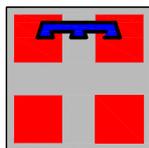




# Autostrada Asti-Cuneo



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

## COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)  
LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

PROGETTO ESECUTIVO  
STUDI E INDAGINI

INDAGINI E PROVE  
INDAGINI GEOFISICHE INTEGRATIVE - CAMPAGNA 2012  
RELAZIONE INDAGINE GEOFISICA

Aggiornato: 00	Data : Apr. 2013	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: Montana	Controllato: Ing. Ossesia	Approvato: Ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r B.3.8.01
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Lotto Prog. Tipo Elaborato
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data: Marzo 2015
Agglornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



PROGETTISTA e RESP. INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Enrico Ghislandi  
Albo di Milano  
N° A 16993

CONCESSIONARIA:





servizi per ingegneria · geologia · ambiente

**COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE**

**ASTI - CUNEO**

**Tronco II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)**

**LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL**

**Indagini geofisiche relative alle interferenze tra lo scavo della galleria e le cavità carsiche**

**(Commessa A.400.S.100.E6)**



<i>Commessa</i>	<i>Committente</i>	<i>Documento</i>
12044	SINA S.p.A.	12044_rel
<i>Redatto da</i>	<i>Revisione</i>	<i>Allegati</i>
C. Ravasio/V. Montana	01	sì
<i>Approvato da</i>	<i>Data</i>	<i>Firma</i>
Gianluca Ascari	30/07/2011	

*Questo documento è di proprietà della Akron srl*

*Il documento non può essere copiato o riprodotto neppure parzialmente senza autorizzazione scritta della Akron srl*



Akron srl  
C.F./P.I./Nr. Iscrizione Reg. Impr. 03145050963  
Società unipersonale - capitale sociale Euro 10.000 i.v.  
REA Milano soc. n. 1647540

Sede Legale e operativa  
Via Di Vittorio 26 – 20813 Bovisio Masciago – MB  
tel. 0362 55 99 02 – fax 0362 59 26 34  
e-mail [info@akronservizi.it](mailto:info@akronservizi.it) – [www.akronservizi.it](http://www.akronservizi.it)

<b>1</b>	<b>Premessa</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Metodologia di indagine</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1</b>	<b>Indagini geoelettriche</b> .....	<b>6</b>
2.1.1	Resistività elettrica.....	6
2.1.2	Proprietà elettriche dei materiali.....	8
2.1.3	Tecniche tomografiche.....	10
2.1.4	Principi base dell'inversione tomografica.....	10
<b>2.2</b>	<b>Indagini sismiche</b> .....	<b>12</b>
2.2.1	Inversione tomografica del dato sismico.....	13
2.2.2	Sismica a rifrazione.....	16
2.2.3	Sismica a riflessione.....	17
<b>3</b>	<b>Strumentazione utilizzata</b> .....	<b>19</b>
<b>3.1</b>	<b>Indagini geoelettriche</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Indagini sismiche</b> .....	<b>22</b>
3.2.1	Acquisizione dati.....	22
3.2.2	Sorgenti.....	23
3.2.3	Ricevitori.....	23
<b>3.3</b>	<b>Rilievo topografico</b> .....	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>Descrizione del rilievo eseguito</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1</b>	<b>Indagini elettriche</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2</b>	<b>Indagine sismica a rifrazione</b> .....	<b>27</b>
<b>4.3</b>	<b>Indagine sismica a riflessione</b> .....	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>Elaborazione dati</b> .....	<b>30</b>
<b>5.1</b>	<b>Indagini geoelettriche</b> .....	<b>30</b>
<b>5.2</b>	<b>Indagini sismiche</b> .....	<b>31</b>
5.2.1	Indagini sismiche a rifrazione.....	31
5.2.2	Indagini sismiche a riflessione.....	32
<b>6</b>	<b>Risultati del rilievo e conclusioni</b> .....	<b>35</b>
<b>7</b>	<b>Documentazione fotografica</b> .....	<b>44</b>



### Allegati

Rif.	Descrizione
2.6E-dB.3.8.02-00	<b>PLANIMETRIA GENERALE.</b>
2.6E-dB.3.8.03-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni di rilievo. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione. Tav.2A
2.6E-dB.3.8.04-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione. Tav.2B
2.6E-dB.3.8.05-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni di rilievo . Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione. Tav.3A
2.6E-dB.3.8.06-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione. Tav.3B
2.6E-dB.3.8.07-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni di rilievo . Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione. Tav.4A
2.6E-dB.3.8.08-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione. Tav.4B
2.6E-dB.3.8.09-00	<b>ZONA GALLERIA.</b> Sezioni interpretative. Tomografia elettrica. Sezioni orizzontali da modello 3D, sezioni interpretative. Tav.5
2.6E-dB.3.8.10-00	<b>ZONA GALLERIA - ESTENSIONE LATERALE.</b> Sezioni di rilievo. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione. Tav.06A
2.6E-dB.3.8.11-00	<b>ZONA GALLERIA - ESTENSIONE LATERALE.</b> Sezioni di interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione. Tav.06B
2.6E-dB.3.8.12-00	<b>ZONA DOLINE.</b> Sezioni di rilievo - Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione. Tav.07
2.6E-dB.3.8.13-00	<b>ZONA OSPEDALE.</b> Sezioni di rilievo e interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione. Tav.08

### Lista di distribuzione

Riferimento	n. copie	
	cartacee	digitali
SINA S.p.A.		1



## 1 PREMESSA

Su incarico di SINA S.p.A. sono state realizzate delle indagini geofisiche in corrispondenza del lotto II.6. Roddi – Diga ENEL dell'Autostrada Asti – Cuneo.

In riferimento alla commessa n. A.400.R.100.M5 sono state effettuate le seguenti tipologie d'indagine relative ad eventuali interferenze tra lo scavo della galleria di Verduno e le cavità carsiche presenti in prossimità dell'area oggetto di studio:

- ✓ tomografia elettrica;
- ✓ tomografia sismica a rifrazione (onde di compressione);
- ✓ sismica a riflessione.

Gli obiettivi delle indagini geofisiche eseguite sono:

Metodo	Obiettivo	Parametri
Tomografia elettrica	Modellizzazione sezioni 2D/3D nel continuo	$\rho$
Sismica a rifrazione (onde di compressione)	Modellizzazione sezioni 2D nel continuo	Vp
Sismica a riflessione	Identificazione orizzonti riflettenti (contrasti di impedenza sismica), zone di discontinuità o fenomeni di variazioni laterali	Vp

La realizzazione del piano d'indagine ha previsto una prima fase, iniziata il 17 Aprile 2012, in cui ci si è occupati di effettuare i sopralluoghi preliminari nell'area d'indagine, contattare ed incontrare i singoli proprietari fondiari al fine di reperire i permessi necessari e di eseguire delle linee di prova grazie alle quali è stato possibile definire la modalità d'acquisizione ottimale.

Effettuato l'inquadramento topografico dell'area in esame mediante l'utilizzo dei capisaldi forniti dalla Committente il 18 Aprile 2012, sono stati definiti gli opportuni accordi con i proprietari dei fondi ed è iniziato il tracciamento delle linee d'indagine.

Una volta terminata l'adeguata predisposizione delle aree di lavoro nel periodo compreso tra il 23 Aprile ed il 19 Luglio 2012 si è potuto procedere con il rilievo geofisico delle linee d'indagine e l'acquisizione dei dati secondo le modalità definite dalla Committente.

Il lavoro è stato sviluppato per aree tematiche in modo tale da conferire omogeneità di significato alle aree indagate. Di seguito si riporta una tabella esplicativa di quanto eseguito:



AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEE D'INDAGINE
CARSISMO	1. Zona galleria	A - B - C - D - E - F - G - H - I - J - K - L - M - N - O - P - Q - R - S - T
	2. Zona galleria - Estensione laterale	U - V - Z
	3. Zona doline - Verifica	D1_01 - D1_02 - D1_03 D2_01 - D2_02 - D2_03 - D2_04
FRANA	1. Zona ospedale	H01 - H02 - H03

Il piano d'indagine è stato quindi sviluppato in modo tale da ottenere informazioni relative alle due principali tematiche riguardanti la zona della Galleria di Verduno.

In particolar modo le acquisizioni in zona di galleria sono state eseguite con l'intento di evidenziare l'eventuale presenza di cavità o depressioni, a tal proposito è stata decisiva la valutazione di situazioni di carsismo note e la realizzazione di un modello geofisico di raffronto. Tale verifica si è resa possibile grazie alle indagini effettuate in zona doline.

La seconda tematica affrontata per mezzo delle indagini geofisiche riguarda la frana caratterizzante la zona dell'Ospedale Nuovo di Verduno; si tratta di un'area in frana sensibile a processi di detensionamento ed in continua evoluzione risultante per tal motivo di forte interesse.

Per ogni linea d'indagine è stato quindi effettuato il rilievo topografico dei punti di stazione (geofoni, spari, elettrodi) tramite GPS.

Nella presente relazione si riporta la metodologia di indagine, le specifiche tecniche del rilievo, la strumentazione utilizzata e la descrizione dei risultati del rilievo geofisico stesso.

La planimetria delle indagini ed i risultati delle elaborazioni sono riportati negli allegati illustrati nella seguente tabella.

AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	TAVOLA	DESCRIZIONE
		2.6E-dB.3.8.02-00	PLANIMETRIA GENERALE.
CARSISMO	1. Zona galleria	2.6E-dB.3.8.03 - 04 - 05 - 06 - 07 - 08-00	ZONA GALLERIA. Sezioni di rilievo e sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.
	2. Zona galleria - Estensione laterale	2.6E-dB.3.8.09-00	ZONA GALLERIA. Tomografia elettrica. Sezioni orizzontali da modello 3D, sezioni interpretative.
		2.6E-dB.3.8.10 - 11-00	ZONA GALLERIA - ESTENSIONE LATERALE. Sezioni di rilievo e sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.
3. Zona doline - Verifica	2.6E-dB.3.8.12-00	ZONA DOLINE. Sezioni di rilievo e sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.	
FRANA	1. Zona ospedale	2.6E-dB.3.8.13-00	ZONA OSPEDALE. Sezioni di rilievo e sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.



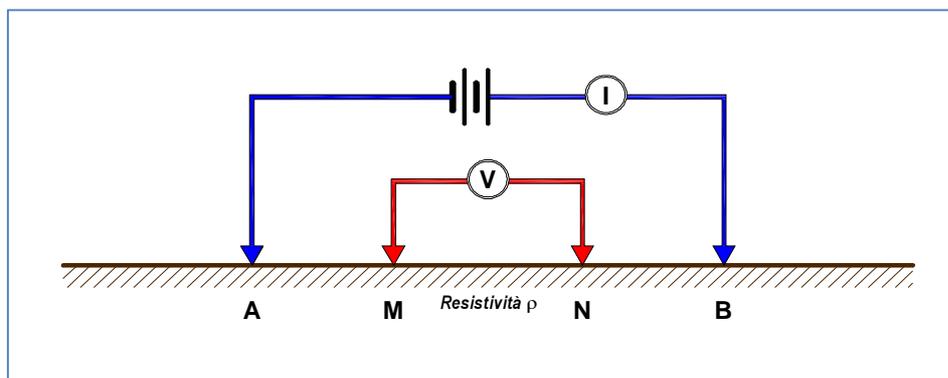
## 2 METODOLOGIA DI INDAGINE

### 2.1 INDAGINI GEOELETTRICHE

Le indagini geoelettriche costituiscono un metodo geofisico che permette di ricostruire la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo.

La grandezza che viene comunemente misurata è la resistività elettrica, ma possono essere misurati altri parametri quali il potenziale spontaneo e la polarizzazione indotta.

Il principio sul quale si basa questa metodologia è così schematizzabile: una corrente viene immessa nel mezzo attraverso una coppia di elettrodi AB (dipolo di immissione) e la differenza di potenziale risultante viene misurata attraverso un'altra coppia di elettrodi MN (dipolo di ricezione). Un voltmetro consente la misura della differenza di potenziale.



