifrazione si è proceduto al riconoscimento e raccolta dei dati dei primi arrivi (software *Reflexw*, Sandmeier Software, D). Successivamente le onde di primo arrivo sono state elaborate con il metodo GRM (General Reciprocal Method) accoppiato ad una inversione tomografica su una griglia di nodi equispaziati per una modellazione della distribuzione delle velocità delle onde di compressione nel sottosuolo (software *Rayfract*, Intelligent Resources Inc., CDN). Il metodo dell'inversione tomografica consente (con un sufficiente numero di scoppi) di individuare anche eventuali inversioni di velocità (che costituiscono il limite della prospezione sismica a rifrazione).

Cenni relativi alle metodologie di indagine sono riportati nelle Appendici A, B e C.

## 4. PROVE DI CLASSIFICAZIONE SISMICA

### 4.1 ZONA SISMICA

Alla luce del DM 14/01/2008 e della nuova zonizzazione sismica della Regione Val d'Aosta, D.G.R. n. 1603 del 04.10.2013 e s.m.i., il Comune di Courmayeur rientra in Zona sismica n. 3.

### 4.2 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SOTTOSUOLO

Il DM 14-01-2008 individua come parametro di riferimento per la classificazione sismica dei suoli la velocità media di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità dal piano campagna ( $V_{S30}$ ) e viene calcolato con la seguente formula:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1, N} \frac{h_i}{V_i}}$$

dove  $h_i$  e  $V_i$  indicano rispettivamente lo spessore (in m) e la velocità (in m/s) delle onde di taglio (per deformazioni di taglio  $\gamma < 10^{-6}$ ) dello strato  $i$ -esimo, per un totale di  $N$  strati presenti nei 30 m di profondità dal piano di appoggio delle fondazioni.

Nella Tabella 1, riportata nella pagina seguente, si presenta la classificazione sismica prevista dal suddetto Decreto Ministeriale.

| CLASSE DI SUOLO | PROFILO STRATIGRAFICO  | PARAMETRI              |                  |                   |
|-----------------|--|------------------------|------------------|-------------------|
|                 |  | V <sub>S30</sub> [m/s] | N <sub>SPT</sub> | Cu [kPa]          |
| <b>A</b>        | Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione con spessore massimo pari a 3 m   | > 800                  |                  |                   |
| <b>B</b>        | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità | < 800<br><br>> 360     | > 50             | > 250             |
| <b>C</b>        | Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati, o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità    | < 360<br><br>> 180     | < 50<br><br>> 15 | < 250<br><br>> 70 |
| <b>D</b>        | Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati, o terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità  | < 150                  | < 15             | < 70              |
| <b>E</b>        | Terreni dei sottosuoli tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con V <sub>S30</sub> > 800 m/sec)   |                        |                  |                   |
| <b>S1</b>       | Depositi di terreni che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche   | < 100                  |                  | < 20<br><br>> 10  |
| <b>S2</b>       | Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti  |                        |                  |                   |

Tabella 1 - Classificazione del tipo di suolo secondo la vigente normativa sismica italiana

### 4.3 Risultati prove MASW

I risultati delle prove MASW1 e MASW2 sono riportati in Tavola 2 e in Tavola 3. L'analisi del profilo stratigrafico derivato dallo spettro di dispersione delle onde di superficie evidenzia un assetto sismo-stratigrafico descritto nelle tabelle seguenti.

#### Prova MASW1

| Livello | Profondità [m da p.c.] | Descrizione  | Velocità Vs [m/s] |
|---------|------------------------|--|-------------------|
| 1       | 0 ÷ 10 m               | Depositi sciolti a grado di addensamento crescente con la profondità | 300 ÷ 600         |
| 2       | 10 ÷ 18 m              | Scisti alterati e sfatti   | 600 ÷ 800         |
| 3       | > 18 m                 | Substrato calcareo molto alterato                                    | 600               |

Tabella 2 – Assetto sismo-stratigrafico emerso da prova MASW1

#### Prova MASW2

| Livello | Profondità [m da p.c.] | Descrizione  | Velocità Vs [m/s] |
|---------|------------------------|--|-------------------|
| 1       | 0 ÷ 24 m               | Depositi sciolti a grado di addensamento crescente | 200 ÷ 500         |
| 2       | > 24 m                 | Scisti alterati e sfatti                           | 500 ÷ 700         |

Tabella 3 – Assetto sismo-stratigrafico emerso da prova MASW2

Il valore di Vs30 calcolato al piano campagna risulta pari a circa 584 m/s per il MASW1 e 394 m/s per il MASW2, che consente di definire il contesto geotecnico esaminato come suolo di classe sismica "B".

| Vs30 [m/s] | Classe di suolo | Descrizione geotecnica   |
|------------|-----------------|--|
| 394 - 584  | B               | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina). |

Tabella 4 – Classificazione sismica



## 5. RISULTATI DELL'INDAGINE GEOELETRICA MULTI-ELETTRODO E GEOSISMICA A RIFRAZIONE IN CORRISPONDENZA DEL NUOVO SOSTEGNO

I modelli tomografici di resistività elettrica e di velocità delle onde di compressione sono illustrati in mostrato in Figura 2.

La sezione geoelettrica B-B' evidenzia la presenza di una coltre detritica di spessore compreso tra 5 e 10 m con presenza di un grosso masso plurimetrico. Il sottostante substrato lapideo presenta elevati valori di resistività elettrica, compatibili con dei litotipi dolomitici o gneissici. Si osservano, inoltre, due possibili zone di faglia (zone di maggior debolezza e ispessimento della coltre detritica).

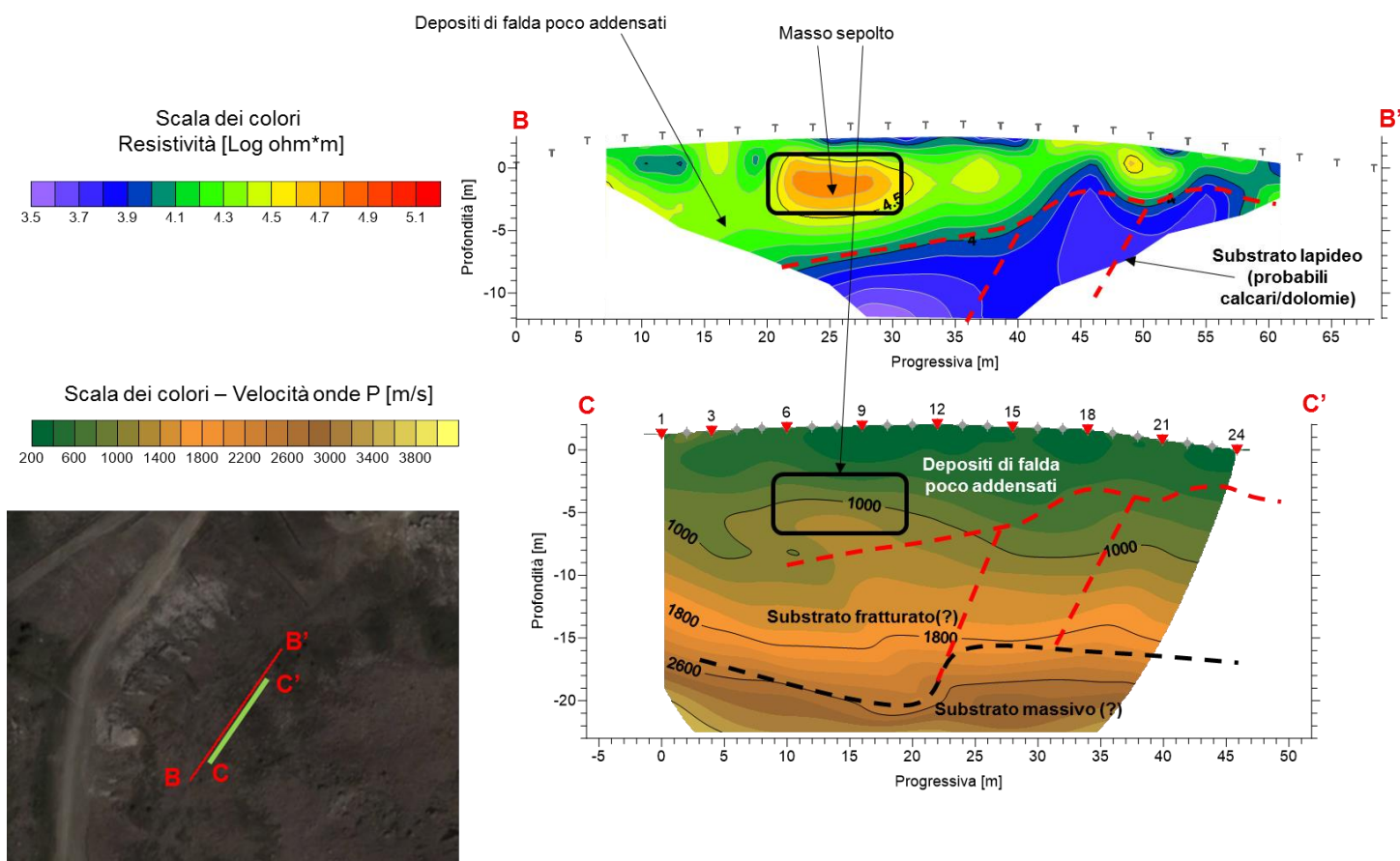


Figura 2 - Sezione geoelettrica ERT B-B' e sezione geosismica C-C'

La sezione sismica C-C' riconosce il masso sepolto e imballato nella coltre detritica (con minor risoluzione rispetto all'indagine geoelettrica). Il contatto tra detrito e substrato fratturato è meno chiaro rispetto all'indagine geoelettrica, ma coincide circa con l'isotaca 1000 m/s. Come per l'indagine geoelettrica si riconosce la presenza di due zone di debolezza (faglie). Il passaggio dal substrato lapideo fratturato al substrato lapideo massivo si colloca tra l'isotaca 2000 e 2500 m/s.

## 6. RISULTATI DELL'INDAGINE GEOSISMICA IN CORRISPONDENZA DELLA STAZIONE

Il modello tomografico di velocità delle onde di compressione relativo alla sezione A-A' viene riportato in Figura 3. L'assetto stratigrafico che emerge dall'analisi di tale modello e sulla base degli esiti del sondaggio S1, nonché dal profilo MASW1, evidenzia quanto segue:

- Un primo sismostrato di spessore mediamente pari a 4÷7 m, con velocità delle onde di compressione inferiori a 1000 m/s (tonalità di colore verde), costituito dalla coltre detritica allentata (limi e sabbie con ghiaia).
- Un secondo sismostrato compreso tra 7-8 m di profondità e 10-12 m di profondità, con velocità delle onde di compressione comprese tra 1000 e 1800 m/s (tonalità di colore marroncino), costituito dalla coltre detritica mediamente addensata. Si osservano delle "inversioni di velocità" all'interno di tale strato, coincidenti con zone sature.
- Un terzo sismostrato caratterizzato da velocità comprese tra 2000 m/s <math>V\_p</math> <math><2500</math> m/s, costituito da scisti fratturati passanti a calcari fratturati.

