

S.S. 45bis - Gardesana Occidentale

Opere di costruzione della galleria in variante tra il km 86+567 e il km 88+800 finalizzata a sottendere le attuali gallerie ogivali a sezione ristretta

**PROGETTO DEFINITIVO**

COD. MI92

**PROGETTAZIONE:** ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA:

*Dott. Ing. Antonio Scalamandrè  
Ordine Ing. di Frosinone n. 1063*

IL GEOLOGO

*Dott. Geol. Serena Majetta  
Ordine Geol. di Roma n. 928*

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.

*Dott. Ing. Laura Troiani  
Ordine Ing. di Roma n. 31890*

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

*Geom. Fabio Quondam*

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

*Dott. Ing. Giancarlo Luongo*

PROTOCOLLO

DATA

**GEOLOGIA**

**Documentazione indagini geofisiche**

CODICE PROGETTO		NOME FILE		REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	T00GE00GEORE05A.pdf			
D P M I 0 0 9 2	D 1 8	CODICE ELAB.	T 0 0 G E 0 0 G E O R E 0 5	A	--
D					
C					
B					
A	EMISSIONE	Gennaio 2020	Geol. R. Laureti	Geol. M. Martino	Geol. S. Majetta
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

## DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

ANNO 2017

Impresa esecutrice: **AKRON s.r.l.**



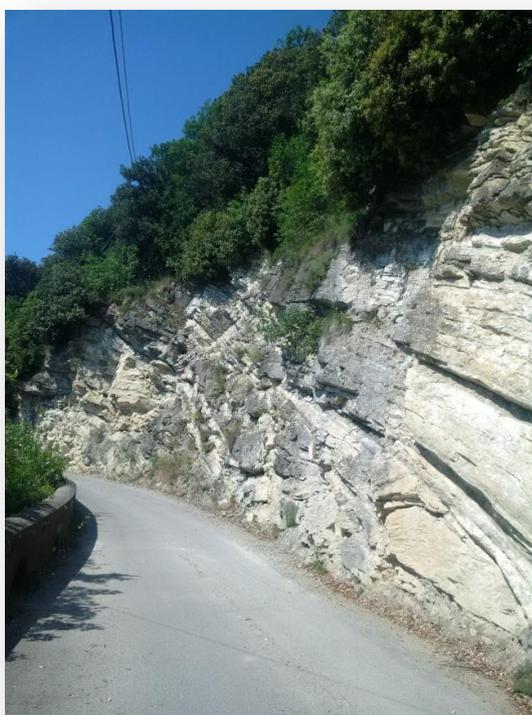
engineering . geophysics . monitoring

## INDAGINI GEOFISICHE

### Indagine sismica a riflessione

**S.S. 45bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+567 al km 88+800**

**Comune di Gargnano (BS)**



<i>Commessa</i>	<i>Committente</i>	<i>Documento</i>
17003	S.In.Ge.A S.r.l.	17003_rel
<i>Redatto da</i>	<i>Revisione</i>	<i>Allegati</i>
	00	sì
<i>Approvato da</i>	<i>Data</i>	<i>Firma</i>
Gianluca Ascari	30/06/2017	

Questo documento è di proprietà di Akron srl e non può essere riprodotto senza specifica autorizzazione scritta di Akron srl

## Sommario

<b>1</b>	<b>Premessa</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Descrizione metodologica</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Indagine sismica</b> .....	<b>4</b>
2.1.1	Inversione tomografica del dato sismico.....	5
2.1.2	Sismica a riflessione.....	8
<b>3</b>	<b>Strumentazione</b> .....	<b>10</b>
<b>3.1</b>	<b>Indagini sismiche</b> .....	<b>10</b>
3.1.1	Acquisizione dati.....	10
3.1.2	Sorgenti.....	10
3.1.3	Ricevitori.....	11
<b>3.2</b>	<b>Rilievo topografico</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Descrizione del rilievo</b> .....	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Elaborazione dati</b> .....	<b>14</b>
<b>5.1</b>	<b>Sismica a riflessione</b> .....	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Risultati del rilievo</b> .....	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Documentazione fotografica</b> .....	<b>19</b>

### Allegati

Rif.	Descrizione
01	Indagine in sismica a riflessione

### Lista di distribuzione

Riferimento	n. copie	
	cartacee	digitali
S.In.Ge.A S.r.l.	-	1

## 1 PREMESSA

Su incarico di S.In.Ge.A S.r.l. sono state realizzate delle indagini geofisiche volte ad indagare il sottosuolo in corrispondenza della S.S. 45bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+567 al km 88+800 Comune di Gargnano, in Provincia di Brescia.

Le indagini geofisiche sono state effettuate in sismica a riflessione mediante l'esecuzione di n.4 linee di rilievo ubicate ove logisticamente possibile rispetto la posizione definita dal committente.

Si precisa che le linee SR2a e SR2b sono sovrapposte di 55 m, pertanto è stato possibile restituire il risultato mediante l'unione delle stesse in un'unica sezione di rilievo della lunghezza totale di circa 655 m.

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva le sezioni eseguite:

ID SEZIONE	Lunghezza (m)
SR1a	289
SR1b	306
SR2a	355
SR2b	355

Per ogni linea di indagine è stato effettuato il rilievo topografico tramite GPS.

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

La planimetria con l'ubicazione delle linee di rilievo ed i risultati delle indagini sono riportate in Allegato (rif.01).

## 2 DESCRIZIONE METODOLOGICA

### 2.1 INDAGINE SISMICA

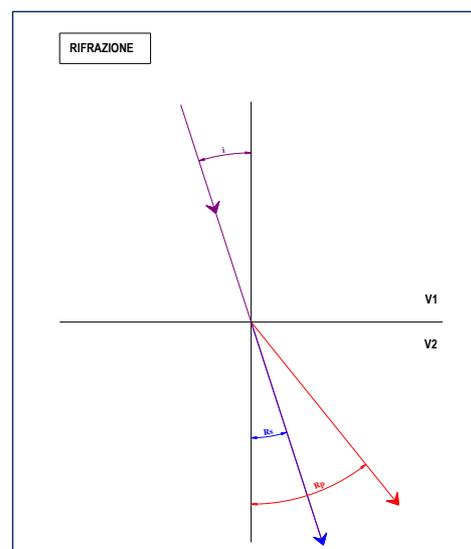
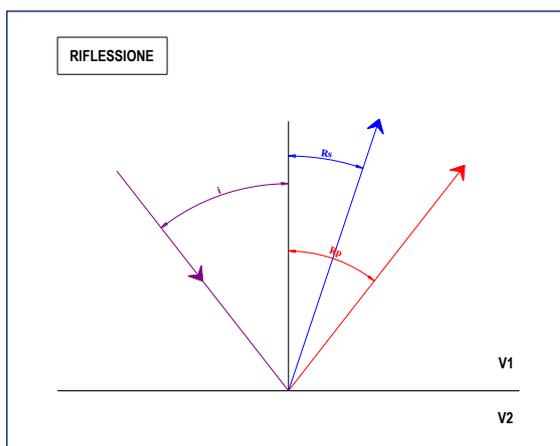
I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e 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.



**Riflessione:** l'angolo di incidenza ( $i$ ) è uguale all'angolo di riflessione dell'onda compressionale P ( $R_p$ ), mentre l'angolo di riflessione dell'onda di taglio S ( $R_s$ ) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\sin(R_s) = \frac{V_s}{V_p} \cdot \sin(i)$$

**Rifrazione:** l'angolo di riflessione dell'onda compressionale P ( $R_p$ ) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_p)} = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$$

L'angolo di riflessione dell'onda di taglio S ( $R_s$ ) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_s)} = \frac{V_{p1}}{V_{s2}}$$

Quando  $\sin(i) = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$  il valore di  $\sin(R_p)$  risulta pari a 1 e l'angolo pari a  $90^\circ$ ; pertanto le onde compressionali rifratte non attraversano il mezzo ma si propagano lungo l'interfaccia. In questo caso si parla di angolo critico e di riflessione totale.