#### 2.1.1 RESISTIVITÀ ELETTRICA

La corrente si propaga nel sottosuolo attraverso:

- conduzione elettronica: la corrente si propaga attraverso gli elettroni liberi, come nei metalli
- conduzione elettrolitica: la corrente si propaga attraverso il movimento degli ioni disciolti nell'acqua presente nel sottosuolo.

I metodi geoelettrici si basano sull'immissione di una corrente nel sottosuolo e sulla misura della differenza di potenziale prodotta per determinare la distribuzione della resistività. Queste grandezze sono legate tra loro dalla Legge di Ohm: il rapporto tra la differenza di potenziale ai capi di un conduttore e la corrente che lo attraversa è la resistenza:

$$\Delta V = RI$$

Dove :

$\Delta V$  = differenza di potenziale (volt)

I = intensità di corrente (ampere)

R = resistenza (ohm)

La resistenza dipende dalle caratteristiche fisiche e geometriche del conduttore e può essere così espressa:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

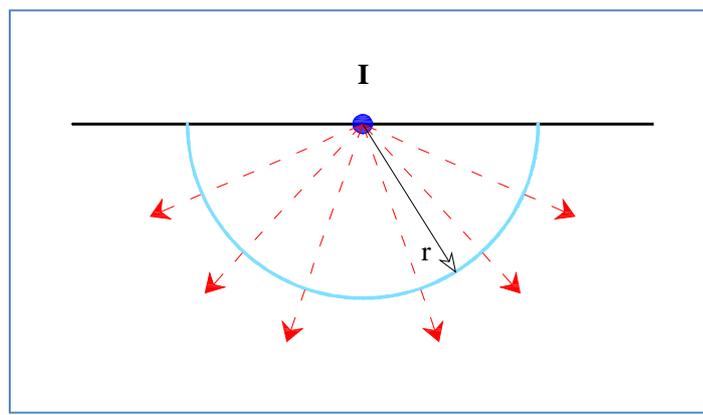
Dove :

$\rho$  = resistività (ohm.m)

$l$  = lunghezza del conduttore (m)

$A$  = sezione del conduttore (m<sup>2</sup>)

Considerando un elettrodo che immette corrente in un mezzo omogeneo, in qualunque superficie semisferica, la corrente si propaga radialmente.



La densità di corrente  $J$  immessa da un elettrodo in un semispazio può essere così espressa:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2}$$

e la differenza di potenziale:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}$$

Considerando i quattro elettrodi utilizzati nelle indagini geoelettriche, è possibile esprimere la differenza di potenziale in questo modo:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

Dove :

$r_1$  = distanza tra M e A

$r_2$  = distanza tra M e B

$r_3$  = distanza tra N e A

$r_4$  = distanza tra N e B

La resistività potrà essere così espressa:

$$\rho = 2\pi \frac{\Delta V}{I} k$$

Dove

$$\frac{1}{k} = \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right)$$

$k$  è il fattore geometrico specifico per ogni configurazione elettroica.

La resistività calcolata sopra è definita per un mezzo omogeneo, ma il sottosuolo è anisotropo e disomogeneo, pertanto l'equazione definisce una **resistività apparente**, poiché varia in funzione della posizione e/o della direzione dello stendimento.

Non rappresenta né la resistività reale, né il valore medio della resistività reale, ma la resistività di un equivalente semispazio omogeneo e isotropo.

## 2.1.2 PROPRIETÀ ELETTRICHE DEI MATERIALI

La resistività elettrica dei terreni e delle rocce dipende da numerosi fattori quali il contenuto di fluidi e di minerali, la porosità e il grado di saturazione del mezzo.

Questa grandezza è funzione essenzialmente della conduzione elettrolitica nei fluidi presenti tra i contatti dei granuli o contenuti in pori, fratture e faglie. La conduzione elettrolitica dipende dai seguenti fattori:

1. **salinità**: sono gli ioni disciolti in acqua a condurre la corrente; ne consegue pertanto che le soluzioni caratterizzate da un elevato contenuto di sali disciolti (ioni) sono quelle maggiormente conduttive;
2. **porosità**: la resistività e la porosità delle rocce sedimentarie sono generalmente correlate attraverso la legge di Archie, che per rocce prive di argilla può essere così espressa:

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = a\phi^{-m}$$

dove:

$\rho_r$  = resistività della roccia

$\rho_e$  = resistività della soluzione presente nei pori della roccia

$\phi$  = porosità

$a$  = coefficiente di saturazione (compreso tra 0.6 e 1.0)

$m$  = fattore di cementazione (compreso tra 1.4 e 2.2)

3. **presenza di materiali coesivi/argillosi**: le argille hanno una conduttività normalmente elevata poiché possiedono un doppio strato di scambio cationico. Questo strato ha una notevole capacità di assorbimento dei cationi che comporta un aumento della conduttività;



4. **grado di saturazione:** è il rapporto tra il volume dell'acqua presente nei pori e il volume totale dei pori. Maggiore è il grado di saturazione, minore è la resistività dei materiali.

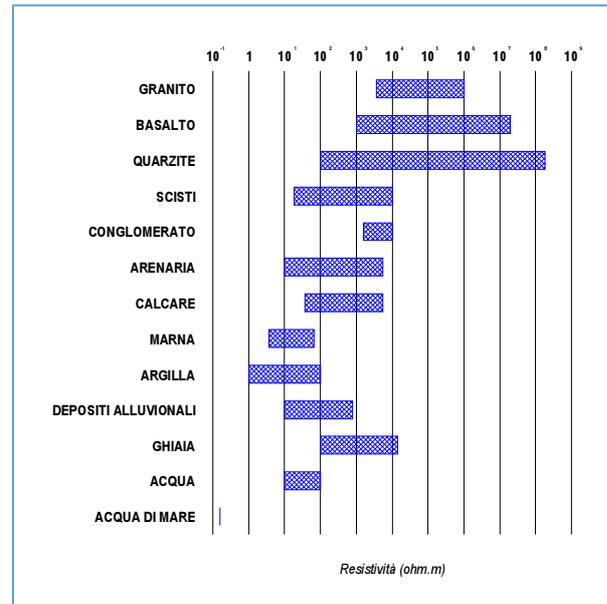
Poiché i fattori che possono influenzare la resistività sono numerosi, una stessa tipologia di materiale può essere caratterizzato da un range di resistività piuttosto ampio.

In generale è possibile affermare quanto segue:

- ✓ materiali naturali come le rocce ignee e metamorfiche sono caratterizzate da un comportamento fortemente resistivo che può raggiungere valori dell'ordine di grandezza pari a  $10^7$  ohm.m (in funzione della porosità e del contenuto di acqua);
- ✓ materiali naturali come le rocce sedimentarie presentano range di resistività variabili da qualche decina di ohm.m fino a  $10^5$  ohm.m (in funzione del grado di fratturazione);
- ✓ materiali naturali di tipo granulare (sabbie e ghiaie) sono caratterizzati da un comportamento fortemente resistivo; in funzione della granulometria dei materiali i valori di resistività variano da 100 fino a 3000-4000 ohm.m;
- ✓ materiali naturali di tipo coesivo (limi e argille) presentano valori di resistività bassi nell'ordine di qualche decina di ohm.m;
- ✓ la resistività dell'acqua nel sottosuolo presenta valori di resistività che variano da 10 a 100 ohm.m (in funzione dei sali disciolti). La presenza di acqua diminuisce i valori di resistività propri del materiale.
- ✓ i processi di alterazione dei materiali naturali provocano una diminuzione dei valori di resistività (ad es. aumentano i minerali delle argille);
- ✓ la presenza ad esempio di composti chimici quali il sodio clorido o il potassio clorido possono ridurre notevolmente la resistività dell'acqua con quantità molto ridotte;
- ✓ la presenza di materiali metallici diminuisce notevolmente la resistività essendo essi stessi materiali fortemente conduttivi;
- ✓ la presenza di fanghi o melme diminuisce la resistività poiché questi materiali sono fortemente conduttivi;
- ✓ la presenza di vuoti (es. scavernamenti) produce valori di resistività molto elevati avendo il vuoto caratteristiche elettriche di resistività infinita;
- ✓ le macerie (presumibilmente costituite da blocchi di calcestruzzo o mattoni) presentano valori di resistività elevate, simili o superiori a quelli che contraddistinguono le ghiaie;
- ✓ la presenza di idrocarburi provoca un incremento di resistività poiché hanno resistività decisamente elevate come ad esempio lo xilene caratterizzato da un valore pari a  $6,998 \times 10^{16}$  ohm.m.

Nella tabella di seguito si riportano dei range di resistività tipici di alcuni materiali:





### 2.1.3 TECNICHE TOMOGRAFICHE

La tomografia elettrica nasce dall'unione dei tradizionali profili elettrici con i metodi di inversione tomografica. Questa metodologia permette di ricostruire attraverso immagini le variazioni di resistività elettrica del sottosuolo.

Come nei tradizionali profili elettrici la tomografia necessita di quattro elettrodi per la misura della resistività: due per l'immissione della corrente nel sottosuolo e due per la misura della differenza di potenziale.

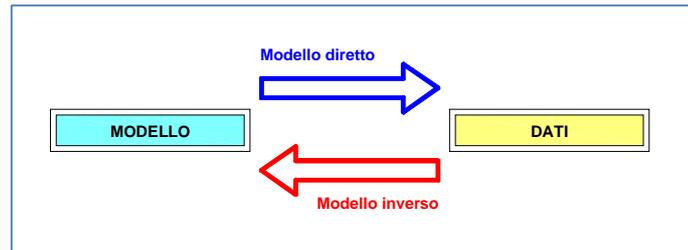
La differenza fondamentale consiste nell'utilizzare decine di elettrodi disposti lungo un allineamento alternativamente come elettrodi di corrente e di misura. Il numero di misure che si possono ottenere è pari a  $n(n-3)/2$  dove  $n$  è il numero degli elettrodi.

Il maggiore vantaggio attribuibile alla tomografia elettrica rispetto alle tradizionali indagini 1D o 2D è quello di poter ricostruire non solo le variazioni verticali di resistività nello spazio, ma anche quelle orizzontali.

### 2.1.4 PRINCIPI BASE DELL'INVERSIONE TOMOGRAFICA

Obiettivo delle indagini è la ricostruzione della distribuzione nel sottosuolo della resistività. I valori di corrente, di differenza di potenziale, insieme alla disposizione degli elettrodi e al fattore geometrico permettono di ottenere la resistività apparente del sottosuolo.

Questi valori costituiscono i dati attraverso i quali è possibile ricostruire un'immagine del sottosuolo (modello 2D) mediante il processo di inversione tomografica.



### MODELLO DIRETTO:

La posizione degli elettrodi, la distribuzione della resistività apparente nel sottosuolo e la corrente immessa costituiscono i parametri del modello diretto attraverso i quali è possibile ricostruire un modello sintetico del potenziale elettrico.

Il modello diretto può essere ricostruito calcolando il potenziale  $V$  attraverso l'equazione:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = -I$$

dove:

$V$  = potenziale elettrico (incognita)

$I$  = corrente immessa

$\sigma$  = distribuzione della conducibilità (per sezioni 2D  $\sigma(x,z)$ )

$\beta$  = parametro che definisce le condizioni al contorno (è uguale a zero in superficie)

con le seguenti condizioni al contorno:

$$\text{in superficie } \frac{\partial V}{\partial n} = 0 \text{ e in qualunque altro punto del sottosuolo } \frac{\partial V}{\partial n} + \frac{\cos \theta}{r} V = 0$$

L'inversione ha lo scopo di definire a partire dal modello diretto ottenuto, il modello che meglio si adatta ai valori misurati, cioè minimizza le differenze tra valori calcolati e misurati. Il modello calcolato deve corrispondere ai valori misurati entro una percentuale accettabile di errore (valutato come RMS o L2 norm).