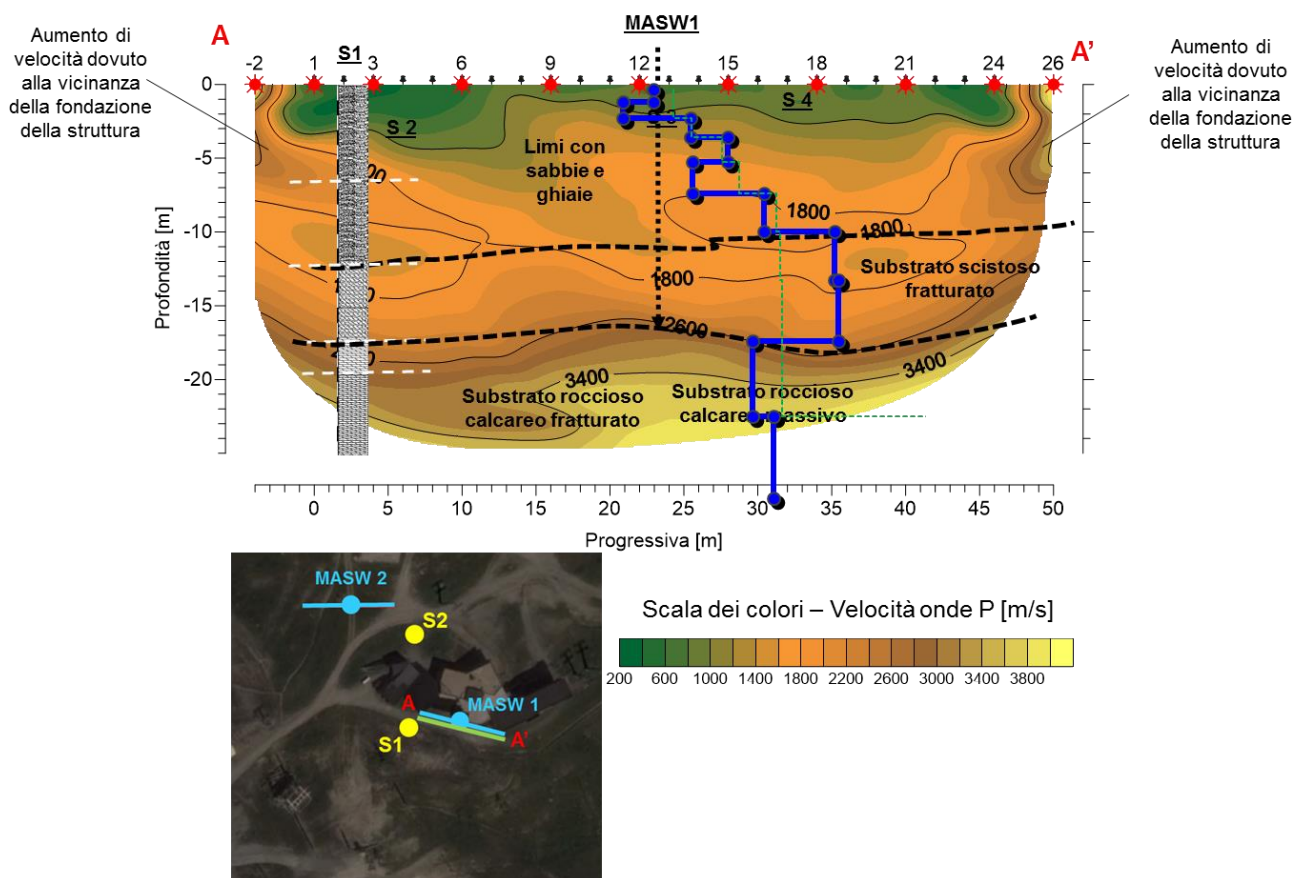


Figura 3 - Sezione sismica a rifrazione A-A': modello tomografico di velocità delle onde di compressione

## 7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geotecnica è stata effettuata a partire dai dati del profilo MASW2 e della sezione sismica SIS1 rilevate nella stazione di arrivo della funivia. I valori vanno interpretati come indicativi e possono variare rispetto ad altre metodologie, in quanto ottenuti tramite correlazioni empiriche.

Più in dettaglio, Il profilo verticale MASW può essere assimilato, per certi versi, al grafico di una prova penetrometrica. Tale similitudine deriva da una nota correlazione utilizzata generalmente per valutare le velocità delle onde di taglio a partire da dati penetrometrici. Nel caso in esame, per derivare il valore di N-SPT si è utilizzata la formula di Ohta and Goto (1978)

$$V_s = 85.35 \cdot (N-SPT)^{0.348}$$

Ricavato il valore di N-SPT è possibile derivare direttamente il valore di angolo di attrito (trattandosi di terreni a comportamento prevalentemente attritivo) utilizzando il metodo di correlazione diretta RBS (Road Bridge Specification) che si basa sulla seguente relazione:

$$\phi' = (15 \cdot N \text{ norm})^{0.5} + 15$$

I valori ottenuti per le prove MASW1 e MASW2 e la loro variazione lungo il profilo di riferimento sono riportati in Tabella 5 (MASW1) e in Tabella 6 (MASW2). Per la prova MASW1, i terreni si presentano molto rigidi fin dalla superficie, con valori di N-SPT non correlabili (Tabella 5). La prova MASW2 fornisce invece dei terreni meno rigidi e per i quali è possibile determinare i valori di N-SPT e, quindi, di angolo di attrito. Si osserva che, a profondità maggiori di 10 m, si rileva rifiuto delle prove SPT (non è quindi possibile stimare l'angolo di attrito). Si assiste ad un graduale miglioramento delle proprietà del terreno, con l'aumento della profondità, in particolare al di sotto dei 3-4 m. Per velocità elevate il valore di N-SPT perde di significato e si assume la prova SPT vada a rifiuto per terreni così rigidi. Inoltre, si assume, in via conservativa, che la coesione sia nulla.

| Strato | Profondità [m] |       | Vs<br>[m/s] | N-SPT | $\phi'$ |
|--------|----------------|-------|-------------|-------|---------|
|        | da             | a     |             |       |         |
| 1      | -0.9           | -0.9  | 380.9       | 74    | 48      |
| 2      | -2.0           | -2.0  | 316.3       | 43    | 40      |
| 3      | -3.4           | -3.4  | 458.5       | 125   | 58      |
| 4      | -5.1           | -5.1  | 536.6       | 197   | 69      |
| 5      | -7.3           | -7.3  | 463.1       | 129   | 59      |
| 6      | -10.0          | -10.0 | 612.0       | 287   | 81      |
| 7      | -13.3          | -13.3 | 760.6       | R     | -       |
| 8      | -17.6          | -17.6 | 769.0       | R     | -       |
| 9      | -22.8          | -22.8 | 589.8       | R     | -       |
| 10     | -30.0          | -30.0 | 632.4       | R     | -       |

Tabella 5 - Valori di N-SPT e angolo d'attrito sulla base del profilo MASW1 – **Dati non correlabili per eccessiva rigidità dei terreni**

| Strato | Profondità [m] |        | Vs<br>[m/s] | N-SPT | φ' |
|--------|----------------|--------|-------------|-------|----|
|        | da             | a      |             |       |    |
| 1      | 0.00           | -0.91  | 180.23      | 9     | 26 |
| 2      | -0.91          | -2.05  | 207.96      | 13    | 29 |
| 3      | -2.05          | -3.47  | 246.58      | 21    | 33 |
| 4      | -3.47          | -5.25  | 270.19      | 27    | 35 |
| 5      | -5.25          | -7.48  | 306.78      | 40    | 39 |
| 6      | -7.48          | -10.26 | 370.60      | 68    | 47 |
| 7      | -10.26         | -13.74 | 432.37      | R     | -  |
| 8      | -13.74         | -18.08 | 468.34      | R     | -  |
| 9      | -18.08         | -23.51 | 480.58      | R     | -  |
| 10     | -23.51         | -30.00 | 660.40      | R     | -  |

Tabella 6 - Valori di N-SPT e angolo d'attrito sulla base del profilo MASW2

Oltre al valore dell'angolo di attrito e al grado di addensamento dei materiali, dalle prove sismiche è possibile definire la densità (peso di volume) e il modulo di taglio.

La densità si può stimare attraverso la seguente relazione:

$$\gamma = 0.51V_p^{0.19}$$

Tale relazione apparentemente diretta, rappresenta un trend medio di molte litologie, in situazioni di pressioni a regime normale e saturazione ad acqua (Gardner et al., 1974).

Il coefficiente di Poisson rappresenta il rapporto tra le deformazioni Indotte in direzione orizzontale e quelle in direzione verticale:

$$\nu = \frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_p}$$

La relazione tra tale coefficiente e i valori di velocità delle onde P e S è espressa in funzione del rapporto  $V_p/V_s$  (costante e caratteristico per ogni tipo di materiale) dalla seguente equazione:

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

Il modulo di taglio fornisce una misura della resistenza dei materiali agli sforzi di taglio. Conoscendo la velocità di propagazione delle onde S, si calcola il modulo di taglio dinamico dalla seguente relazione:

$$G = \gamma V_s^2$$

I valori calcolati a partire dalle formule prima commentate e la loro variazione lungo il profilo MASW1 sono riportati nella Tabella 7.