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	$V_p$ (m/s)
Granito	5.000
Calcare	1.500-4.200
Arenaria	1.400-4.000
Sabbie	1.200-1.800
Argilla	1.100-2.500

### 2.1.1 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.

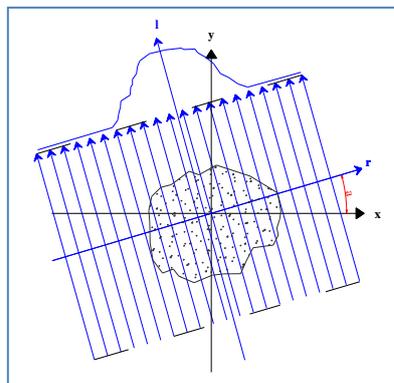
L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

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 ( $M \times N$ ) 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:

$$D_i = t_{obs} - t_{calc} \quad \text{dove} \quad i = 1, 2 \dots N$$

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.

### 2.1.2 SISMICA A RIFLESSIONE

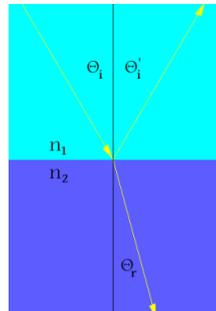
Le indagini a riflessione consentono di definire lungo un profilo indagato, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche presenti e la loro geometria (spessori e superfici di contatto).

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:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_2}{n_1}$$

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

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

### 3.1 INDAGINI SISMICHE

#### 3.1.1 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

#### 3.1.2 SORGENTI

Per le indagini sismiche da superficie 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 4 e le 6 volte.

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

Si ricorda che la generazione delle onde di compressione P e delle onde di taglio S è stata rispettivamente eseguita effettuando un'energizzazione in senso verticale e trasversale rispetto al suolo.

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

### 3.1.3 RICEVITORI

Per le indagini di sismica a rifrazione sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 14 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.

## 3.2 RILIEVO TOPOGRAFICO

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

E' stato utilizzato il sistema GPS Stonex S8N Plus avente le seguenti caratteristiche:

#### ➤ Receiver

- Channels: 120
- Satellite tracked: GPS - Simultaneous L1, L2, L2C, L5. GLONASS - Simultaneous L1,L2; GALILEO - E5a, E5b, Alt-BOC; BeiDou - B1, B2; SBAS - Simultaneous L1 C/A, L5; QZSS (Quasi -Zenith Satellite System); L-Band
- Position Rate: Up to 5Hz
- Signal Reacquisition: <1s
- RTK Signal Initialization <10s
- Hot start: <35s
- Initialization reliability >99.9%
- Internal memory: 256MB
- Micro SD Card: 4 GB Internal Memory (Over 60 days of raw static data storage with recording sample every 1s)

#### ➤ Positioning

- Static
  - Horizontal: 5mm +0.5ppm RMS
  - Vertical: 10mm +0.5ppm RMS
- Static (Long time observations)
  - Horizontal: 3mm +0.1ppm RMS
  - Vertical: 3.5mm +0.4ppm RMS
- Code differential positioning
  - 3D: 0.25m RMS
  - SBAS Positioning: 0.6m 3D RMS<sup>2</sup>

#### ➤ Comunication

- Connectors I/O 7pins Lemo and 5-pins Lemo interfaces. Multicable with USB interface for connecting with PC



- Bluetooth Device: 2.4GHz class II - maximum range 50m
- Reference Outputs: CMR, CMR+, RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1
- Navigation Outputs Navigation output support for NMEA-0183 and detailed NovAtel ASCII and binary logs.

➤ **Integrated GNSS antenna**

- High accuracy four constellation microstrip antenna, zero-phase center, with internal multipath suppressive board

➤ **Internal radio**

- Frequency range: 403-473MHz
- Channel Spacing: 12.5KHz / 25KHz
- Emitting Power: 0.5/1/2W
- Maximum Range: 3-4 Km (urban environment), 5-6 Km with optimal conditions
- Radio Protocol: Transparent EOT/EOC/FST, SATEL, South, Stonex Type 1, TRIMTALK II/IIe, trimmark 3, TRIMTALK 450S.

## 4 DESCRIZIONE DEL RILIEVO

Su incarico di S.In.Ge.A S.r.l. sono state realizzate delle indagini geofisiche volte ad indagare il sottosuolo in corrispondenza della S.S. 45bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+567 al km 88+800 Comune di Gargnano, in Provincia di Brescia.

L'indagine geofisica ha previsto l'esecuzione di n. 4 linee a sismica a riflessione eseguite ove logisticamente possibile rispetto la posizione di progetto. L'obiettivo dell'indagine geofisica è l'esplorazione del sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici.

Si specifica che le linee SR2a e SR2b risultano essere sovrapposte di 55 m pertanto sono state restituite in modalità di rilievo continuo.

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva delle sezioni sismiche eseguite:

ID SEZIONE	Lunghezza (m)
SR1a	289
SR1b	306
SR2a	355
SR2b	355
Lunghezza tot.	1305

La planimetria con la posizione delle linee di rilievo è riportata in allegato (rif.01).

## 5 ELABORAZIONE DATI

### 5.1 SISMICA A RIFLESSIONE

Per l'analisi dei dati è stato utilizzato il software Visual SUNT Pro.

La sequenza di processing per dati sismici a riflessione 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 "trace 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 (Vstack) 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

Su incarico di S.In.Ge.A S.r.l. sono state realizzate delle indagini geofisiche volte ad indagare il sottosuolo in corrispondenza della S.S. 45bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+567 al km 88+800 Comune di Gargnano, in Provincia di Brescia.

L'indagine geofisica ha previsto l'esecuzione delle seguenti linee di rilievo, di cui si riportano le rispettive lunghezze:

ID SEZIONE	Lunghezza (m)
SR1a	289
SR1b	306
SR2a	355
SR2b	355
<b>Lunghezza tot.</b>	<b>1305</b>

L'elaborazione del dato sismico a riflessione ha permesso di individuare un modello del sottosuolo fino ad una profondità di circa 300 m.

L'elaborazione dei dati ha definito un modello di velocità così composto:

STRATO	V (m/s)	T1 (sec)	T2 (sec)	Descrizione
<b>1</b>	800-1200	0.000	0.015	Strato aerato (sciolto)
<b>2</b>	2.600	0.015	0.032	Materiale lapideo (substrato – formazione 1)
<b>3</b>	3.500	0.032	0.150	Materiale lapideo (substrato – formazione 2)
<b>4</b>	>3.500	>0.150		Materiale lapideo ad elevata velocità

Nella tavola allegata (rif.01) sono stati individuati i principali riflettori:

- riflettore 1 – ha profondità variabili tra 40 e 70m da pc e definisce l'interfaccia tra strato 2 e strato 3 ovvero tra formazioni lapidee a differente velocità
- riflettore 2 – ha profondità variabili tra 80 e 140m da pc. Identifica il passaggio a valori di velocità superiori a 3.500 m/sec
- riflettore 3 – identifica possibili variazioni di competenza all'interno dello strato 4. Tali fenomeni possono essere legati o a variazioni composizionali o a variazioni nello stato di conservazione/degrado (meccanico, ovvero fatturazione) all'interno della medesima formazione. L'orizzonte è posizionato a profondità variabili (non è identificabile con continuità) a oltre 160m da pc.

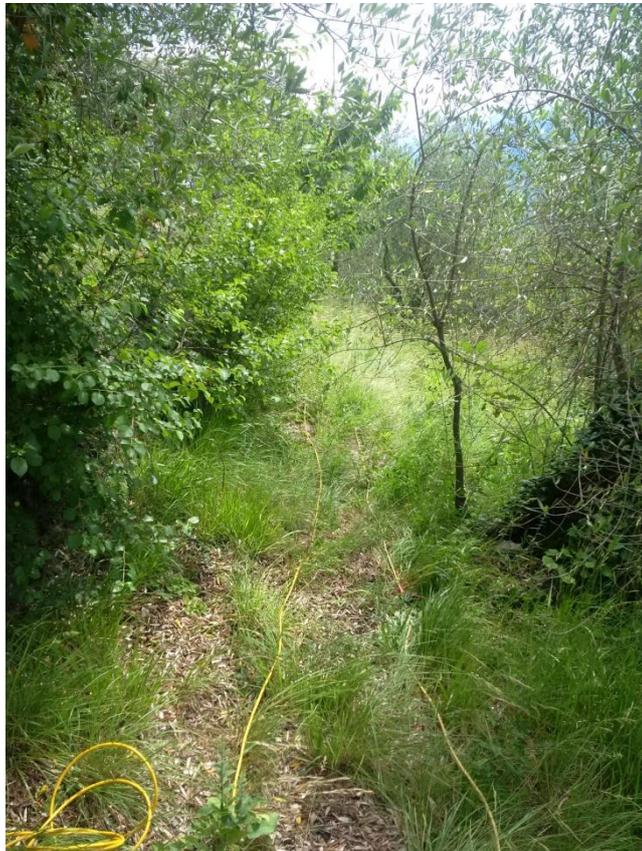
L'interpretazione del dato a riflessione permette di posizionare lineamenti con andamento sub verticale evidenziati da fenomeni di dislocazione dei lineamenti (riflettori) 2 e 3. Appare pertanto ipotizzabile la presenza di lineamenti fagliativi con inclinazione sub verticale ed immersione verso NO che dislocano le formazioni a profondità superiori a 60-70m. Tali lineamenti proseguono sino alle massime profondità investigate stimabili alle quote di 60-80m slm. e sono identificati in tavola con linee tratteggiate (faglie ipotizzate) di colore rosso.