Il modello di resistività iniziale utilizzato nel processo di inversione può essere:

1. pseudosezione (rappresentazione 2D dei valori di resistività apparente misurata ottenuta mediante interpolazione geometrica dei dati)
2. valore medio della resistività apparente
3. modello a-priori definito dall'operatore

Il processo è iterativo e termina quando soddisfa i criteri stabiliti dall'operatore, che possono essere:

- il numero delle inversioni
- la percentuale di riduzione dell'errore  $\frac{|RMS_n - RMS_{n-1}|}{RMS_{n-1}} * 100\%$
- il valore di RMS  $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i^{calc} - d_i^{meas}}{d_i^{meas}} \right)^2}{N}} * 100\%$
- il valore di L2 normalizzata  $\frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{d_i^{calc} - d_i^{meas}}{3\% d_i^{meas}} \right)^2}{N}$

Poiché la soluzione del problema non è unica è possibile limitare il numero di soluzioni introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di resistività, conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.

## 2.2 INDAGINI SISMICHE

I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e le variazioni che esse ne subiscono permettono di ricostruire le caratteristiche meccaniche e geometriche del sottosuolo.

Un qualunque segnale sismico può essere descritto come la sovrapposizione di quattro differenti fasi (fase è il movimento che compie una particella nel mezzo investito dal fronte d'onda sismico):

- onde di volume
  - P: onde primarie o di compressione
  - S: onde secondarie o di taglio
- onde di superficie
  - L: onde di Love (caratterizzate da un movimento longitudinale e trasversale)
  - R: onde di Rayleigh (caratterizzate da un movimento ellittico retrogrado)

Le onde sismiche generate dalla sorgente attraversando il sottosuolo possono incontrare limiti tra materiali con differenti proprietà. Il fronte d'onda potrà essere riflesso, rifratto oppure convertito in una diversa tipologia. Le caratteristiche del mezzo e l'angolo di incidenza dei raggi sismici determineranno la traiettoria dell'onda sismica.

Quando un'onda longitudinale piana incide un'interfaccia tra due materiali con differenti proprietà elastiche, dove il mezzo a profondità maggiore ha una velocità superiore, è possibile applicare i principi dell'ottica e in particolare le leggi di Snell. Il fronte d'onda che incide obliquamente sull'interfaccia genera onde longitudinali e trasversali che si propagano in entrambi i mezzi. Le onde che si propagano nello stesso mezzo del fronte d'onda sono riflesse, mentre quelle che si propagano nel mezzo sottostante sono rifratte.

La presenza di discontinuità o anisotropie nel mezzo modifica ampiezza e periodo delle onde sismiche. La velocità delle onde dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato, in particolare da: densità ( $\gamma$ ), coefficiente di Poisson ( $\rho$ ), modulo di Young ( $E$ ) e modulo di taglio ( $G$ ).

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$
$$E = V_p^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \rho) \cdot (1 - 2\rho)}{1 - \rho}$$
$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g}$$

$V_p$  = velocità delle onde P  
 $V_s$  = velocità delle onde S  
 $g$  = accelerazione di gravità



Nella tabella di seguito vengono indicati valori di riferimento della velocità P per i vari materiali:

MATERIALE	Vp (m/s)
Granito	5.000
Calcere	1.500-4.200
Arenaria	1.400-4.000
Sabbie	1.200-1.800
Argilla	1.100-2.500

### 2.2.1 INVERSIONE TOMOGRAFICA DEL DATO SISMICO

La tomografia è una tecnica di ricostruzione per immagini che permette di caratterizzare un'area non accessibile per mezzo di impulsi di energia che attraversano l'area oggetto di indagine. L'esempio più efficace di tecnica tomografica è la TAC (tomografia assiale computerizzata) di largo impiego nel settore medicale.

I metodi di inversione tomografica applicati a metodologie di prospezione sismica attiva trovano numerose applicazioni per indagini di tipo geotecnico:

- ricostruzione stratigrafica;
- caratterizzazione di contrasti di impedenza;
- caratterizzazione delle zone a gradiente di velocità o attenuazione;
- individuazione di faglie e fratture;
- localizzazione di oggetti sepolti, massi erratici.

Gli obiettivi elencati possono essere raggiunti poiché la velocità sismica è un parametro che dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale quali: porosità, resistenza al taglio, compressibilità, quantità di fratture, saturazione e contenuto di argilla.

Misurando i tempi di arrivo o le ampiezze delle onde sismiche è possibile ottenere la distribuzione nel mezzo indagato di velocità sismica (modello di velocità) o attenuazione (modello cinematico); parametri che permettono di definire le caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

Esistono differenti geometrie di acquisizione comunemente utilizzate per le elaborazioni tomografiche:

- sismica superficiale a riflessione o rifrazione;
- VSP (Vertical Seismic Profile);
- cross-hole;
- sismica 3D.

L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

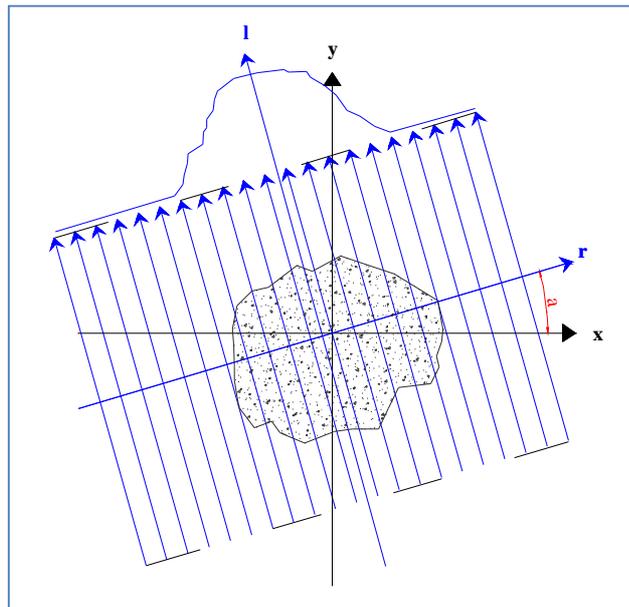


Le serie di proiezioni utilizzate in tomografia corrispondono a integrali lineari di alcune funzioni del mezzo. Nelle indagini sismiche i parametri misurati sono il tempo di arrivo e l'ampiezza delle onde sismiche, mentre la funzione può essere lo smorzamento (reciproco della velocità) o il fattore di attenuazione. Per un'analisi bidimensionale il problema tomografico è rappresentato dalla seguente equazione:

$$p(r, \alpha) = \int f(x, y) dl$$

(una serie completa di somme di raggi ad un determinato angolo è definita proiezione o profilo)

Dove  $x$ ,  $y$ ,  $r$ ,  $l$  e  $\alpha$  sono rappresentati nello schema di seguito:



Dal punto di vista teorico  $f(x,y)$  è una funzione 2D continua e per essere ricostruita necessita di un numero infinito di proiezioni. Per ovvi motivi di discretizzazione  $f(x,y)$  è calcolata per un numero finito di punti attraverso un numero finito di proiezioni.

Il mezzo da ricostruire viene quindi discretizzato in un grid a elementi rettangolari (celle) in ciascuno dei quali il valore di smorzamento si suppone costante. Il tempo di arrivo calcolato per un raggio (impulso sismico - perturbazione ondulatoria) che attraversa le celle del grid può essere espresso dalla formula:

$$t_k^{calc} = \sum_{j=1}^N d_{kj} \cdot s_j$$

$t_k^{calc}$  = tempo di arrivo calcolato per il raggio  $k_{esimo}$

$d_{kj}$  = lunghezza del percorso del raggio  $k_{esimo}$  nella cella  $j_{esima}$

$s_j$  = smorzamento della cella  $j_{esima}$

$N$  = numero di elementi del grid

I tempi di arrivo di tutti i raggi possono essere tradotti in forma matriciale:

$$T = D * S$$

**T** = vettore di lunghezza M (tempi di arrivo)

**S** = vettore di lunghezza N (celle)

**D** = vettore (MxN) con lunghezza dei raggi in ogni cella

Ricostruire una funzione attraverso il suo integrale comporta una soluzione non unica poiché un infinito numero di integrali possono essere misurati. Il numero di soluzioni può essere ridotto introducendo dei vincoli nel modello quali: limiti di velocità, limiti di gradiente delle velocità (damping), conoscenza delle strutture geologiche presenti nell'area, dimensioni e tipologia di celle da utilizzare nella ricostruzione.

Esistono differenti approcci alla risoluzione del problema:

- ✓ Back Projection (BP);
- ✓ matrice di inversione;
- ✓ ricostruzione analitica;
- ✓ ricostruzioni iterative (ART, SIRT).

I processi di tipo iterativo risultano più appropriati per l'ambito geologico poiché i dati geofisici possono essere distorti dal rumore di fondo, oppure essere campionati irregolarmente e discontinuamente.

I metodi iterativi si basano sulla definizione di un modello iniziale di velocità del sottosuolo (modello a priori) costruito attribuendo un valore di velocità a tutte le celle del grid. Attraverso il modello iniziale è possibile calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche.

Successivamente è possibile calcolare i tempi residui, ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, e pertanto definire l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale/reale:

$$D_i = t_{obs_i} - t_{calc_i} \text{ dove } i = 1, 2 \dots N$$

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. La soluzione del sistema di equazioni, che risulta sovradeterminato poiché ha un numero di equazioni superiore al numero di incognite, definisce la variazione da applicare al modello iniziale (matrice di risoluzione).

L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta compresa in un range di errore accettabile.

La risoluzione delle sezioni tomografiche è proporzionale al numero e alla dimensione delle celle del grid ed è limitata dalla media della lunghezza d'onda del segnale che determina la dimensione minima della cella. Una anomalia può essere individuata solamente se l'effetto prodotto sul tempo di arrivo è maggiore della precisione della lettura del tempo di arrivo stesso.

La dimensione minima ( $\Delta l$ ) che un'anomalia dovrebbe avere per generare una variazione misurabile nei tempi di arrivo dei raggi che vi passano attraverso può essere calcolata con la seguente equazione:



$$\Delta l = \frac{\Delta t}{\Delta v} \cdot (v_a \cdot v_m)$$

$v_a$  = velocità dell'anomalia

$v_m$  = velocità media nel mezzo

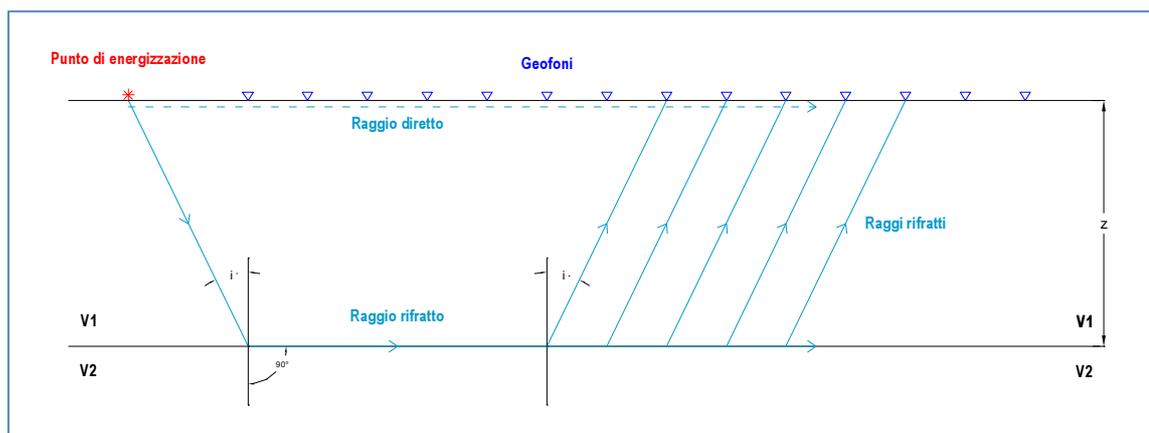
$$\Delta v = |v_a - v_m|$$

$\Delta t$  = errore nella lettura dei primi arrivi

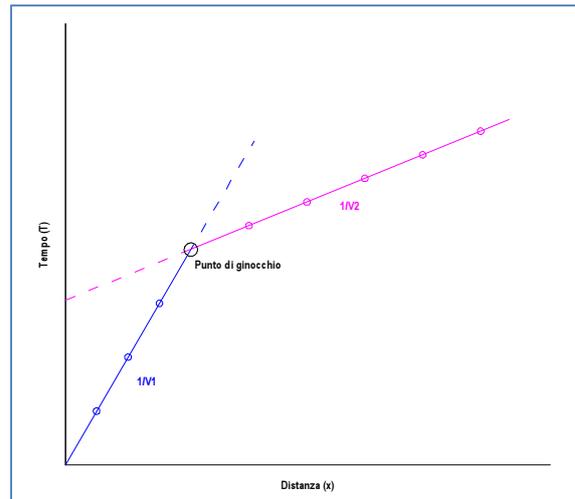
Al fine di evitare artefatti matematici senza corrispondenza fisica e geologica, le dimensioni della cella devono risultare inferiori alle dimensioni dell'anomalia, inoltre occorre tenere in considerazione il numero di raggi che attraversano le celle, i quali a loro volta dipendono dalla distanza sorgente-ricevitore, dal numero di sorgenti e ricevitori e dalla loro distribuzione.