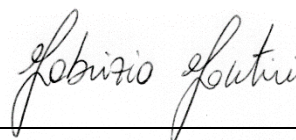
I valori geotecnici così calcolati sono da ritenersi indicativi dell'intorno analizzato. Inoltre, trattandosi di valori dinamici in contesti con eterogeneità verticali e laterali, come quello oggetto della presente relazione, possono discostarsi dai valori ottenuti con le prove dirette o di laboratorio.

| Strato | Profondità [m] |        | Vp<br>[m/s] | Vs<br>[m/s] | Y<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | v     | G<br>[MPa] | E<br>[MPa] |
|--------|----------------|--------|-------------|-------------|---------------------------|-------|------------|------------|
|        | da             | a      |             |             |                           |       |            |            |
| 1.00   | 0.00           | -0.91  | 500.00      | 380.86      | 1.66                      | -0.19 | 240.94     | 389.80     |
| 2.00   | -0.91          | -2.05  | 600.00      | 316.34      | 1.72                      | 0.31  | 172.07     | 449.98     |
| 3.00   | -2.05          | -3.47  | 750.00      | 458.52      | 1.79                      | 0.20  | 377.18     | 906.42     |
| 4.00   | -3.47          | -5.25  | 850.00      | 536.59      | 1.84                      | 0.17  | 528.98     | 1236.47    |
| 5.00   | -5.25          | -7.48  | 900.00      | 463.10      | 1.86                      | 0.32  | 398.31     | 1051.49    |
| 6.00   | -7.48          | -10.26 | 1250.00     | 612.01      | 1.98                      | 0.34  | 740.45     | 1987.88    |
| 7.00   | -10.26         | -13.74 | 1300.00     | 760.57      | 1.99                      | 0.24  | 1152.13    | 2856.79    |
| 8.00   | -13.74         | -18.08 | 1700.00     | 769.02      | 2.10                      | 0.37  | 1239.45    | 3399.45    |
| 9.00   | -18.08         | -23.51 | 2200.00     | 589.78      | 2.20                      | 0.46  | 765.62     | 2237.58    |
| 10.00  | -23.51         | -30.00 | 3500.00     | 632.43      | 2.40                      | 0.48  | 961.53     | 2852.13    |

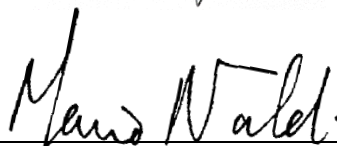
Tabella 7 - Velocità delle onde P, S, densità e parametri dinamici. In rosso, i valori relativi al substrato lapideo. Si noti come gli scisti (da 14 a 18 m) abbiano caratteristiche geotecniche migliori dei sottostanti calcari

## Techgea S.r.l.

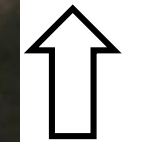
Redatto da: Ing. Fabrizio Fantini



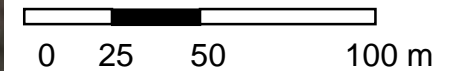
Controllato da: Dott. Geol. Mario Naldi



## TAVOLE



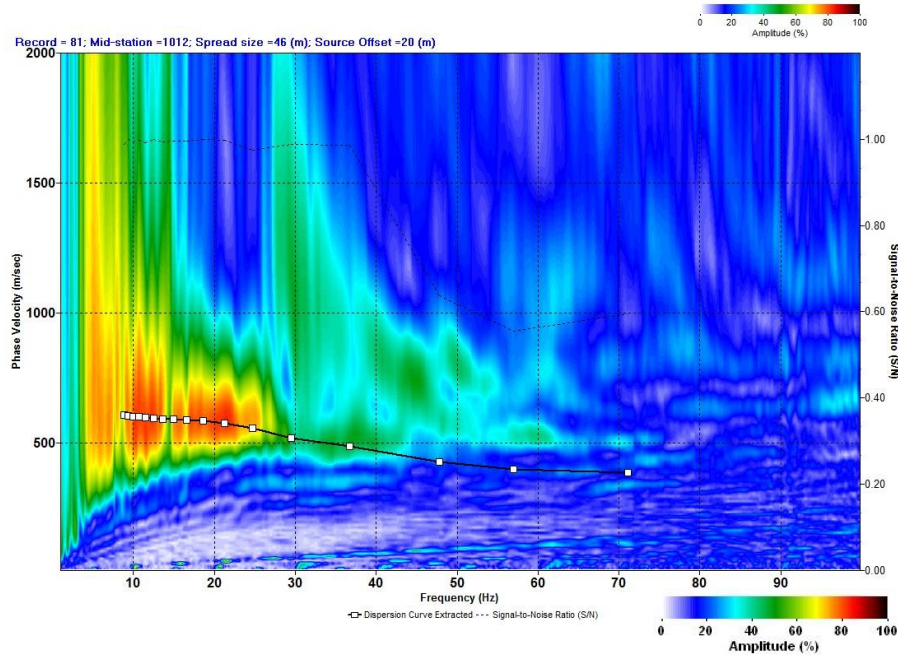
NORD



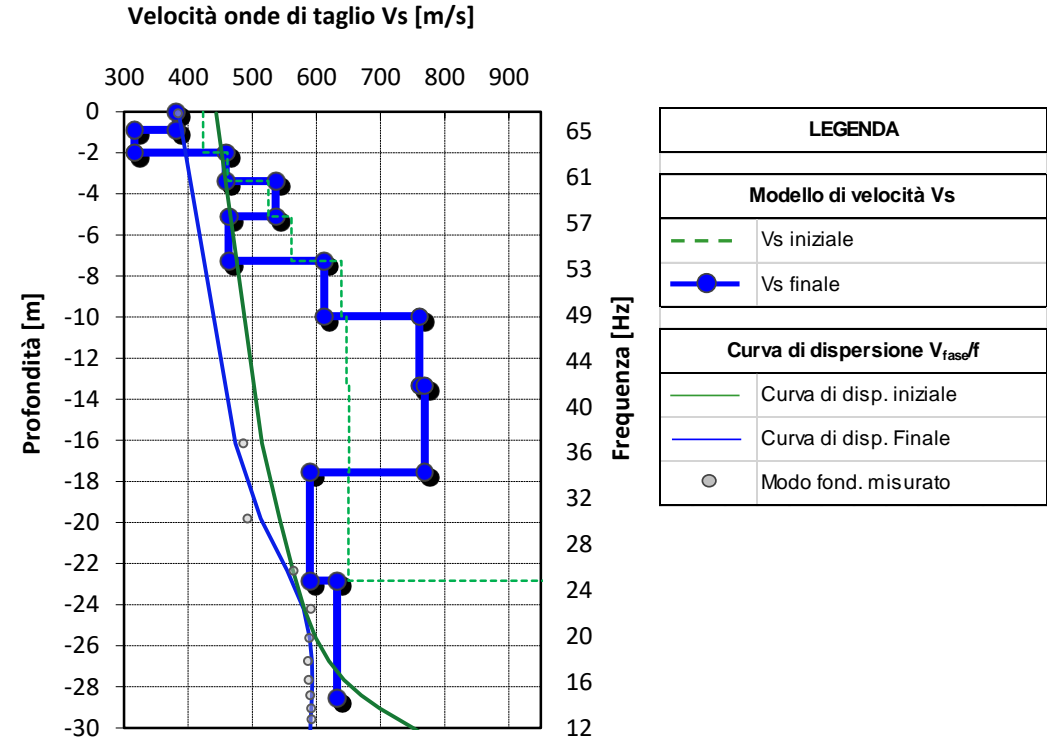
Legenda

- Sezione geoelettrica (ERT)
- Sezione sismica a rifrazione (SIS)
- Stendimento MASW
- Centro MASW - Profilo Vs
- Sondaggio geognostico

### SPETTRO IN FREQUENZA E CURVA DI DISPERSIONE ESTRATTA



### PROFILO DI VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO



### MODELLO Vs A 10 STRATI

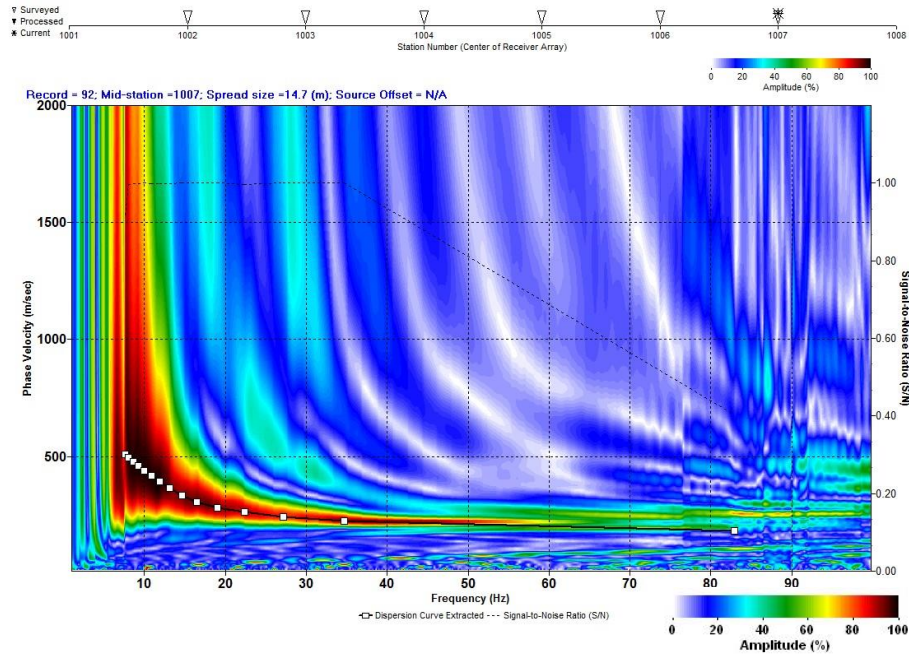
| Strato | Profondità [m] |       | Vs [m/s] |
|--------|----------------|-------|----------|
|        | da             | a     |          |
| 1      | 0.0            | -0.9  | 381      |
| 2      | -0.9           | -2.0  | 316      |
| 3      | -2.0           | -3.4  | 459      |
| 4      | -3.4           | -5.1  | 537      |
| 5      | -5.1           | -7.3  | 463      |
| 6      | -7.3           | -10.0 | 612      |
| 7      | -10.0          | -13.3 | 761      |
| 8      | -13.3          | -17.6 | 769      |
| 9      | -17.6          | -22.8 | 590      |
| 10     | -22.8          | -30.0 | 632      |

Codice di calcolo: SurfSeis 5.3.1.9

| Vs30 [m/s] | CLASSE DI SUOLO | DESCRIZIONE GEOTECNICA   |
|------------|-----------------|--|
| <b>584</b> | <b>B</b>        | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina). |