Come citato in precedenza I risultati dell'indagine sono rappresentati nella tavola allegata unitamente all'ubicazione delle linee di rilievo eseguite (rif.01).

## 7 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



*Strumentazione utilizzata*



*Indagine sismica a riflessione*

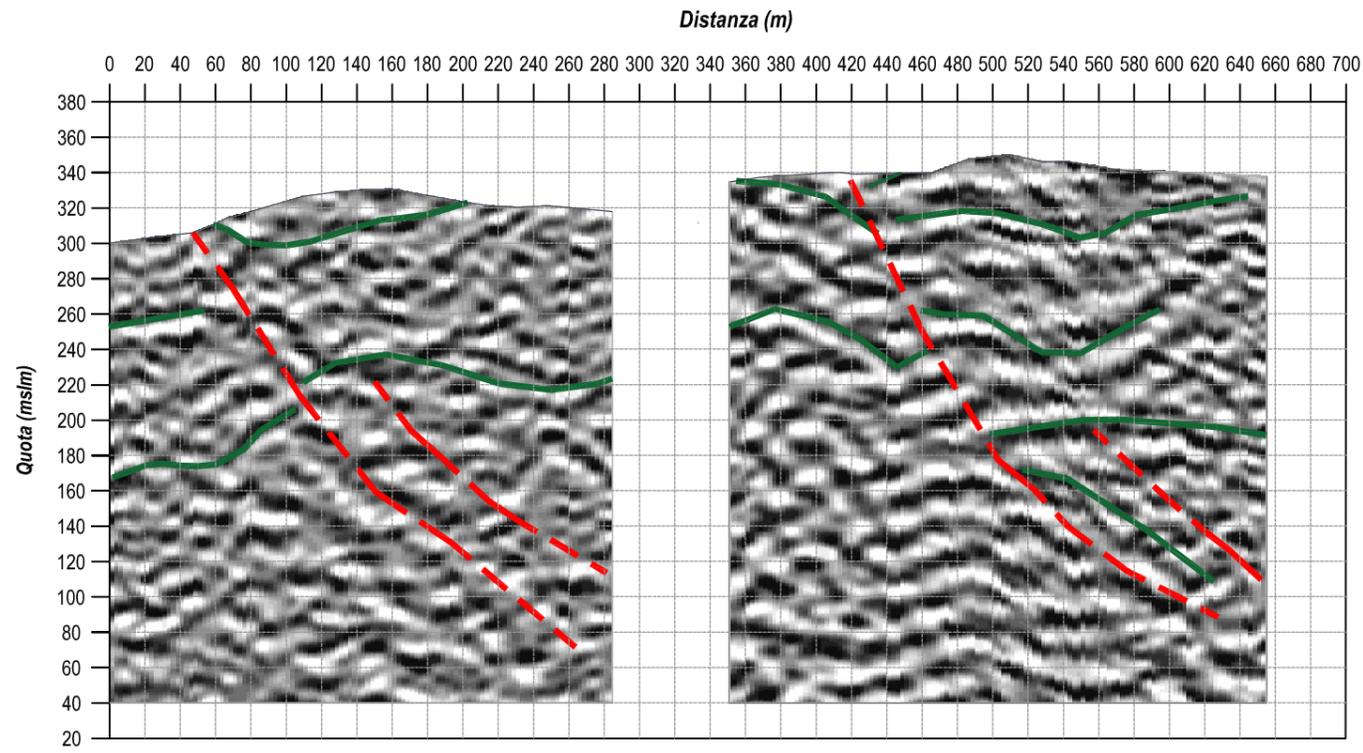


*Indagine sismica a riflessione*

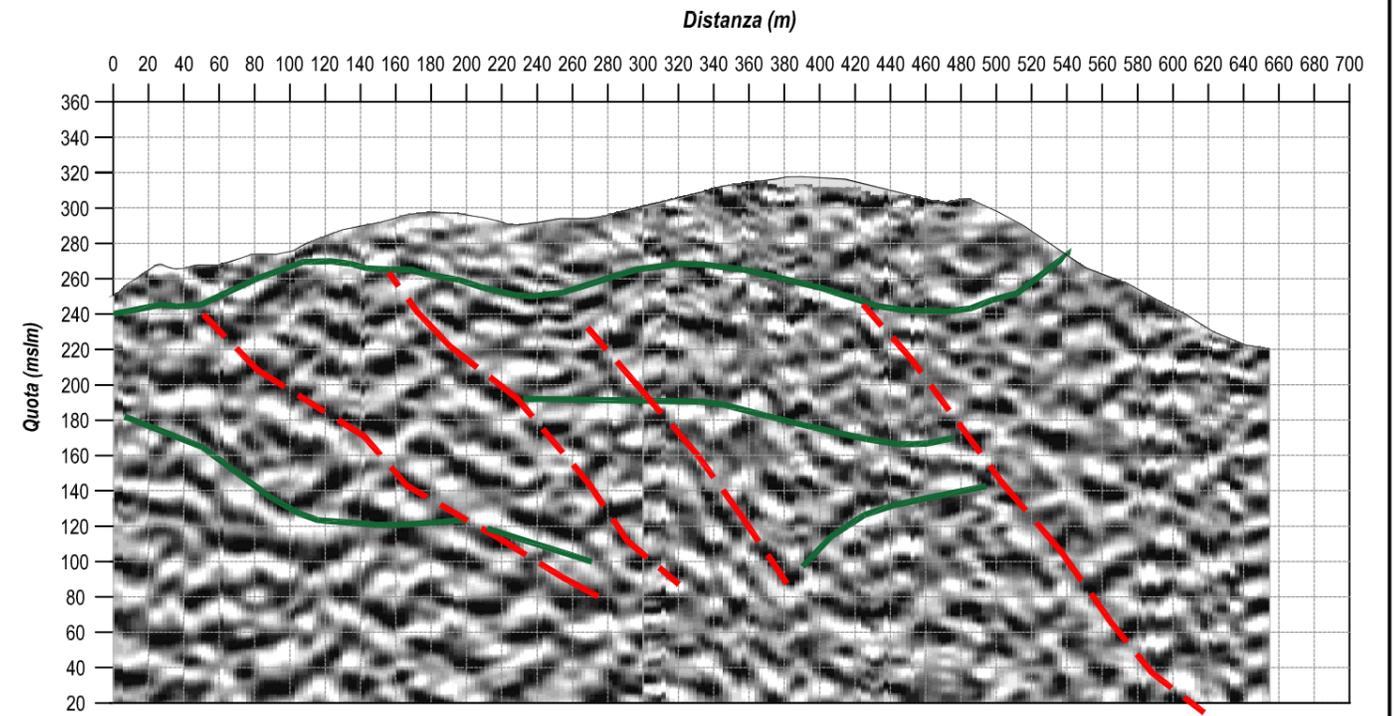
# INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE

SS. 45 bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+567 al km 88+800 - COMUNE DI GARGNANO (BS)