### 2.2.2 SISMICA A RIFRAZIONE

Il metodo sismico a rifrazione utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo ad es. l'interfaccia tra due mezzi a diverse velocità (si ipotizza che la velocità aumenti con la profondità).



Misurando i tempi di primo arrivo (FBP First Break Point) degli impulsi ai geofoni e le distanze tra gli stessi viene costruito un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse vengono rappresentate le distanze e in ordinate i tempi.



Le onde dirette viaggiano dalla sorgente al ricevitore con velocità  $V_1$  (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea che dall'origine ha una pendenza pari a  $1/V_1$ ) e raggiungono i ricevitori in un tempo:

$$t = \frac{x}{V_1}$$

Le onde rifratte viaggiano lungo l'interfaccia a una profondità  $z$  (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea retta con pendenza  $1/V_2$  che intercetta l'asse dei tempi a  $x=0$ ) e raggiungono i ricevitori in un tempo (tempo di intercetta):

$$T_i = \frac{x}{V_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 * V_1}$$

Il punto di intersezione tra le due rette, definito come punto di ginocchio, permette di calcolare la profondità del rifratte.

### 2.2.3 SISMICA A RIFLESSIONE

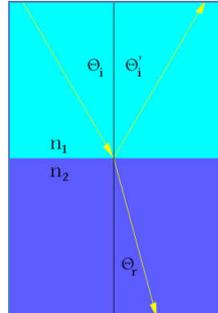
Le indagini a riflessione consentono di definire lungo un profilo indagato, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche presenti e la loro geometria (spessori e superfici di contatto).

Il principio base su cui si fonda la tecnica sismica a riflessione consiste nell'idea che una volta generato un segnale, ad un istante noto, si possa misurare il tempo che impiegano le onde sismiche così prodotte ad attraversare il mezzo considerato, essere riflesse e raggiungere i ricevitori posti in superficie. Questo tempo è noto come "two-way travel time" (TWTT) e la sua valutazione rappresenta l'essenza della tecnica a riflessione.

La sismica a riflessione, così come accade per la sismica a rifrazione, si basa sulla validità delle leggi di Snell alle quali occorre accennare al fine di comprendere i fenomeni che determinano i percorsi, le geometrie, le velocità e le caratteristiche dei raggi sismici.



Consideriamo un piano di incidenza individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie di discontinuità tra il mezzo 1 ed il mezzo 2 (aventi caratteristiche meccaniche differenti) ed ipotizziamo che un'onda colpisca la loro superficie di separazione. In questo caso una parte dell'onda incidente subirà un fenomeno di riflessione e continuerà a viaggiare nel mezzo 1 (raggio riflesso), mentre una parte proseguirà il suo percorso e raggiungerà il mezzo 2 (raggio rifratto).



Secondo la **Prima legge di Snell** il raggio incidente, il raggio rifratto, il raggio riflesso e la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi appartengono allo stesso piano, chiamato *piano di incidenza*.

La **Seconda legge di Snell** ci dà delle informazioni sulla relazione che lega l'angolo di riflessione e quello di incidenza sottolineando che:

$$\theta_i = \theta_i'$$

Il raggio rifratto, invece, viene trasmesso nel mezzo 2 e forma con la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi l'angolo di rifrazione  $\theta_r$ .

Secondo la **Terza legge di Snell** il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione è uguale al rapporto tra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo:

$$\frac{\text{sen } \theta_i}{\text{sen } \theta_r} = \frac{n_2}{n_1}$$

Sulla base di quanto detto consegue che se  $v_2 > v_1$  il raggio rifratto si allontanerà dalla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi; se, invece,  $v_2 < v_1$  allora il raggio rifratto si avvicinerà alla normale.

### 3 STRUMENTAZIONE UTILIZZATA

Le prove sono state effettuate con la strumentazione di seguito riportata.

#### 3.1 INDAGINI GEOELETTRICHE

Per il rilievo in esame è stato utilizzato sia il sistema multielettrodico ARES 200E con elettrodi attivi, che il sistema multielettrodico ABEM Terrameter LS con elettrodi passivi. Ogni elettrodo è collegato all'unità centrale e contiene l'elettronica di comando per la gestione dell'operazione di switching.

L'unità centrale esegue in batch la sequenza di misure secondo la tecnica walk-away: definite le combinazioni di elettrodi di misura e corrente si rilevano profili di resistività con diverse spaziature elettrodiche in corrispondenza di diverse posizioni fino a coprire l'intero stendimento.

L'automazione del processo di acquisizione mediante centralina di switch intelligente velocizza le operazioni di acquisizione dati.

Nelle tabelle di seguito si riportano le caratteristiche tecniche dei sistemi impiegati:

#### ARES 200E

PARAMETRO	CARATTERISTICHE ARES 200E
Tipologie di misura	Resistività apparente, resistenza, voltaggio (PS), polarizzazione indotta (IP), voltaggio batteria alimentazione
Range di misura	da 400 KW a 0.1 milliW (resistenza) 0 – 500 V autorange del voltaggio della scala
Risoluzione delle misure	Massimo 30 nV, in dipendenza del livello del voltaggio
Corrente di output	1-2-5-10-20-50-100-200-500 mA
Voltaggio di output	L'operatore può selezionare tra il limite di alto e basso voltaggio per il trasmettitore (800 Vp-p o 320 Vp-p voltaggio limite). In effetti però il voltaggio elettrodico si setta automaticamente in funzione della corrente trasmessa e dalla resistività del terreno
Input gain ranging	Automatico, utilizza sempre l'intero range dinamico della ricevente
Input di voltaggio	Massimo 500 V
Compensazione dei Potenziali Spontanei	Cancellazione automatica dei voltaggi PS durante le misure di resistività. Cancella completamente variazioni lineari e costanti di PS
Elaborazione del segnale	Media continua dopo ogni ciclo completo. Gli errori relativi al "noise" vengono calcolati e visualizzati come percentuale di lettura. Letture visualizzate come resistenza (D V/ I) e resistività apparente (W m). La resistività viene calcolata utilizzando le coordinate dello stendimento inserite dall'operatore
Eliminazione del "noise"	Superiore a 100 dB per $f > 20$ Hz Superiore a 120 dB a frequenze di linee di potenza (16 2/3, 20, 50 e 60 Hz)
Precisione totale	Superiore a 1% della lettura nella maggior parte dei casi (misure di laboratorio). La precisione delle misure di campo dipende dalla resistività e dal "noise" del terreno. Lo strumento calcolerà e visualizzerà una stima della precisione delle misure correnti



## ABEM Terrameter LS

<b>Receiver</b>		<b>Tx Monitor</b>	
No. of Channels	4,8 or 12 input (+ 2 for Tx monitoring)	Voltage	+/- 600 V
Isolation	All channels are galvanically separated	Current	+/- 2500 mA
Input Voltage Range	+ / - 600 V	Current Accuracy	Full waveform monitored
Input Impedance	200 MOhm	Current Precision	0,2 %
Precision	0.1 %		0,1 %
Accuracy	0.2 %		
Resolution	Theoretical 3 nV at 1 sec integration	<b>General</b>	
Linearity	0.005 %	Casing	Rugged Aluminum case meets IEC IP 66
Range	+ / - 2.5 V, 200 MOhm + / - 15 V, 30 MOhm + / - 600 V, 20 MOhm	Computer	Embedded ARM 9, 200 MHz
Flat Frequency Response	Better than 1 % up to 300 Hz	GPS	20 channels SirF star III chip
		Display	8,4" Active TFT LCD, full colour, daylight visible
		I / O ports	2 x KPT 32 p for imaging (1 x KPT 32 p for VES) AUX, USB A, USB B, RJ45 for LAN
		Service point	Accessible through Internet, Multifunction connector
<b>Measuring</b>		Memory Capacity	8 GB, More than 1 500 000 readings
Resistivity	YES	Power	8 Ah Internal NiMH 12 V power pack and External 12 VDC battery (recommended option for all Imaging and VES)
SP	YES	Dimensions (W x L x H)	39 x 21 x 32 cm
IP	YES	Weight	12 kg
Full wave form	Sampled and average to requested data. Possible to activate recording to file for post analysis	Ambient Temperature Range	- 20°C to + 55 °C operating <sup>1,2</sup> - 30°C to + 70 °C storage <sup>3</sup>
Dynamic Averaging	24 bit A/D conversion	<small>Note 1: Measuring speed may be reduced in high ambient temperature combined with high output power</small> <small>Note 2: The performance of the LCD is not guaranteed below 0°C</small> <small>Note 3: Non condensing</small>	
Data Sampling Rate	30 kHz	<b>Multi-Electrode Survey Systems for 2D &amp; 3D for Resistivity, IP &amp; SP Imaging &amp; Monitoring</b>	
Cycle time	from 0.4 sec to 28,7 sec User selectable, resistivity	Switching matrix	Internal 10 X 64, divided into four blocks for effective use of all receiver channels available
Pulse time	from 0.1 sec to 8,2 sec. User selectable	Roll-a-Long	YES full coverage, both 2D & 3D
IP Windows	Arbitrary windows flexibility configured to powerline frequencies	Array types Default	Multiple Gradient, Dipole-Dipole, Pole-Dipole, Wenner etc. (for VES, get info)
		Take-outs internal	64 inline + 3 remote electrodes
		Electrode Test	YES, Focus One estimating contact resistance on all electrodes currently in use
<b>Transmitter</b>			
Output power	250 W		
Current transmission	True Current Transmitter		
Output Current Accuracy	Better than 0.4 %		
Maximum Output Current	2500 mA		
Maximum Output Voltage	+ / - 600 V 1200 V peak to peak		
Instant Polarity Changer	YES		
Accuracy	0.4 %		
Precision	0.1 %		
Self Diagnostics	Temperature, Power dissipation, Monitoring		
Safety	Emergency Interrupter easily accessible		





*Georesistivometro multielettrodico ARES 200E con elettrodi attivi.*



*Georesistivometro multielettrodico ABEM Terrameter LS con elettrodi passivi.*



*Elettrodo collegato ad un picchetto in ottone*

## 3.2 INDAGINI SISMICHE

### 3.2.1 ACQUISIZIONE DATI

I dati sono stati acquisiti con sismografo GEODE della Geometrics dotato di 24 canali a 24 bit, possibilità di stacking, filtri analogici e digitali.

Si fa ad ogni modo notare che il dato è stato registrato a finestra aperta, vale a dire senza filtri in acquisizione che potrebbero precludere l'impiego del dato stesso su tutto lo spettro di frequenze acquisibili (ciò assicura che non venga intaccata in fase di acquisizione la completezza delle informazioni rilevabili).