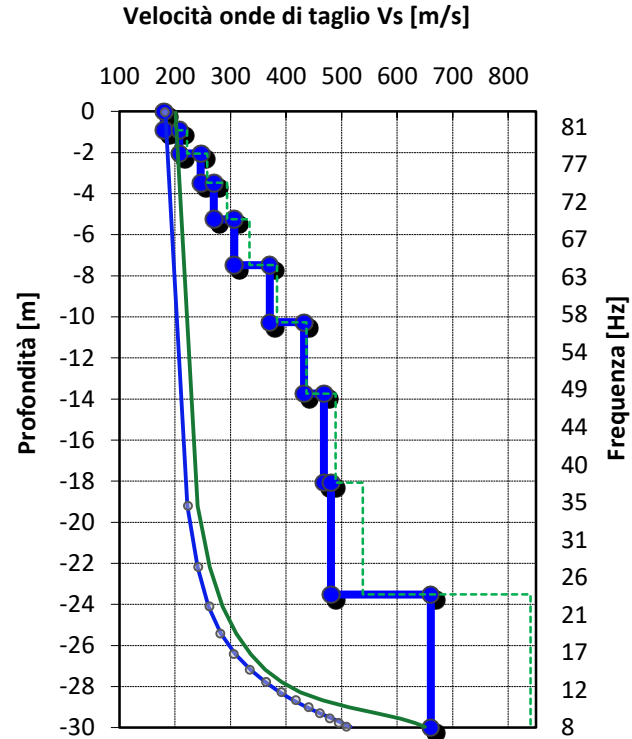
## SPETTRO IN FREQUENZA E CURVA DI DISPERSIONE ESTRATTA



| MODELLO Vs A 10 STRATI |                |       |          |
|------------------------|----------------|-------|----------|
| Strato                 | Profondità [m] |       | Vs [m/s] |
|                        | da             | a     |          |
| 1                      | 0.0            | -0.9  | 180      |
| 2                      | -0.9           | -2.1  | 208      |
| 3                      | -2.1           | -3.5  | 247      |
| 4                      | -3.5           | -5.3  | 270      |
| 5                      | -5.3           | -7.5  | 307      |
| 6                      | -7.5           | -10.3 | 371      |
| 7                      | -10.3          | -13.7 | 432      |
| 8                      | -13.7          | -18.1 | 468      |
| 9                      | -18.1          | -23.5 | 481      |
| 10                     | -23.5          | -30.0 | 660      |

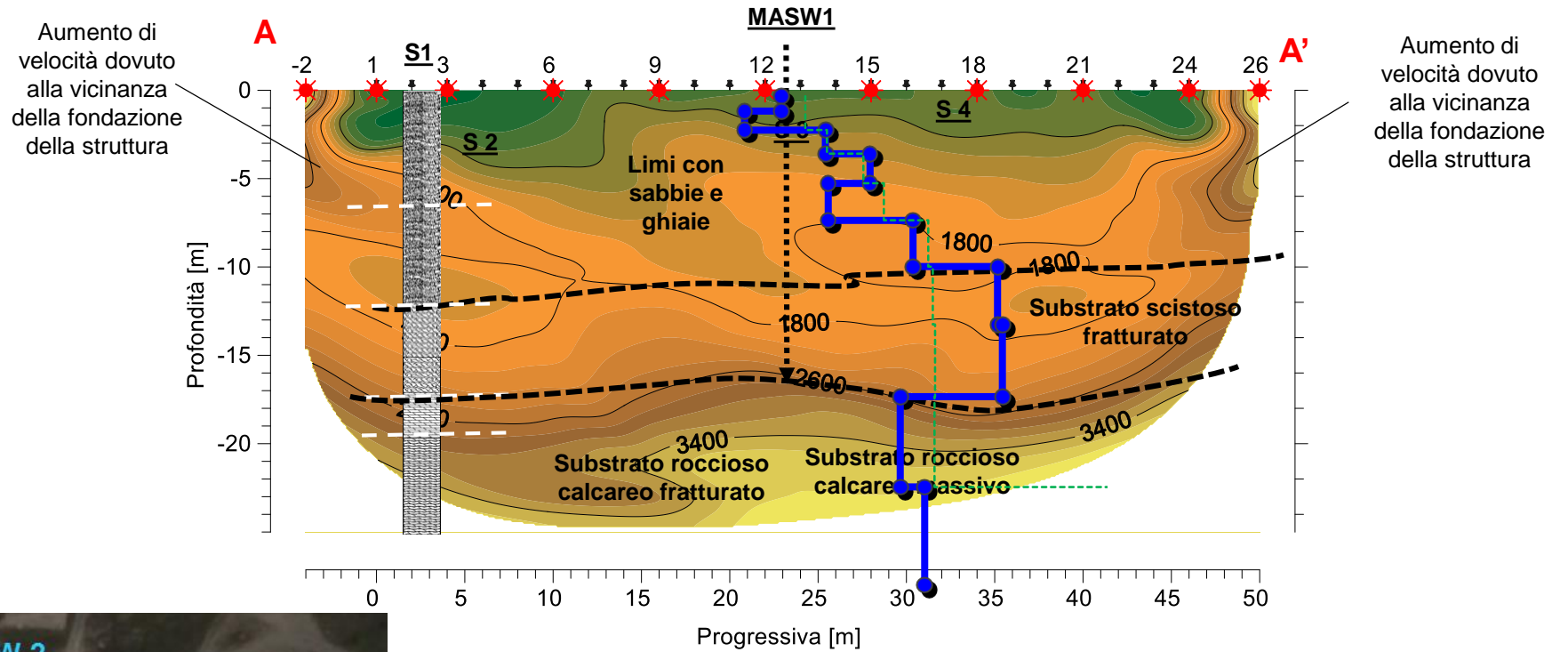
Codice di calcolo: SurfSeis 5.3.1.9

## PROFILO DI VELOCITA' DELLE ONDE DI TAGLIO

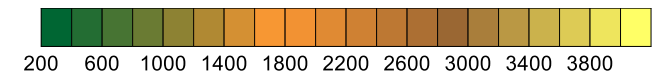


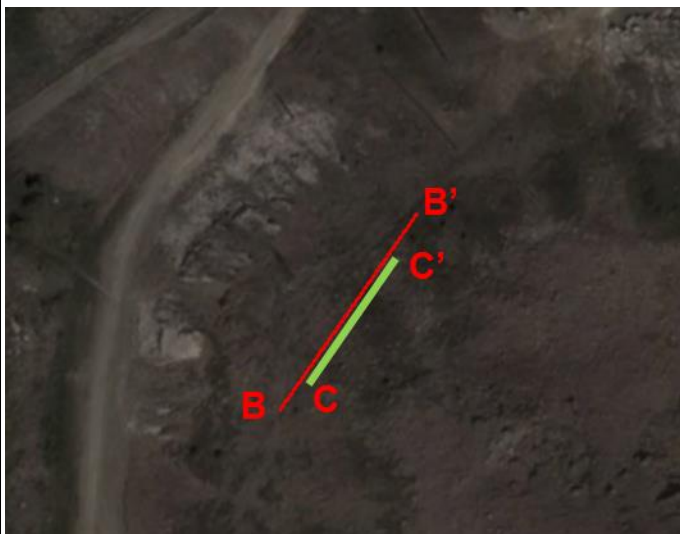
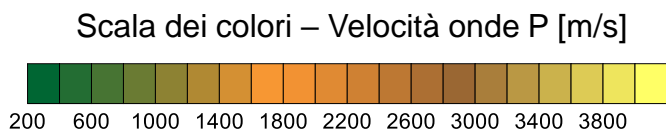
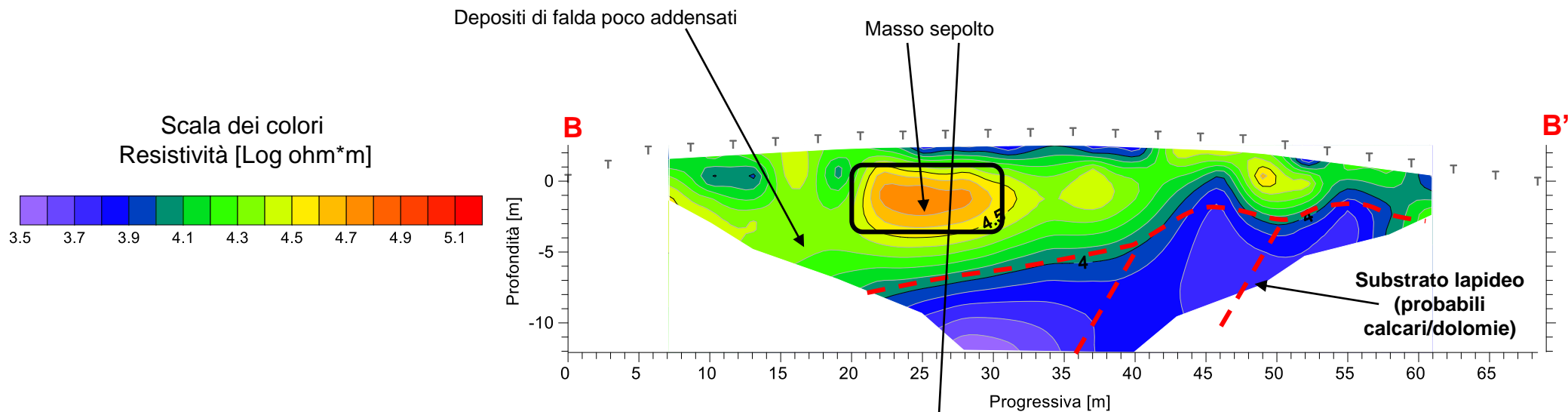
| LEGENDA                           |                         |
|-----------------------------------|-------------------------|
| Modello di velocità Vs            |                         |
| ---                               | Vs iniziale             |
| —●—                               | Vs finale               |
| Curva di dispersione $V_{fase}/f$ |                         |
| ---                               | Curva di disp. iniziale |
| —●—                               | Curva di disp. Finale   |
| ○                                 | Modo fond. misurato     |

| Vs30 [m/s] | CLASSE DI SUOLO | DESCRIZIONE GEOTECNICA   |
|------------|-----------------|--|
| <b>394</b> | <b>B</b>        | Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina). |



Scala dei colori – Velocità onde P [m/s]







## **APPENDICE A**

### Cenni sulla metodologia geoelettrica multi-elettrodo

## Cenni teorici sulle indagini geoelettriche multi-elettrodo

Il metodo di indagine geoelettrica multi-elettrodo consiste nel ricostruire la distribuzione della resistività elettrica reale del sottosuolo mediante immissione di corrente elettrica e misura della differenza di potenziale in una serie di elettrodi posizionati sul terreno o in foro. La resistività elettrica è strettamente correlata alle caratteristiche chimiche e fisiche del mezzo attraversato e, per tale motivo, il metodo geoelettrico fornisce una sezione del sottosuolo molto realistica e affidabile, consentendo la costruzione di un modello elettrico bidimensionale o tridimensionale del sottosuolo.