LINEA SR1

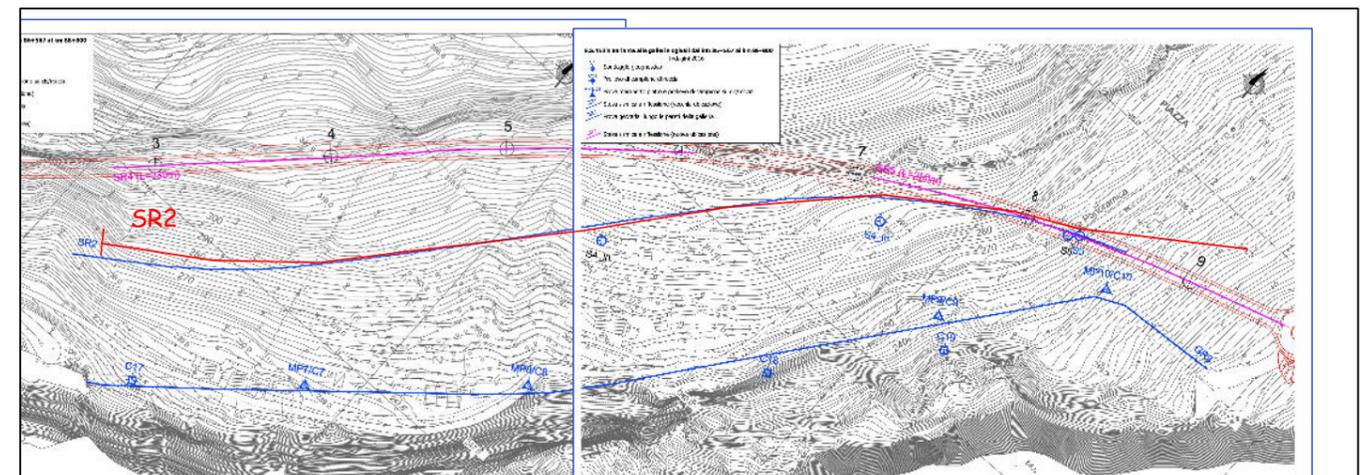
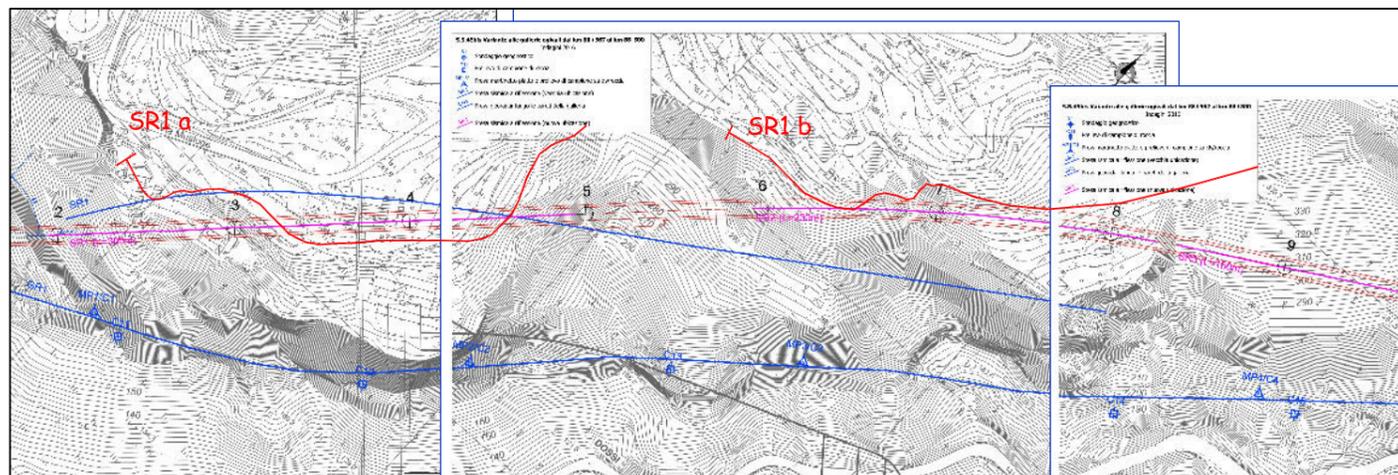