Nella tabella si riportano le caratteristiche tecniche del sismografo.

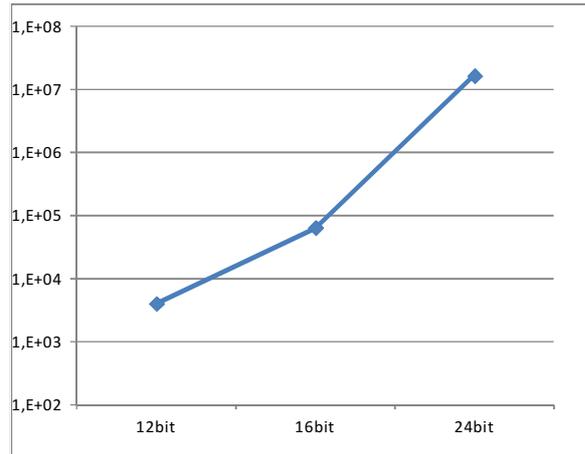
<i>A/D Conversion</i>	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling
<i>Dynamic Range</i>	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB
<i>Sample Interval</i>	0.02, 0.3125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
<i>Record Length</i>	16,000 samples
<i>Maximum Input Signal</i>	2.8 VPP
<i>Distortion</i>	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
<i>Bandwidth</i>	1.75 Hz to 20 kHz
<i>Common Mode Rejection</i>	>-100 dB at <=100 Hz, 36 dB
<i>Crosstalk</i>	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
<i>Noise Floor</i>	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
<i>Stacking Trigger Accuracy</i>	1/32 of sample interval
<i>Input Impedance</i>	20 kOhm, 0.02 uf
<i>Anti-alias Filters</i>	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
<i>Delay</i>	0 to 9999 ms in 1 ms steps
<i>Acquisition and DisplayFilters</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>└ LowCut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth.</li> <li>└ Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency.</li> <li>└ HighCut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.</li> </ul>
<i>Triggering</i>	Positive, negative or contact closure, software adjustable threshold
<i>Power</i>	12V external battery

Si ricorda che il segnale analogico in uscita dai geofoni viene discretizzato (digitalizzato) secondo una capacità di risoluzione che è funzione del numero di bit dell'acquisitore ( $2^n$  dove n sono i bit). Posto infatti che l'uscita in ampiezza (volt) dei geofoni è costante (per i geofoni sia da rifrazione che da riflessione è identica anche per i diversi costruttori) la capacità di discretizzare livelli sempre inferiori (bassi) di segnale è stata nel tempo la seguente:

- anni 80 – strumentazione a 12bit ( $2^{12} = 4.096$ )
- anni 90 – strumentazione a 16bit ( $2^{16} = 65.536$ )
- anni 2000 – strumentazione a 24bit ( $2^{24} = 16.777.216$ )

Poiché la capacità di risolvere segnali di bassa ampiezza è legata a valore di range in ingresso (geofoni) e bit della scheda A/D (conversione da analogico a digitale) risulta evidente l'incremento di capacità risolvente dei sismografi tipo Geode (qui utilizzati). Si veda il grafico in cui la capacità di risolvere segnali in ingresso sempre più piccoli (LSB) è riportata in ordinate.





In sostanza un sismografo a 24 bit (tipo Geode qui impiegato) presenta una capacità risolvibile del segnale 256 volte maggiore rispetto ai precedenti sismografi a 16bit (ancora ovviamente in uso ai quali fanno riferimento le specifiche tecniche in uso corrente).

### 3.2.2 SORGENTI

In fase d'acquisizione è stata utilizzata come sorgente di energia la massa battente; essa è costituita da un martello avente massa da 10 kg utilizzato da un operatore.

Una sorgente di basso livello con più acquisizioni (stack) corrispondente all'impiego di una massa battente è, infatti, sicuramente meno efficiente dal punto di vista dell'energia impiegata, ma permette di utilizzare ampiamente le tecniche di stack che riducono gli effetti di rumore (segnale incoerente) aumentando (stack – somma) il segnale coerente, vale a dire il segnale sismico di interesse nella prospezione.

Per tal ragione al fine di ottenere l'ottimizzazione del rapporto S/N (signal to noise) tutte le indagini sismiche sono state effettuate con una ripetizione dell'operazione di stack compresa tra le 8 e le 12 volte.

L'impulso viene generato attraverso il colpo del martello su una piastra in teflon appoggiata al terreno.

L'istante di trigger è fornito da un geofono posizionato in prossimità del punto di battuta.

### 3.2.3 RICEVITORI

Per le indagini di sismica a rifrazione sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 14 Hz; mentre per quelle di sismica a riflessione sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 70 Hz. I geofoni sono sensori di tipo elettromagnetico che generano una tensione proporzionale alla velocità della perturbazione sismica.

I cavi utilizzati per l'acquisizione sono cavi con guaina in polipropilene schermati con connettori tipo militare Bendix o Cannon a 36 pin.

### 3.3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Lungo tutte le sezioni è stato eseguito il rilievo dei punti di stazione elettrodica e sismica (sorgenti e ricevitori) mediante sistema GPS previo inquadramento topografico.

E' stato utilizzato il sistema GPS Stonex S9 avente le seguenti caratteristiche:

- ✓ Canali: 220
- ✓ Segnali satellitari ricevuti:
  - GPS: L1 C/A, L2E, L2C, L5 simultaneamente
  - GLONASS: L1 C/A, L1 P, L2 C/A (solo GLONASS M), L2 P simultaneamente
  - SBAS: L1 C/A, L5 simultaneamente
  - GIOVE-A: L1 BOC, E5A, E5B, E5AltBOC1 simultaneamente
  - GIOVE-B: L1 CBOC, E5A, E5B, E5AltBOC1 simultaneamente
  - COMPASS: (riservato): B1 (QPSK), B1-MBOC (6, 1, 1/11), B1-2 (QPSK), B2 (QPSK), B2-BOC (10, 5), B3 (QPSK), B3BOC (15, 2.5), L5 (QPSK)
- ✓ Misurazioni di fase portante GNSS a rumore molto basso con precisione di <1 mm su una larghezza di banda di 1 Hz
- ✓ Correlatore multiplo ad alta precisione per misurazioni di pseudorange L1, L2 e L5
- ✓ Misurazioni di pseudorange non stabilizzate, non filtrate, dati per basso rumore, basso margine di errore multipath, bassa correlazione dominio temporale ed elevata risposta dinamica
- ✓ Posizionamento a 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e 50 Hz
- ✓ Memoria interna: 64 MB (più di 15 giorni di dati statici grezzi osservabili considerando una registrazione ogni 15 secondi)
- ✓ Accuratezze ricevitore
  - Accuratezza statica orizzontale: 3mm ± 1ppm (RMS)\*.
  - Accuratezza statica verticale: 5mm ± 1ppm (RMS)\*.
  - Accuratezza orizzontale RTK: 1cm ± 1ppm (RMS)\*.
  - Accuratezza verticale RTK: 2cm ± 1ppm (RMS)\*.
  - Accuratezza del codice differenziato (DGPS): 0.45m (CEP)\*.
  - Accuratezza di posizionamento Stand Alone RTK: 1.5m (CEP)\*.
  - Accuratezza SBAS tipicamente <5m (3D RMS)\*.



## 4 DESCRIZIONE DEL RILIEVO ESEGUITO

L'indagine geofisica è stata organizzata per aree tematiche in modo tale da programmare con coerenza le modalità d'acquisizione ed avere un quadro completo e significativo dei risultati. In particolare si è organizzato il lavoro analizzando le seguenti tematiche in:

1. Aree a possibile carsismo
2. Area in frana

Le tipologie d'indagine effettuate sono:

- ✓ Indagini elettriche; volte alla determinazione dei valori di resistività e ad una modellizzazione 2D/3D in continuo del sottosuolo.
- ✓ Indagini sismiche a rifrazione; il cui obiettivo è la modellizzazione 2D nel continuo tramite investigazione dettagliata delle prime decine di metri del sottosuolo. Le indagini in rifrazione sono state realizzate al fine di evidenziare la presenza di eventuali dissesti, condizioni di instabilità, aree carsiche o zone caratterizzate dalla possibile presenza di fluidi che interessino le unità più superficiali.
- ✓ Indagini sismiche a riflessione; il cui obiettivo consiste nella modellizzazione degli orizzonti riflettenti caratterizzati da contrasti di impedenza significativi, nonché nel riconoscimento di zone di discontinuità o di fenomeni di variazioni laterali degli orizzonti. Tale metodologia d'indagine permette inoltre di trattare il dato in modo robusto dando risultati affidabili e di qualità lavorando con ogni distribuzione di velocità nel sottosuolo. Le indagini sismiche a riflessione, infine, hanno previsto l'impiego dell'intera forma d'onda e non solo dei tempi di primo arrivo, il che permette di elaborare informazioni aggiuntive deducibili da ampiezza, frequenza e fase e di ottenere risultati facilmente interpretabili in termini di strutture geologiche anche complesse con un dettaglio non raggiungibile con la tecnica a rifrazione.

### 4.1 INDAGINI ELETTRICHE

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 30 profili di rilievo eseguiti con metodologia elettrica.

Si ricorda che per ciascuna sezione tomografica è stata prevista l'opportuna sovrapposizione con le linee adiacenti in modo da avere la copertura ottimale del dato acquisito.

Nella tabella si riporta l'area tematica, la fase di lavoro, la linea, il numero di sezioni eseguite e la lunghezza di ciascuna sezione tomografica:

AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEA	SEZIONE	LUNGHEZZA SINGOLA SEZIONE (m)
CARSISMO	1. Zona galleria	A	1	170.5
			2	170.5
			3	170.5
			4	170.5
			5	170.5



AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEA	SEZIONE	LUNGHEZZA SINGOLA SEZIONE (m)
			6	170.5
			7	170.5
			8	214.5
		B	1	170.5
			2	170.5
			3	170.5
			4	170.5
			5	170.5
			6	170.5
			7	170.5
			8	214.5
		C	1	315
			2	315
			3	315
		D	1	315
			2	315
			3	315
		E	1	315
			2	315
			3	315
		F	1	315
			2	315
			3	315
		G	1	315
			2	315
			3	315
		H	1	315
			2	315
			3	315
		I	1	315
			1	315
			2	315
J	1	315		
	2	315		
	3	315		
K	1	315		
	1	315		
	1	315		
L	1	315		
	1	315		
	1	315		
M	1	315		
	1	315		
	1	315		
N	1	315		
	1	315		
	1	315		
P	1	315		
	1	315		
	1	315		
Q	1	315		
	1	315		
	1	315		
T	1	315		
	1	315		
	1	315		
2. Zona galleria Estensione laterale	U	1	315	
		2	315	
		3	315	
	V	1	315	
		2	315	
		3	315	
	Z	1	315	
		2	315	
		3	315	
3. Zona doline Verifica	D1_01	1	315	
	D1_02	1	315	
	D1_03	1	315	
	D2_01	1	315	
	D2_02	1	315	
	D2_03	1	315	
	D2_04	1	315	
FRANA	1. Zona ospedale	H01	1	315
		H02	1	315
		H03	1	315
		<b>SVILUPPO TOTALE</b>		



Le posizioni delle linee di rilievo ed i risultati ottenuti sono riportate sulle Tavole 2.6E-dB.3.8.02 – 03 – 04 – 05 – 06 – 07 – 08 – 09 – 10 – 11 – 12 – 13-00 in allegato.

In fase di acquisizione la strumentazione è stata impostata con il seguente setup:

- ✓ stack: 4
- ✓ durata dell'impulso: 1sec
- ✓ valore minimo di lettura in V: 10mV
- ✓ deviazione standard massima per singola misura: 2% (qualora la misura non rispetti questo criterio, viene ripetuta)

## 4.2 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 31 profili di rilievo realizzati con tecnica sismica a rifrazione basata sulla velocità di propagazione delle onde di compressione.