Il metodo può essere utilizzato per numerose applicazioni, tra cui:

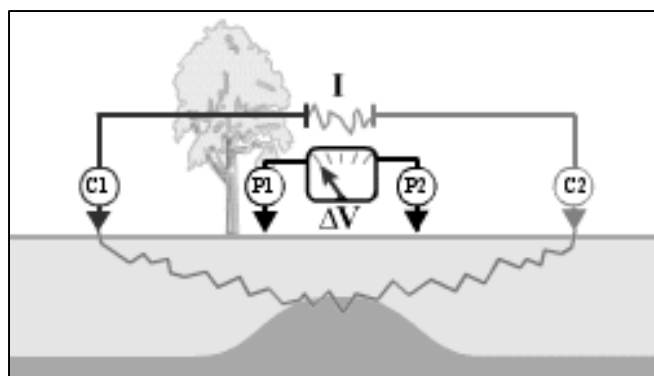
- individuazione e caratterizzazione di discariche e perdite di percolato;
- valutazione e redazione di modelli geologici;
- localizzazione di cavità;
- caratterizzazioni e ricerche archeologiche;
- ricerca di acqua sotterranea.

Il principio fisico su cui si basano le misure di resistività elettrica è la legge di Ohm, che governa il flusso di corrente in un mezzo:

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

dove  $\Delta V$  è la differenza di potenziale [V],  $I$  la corrente [A] e  $R$  la resistenza elettrica [Ohm].

Nella pratica ciò che viene misurato è la differenza di potenziale tra due punti della superficie (P1 e P2) in seguito all'immissione di corrente nei due punti C1 e C2 (schema in Figura 1).



Gli strumenti di misura utilizzati in ambito geofisico per la misura della resistenza elettrica sono detti georesistivimetri. Poiché le misure di campo sono condotte su mezzi non ideali (e quindi eterogenei) e la resistenza varia in uno spazio tridimensionale, dalla corrente immessa  $I$  e dalla differenza di potenziale  $\Delta V$  si calcola il valore di **resistività apparente** [Ohm·m] moltiplicando la resistenza misurata per un fattore geometrico  $k$  [m] che dipende dalla disposizione elettrodica adottata:

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I}$$

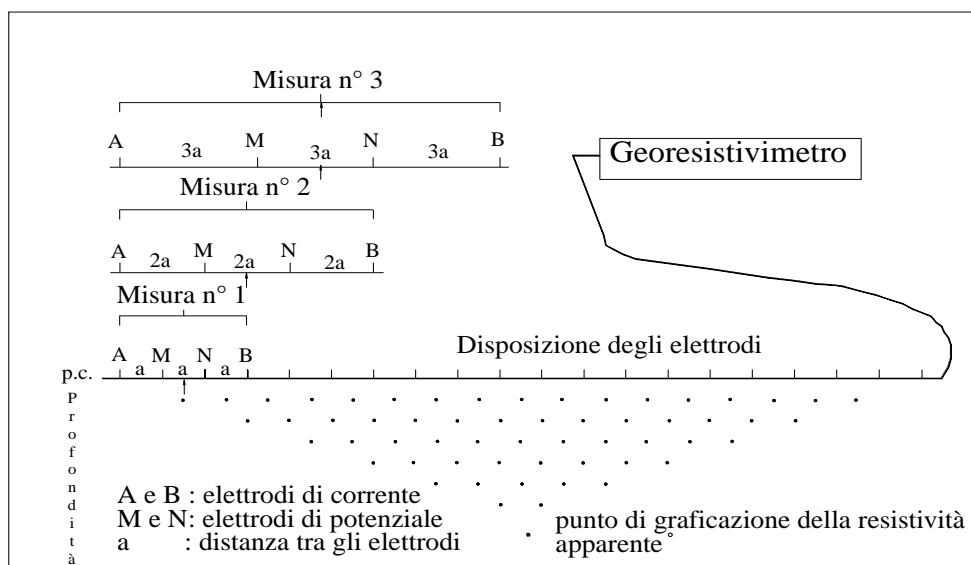
Tale resistività apparente è un valore che corrisponde alla resistività che un semispazio omogeneo fornirebbe nella stessa configurazione elettrodica.

L'esecuzione di misure di resistività elettrica ottenute traslando lateralmente il quadripolo consente di ottenere informazioni relative a variazioni laterali di resistività. Se, invece, si aumenta la spaziatura tra gli elettrodi di corrente e di tensione, aumenta la profondità di indagine e si ottengono informazioni maggiori sulle variazioni verticali. La strumentazione tipica delle tecniche di tomografia elettrica permette di effettuare le due operazioni in modo automatico, e di associare ad ogni linea di misura, una distribuzione bidimensionale di resistività apparente, detta *pseudosezione*.

La misura viene eseguita disponendo lungo una linea una serie di elettrodi ad interasse regolare collegati al georesistivometro mediante cavi multipolari: il numero e la spaziatura tra gli elettrodi vengono stabiliti in relazione al grado di dettaglio ed alla profondità d'indagine richieste.

Le configurazioni elettrodiche (array) più utilizzate (che differiscono per potere risolutivo, profondità di investigazione, copertura orizzontale e stabilità del segnale) sono:

- **Wenner:** presenta un'alta risoluzione verticale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni orizzontali, una buona profondità di investigazione, scarsa copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale, essendo questa inversamente proporzionale a  $k$  (schema esemplificativo in Figura 2).
- **Schlumberger:** presenta un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture o stratificazioni verticali, una buona profondità di investigazione (pari al Wenner, scarsa copertura orizzontale e una buona stabilità del segnale;
- **Dipolo-Dipolo:** presenta un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali (variazioni laterali di resistività, cavità ecc.), profondità di investigazione e ampiezza del segnale misurato minori rispetto al Wenner, ma con una maggiore copertura orizzontale;
- **Polo-Dipolo:** presenta un'alta risoluzione orizzontale e quindi una capacità elevata nel discriminare strutture verticali, profondità di investigazione circa doppia rispetto alla configurazione Wenner ma ampiezza del segnale misurato minore, buona copertura orizzontale;
- **Wenner-Schlumberger:** rappresenta una soluzione ibrida ed è quello più utilizzato in geofisica ambientale poiché costituisce il giusto compromesso tra le differenti caratteristiche sopra descritte.



Per ottenere, a partire dai valori di resistività apparente, la distribuzione delle resistività reali nel sottosuolo, è necessario risolvere un “problema inverso”. In molte applicazioni geofisiche, la soluzione del problema inverso consente di determinare i valori di quantità non misurabili direttamente, parametri incogniti, a partire da quantità misurabili, i dati sperimentali, attraverso l’assunzione di un modello, cioè di una legge fisica che li correla. Tale modello è una rappresentazione matematica ed ideale di una porzione di sottosuolo; il modello è caratterizzato dai “parametri del modello” che sono le quantità fisiche che si vuole stimare dai dati misurati.

Nel caso della tomografia elettrica, si vuole stimare la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo a partire da misure effettuate in superficie.

I software utilizzati per l’inversione (RES2DINV, ERTLab, ecc) implementano un modello a celle (o blocchi), i cui parametri sono i valori di resistività delle singole celle in cui il sottosuolo è stato suddiviso; la soluzione agli elementi finiti o alle differenze finite fornisce i valori di resistività elettrica reale.

Dal modello geofisico, con opportune tarature e/o in base alle conoscenze geologiche del sottosuolo, si elabora un modello geo-litologico. Utilizzando l’array elettrodo Wenner-Schlumberger la profondità di indagine raggiunta è mediamente pari a 1/6 della lunghezza dello stendimento: pertanto uno stendimento costituito da 48 elettrodi con interasse 3 m con si ottiene una sezione lunga 141 m ed una profondità di indagine pari a circa 23 m.

Nella tabella della pagina seguente si riportano i valori di resistività elettrica di alcuni terreni e materiali che vengono utilizzati come valori indicativi di taratura nell’interpretazione delle tomografie.



| <b>Materiale</b>                      | <b>Resistività [Ohm·m]</b>              |
|---------------------------------------|---|
| Acqua dolce                           | 10-10 <sup>2</sup>                      |
| Acqua salata                          | 0.2                                     |
| Arenarie                              | 2·10 <sup>2</sup> -5·10 <sup>3</sup>    |
| Argille                               | 1-50                                    |
| Benzina                               | 107                                     |
| Calcari                               | 3·10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>      |
| Cloruro di Potassio                   | 0.708                                   |
| Cloruro di sodio                      | 0.843                                   |
| Depositi alluvionali                  | 50·10 <sup>3</sup>                      |
| Dolomie                               | 5·10 <sup>2</sup> -10 <sup>5</sup>      |
| Ferro                                 | 9.074·10 <sup>-8</sup>                  |
| Ghiaia e sabbia secca                 | 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>        |
| Ghiaia e sabbia sature d'acqua dolce  | 50-5·10 <sup>2</sup>                    |
| Ghiaia e sabbia sature d'acqua salata | 2-5                                     |
| Gneiss e graniti sani                 | 10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>        |
| Gneiss e graniti alterati             | 10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>        |
| Marne                                 | 50-5·10 <sup>2</sup>                    |
| Piroclastici                          | 50-6·10 <sup>2</sup>                    |
| Rocce ignee                           | 10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>        |
| Suolo di copertura                    | 10-2·10 <sup>2</sup>                    |
| Tufi                                  | 1.5·10 <sup>2</sup> - 9·10 <sup>2</sup> |

*Tabella 1: Valori caratteristici di resistività elettrica [Ulriksen (1982), Telford (1990), Reynolds (1997)]*

Oltre alla resistività elettrica, i comuni georesistivimetri consentono anche la misura contemporanea del valore di polarizzazione indotta: si tratta di un fenomeno elettrico che si manifesta all'interno di mezzi materiali sia nel dominio del tempo, con tensioni di rilassamento all'interruzione di un flusso di corrente elettrica energizzante a gradino (in questo caso viene misurata come caricabilità), sia nel dominio della frequenza, con una precisa legge di dispersione della resistività elettrica al variare della frequenza di un flusso di corrente alternata energizzante.

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente utilizzo di tale parametro geofisico in campi differenti, quali la ricerca mineraria, l'idrogeologia, lo studio della distribuzione di sostanze contaminanti nel sottosuolo, l'esplorazione geotermica e la ricerca di idrocarburi. In questi casi, gli effetti di polarizzazione possono essere dovuti ad una varietà di motivi, fra i quali i più importanti sono: fenomeni di interfaccia, polarizzazione di membrana, variazioni di porosità, fenomeni di trasformazione indotti dall'interazione di fluidi chimicamente attivi con le rocce ospitanti e/o l'acqua di falda.

L'inversione tomografica dei dati ottenuti in campagna restituisce un modello tomografico di caricabilità del terreno grazie al quale è possibile individuare eventuali zone di accumulo di percolato o di cospicue concentrazioni di minerali, idrocarburi, ecc.