LINEA SR2



sc.: 1:4000

## PLANIMETRIA - UBICAZIONE STENDIMENTI



### LEGENDA



Lineamenti verticali



Riflettore principale



Linea sismica a riflessione

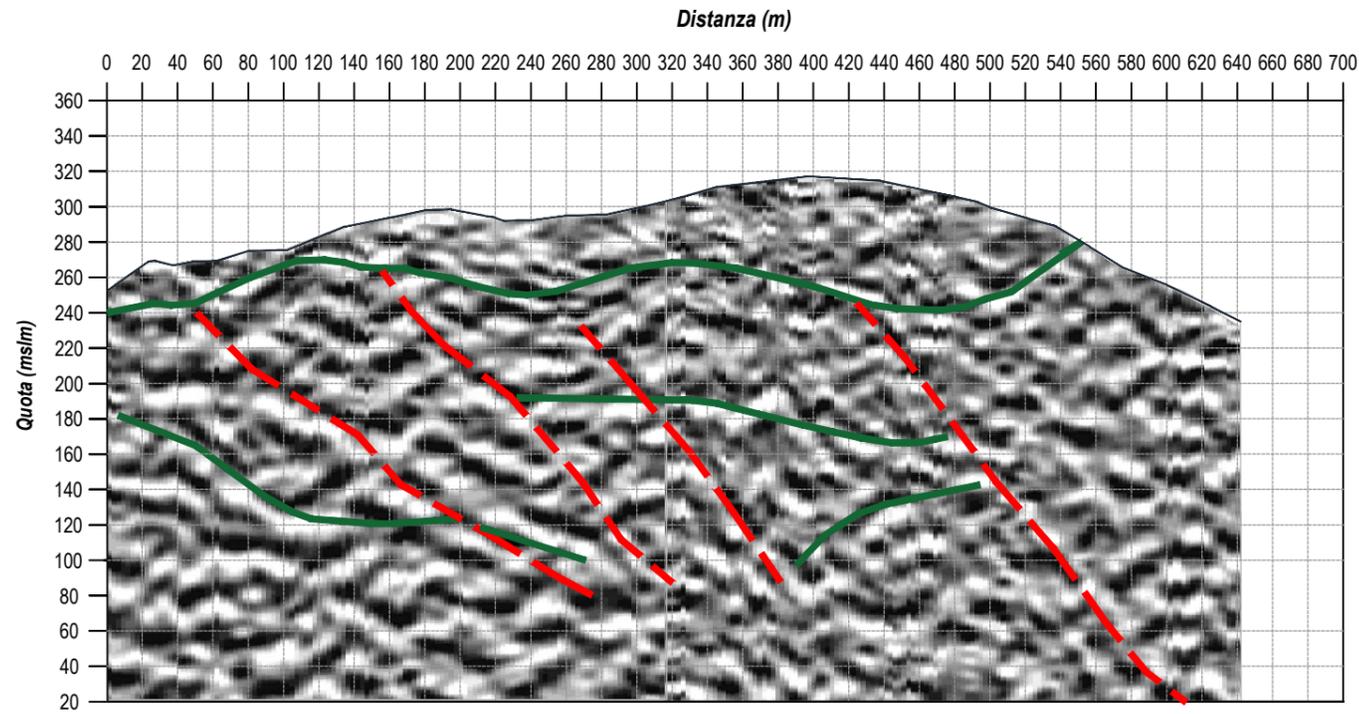


Akron  
engineering. geophysics. monitoring

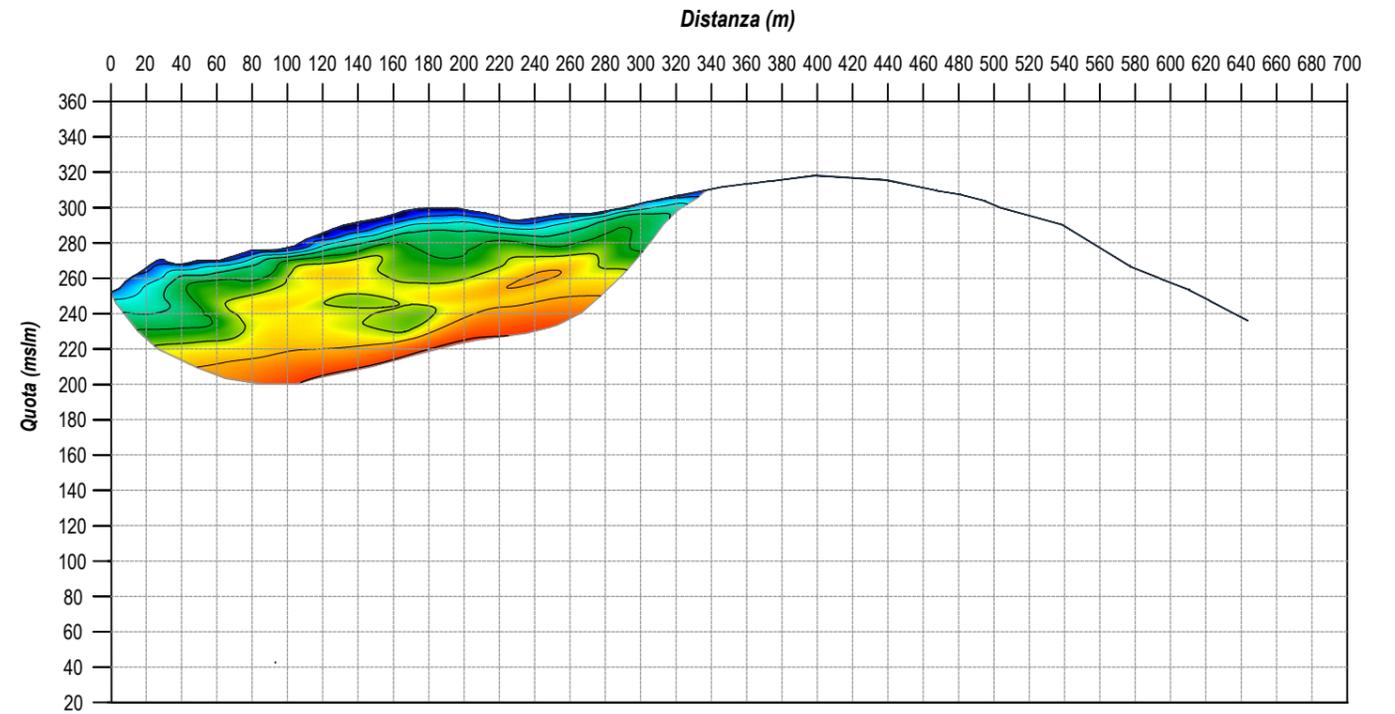
# LINEA SR2

SS. 45 bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+567 al km 88+800 - COMUNE DI GARGNANO (BS)

## INDAGINE SISMICA A RIFLESSIONE

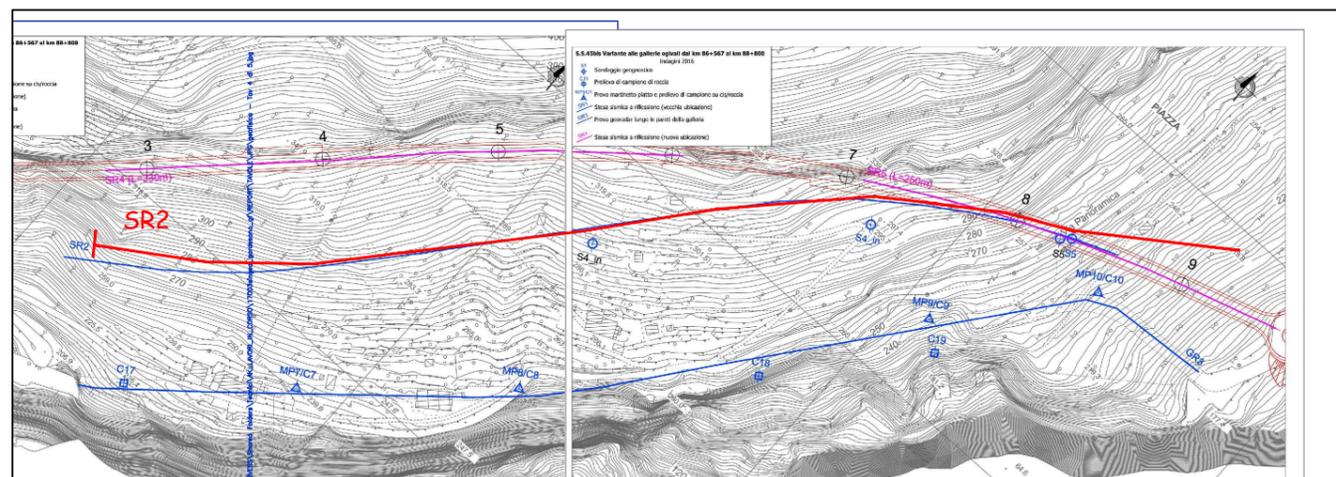


## SEZIONE SISMICA A RIFRAZIONE Vp- linea A



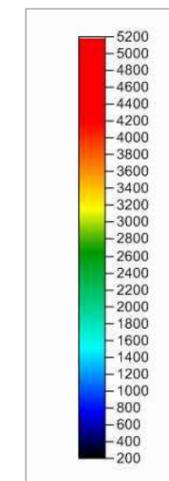
sc.: 1:4000

## PLANIMETRIA - UBICAZIONE STENDIMENTO



## LEGENDA

Vp



-  Linea sismica a riflessione
-  Riflettore principale
-  Lineamenti verticali

## DOCUMENTAZIONE INDAGINI GEOFISICHE

ANNO 2019

Impresa esecutrice: **AKRON s.r.l.**



engineering . geophysics . monitoring

## Tratta SS 45 Bis Gardesana Occidentale

### Indagini geofisiche e geognostiche



<i>Commessa</i>	<i>Committente</i>	<i>Documento</i>
18124	Anas S.p.A.	18124_rel_rev03
<i>Redatto da</i>	<i>Revisione</i>	<i>Allegati</i>
Marta Bergamin	03	Si
<i>Approvato da</i>	<i>Data</i>	<i>Firma</i>
Gianluca Ascari	26/08/2019	

Questo documento è di proprietà di Akron srl e non può essere riprodotto senza specifica autorizzazione scritta di Akron srl

## 1 PREMESSA

Su incarico di Anas S.p.A. sono state eseguite indagini geofisiche e geognostiche presso la tratta SS 45 Bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+560 al km 88+800, Gardesana Occidentale.

Le indagini sono state eseguite nei giorni compresi tra il 7 ed il 20 maggio 2019.

La presente relazione illustra le modalità di prova ed i risultati delle indagini eseguite come segue:

- Indagini geofisiche:
  - indagine sismica a rifrazione (onde P e onde S)
  - indagine sismica a riflessione
  - Indagine down-hole

Le modalità, le quantità e il posizionamento delle indagini hanno seguito le prescrizioni fornite dal committente e sono descritte nella presente relazione.

I risultati completi sono riportati in allegato come segue:

- Allegato 01: Planimetria
- Allegato 02: Indagini geofisiche: indagine sismica a rifrazione (Vp e Vs) e riflessione
- Allegato 03: Indagine down-hole

## 2 METODOLOGIE DI PROVA E STRUMENTAZIONE

Nel presente capitolo si descrivono le metodologie di prova utilizzate e la relativa strumentazione utilizzata.

## 2.1 INDAGINE SISMICA

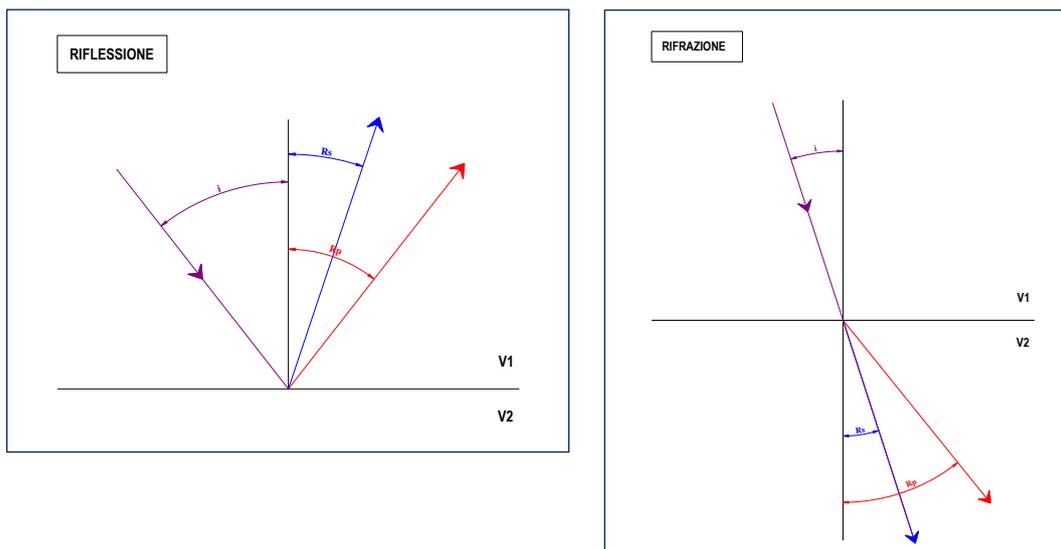
I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e 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.