Si ricorda che per ciascuna sezione sismica è stata prevista l'opportuna sovrapposizione con le linee adiacenti in modo da avere la copertura ottimale del dato acquisito.

Nella tabella si riporta l'area tematica, la fase di lavoro, la linea, il numero di sezioni eseguite e la lunghezza di ciascuna sezione:

AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEA	SEZIONE	LUNGHEZZA SINGOLA SEZIONE (m)	
CARSISMO	1. Zona galleria	A	1	235	
			2	235	
			3	235	
			4	235	
		B	1	235	
			2	235	
			3	235	
			4	235	
		C	1	235	
			2	235	
			3	235	
			4	235	
		D	1	235	
			2	355	
			3	355	
		E	1	355	
			2	355	
			3	355	
		F	1	355	
			2	355	
			3	355	
		G	1	355	
			2	355	
			3	355	
		H	1	355	
			2	355	
			3	355	
		I		1	295
		J		1	355



AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEA	SEZIONE	LUNGHEZZA SINGOLA SEZIONE (m)	
			2	355	
			3	355	
		K	1	295	
		L	1	295	
		M	1	295	
		N	1	295	
		O	1	295	
		P	1	295	
		Q	1	295	
		T	1	295	
		2. Zona galleria Estensione laterale	U	1	335
				2	335
				3	335
			V	1	335
	2			335	
	3			335	
	Z	1	335		
		2	335		
		3	335		
	3. Zona doline Verifica	D1_01	1	295	
		D1_02	1	295	
		D1_03	1	295	
		D2_01	1	355	
		D2_02	1	295	
		D2_03	1	295	
		D2_04	1	295	
	FRANA	1. Zona ospedale	H01	1	295
H02			1	295	
H03			1	295	
<b>SVILUPPO TOTALE</b>			<b>17,770.0</b>		

Ogni tiro è stato ripetuto dalle 8 alle 12 volte per migliorare mediante operazione di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (aumento del rapporto segnale/disturbo).

La planimetria con la posizione delle linee di rilievo ed i risultati ottenuti vengono riportati nelle tavole in allegato (Tavole 2.6E-dB.3.8.02 – 03 – 04 – 05 – 06 – 07 – 08 – 09 – 10 – 11 – 12 – 13-00).

#### 4.3 INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 12 profili di rilievo realizzati con tecnica sismica a riflessione basata sulla velocità di propagazione delle onde di compressione.

Si ricorda che per ciascuna sezione sismica è stata prevista l'opportuna sovrapposizione con le linee adiacenti in modo da avere la copertura ottimale del dato acquisito.

Nella tabella si riporta l'area tematica, la fase di lavoro, la linea, il numero di sezioni eseguite e la lunghezza di ciascuna sezione:



AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEA	SEZIONE	LUNGHEZZA SINGOLA SEZIONE (m)
CARSISMO	1. Zona galleria	C	1	235
			2	235
			3	235
			4	235
		E	1	355
			2	355
			3	355
		G	1	355
			2	355
			3	355
		I	1	295
		K	1	295
		L	1	295
		M	1	295
		N	1	295
		O	1	295
		P	1	295
Q	1	295		
T	1	295		
<b>SVILUPPO TOTALE</b>				<b>5,725.0</b>

Ogni tiro è stato ripetuto dalle 8 alle 12 volte per migliorare mediante operazione di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (aumento del rapporto segnale/disturbo).

La planimetria con la posizione delle linee di rilievo ed i risultati ottenuti vengono riportati nelle tavole in allegato (Tavole 2.6E-dB.3.8.02 – 03 – 04 – 05 – 06 – 07 – 08 – 09 – 10 – 11 – 12 – 13-00).

## 5 ELABORAZIONE DATI

### 5.1 INDAGINI GEOELETTRICHE

L'elaborazione dei dati ha previsto i seguenti step:

1. **Pseudosezione misurata:** rappresentazione 2D dei valori di resistività apparente misurata ottenuta mediante interpolazione geometrica dei dati con contouring.
2. **Filtraggio dati:** la rappresentazione grafica dei dati misurati come sezione 2D attraverso la pseudosezione permette di eliminare eventuali dati anomali. Singoli valori di resistività, corrispondenti dunque ad un unico punto di misura, decisamente superiori o inferiori rispetto ai materiali circostanti sono infatti certamente legati ad un disturbo di sistema e non ad una reale anomalia con corrispondenza nel sottosuolo. Affinché un'anomalia abbia una corrispondenza concreta deve infatti presentare una densità di punti di misura significativa in relazione alla densità della matrice dei dati acquisita, per tale ragione i singoli punti anomali vengono eliminati tramite l'operazione di filtraggio.
3. **Modello diretto:** il modello è stato costruito eliminando tutti i valori inferiori a 1 ohm.m e con un massimo valore di errore pari al 5%. È stato scelto come metodo di elaborazione il metodo agli elementi finiti con equazione di risoluzione Cholewsky.
4. **Modello inverso:** il metodo di inversione scelto è quello dei minimi quadrati smorzati con massimo numero di iterazioni pari a 8 e range di resistività compreso tra 1 e 1000 ohm.m. Come modello iniziale dell'inversione è stata scelta la pseudosezione.
5. **Valutazione del modello:** al fine di eliminare eventuali artefatti matematici al termine dell'inversione tomografica sono stati eliminati per ogni sezione i valori con L2 più elevati. Il valore di L2 cambia in funzione dell'attendibilità geologica del modello ottenuto.
6. **Costruzione sezioni profondità:** il modello ottenuto dall'inversione è stato esportato per ogni linea di rilievo in formato ASCII. I valori di resistività calcolati sono stati rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore). L'algoritmo utilizzato per tale rappresentazione è quello di "triangolazione con interpolazione lineare" con un valore di smoothing (filtro spaziale) medio.
7. **Costruzione modello 3D:** le sezioni tomografiche 2D acquisite sono state assemblate in un modello 3D assegnando a ciascuna linea le corrispondenti coordinate spaziali.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata con i seguenti software:

- punti da 1 a 5: data processing EarthImager 2D (AGI);
- punto 6 e 7: data processing Excel 2007 (Microsoft) - interpolazione matrici 2D Surfer 9 (Golden Software) - rappresentazione grafica AutoCAD LT 2011 (Autodesk).



## 5.2 INDAGINI SISMICHE

### 5.2.1 INDAGINI SISMICHE A RIFRAZIONE

Le linee di sismica a rifrazione sono state analizzate tramite elaborazione tomografica.

#### **TOMOGRAFIA SISMICA**

L'elaborazione in tomografia sismica ha previsto i seguenti step:

##### **1. Definizione dei tempi di arrivo**

I dati acquisiti sono stati convertiti da formato SEG 2 a SU (Seismic Unix) con il software SeisOpt Picker. Utilizzando lo stesso software, sono stati analizzati i film sismici acquisiti e successivamente determinati per ogni traccia i tempi di primo arrivo delle onde compressionali P (FBP - First Break Peak).

##### **2. Elaborazione tomografica**

L'elaborazione tomografica è stata effettuata con il software Rayfract che utilizza il metodo di inversione WET (Wavepath Eikonal Traveltime).

L'algoritmo di inversione utilizza l'approccio basato sulle zone di Fresnel che costituisce un'alternativa ai metodi di inversione basati sul ray tracing.

Gli assunti di base di tale modellizzazione sono:

- ✓ i raggi sismici sono considerati come fronti d'onda sferici;
- ✓ il range di frequenza dell'impulso sismico è considerato finito (condizione rappresentativa della realtà);
- ✓ la perturbazione sismica indotta si propaga in uno spazio finito 3D (zona di Fresnel) attorno al raggio sismico.

L'analisi dei tempi di primo arrivo permette di definire il modello iniziale di velocità (gradiente), attraverso il quale calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Calcolando i tempi residui ( $T_r$ ), ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, viene definita l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale.

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui ( $T_r$ ) e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta accettabile.

I risultati dell'inversione tomografica sono:

- ✓ matrice  $V_p$ ;
- ✓ dromocrone calcolate;
- ✓ valori di RMS dei tempi residui;
- ✓ matrice di copertura (coverage): copertura dei raggi sismici nello spazio indagato;



- ✓ matrice di risoluzione: scostamento del modello finale dal modello iniziale (variazione apportata dal processo tomografico al modello iniziale).

### 3. Restituzione e interpretazione e delle sezioni sismiche

I dati delle matrici Vp sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer. L'algoritmo utilizzato per tale rappresentazione è il kriging con un valore di smoothing (filtro spaziale) basso. Questa funzione di interpolazione spaziale si basa sull'autocorrelazione della grandezza (in questo caso le velocità Vp), cioè l'assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità. Le sezioni ottenute sono state riportate su tavole costruite con il software AutoCAD LT 2011 (Autodesk).

---

#### 5.2.2 INDAGINI SISMICHE A RIFLESSIONE

Per l'analisi dei dati sismici acquisiti in riflessione sono stati utilizzati i software RedExPro (DECO Geophysical) e Visual\_SUNT Pro 21 (W\_GeoSoft). La sequenza di processing per tale tipologia di dati si compone di una successione di operazioni applicate in cascata e organizzate in azioni pre-stack e post-stack.

##### Operazioni pre-stack

---

- ✓ Formattazione dei dati:

I dati ottenuti nel corso dell'indagine sono registrati in formato SEG-2; poiché la dimensione utilizzata nel processing sismico è la SEG-Y, la prima operazione da compiere è adeguare il formato SEG-2 a quello richiesto dal programma di elaborazione.

- ✓ Geometria:

Le coordinate geografiche e le quote di ogni stazione, vengono trasferite nell'header dei record di campagna in modo da assegnare correttamente la collocazione spaziale dei punti di scoppio e delle tracce sismiche.

- ✓ Editing-Controllo della qualità:

La procedura di "tracce editing" rappresenta la fase in cui si esegue l'eliminazione delle tracce mal funzionanti, morte o comunque particolarmente rumorose.

- ✓ Recupero delle ampiezze:

A causa della sua propagazione nel sottosuolo l'onda sismica subisce una progressiva perdita di energia legata alla divergenza sferica (spreading geometrico), all'attenuazione anelastica ed alla ripartizione dell'energia alle interfacce; in termini di traccia sismica ciò si traduce in una diminuzione delle ampiezze con il crescere del tempo di propagazione in profondità e distanza. Per recupero delle ampiezze si intende, quindi, la compensazione del decadimento delle ampiezze che si rende necessaria nelle operazioni di processing per avere un'ottimizzazione dell'immagine.



✓ Filtraggio:

Nel processing sismico il filtraggio rappresenta un'operazione molto importante in quanto permette di ottenere un'attenuazione del rumore coerente ed incoerente e, di conseguenza, l'esaltazione del segnale di interesse.

Le modalità di filtraggio sono tre e la scelta della metodologia da adottare dipende dalle caratteristiche del segnale e del rumore:

- Nel dominio del tempo e delle distanze; si tratta dell'annullamento o del taglio delle ampiezze di porzioni di sezioni nel dominio tempo-spazio (t-x) che presentano del rumore. La tecnica più utilizzata in questo caso è il muting che manualmente o automaticamente permette di eliminare ad esempio il ground roll, l'onda d'aria o il rumore incoerente pre-primi arrivi.
- Nel dominio F-K; impiegato per l'eliminazione del rumore coerente contraddistinto da velocità caratteristiche quali il ground roll (250-330 m/s) o l'onda d'aria (340 m/s).
- Nel dominio delle frequenze; esso è effettuato sulla singola traccia tramite un'analisi di Fourier che permette di identificare le frequenze contenute nel segnale e quindi di applicare un filtro passa alto, passa basso o passa banda che consenta di esaltare le frequenze di interesse.

✓ Sort:

Prima di procedere con l'analisi di velocità e con le operazioni di stack i dati vengono riorganizzati dal dominio shot gather al dominio CDP-gather; per ciascun Common Depth Point-gather le tracce in esso contenute sono associate al medesimo punto medio superficiale.