**I limiti di applicabilità del metodo geoelettrico** sono legati a:

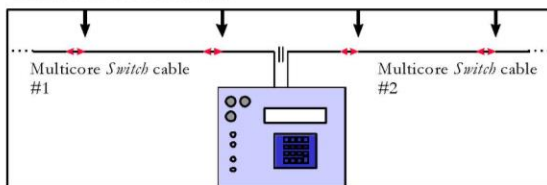
- condizioni di sito specifiche (ad esempio, presenza di pavimentazioni in cemento armato che non consentono una corretta distribuzione delle linee di corrente);
- presenza di sottoservizi interrati con andamento parallelo o sub-parallelo allo stendimento (in particolare cavi elettrici in tensione e tubazioni metalliche in genere);
- scarso contrasto di resistività elettrica tra il target dell'indagine ed il terreno naturale all'interno del quale esso si trova.

## Specifiche tecniche della strumentazione geoelettrica

### SYSCAL Pro

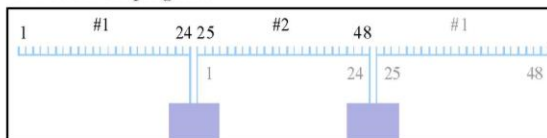
#### FIELD LAY-OUT OF A SYSCAL PRO SWITCH UNIT

The unit is located at the centre of the configuration. Standard take-out spacing of the multicore *Switch* cables are 5 and 10 meters. The cables are supplied on reels in several sections in regards to the number of take-outs and the spacing, so as to keep a suitable weight for each reel. Sequences of measurement using standard electrode arrays (Dipole-Dipole,...) can be directly programmed from the SYSCAL Pro for a full in-the-field autonomy. Non standard configuration can also be uploaded to the unit by the ELECTRE II PC software.



SYSCAL Pro *Switch*-48 with two electrode strings

The roll-along capability can also be easily implemented thanks to the cable design (double ended) and to the internal or ELECTRE II programs.



Roll along of the SYSCAL Pro *Switch*-48

For 3D surveys, *Switch* Pro boxes can be added to the basic SYSCAL Pro unit (standard or *Switch* version). A *Switch* Pro box contains switching boards to drive 48, 72 or 96 electrodes, a 12V rechargeable battery and a LCD screen. The user has the opportunity to perform the numbering of the electrodes connected to the box for a full flexibility.

#### DATA MANAGING

Thanks to the data managing PROSYS software, one has the opportunity to visualize graphically the apparent resistivity section and process the data (filter, insert topography, add data files...).

Then, one can export the data to ?txt? file or to interpretation software:

WINSEV for 1D sounding interpretation.

RES2DINV – SENSINV2D - GEOSOFT or INTERPEX software for pseudo-section inversion to true resistivity (and IP) 2D section.

RES3DINV software, for inversion to true resistivity (and IP) 3D data.

#### TECHNICAL FEATURES

##### OUTPUT SPECIFICATIONS

- Automatic injection ranging (microprocessor controlled)
- Current: up to 2.5 A
- Voltage: up to 1000 V (1500 V with an external DC/DC converter)
- Power: up to 250 W (500 W with an external DC/DC converter)
- Possibility to use an external AC/DC 1200 W converter
- Pulse duration: 0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 4 or 8 s
- Current measurement precision: 0.2 % typical
- *Switch* version output voltage: up to 800 V

##### INPUT SPECIFICATIONS

- Measuring process: automatic ranging and calibration
- Input impedance: 100 M $\Omega$
- Input voltage:
  - Max. channel 1: 15 V
  - Max. channel 2 to channel 10: 15 V
  - Protection up to 1000V
- 50 to 60 Hz power line rejection
- Voltage measurement:
  - Precision: 0.2 % typical
  - Resolution: 1  $\mu$ V
- Noise reduction: automatic stacking number in relation with a given standard deviation value
- SP compensation through automatic linear drift correction
- Induced Polarization (chargeability) measured over up to 20 automatic or user defined slices

##### GENERAL SPECIFICATIONS.

- Up to 4000 electrodes can be used
- Data flash memory: more than 21 000 readings
- Serial link RS-232 data download
- Power supply: two internal rechargeable 12V, 7.2 Ah batteries ; optional external 12V standard car battery can be connected to the transmitter part
- Weather proof
- Shock resistant fiber-glass case
- Operating temperature: -20 to +70 °C
- Dimensions (SYSCAL Pro *Switch*-48): 31 x 23 x 36 cm
- Weight (SYSCAL Pro *Switch*-48): 13 kg
- Weight of a 24 take-outs (spaced 5 m) string on a reel: 23 kg



IRIS INSTRUMENTS - 1, avenue Buffon, B.P. 6007 - 45060 Orléans Cedex 2, France  
 Phone: +33 (0)2 38 63 81 00 - Fax: +33 (0)2 38 63 81 82  
 E-mail: sales@iris-instruments.com - Web site: www.iris-instruments.com

## **APPENDICE B**

### Cenni sulla metodologia sismica a rifrazione

## Teoria della metodologia sismica a rifrazione

Il rilievo sismico a rifrazione di onde P è un metodo di indagine basato sulla misura dei tempi di percorso che le onde elastiche, generate nel terreno in un punto-sorgente, impiegano per raggiungere dei ricevitori (geofoni) disposti sulla superficie del terreno ed allineati con il punto di energizzazione. La distanza tra i geofoni e quella del punto di energizzazione sono scelte in base allo spessore ed ai tipi di materiale che si vogliono indagare.

Le onde elastiche che si propagano in profondità e vengono in parte deviate (rifratte) lungo l'interfaccia che separa due mezzi a differente impedenza acustica ( $V_1$ ,  $V_2$ ) ed in parte proseguono verso il basso finché l'energia viene completamente assorbita dal mezzo in cui si propaga.

L'effetto di queste onde è la formazione di vibrazioni che vengono captate da sensori posti sulla superficie, generalmente elettromagnetici, in grado di trasformare la sollecitazione meccanica, che subisce la massa mobile del magnete, in un segnale elettrico che, debitamente amplificato, viene riprodotto su monitor e memorizzato su supporto informatico.

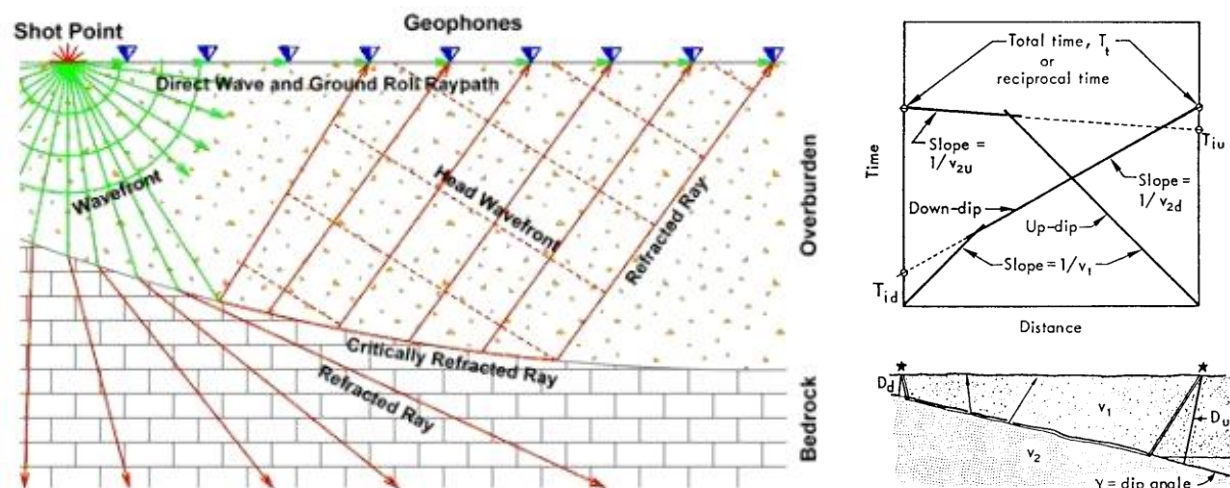


Figura 1 - Modello di propagazione dei fronti d'onda nei raggi rifratti

Con i tempi di percorso rilevati mediante i geofoni e le distanze degli stessi dai punti di energizzazione si tracciano dei diagrammi tempi-distanze (dromocrone) che permettono di calcolare sia la velocità di propagazione delle onde di compressione P, sia la profondità e lo spessore dei terreni che sono stati attraversati dalle onde sismiche.

L'interpretazione delle dromocrone consente di ricavare delle sezioni sismiche che schematizzano la distribuzione della velocità in funzione della profondità.