**Riflessione:** l'angolo di incidenza ( $i$ ) è uguale all'angolo di riflessione dell'onda compressionale P ( $R_p$ ), mentre l'angolo di riflessione dell'onda di taglio S ( $R_s$ ) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\sin(R_s) = \frac{V_s}{V_p} \cdot \sin(i)$$

**Rifrazione:** l'angolo di riflessione dell'onda compressionale P ( $R_p$ ) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_p)} = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$$

L'angolo di riflessione dell'onda di taglio S ( $R_s$ ) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_s)} = \frac{V_{s1}}{V_{s2}}$$

Quando  $\sin(i) = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$  il valore di  $\sin(R_p)$  risulta pari a 1 e l'angolo pari a  $90^\circ$ ; pertanto le onde compressionali rifratte non attraversano il mezzo ma si propagano lungo l'interfaccia. In questo caso si parla di angolo critico e di riflessione totale.

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	$V_p$ (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

### 2.1.1 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.

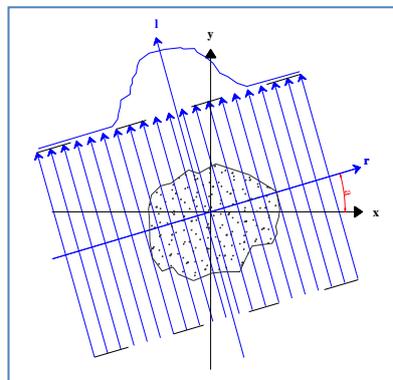
L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

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:

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

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

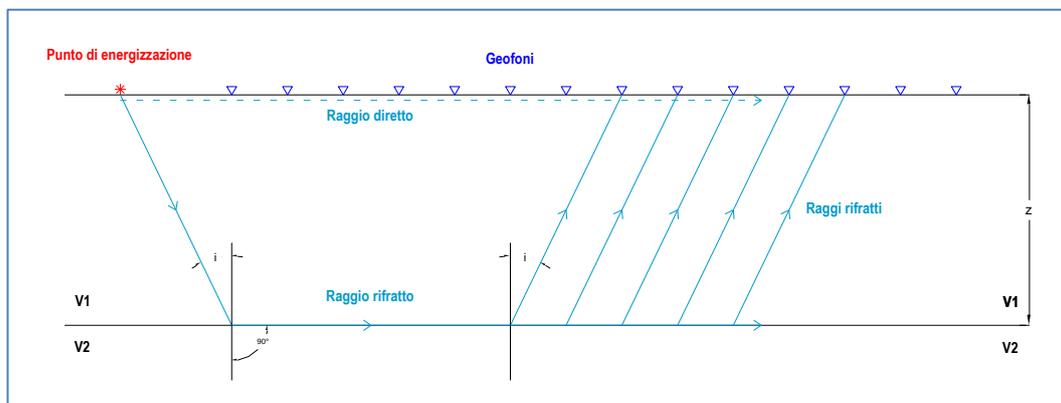
$$\Delta v = |v_a - v_m|$$

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

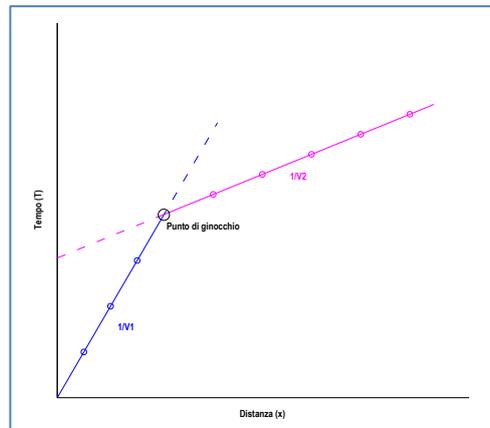
Al fine di evitare artefatti matematici senza corrispondenza fisica e geologica, le dimensioni della cella devono risultare inferiori alle dimensioni dell'anomalia, inoltre occorre tenere in considerazione il numero di raggi che attraversano le celle, i quali a loro volta dipendono dalla distanza sorgente-ricevitore,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

### 2.1.2 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 differente 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.

### 2.1.2.1 ACQUISIZIONE DATI

I dati sono stati acquisiti con sismografi GEODE della Geometrics dotati 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

### 2.1.2.2 SORGENTI

Per le indagini sismiche da superficie 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 4 e le 6 volte.

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

Si ricorda che la generazione delle onde di compressione P e delle onde di taglio S è stata rispettivamente eseguita effettuando un'energizzazione in senso verticale e trasversale rispetto al suolo.

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

### 2.1.2.3 RICEVITORI

Per le indagini di sismica sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 14 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.

### 2.1.3 SISMICA A RIFLESSIONE

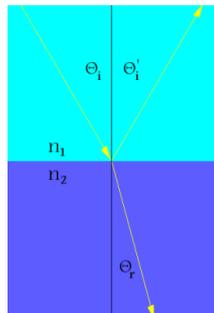
Le indagini a riflessione consentono di definire lungo un profilo indagato, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche presenti e la loro geometria (spessori e superfici di contatto).

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 da 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.

### 2.1.3.1 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

### 2.1.3.2 SORGENTI

Per le indagini sismiche da superficie 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 4 e le 6 volte.

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

Si ricorda che la generazione delle onde di compressione P e delle onde di taglio S è stata rispettivamente eseguita effettuando un'energizzazione in senso verticale e trasversale rispetto al suolo.

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

### 2.1.3.3 RICEVITORI

Per le indagini di sismica a rifrazione sono stati utilizzati geofoni con asse verticale con frequenza pari a 14 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.

## 2.1.4 RILIEVO TOPOGRAFICO

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

E' stato utilizzato il sistema GPS Stonex S8N Plus avente le seguenti caratteristiche:

### ➤ **Receiver**

- Channels: 120
- Satellite tracked: GPS - Simultaneous L1, L2, L2C, L5. GLONASS - Simultaneous L1,L2; GALILEO - E5a, E5b, Alt-BOC; BeiDou - B1, B2; SBAS - Simultaneous L1 C/A. L5; QZSS (Quasi -Zenith Satellite System); L-Band
- Position Rate: Up to 5Hz
- Signal Reacquisition: <1s
- RTK Signal Initialization <10s
- Hot start: <35s
- Initialization reliability >99.9%
- Internal memory: 256MB
- Micro SD Card: 4 GB Internal Memory (Over 60 days of raw static data storage with recording sample every 1s)

### ➤ **Positioning**

- Static
  - Horizontal: 5mm +0.5ppm RMS
  - Vertical: 10mm +0.5ppm RMS
- Static (Long time observations)
  - Horizontal: 3mm +0.1ppm RMS
  - Vertical: 3.5mm +0.4ppm RMS
- Code differential positioning
  - 3D: 0.25m RMS
  - SBAS Positioning: 0.6m 3D RMS<sup>2</sup>

### ➤ **Comunication**

- Connectors I/O 7pins Lemo and 5-pins Lemo interfaces. Multicable with USB interface for connecting with PC
- Bluetiith Device: 2.4GHz class II - maximum range 50m
- Reference Outputs: CMR, CMR+, RTCM 2.1, 2.3, 3.0, 3.1
- Navigation Outputs Navigation output support for NMEA-0183 and detailed NovAtel ASCII and binary logs.

### ➤ **Integrated GNSS antenna**

- High accuracy four constellation microstrip antenna, zero-phase center, with internal multipath suppressive broad

### ➤ **Internal radio**

- Frequency range: 403-473MHz
- Channel Spacing: 12.5KHz / 25KHz
- Emitting Power: 0.5/1/2W
- Maximum Range: 3-4 Km (urban environment), 5-6 Km with optimal conditions
- Radio Protocol: Trasparent EOT/EOC/FST, SATEL, South, Stonex Type 1, TRIMTALK II/Ile, trimmark 3, TRIMTALK 450S.