✓ Analisi di velocità:

L'analisi di velocità mira alla determinazione delle funzioni di velocità che allineano i segnali riflessi nel dominio CDP-gather. Essa rappresenta il passaggio fondamentale che permette la conversione dal dominio del tempo (il sismogramma) al dominio della profondità (la sezione geologica finale).

L'analisi di velocità è essenzialmente una procedura di modellazione inversa in cui la ricerca dei valori di velocità di stack ( $V_{stack}$ ) in funzione della profondità si ottiene per tentativi. Tra le metodologie che si possono adoperare in tale fase del processing ci sono:

- Constant Velocity Stack (CVS);
- Analisi degli spettri di velocità;
- Pannelli di velocità costante (CVP).

✓ Stack delle tracce:

Una volta corrette per la velocità di NMO, sulle tracce appartenenti a ciascun CDP si esegue una somma in fase. In questo modo le riflessioni verranno rinforzate e contemporaneamente si avrà un'attenuazione del rumore grazie all'eliminazione statistica degli eventi non allineati. Tale fase del processing produrrà la cosiddetta sezione stack.



## Operazioni post-stack:

---

✓ Migrazione:

La prima operazione post-stack da compiere nel processing sismico è la migrazione; essa mira al completo recupero della corretta ubicazione spaziale degli eventi contenuti nella sezione stack, ed opera riportando gli orizzonti nella loro posizione reale.

Il processo di migrazione ha lo scopo di far collassare le iperboli di diffrazione che si generano in corrispondenza delle discontinuità degli orizzonti e di riposizionare le superfici pendenti, ripristinando in questo modo le reali geometrie dei riflettori nella sezione tempo.

✓ Correzioni statiche:

Nella sismica a riflessione le tracce sono caratterizzate da una serie di sfasamenti temporali causati dalle variazioni topografiche e dalle variazioni di velocità e spessore dello strato più superficiale del terreno (è lo strato areato o weathered zone). Nel corso del processing sismico i ritardi e gli anticipi nei tempi di primo arrivo legati a tali fattori devono essere collocati in modo tale da poter applicare la giusta correzione a ciascuna traccia sismica; ciò fa sì che i dati vengano ridotti ad un piano di riferimento comune chiamato datum.

✓ Conversione in profondità:

La sezione stack restituisce un'immagine del sottosuolo con scale verticale espressa in tempi doppi (TWTT); essa rappresenta, infatti, il tempo totale impiegato dall'onda sismica per raggiungere una generica superficie di discontinuità posta in profondità e riemergere in superficie dopo la riflessione. La conversione della sezione-tempi in una sezione-profondità avviene attraverso l'applicazione delle velocità medie ottenute dalla precedente analisi di velocità.



## 6 RISULTATI DEL RILIEVO E CONCLUSIONI

Su incarico di SINA S.p.A. sono state realizzate delle indagini geofisiche in corrispondenza del lotto II.6. Roddi – Diga ENEL dell’Autostrada Asti – Cuneo.

In riferimento alla commessa n. A.400.R.100.M5 sono state effettuate le seguenti tipologie d’indagine relative ad eventuali interferenze tra lo scavo della galleria di Verduno e le cavità carsiche presenti in prossimità dell’area oggetto di studio:

- ✓ tomografia elettrica;
- ✓ tomografia sismica a rifrazione (onde di compressione);
- ✓ sismica a riflessione.

La realizzazione del piano d’indagine ha previsto una prima fase, iniziata il 17 Aprile 2012, in cui ci si è occupati di effettuare i sopralluoghi preliminari nell’area d’indagine, contattare ed incontrare i singoli proprietari fondiari al fine di reperire i permessi necessari e di eseguire delle linee di prova grazie alle quali è stato possibile definire la modalità d’acquisizione ottimale.

Effettuato l’inquadramento topografico dell’area in esame mediante l’utilizzo dei capisaldi forniti dalla Committente il 18 Aprile 2012, sono stati definiti gli opportuni accordi con i proprietari dei fondi ed è iniziato il tracciamento delle linee d’indagine.

Una volta terminata l’adeguata predisposizione delle aree di lavoro nel periodo compreso tra il 23 Aprile ed il 19 Luglio 2012 si è potuto procedere con il rilievo geofisico delle linee d’indagine e l’acquisizione dei dati secondo le modalità definite dalla Committente.

Il lavoro è stato sviluppato per aree tematiche in modo tale da conferire omogeneità di significato alle aree indagate. Di seguito si riporta una tabella esplicativa di quanto eseguito:

AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	LINEE D’INDAGINE
<b>CARSISMO</b>	1. Zona galleria	A - B - C - D - E - F - G - H - I - J - K - L - M - N - O - P - Q - R - S - T
	2. Zona galleria - Estensione laterale	U - V - Z
	3. Zona doline - Verifica	D1_01 - D1_02 - D1_03 D2_01 - D2_02 - D2_03 - D2_04
<b>FRANA</b>	1. Zona ospedale	H01 - H02 - H03

Il piano d’indagine è stato quindi sviluppato in modo tale da ottenere informazioni relative alle due principali tematiche riguardanti la zona della Galleria di Verduno.

In particolar modo le acquisizioni in zona di galleria sono state eseguite con l’intento di evidenziare l’eventuale presenza di cavità, a tal proposito è stata decisiva la valutazione di situazioni di carsismo note e la realizzazione di un modello geofisico di raffronto. Tale verifica si è resa possibile grazie alle indagini effettuate in zona doline.



La seconda tematica affrontata per mezzo delle indagini geofisiche riguarda la frana caratterizzante la zona dell'Ospedale Nuovo di Verduno; si tratta di un'area in frana sensibile a processi di detensionamento ed in continua evoluzione risultante per tal motivo di forte interesse.

Per ogni linea d'indagine è stato quindi effettuato il rilievo topografico dei punti di stazione (geofoni, spari, elettrodi) tramite GPS.

Nella presente relazione sono stati riportati la metodologia di indagine, le specifiche tecniche del rilievo, la strumentazione utilizzata e la descrizione dei risultati del rilievo geofisico stesso.

La planimetria delle indagini ed i risultati delle elaborazioni sono riportati negli allegati illustrati nella seguente tabella:

AREA TEMATICA	FASE DI LAVORO	TAVOLA	DESCRIZIONE	LINEE D'INDAGINE
		2.6E-dB.3.8.02-00	PLANIMETRIA GENERALE.	A - B - C - D - E - F - G - H - I - J - K - L - M - N - O - P - Q - R - S - T - U - V - Z - D1_01 - D1_02 - D1_03 - D2_01 - D2_02 - D2_03 - D2_04 - H01 - H02 - H03
CARSISMO	1. Zona galleria	2.6E-dB.3.8.03-00	ZONA GALLERIA. Sezioni di rilievo. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.	A - B - C - D - E - F - G - H - J
		2.6E-dB.3.8.04-00	ZONA GALLERIA. Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.	A - B - C - D - E - F - G - H - J
		2.6E-dB.3.8.05-00	ZONA GALLERIA. Sezioni di rilievo . Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.	I - K - L - M - N
		2.6E-dB.3.8.06-00	ZONA GALLERIA. Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.	I - K - L - M - N
		2.6E-dB.3.8.07-00	ZONA GALLERIA. Sezioni di rilievo . Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.	O - P - Q - T
		2.6E-dB.3.8.08-00	ZONA GALLERIA. Sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione, sismica a riflessione.	O - P - Q - T
	2. Zona galleria - Estensione laterale	2.6E-dB.3.8.09-00	ZONA GALLERIA. Tomografia elettrica. Sezioni orizzontali da modello 3D, sezioni interpretative.	A - B - C - D - E - F - G - H - I - J - K - L - M - O - P - Q - R - S - T U - V - Z
		2.6E-dB.3.8.10-00	ZONA GALLERIA - ESTENSIONE LATERALE. Sezioni di rilievo. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.	U - V - Z
		2.6E-dB.3.8.11-00	ZONA GALLERIA - ESTENSIONE LATERALE. Sezioni di interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.	U - V - Z
	3. Zona doline - Verifica	2.6E-dB.3.8.12-00	ZONA DOLINE. Sezioni di rilievo e sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.	D1_01 - D1_02 - D1_03 D2_01 - D2_02 - D2_03 - D2_04
FRANA	1. Zona ospedale	2.6E-dB.3.8.13-00	ZONA OSPEDALE. Sezioni di rilievo e sezioni interpretative. Tomografia elettrica, tomografia sismica a rifrazione.	H01 - H02 - H03



Nello specifico la tomografia elettrica è stata realizzata con lo scopo di definire i valori di resistività in corrispondenza delle aree selezionate e di individuare delle cross-correlazioni tra le diverse tipologie d'indagine effettuate lungo i diversi allineamenti.

Ai fini di una corretta interpretazione dei risultati ottenuti occorre ricordare che la resistività elettrica dei terreni e delle rocce dipende da numerosi fattori quali il contenuto di fluidi e di minerali, la porosità, il grado di saturazione delle rocce, la conducibilità della soluzione saturante nonché la litologia stessa del terreno o della roccia; da ultimo anche la forma dei pori può influenzare la resistività.

Com'è noto la legge di Archie (1942) stabilisce una stretta dipendenza tra la resistività della roccia, la resistività della soluzione presente nei pori della roccia stessa, vale a dire dell'acqua di imbibizione, la porosità del terreno ed il coefficiente di saturazione. Tale interdipendenza è espressa dalla seguente formula :

$$F = \frac{\rho_r}{\rho_e} = a\phi^{-m}$$

dove:

$\rho_r$  = resistività della roccia

$\rho_e$  = resistività della soluzione presente nei pori della roccia

$\phi$  =porosità

$a$  = coefficiente di saturazione (compreso tra 0.6 e 1.0)

$m$  = fattore di cementazione (compreso tra 1.4 e 2.2), dipendente dalla consolidazione del materiale

In altre parole ciò evidenzia che un significativo grado di fratturazione implichi un aumento del valore di resistività derivante da un incremento del contenuto dei vuoti e dunque della porosità. Allo stesso modo la legge di Archie sottolinea come un aumento del grado di saturazione della roccia, a parità di materiale, si traduca in una diminuzione della resistività misurata.

Infine va ricordato che l'acqua presente nelle rocce e nei suoli è una soluzione elettrolitica di composizione e concentrazione varia (in funzione del tipo di roccia-serbatoio e della sua storia geologica) che influisce sulla resistività del mezzo.

Sulla base di quanto detto è dunque opportuno evidenziare l'importanza, per una maggior completezza di significato, del confronto dei dati geoelettrici acquisiti con dati derivanti da indagini di tipo diretto (rilievo geologico di superficie, sondaggi diretti).

Poiché i fattori che influenzano la resistività sono numerosi ricordiamo quindi che:

- ✓ materiali naturali come le rocce sedimentarie presentano range di resistività variabili da qualche decina di ohm.m fino a  $10^5$  ohm.m (in funzione del grado di fratturazione);
- ✓ materiali naturali di tipo granulare (sabbie e ghiaie) sono caratterizzati da un comportamento fortemente resistivo; in funzione della granulometria dei materiali i valori di resistività variano da 100 fino a 3000-4000 ohm.m;
- ✓ materiali naturali di tipo coesivo (limi e argille) presentano valori di resistività bassi nell'ordine di qualche decina di ohm.m;



- ✓ la resistività dell'acqua nel sottosuolo presenta valori di resistività che variano da 10 a 100 ohm.m (in funzione dei sali disciolti). La presenza di acqua diminuisce i valori di resistività propri del materiale.
- ✓ i processi di alterazione dei materiali naturali provocano una diminuzione dei valori di resistività (ad es. aumentano i minerali delle argille);
- ✓ la presenza di vuoti (es. scavamenti) produce valori di resistività molto elevati avendo il vuoto caratteristiche elettriche di resistività infinita.