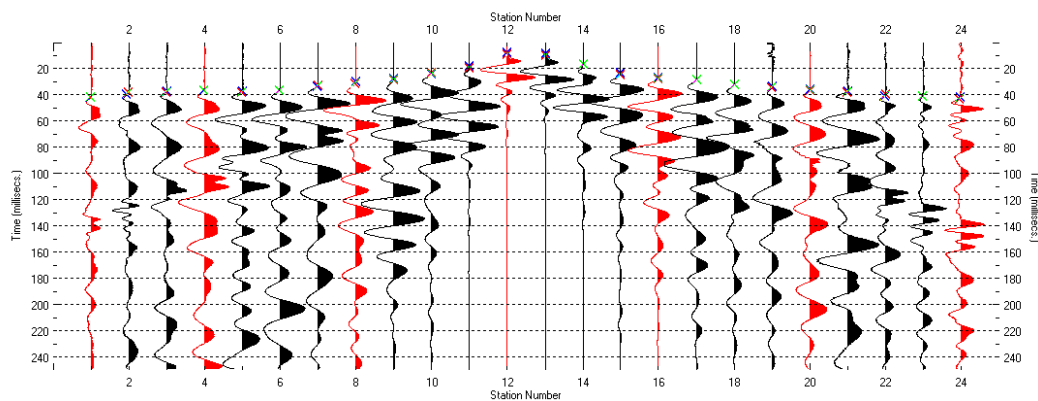


Figura 2 - Sismogramma

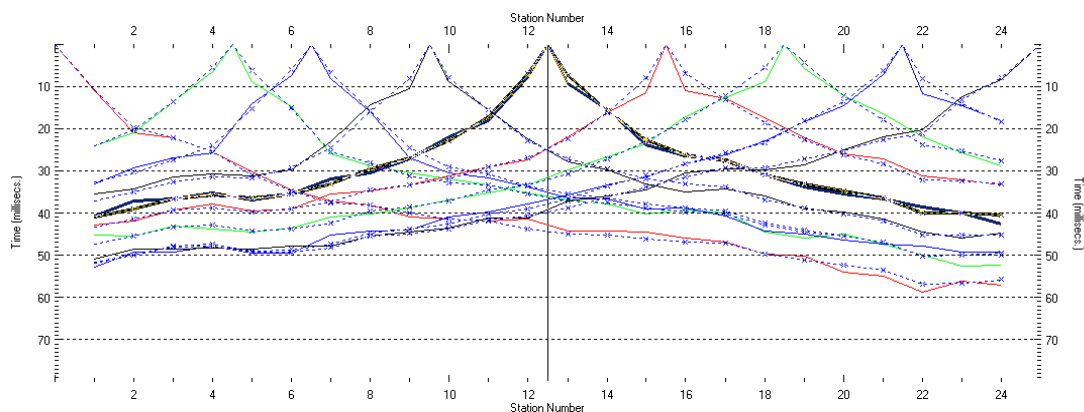


Figura 3 - Dromocrone

Dall'analisi delle dromocrone è possibile definire il numero dei sismostrati presenti nel sottosuolo (ovviamente per la finestra temporale adottata che è funzione della lunghezza dello stendimento e della quantità di energia utilizzata). E' importante sottolineare che la sismica a rifrazione funziona solo per velocità crescenti. L'interpretazione per la risoluzione geometrica dei sismostrati (profondità e velocità) si avvale di diverse metodologie di calcolo dalle più semplici procedure dirette (Hagedoorn, 1959; Barry, 1967), seguendo le leggi generali dell'ottica, a quelle più complesse sia 1D che 2D che elaborano i dati mediante la tecnica del GRM (Palmer, 1980), del Ray-tracing o della tomografia (Hampson & Russell, 1984; Olsen, 1989). La finalità della tomografia è la dettagliata esplorazione del modello di distribuzione della velocità in un mezzo. Essa si basa sui primi arrivi ottenuti per set plurimi di coppie sorgente-ricevitore: la sola limitazione è quella che i raggi sismici formino una rete completa e cioè, idealmente, ciascun punto del mezzo investigato dovrebbe essere attraversato dai raggi in tutte le direzioni.

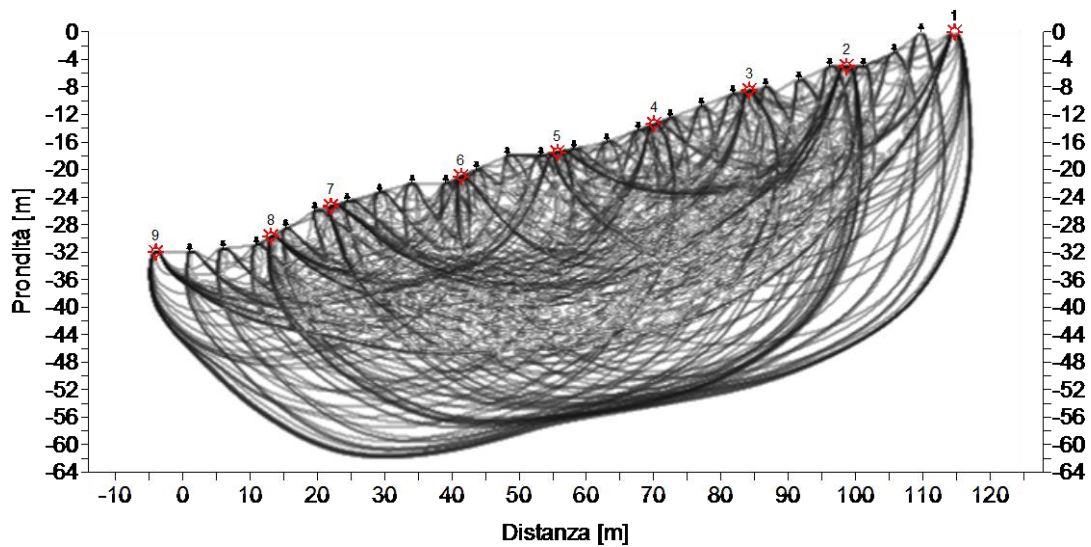


Figura 4 - Copertura raggi sismici

L'analisi dei raggi sismici con un programma di inversione tomografica discretizza il modello fisico e restituisce un modello di distribuzione delle velocità delle onde di compressione P (isotache espresse in m/s) coerente con il modello geologico del sottosuolo.

Per l'elaborazione dei dati sismici a rifrazione si utilizza il software RAYFRACT™ (32 – bit version), della Intelligent Resources Inc. (Canada). I dati dei primi arrivi (onde di compressione) sono elaborati con il metodo GRM (general reciprocal method) accoppiato ad una inversione tomografica su una griglia di nodi equispaziati per una modellazione della distribuzione delle velocità delle onde di compressione nel sottosuolo. Tale metodo (inversione tomografica) consente (con un sufficiente numero di scoppi) di individuare anche eventuali inversioni di velocità (che costituiscono il limite della prospezione sismica a rifrazione).

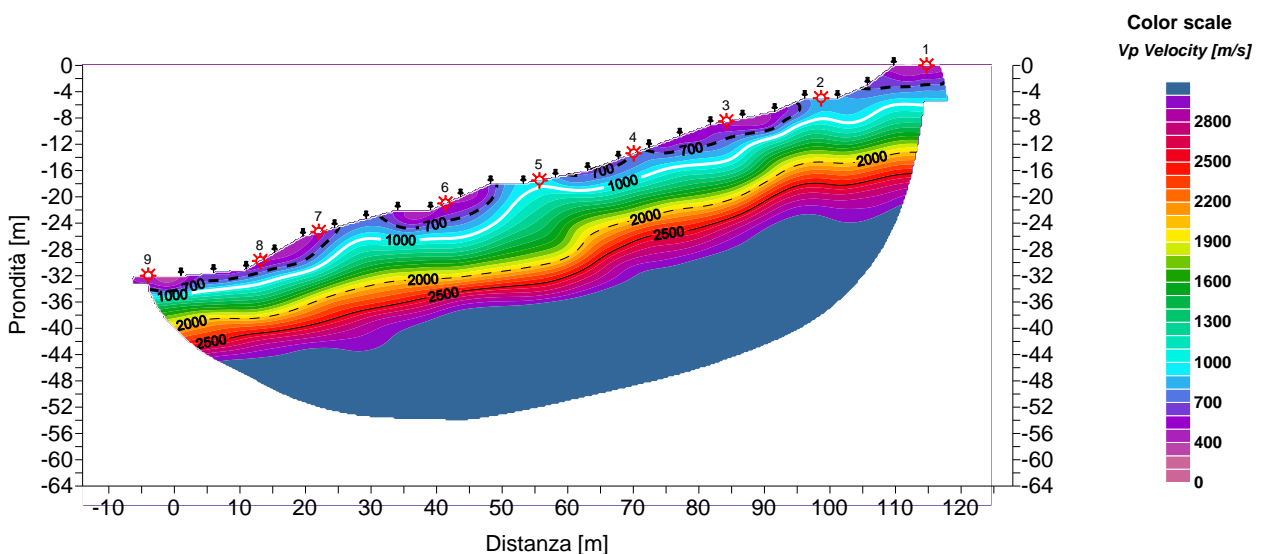


Figura 5 - Modello tomografico della distribuzione delle onde di compressione  $V_p$  in m/s

Il metodo può essere utilizzato per numerose applicazioni, tra cui:

- definire la profondità e la geometria del substrato lapideo;
- caratterizzare le zone di frana,
- definire la classificazione sismica dei suoli (Vs30, microzonazione sismica),
- valutare le caratteristiche di deformabilità dei terreni e di rilevati (grado di addensamento);
- valutare il grado di ammaloramento di strutture in calcestruzzo;
- valutare l'escavabilità di rocce e terreni.



## Specifiche tecniche della strumentazione georadar

**DAQlink-III SPECIFICATIONS**
**GENERAL**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Number of channels per unit | 1 to 24 (factory set)                             |
| A/D resolution              | 24-bit  |
| Record length               | Up to 4 billion samples                           |
| Continuous recording        | Available   |
| GPS synchronization         | Int. Clock set to GPS time, Time & position saved |
| Internal storage            | Compact Flash media (FAT16/FAT32)                 |
| Built-in Ethernet speed     | 100 Mbit (8 Mbyte download)                       |

**ENVIRONMENTAL**

|                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Enclosure                           | Weatherproof               |
| Size                                | 330x230x60 mm              |
| Weight                              | 3.4 kg (7.5 lbs)           |
| Power consumption (24-channel unit) | Less than 0.4 Watt/channel |

**SIGNAL CONDITIONING**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Analog filter flat response | Up to 8000 Hz   |
| Digital filter bandwidth    | 85% of Nyquist frequency  |
| Low cut filter              | User selectable   |
| Notch filter                | 50/60 Hz standard, selectable   |
| High cut filter             | User selectable   |
| Gain                        | x2(6 dB), x32(30 dB) standard<br>x1(0 dB), x16(24 dB) optional          |
| Max input signal            | 3.58 V peak to peak (x2 gain) standard<br>7.16 V peak to peak (x1 gain) |

**ACQUISITION**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Dynamic range               | >118 dB (at 2 msec sampling)                                |
| Bandwidth                   | DC to 15 kHz  |
| Weight                      | 3.4 kg (7.5 lbs)  |
| Sample rates (milliseconds) | 0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 |
| Pre-trigger window          | 10 second   |
| Trigger accuracy            | ±1 microsecond  |

**INSTRUMENT TEST**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Common Mode Rejection | Better than 100 dB                            |
| Crosstalk             | Better than 125 dB                            |
| Noise floor           | 0.2 micro Volt RMS noise (at 2 msec sampling) |
| Input impedance       | 100 kOhm                                      |

Note: Specifications subject to change without notice.



## **APPENDICE C**

### Cenni sulla metodologia MASW

## Teoria della metodologia MASW

Le prove MASW servono per determinare il profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , e quindi risalire a:

- il tipo di suolo sismico (A, B, C, D, E, S1, S2);
- le azioni sismiche con cui progettare e verificare le opere di Ingegneria Civile;
- il modulo di rigidezza del terreno;
- i cedimenti e gli spostamenti delle opere interagenti con il terreno: edifici, ponti, rilevati arginali, opere di sostegno, ecc.

La propagazione delle onde di Rayleigh in un mezzo verticalmente eterogeneo è un fenomeno multimodale: data una determinata stratigrafia, in corrispondenza di una certa frequenza, possono esistere diverse lunghezze d'onda. Di conseguenza, ad una determinata frequenza possono corrispondere diverse velocità di fase, ad ognuna delle quali corrisponde un modo di propagazione e differenti modi di vibrazione possono esibirsi simultaneamente.