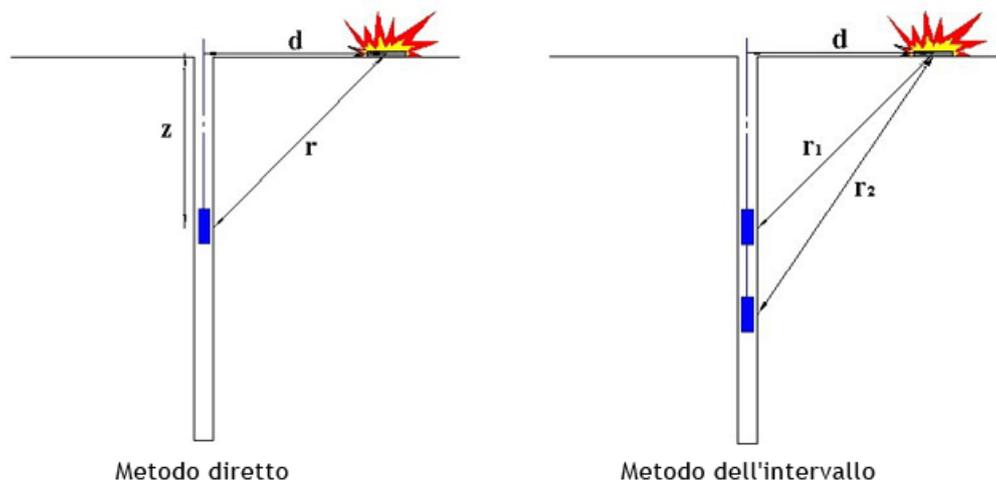
## 2.1.5 INDAGINE DOWN-HOLE

Lo scopo della prova sismica consiste nel determinare la velocità di propagazione delle onde di volume, di compressione (onde P) e di taglio (S), misurando il tempo che esse impiegano nel tragitto tra la sorgente, posta in superficie, e i ricevitori, posti all'interno di fori di sondaggio, considerando nota la distanza sorgente-ricevitori.

Le modalità di esecuzione della prova sono state le seguenti:

- posizionamento e bloccaggio del ricevitore (in foro) a fondo foro;
- generazione dell'impulso da superficie (con eventuale somma di più impulsi) su piastra di battuta e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di compressione;
- generazione dell'impulso da superficie (con eventuale somma di più impulsi) su blocco per la generazione di impulsi di taglio e registrazione dei tempi di arrivo delle onde di taglio;
- ripetizione delle medesime operazioni con posizione del doppio geofono da foro in risalita per ogni mezzo metro di profondità

L'analisi dei dati sismici provenienti da una prova Down Hole consiste nel diagrammare i tempi di tragitto  $t$  misurati lungo il percorso sorgente-ricevitore in funzione della profondità  $z$ . Le procedure di interpretazione della prova sismica possono essere ricondotte a due tipologie principali di metodo: metodo diretto e metodo intervallo.



### *Metodi di interpretazione della prova sismica Down Hole*

Poiché le onde sismiche prodotte dalla sorgente, data la sua posizione, non si propagano esattamente in direzione verticale rispetto ai ricevitori è necessario correggere i tempi di arrivo stimati per tenere conto dell'inclinazione del percorso effettivo.

Indicata con  $z$  la profondità del ricevitore, con  $d$  la distanza effettiva tra sorgente e ricevitore, con  $R$  la distanza superficiale tra sorgente e centro del foro e con  $t$  il tempo determinato dalle tracce di registrazione, la velocità corretta risulta:

$$V = \frac{\sqrt{z^2 + d^2}}{t}$$

Dividendo infatti la distanza (inclinata) per il tempo misurato si ricavano i valori di velocità per ciascuno dei ricevitori in corrispondenza di ciascuna delle profondità considerate (metodo diretto).

È anche possibile ricavare le velocità dividendo la differenza tra due profondità corrispondenti a due ricevitori collegati rigidamente e i tempi di arrivo rilevati per una singola battuta (metodo dell'intervallo).

### 2.1.5.1 ACQUISIZIONE DATI

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

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

### 2.1.5.2 SORGENTI

In merito alle indagini down hole come sorgenti di energia sono state utilizzate:

- Massa battente costituita da un martello avente massa da 10 kg utilizzato da un operatore (energizzazione verticale per la generazione di onde di compressione P).
- Sistema di energizzazione per il taglio con pendolo avente massa pari 35 kg (energizzazione orizzontale per la generazione di onde di taglio S).

Anche in questo caso l'impulso viene generato in superficie e l'istante di trigger è fornito da un geofono posizionato in prossimità del punto di battuta.

### 2.1.5.3 RICEVITORI

Nel caso delle indagini Down Hole per la ricezione delle onde di compressione e di taglio viene utilizzato un doppio geofono triassiale da foro.



Si tratta del modello DDS della Geotomographie con frequenza pari a 10 Hz dotato di unità di controllo e sistema di ancoraggio pneumatico alle pareti del foro. I geofoni sono sensori di tipo elettromagnetico che generano una tensione proporzionale alla velocità della perturbazione sismica.

Il sistema è costituito da 2 geofoni triassiali (assi x-y-z) con interdistanza pari a 2m.

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 DESCRIZIONE DEL RILIEVO

Nel presente capitolo si riportano le modalità e le quantità di rilievo eseguite per ogni tipologia di indagine.

#### 3.1 INDAGINI GEOFISICHE

##### 3.1.1 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE E RIFLESSIONE

L'indagine geofisica ha previsto l'esecuzione di n.2 linee di rilievo in sismica a rifrazione Vp, sismica a rifrazione Vs e sismica a riflessione. L'obiettivo delle indagini geofisiche è l'esplorazione del sottosuolo per riconoscere l'assetto stratigrafico e strutturale dei corpi geologici.

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva delle sezioni sismiche eseguite:

ID SEZIONE	INTERDISTANZA GEOFONICA (m)	LUNGHEZZA (m)	SISMICA A RIFRAZIONE VP e Vs	SISMICA A RIFLESSIONE
L1	2,0	94.0	x	x
L2	2,5	117.5	x	x

La planimetria con la posizione delle linee di rilievo è riportata in allegato, unitamente ai risultati (rif.08).

##### 3.1.2 INDAGINE DOWN HOLE

Con lo scopo di determinare la velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, nonché di effettuare una valutazione di parametri quali il rapporto Vp/Vs, coefficiente di Poisson ( $\rho$ ), modulo di Young ( $E$ ) e modulo di taglio ( $G$ ), sono state effettuate n.1 prove down-hole in corrispondenza del sondaggio indicato dalla Committente (S10).

Per la ricezione delle onde di compressione P e di taglio S è stato utilizzato un doppio geofono triassiale da foro con interdistanza tra i due punti di ricezione pari a 2m.

Ogni tiro è stato ripetuto almeno una volta 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).

Nella tabella seguente si riporta la codifica e la lunghezza della prova eseguita. I risultati sono riportati in allegato (rif.09).

SONDAGGIO	LUNGHEZZA (m)
S10	18
<b>TOTALE</b>	<b>18</b>

## 4 RISULTATI DEL RILIEVO

Su incarico di Anas S.p.A. sono state eseguite indagini geofisiche e geognostiche presso la tratta SS 45 Bis Variante alle gallerie ogivali dal km 86+560 al km 88+800, Gardesana Occidentale.

Le indagini sono state eseguite nei giorni compresi tra il 7 ed il 20 maggio 2019.

La presente relazione illustra le modalità di prova ed i risultati delle indagini eseguite come di seguito riportato:

- Indagini geofisiche:
  - indagine sismica a rifrazione
  - indagine sismica a riflessione
  - Indagine down-hole

Le modalità, le quantità e il posizionamento delle indagini hanno seguito le prescrizioni fornite dal committente e sono descritte nella presente relazione.

I risultati completi sono riportati in allegato come segue:

- Allegato 01: Planimetria
- Allegato 02: Indagini geofisiche: sismica a rifrazione e riflessione
- Allegato 03: Indagine down-hole

Si descrivono nei capitoli seguenti i risultati ottenuti da ogni indagine effettuata.