La sismica a rifrazione è stata effettuata con lo scopo di fornire una modellizzazione 2D in continuo dell'area in esame al fine di evidenziare l'eventuale presenza di cavità carsiche, inghiottitoi, dissesti, condizioni di instabilità o zone contraddistinte dalla presenza di rocce gessifere che potrebbero essere interessate da processi di dissoluzione.

L'investigazione con tecnica sismica a riflessione permette la modellizzazione degli orizzonti riflettenti caratterizzati da contrasti di impedenza significativi, nonché nel riconoscimento di zone di discontinuità o di fenomeni di variazioni laterali degli orizzonti. Tale metodologia d'indagine consente inoltre di trattare il dato in modo robusto dando risultati affidabili e di qualità lavorando con ogni distribuzione di velocità nel sottosuolo. Le indagini sismiche a riflessione, infine, prevedono l'impiego dell'intera forma d'onda e non solo dei tempi di primo arrivo, il che permette di elaborare informazioni aggiuntive deducibili da ampiezza, frequenza e fase e di ottenere risultati facilmente interpretabili in termini di strutture geologiche anche complesse con un dettaglio non raggiungibile con la tecnica a rifrazione.

L'elaborazione delle sezioni acquisite in tomografia sismica a rifrazione, con tecnica sismica a riflessione e con metodologia geoelettrica è stata seguita da una fase di discussione e successivamente di interpretazione dei dati acquisiti.

Tale fase operativa ha previsto dunque la valutazione di tutte le informazioni a disposizione (cartografia ed indagini geognostiche) e l'integrazione di tali indicazioni con i dati derivanti dalla Nostra indagine geofisica.

Si è quindi proceduto nel seguente modo:

- ✓ Elaborazione dei dati acquisiti nel corso della campagna d'indagine secondo le diverse metodologie e presentazione del modello bidimensionale ottenuto. Nelle tavole in allegato (Tav.le 03 – 05 – 07 – 09 – 10 – 12 – 13-00) tale fase di elaborazione sarà presentata nelle finestre:
  - TOMOGRAFIA ELETTRICA - Sezioni di rilievo;
  - TOMOGRAFIA SISIMICA A RIFRAZIONE - Sezioni di rilievo ;
  - SISIMICA A RIFLESSIONE.
- ✓ Analisi puntuale delle singole sezioni d'acquisizione suddivisa per metodologia d'indagine ed interpretazione delle stesse. Nelle tavole in allegato (Tav.le 04 – 06 – 08 09 – 11 – 12 – 13-00) tale fase interpretativa sarà presentata nelle finestre:
  - TOMOGRAFIA ELETTRICA – Sezione interpretativa;
  - SISIMICA A RIFRAZIONE – Sezione interpretativa;
  - SISIMICA A RIFLESSIONE.

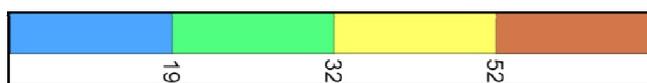


- ✓ Analisi del modello finale tramite integrazione dei risultati ottenuti da tutte le metodologie impiegate nella presente indagine geofisica con le informazioni deducibili dalle indagini pregresse di tipo geologico, geognostico, geofisico.

Di seguito si riportano le tabelle con le unità individuate per mezzo delle indagini geofisiche:

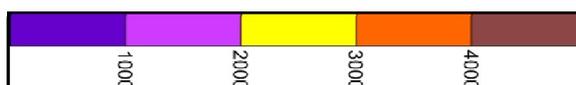
## AREA TEMATICA : CARISMO

### Tomografia elettrica



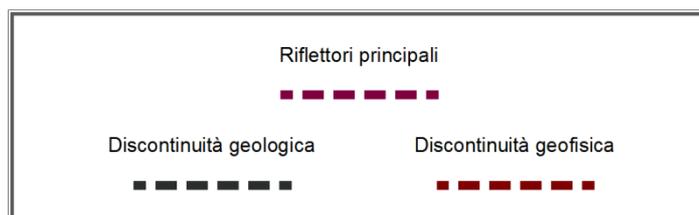
UNITA'	Resistività elettrica (Ohm.m)	Descrizione delle Unità
1	$\rho < 19$	Materiale limoso-argilloso poco consistente, variabile grado di umidità.
2	$19 < \rho < 32$	Materiale argilloso.
3	$32 < \rho < 52$	Roccia gessifera a vario stato di fratturazione ed alterazione.
4	$\rho > 52$	Roccia gessifera maggiormente compatta.

### Tomografia sismica a rifrazione



UNITA'	Velocità P (m/s)	Descrizione delle Unità
1	$V_p < 1000$	Materiale argilloso, copertura.
2	$1000 < V_p < 2000$	Marne gessifere e rocce gessifere a vario stato di fratturazione ed alterazione.
3	$2000 < V_p < 3000$	Rocce gessifere.
4	$3000 < V_p < 4000$	Rocce gessifere maggiormente consistenti.
5	$V_p > 4000$	Marne consistenti.

### Sismica a riflessione



I riflettori principali individuati sono strettamente legati al modello di velocità definito per ciascuna linea sismica investigata con tecnica a riflessione; essi evidenziano le principali variazioni di velocità indicate dal modello stesso.

In legenda viene esplicitata la simbologia scelta al fine di indicare le discontinuità geologiche definite sulla base dell'analisi del modello geologico a Nostra disposizione, nonché quella indicante le discontinuità definite su base geofisica.

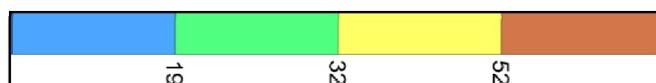
Si ricorda che la dicitura "Area oggetto di interesse" identifica delle aree caratterizzate da una diminuzione dei valori di resistività elettrica individuati aventi dei riscontri nelle indagini di tipo sismico e geognostico. Tali valori di resistività bassi potrebbero essere riconducibili ad un maggior grado di fratturazione e ad una circolazione di fluidi indice della presenza di cavità carsiche o inghiottitoi dal diverso stadio evolutivo.



Area oggetto di interesse

## AREA TEMATICA : FRANA

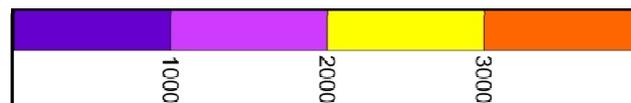
### Tomografia elettrica



UNITA'	Resistività elettrica (Ohm.m)	Descrizione delle Unità
1	$\rho < 19$	Materiale limoso-argilloso poco consistente, variabile grado di umidità.
2	$19 < \rho < 32$	Materiale argilloso poco consistente.

UNITA'	Resistività elettrica (Ohm.m)	Descrizione delle Unità
3	$32 < \rho < 52$	Argilla limosa molto consistente.
4	$\rho > 52$	Substrato a vario grado di fratturazione.

#### Tomografia sismica a rifrazione



UNITA'	Velocità P (m/s)	Descrizione delle Unità
1	$V_p < 1000$	Materiale argilloso, copertura.
2	$1000 < V_p < 2000$	Materiale argilloso molto consistente.
3	$2000 < V_p < 3000$	Argille limose dure.
4	$V_p > 3000$	Substrato roccioso.

L'analisi delle indagini effettuate hanno permesso di osservare quanto segue:

- Le indagini in tomografia elettrica hanno portato all'individuazione del limite litologico tra argille e rocce gessifere (posto ad una profondità variabile comprese tra i 5 ed i 20m).
- La roccia gessifera è caratterizzata da valori di resistività elettrica superiori ai 30 Ohm.m; mentre i materiali argillosi presentano valori di resistività inferiori ai 30 Ohm.m.
- Le linee di rilievo posizionate in corrispondenza delle aree caratterizzate da evidenze morfologiche indicanti la presenza di aree contraddistinte da depressioni carsiche, o inghiottitoi hanno permesso di effettuare una taratura dell'intero sistema d'indagine. In corrispondenza di tali depressioni l'andamento dei valori di resistività si presenta infatti caotico e complesso; esso è generalmente caratterizzato da valori di resistività molto bassi (inferiori ai 20 Ohm.m) indice della presenza di fluidi.

Tali aree campione hanno permesso la caratterizzazione della zona in corrispondenza del cavo di galleria, consentendo l'individuazione di situazioni non stratigrafiche.

Di seguito si riporta una tabella indicante la posizione rispetto inizio linea e le quote entro cui è possibile riconoscere tali aree.

LINEA D'INDAGINE	AREA N.	POSIZIONE RISPETTO INIZIO LINEA (m) da - a	QUOTA DI RIFERIMENTO (m.s.l.m.)
D	1	450 - 468	210 - 238
E	1	655 - 682	225 - 259
F	1	740 - 770	231 - 261
G	1	5 - 22	215 - 202
	2	15 - 55	205 - 170
	3	420 - 442	202 - 228
	4	536 - 566	211 - 240
	5	721 - 742	225 - 260
H	1	10 - 30	208 - 192
	2	340 - 360	230 - 215
	3	364 - 380	232 - 196
	4	482 - 505	207 - 240
	5	675 - 694	230 - 262
J	1	10 - 20	220 - 207
	2	418 - 450	207 - 231
Z	1	30 - 90	178 - 192
	2	520 - 560	227 - 252
	3	638 - 670	240 - 260
D1_01	1	30 - 165	255 - 278
D1_02	1	90 - 210	245 - 280
D1_03	1	50 - 280	255 - 280
D2_01	1	100 - 140	275 - 285
	2	150 - 180	280 - 290
	3	50 - 100	- 245
	4	190 -	- 245
D2_02	1	0 - 40	250 - 265
	2	115 - 140	255 - 265
	3	170 - 210	252 - 268
	4	47 - 97	220 - 245
D2_04	1	40 - 110	267 - 288
	2	127 - 180	270 - 292

- Si ricorda che l'evoluzione di un'area carsica è un processo morfologico complesso che si sviluppa in un arco di tempo estremamente lungo sicuramente maggiore rispetto all'aspettativa di durata dell'opera. Si ritiene quindi che le aree interessate da conformazioni complesse ma da valori di resistività minori rispetto alle rocce gessifere e maggiori di 20 Ohm.m possano essere considerate parte integrante di un complesso sistema carsico in evoluzione, ma agli stadi primordiali. Dunque tali aree non presentano problematiche significative in relazione all'opera.
- Si fa notare che in corrispondenza delle aree campione caratterizzate dalla presenza di depressioni carsiche ed inghiottitoi si identificano dei valori di resistività elevati in superficie; tali valori sono comparabili a quelli delle rocce gessifere e sono legati alla presenza di blocchi di gesso talora affioranti e di materiale detritico caratterizzato da un'elevata componente gessosa.
- L'indagine sismica mostra una corrispondenza con i risultati della tomografia elettrica andando ad individuare il limite stratigrafico tra i materiali argillosi e le rocce gessifere ad una profondità compresa tra i 5 ed i 20m.
- Le indagini sismiche si caratterizzano per la presenza dei maggiori valori di velocità in corrispondenza delle aree più prossime all'imbocco della galleria, ciò è riconducibile ad uno stato di maggior compattezza dell'ammasso roccioso.
- L'indagine sismica in riflessione ha portato all'individuazione di una serie di riflettori principali riconducibili al limite tra argille e rocce gessifere specificato dalle suddette indagini geofisiche.

Essa ha inoltre reso possibile l'identificazione di discontinuità sub verticali riconducibili a possibili zone di debolezza verificando e precisando la posizione dei lineamenti tettonici presenti nell'area.



## 7 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



*Rilievo topografico con sistema GPS.*



*Unità d'acquisizione ARES 200E.*



***Stendimento linea elettrica profilo di rilievo A; elettrodi attivi.***



***Unità d'acquisizione ABEM Terrameter LS.***



***Stendimento linea elettrica profilo di rilievo C; elettrodi passivi.***



***Indagine sismica a rifrazione (profilo di rilievo D).***



*Indagine sismica a riflessione (profilo di rilievo E).*