La curva di dispersione ottenuta elaborando i dati derivanti dalle indagini sismiche col metodo SWM (surface waves multichannel) è una curva apparente derivante dalla sovrapposizione delle curve relative ai vari modi di vibrazione, e che per i limiti indotti dal campionamento non necessariamente coincide con singoli modi nei diversi intervalli di frequenza campionati.

Il processo di caratterizzazione basato sul metodo delle onde superficiali, schematizzato in Figura 1 e 2, può essere suddiviso in tre fasi:

- Acquisizione (Figura 1);
- Elaborazione (Figura 2);
- Inversione (Figura 3).

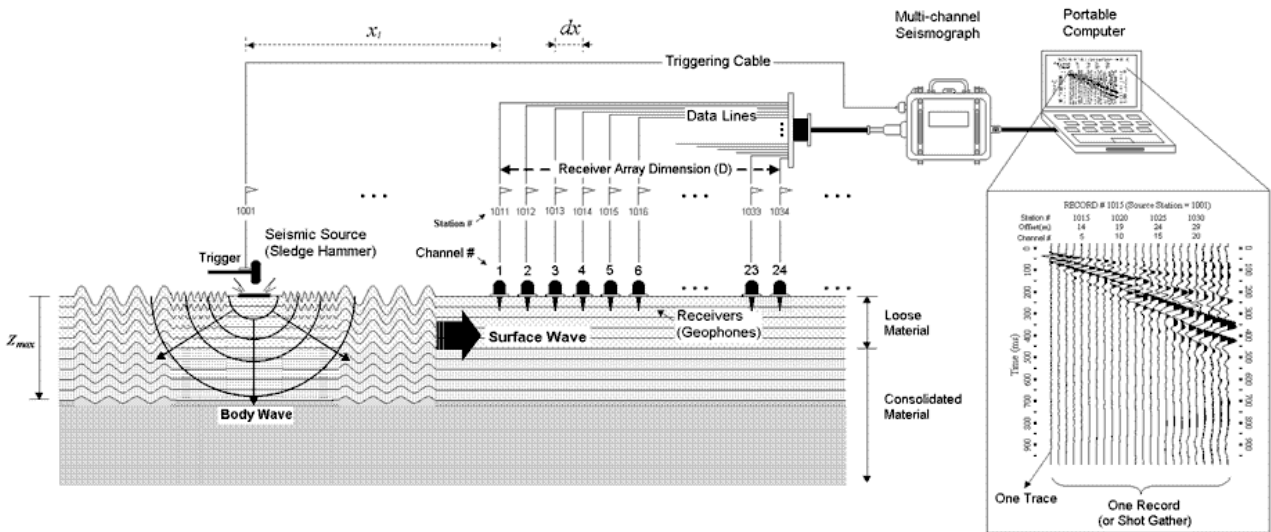


Figura 1 - Schema di acquisizione dati MASW

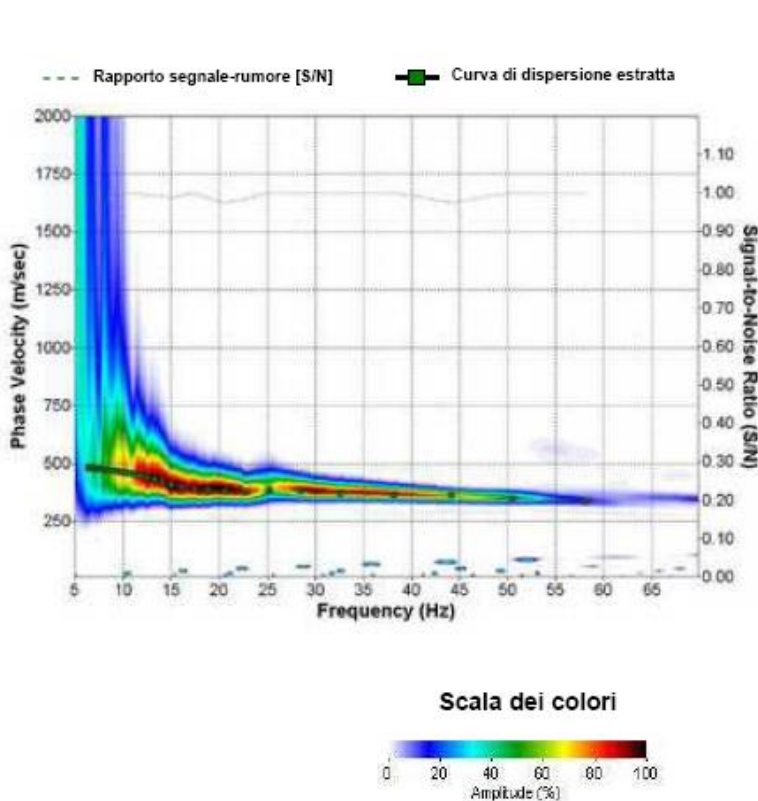


Figura 3 - Curva di dispersione della velocità Vs in funzione della frequenza e della velocità di fase

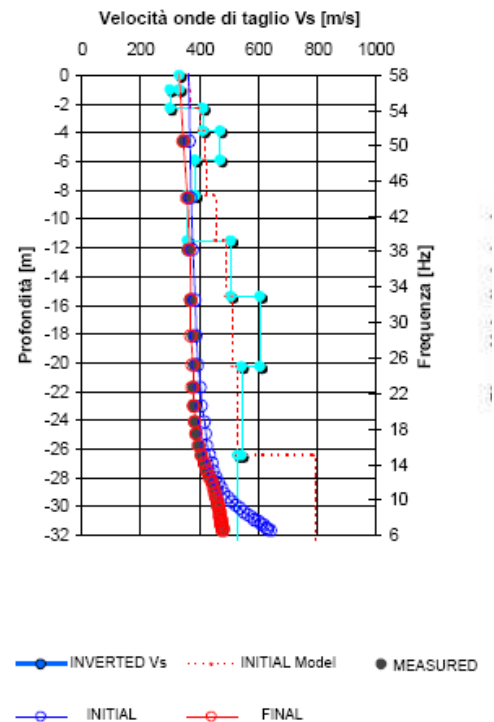


Figura 2 - Modello di propagazione delle velocità delle onde Vs

I dati acquisiti vengono sottoposti ad una fase di processing che consente di stimare la curva di dispersione caratteristica del sito in oggetto ovvero, la velocità di fase delle onde di Rayleigh in

funzione della frequenza (il codice di calcolo utilizzato è SurfSeis® versione 2.0, Kansas University USA).

Esistono diverse tecniche di processing per estrarre dai sismogrammi le caratteristiche dispersive del sito. La metodologia più diffusa è l'analisi spettrale in dominio f-k (frequenza-numero d'onda). I dati sismici registrati vengono sottoposti a una doppia trasformata di Fourier che consente di passare dal dominio x-t (spazio tempo) al dominio f-k.

Lo spettro f-k del segnale consente di ottenere una curva di dispersione per le onde di Rayleigh, nell'ipotesi che nell'intervallo di frequenze analizzato le onde che si propagano con il maggiore contenuto di energia siano proprio le onde di Rayleigh, e se le caratteristiche del sito sono tali da consentire la propagazione delle onde superficiali e un comportamento dispersivo delle stesse. Si dimostra infatti che la velocità delle onde di Rayleigh è associata ai massimi dello spettro f-k; si può ottenere facilmente una curva di dispersione individuando ad ogni frequenza il picco spettrale, al quale è associato un numero d'onda k e quindi una velocità delle onde di Rayleigh  $V_R$ , determinabile in base alla teoria delle onde dalla relazione:

$$V_R(f) = 2\pi f/k$$

Riportando le coppie di valori ( $V_R, f$ ) in un grafico, si ottiene la curva di dispersione utilizzabile nella successiva fase di inversione (Figura 2). La fase di inversione deve essere preceduta da una parametrizzazione del sottosuolo, che viene di norma schematizzato come un mezzo visco-elastico a strati piano-paralleli, omogenei ed isotropi, nel quale l'eterogeneità è rappresentata dalla differenziazione delle caratteristiche meccaniche degli strati.

Il processo di inversione è iterativo: a partire da un profilo di primo tentativo, costruito sulla base di metodi semplificati, ed eventualmente delle informazioni note a priori riguardo la stratigrafia, il problema diretto viene risolto diverse volte variando i parametri che definiscono il modello. Il processo termina quando viene individuato quel set di parametri di modello che minimizza la differenza fra il set di dati sperimentali (curva di dispersione misurata) e il set di dati calcolati (curva di dispersione sintetica). Usualmente, algoritmi di minimizzazione ai minimi quadrati vengono utilizzati per automatizzare la procedura (Figura 3).

## Specifiche tecniche della strumentazione sismica

**DAQlink-III SPECIFICATIONS**
**GENERAL**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Number of channels per unit | 1 to 24 (factory set)                             |
| A/D resolution              | 24-bit  |
| Record length               | Up to 4 billion samples                           |
| Continuous recording        | Available   |
| GPS synchronization         | Int. Clock set to GPS time, Time & position saved |
| Internal storage            | Compact Flash media (FAT16/FAT32)                 |
| Built-in Ethernet speed     | 100 Mbit (8 Mbyte download)                       |

**ENVIRONMENTAL**

|                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| Enclosure                           | Weatherproof               |
| Size                                | 330x230x60 mm              |
| Weight                              | 3.4 kg (7.5 lbs)           |
| Power consumption (24-channel unit) | Less than 0.4 Watt/channel |

**SIGNAL CONDITIONING**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Analog filter flat response | Up to 8000 Hz   |
| Digital filter bandwidth    | 85% of Nyquist frequency  |
| Low cut filter              | User selectable   |
| Notch filter                | 50/60 Hz standard, selectable   |
| High cut filter             | User selectable   |
| Gain                        | x2(6 dB), x32(30 dB) standard<br>x1(0 dB), x16(24 dB) optional          |
| Max input signal            | 3.58 V peak to peak (x2 gain) standard<br>7.16 V peak to peak (x1 gain) |

**ACQUISITION**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Dynamic range               | >118 dB (at 2 msec sampling)                                |
| Bandwidth                   | DC to 15 kHz  |
| Weight                      | 3.4 kg (7.5 lbs)  |
| Sample rates (milliseconds) | 0.0208, 0.0625, 0.125, 0.250, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 |
| Pre-trigger window          | 10 second   |
| Trigger accuracy            | ±1 microsecond  |

**INSTRUMENT TEST**

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Common Mode Rejection | Better than 100 dB                            |
| Crosstalk             | Better than 125 dB                            |
| Noise floor           | 0.2 micro Volt RMS noise (at 2 msec sampling) |
| Input impedance       | 100 kOhm                                      |

Note: Specifications subject to change without notice.