### 4.1 INDAGINI GEOFISICHE

#### 4.1.1.1 INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE E RIFLESSIONE

L'indagine geofisica ha previsto l'esecuzione delle seguenti linee di rilievo, di cui si riportano le rispettive lunghezze:

Si riporta di seguito la tabella riassuntiva delle sezioni sismiche eseguite:

ID SEZIONE	INTERDISTANZA GEOFONICA (m)	LUNGHEZZA (m)	SISMICA A RIFRAZIONE VP E VS	SISMICA A RIFLESSIONE
L1	2,0	94.0	x	x
L2	2,5	117.5	x	x

La planimetria con la posizione delle linee di rilievo è riportata in allegato, unitamente ai risultati (rif.07).

L'elaborazione del dato sismico a rifrazione ha permesso di individuare un modello del sottosuolo fino ad una profondità di circa 20 m per la sismica a rifrazione e circa 80 m per la sismica a riflessione.

L'elaborazione dei dati in sismica a rifrazione ha individuato velocità delle onde di compressione comprese tra 600-3800 m/sec e velocità delle onde di taglio comprese tra 100-2000 m/sec. In dettaglio:

- **Strato 1:** valori di velocità delle onde P < 1.000 m/sec (e Vs < 340 m/sec) sono stati riscontrati nei primi metri di sottosuolo (circa 5-8 m da piano campagna);
- **Strato 2:** Valori di velocità delle onde di compressione comprese tra 1.000-3.000 m/sec (e Vs comprese tra 340 – 1300 m/sec) sono state individuate tra 8-12 m da piano campagna;
- **Strato 3:** Valori di velocità delle onde P superiori a 3.000 m/sec (e Vs > 1350 m/sec) si riscontrano a profondità superiori a 12 m.

L'analisi delle sezioni sismiche ha messo in evidenza un decremento laterale nei valori di velocità delle onde P e delle onde S a partire da 40 m da inizio linea, sino a circa 60 m.

L'interpretazione del dato a riflessione ha permesso di individuare i seguenti riflettori principali, in entrambe le sezioni sismiche:

- **riflettore 1** – ha profondità variabili tra 5-10 m da pc e definisce l'interfaccia tra strato 1 e strato 2;
- **riflettore 2** – ha profondità variabili tra 8 e 12m da pc. Identifica il passaggio a valori di velocità delle onde P superiori a 3.000 m/sec
- **Lineamenti verticali:** l'interpretazione del dato a riflessione permette di posizionare lineamenti con andamento sub verticale evidenziati nelle sezioni in sismica a rifrazione da un decremento laterale nei valori di velocità delle onde di compressione e di taglio. Tali lineamenti sono identificati in tavola con linee tratteggiate di colore rosso.

Come citato in precedenza I risultati dell'indagine sono rappresentati nella tavola allegata unitamente all'ubicazione delle linee di rilievo eseguite (rif.08).

#### 4.1.1.2 INDAGINE DOWN-HOLE

Le indagini down hole sono state eseguite in corrispondenza del foro di sondaggio S10.

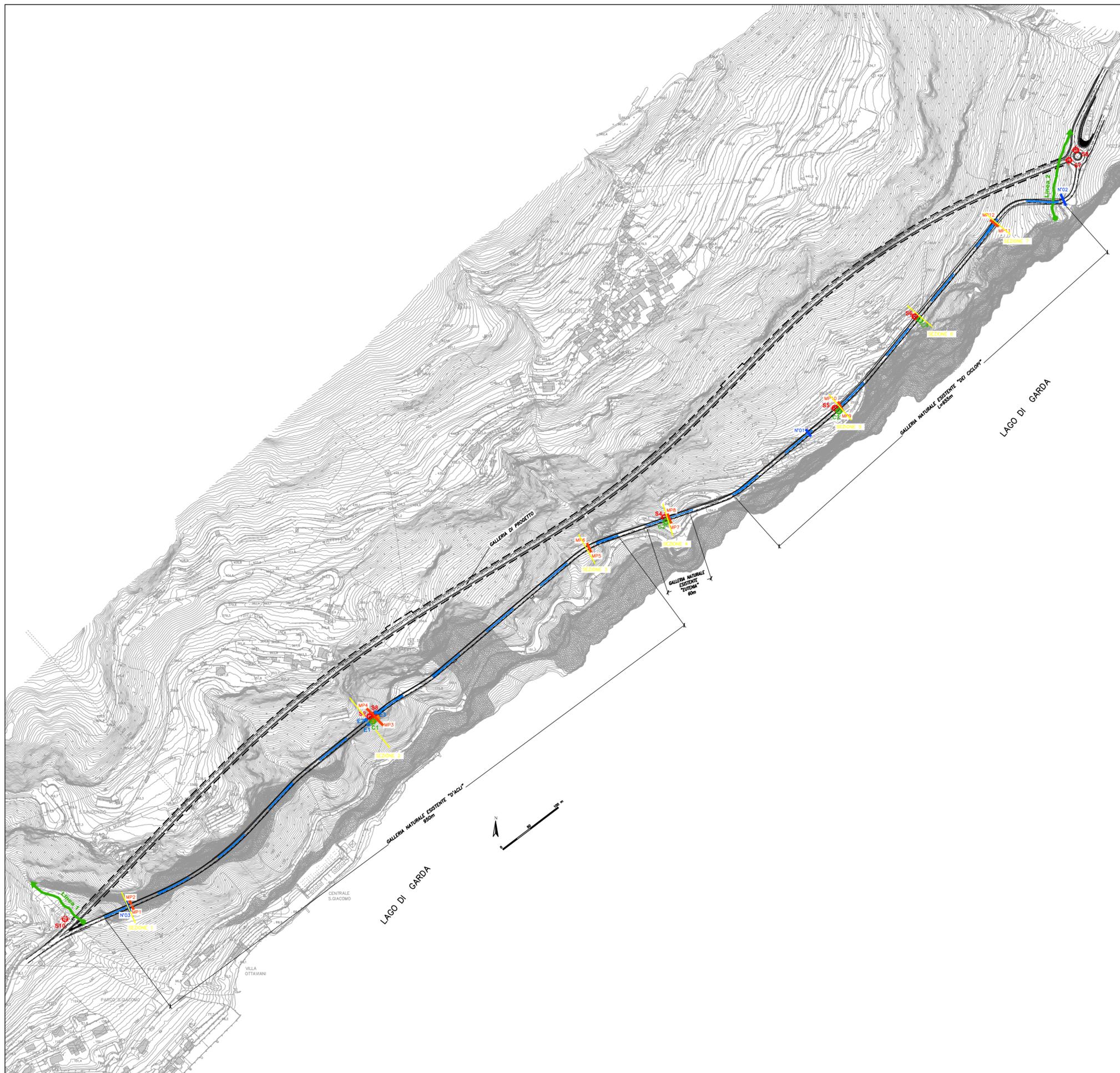
In merito all'indagine di tipo down-hole si fa presente che per il calcolo dei moduli dinamici E e G è stato utilizzato un valore medio di densità pari a 20.0 kN/m<sup>3</sup>.

L'indagine down-hole mostra valori di velocità di propagazione delle onde di compressione superiori a 600 m/sec fino a valori di velocità massimi pari a circa 3400 m/sec (onde di taglio superiori 210 m/sec sino a massimi di 2000 m/sec). Velocità delle onde di compressione superiori a 1000 m/sec si riscontrano ad una profondità di circa 10 m da quota sondaggio; tale incremento è ricondotto all'interfaccia tra materiale granulare a vario stato di addensamento e materiale roccioso fratturato.

I risultati completi sono riportati in allegato (rif.09).

## ALLEGATO 01

### *Planimetria*



LEGENDA	
N	RILIEVO GEOSTRUTTURALE
MP	MISURA DELLO STATO TENSIONALE (MARTINETTO PIATTO)
	SONDAGGIO CON ESTRAZIONE CAMPIONI
	CAROTAGGIO CON ESTRAZIONE CAMPIONI
	ENDOSCOPIA
	GEORADAR SU RIVESTIMENTO
	GEORADAR SU PAVIMENTAZIONE
	INDAGINI GEOFISICHE

TABELLA RIEPILOGATIVA QUANTITA' ESEGUITE

PROVE DI MARTINETTO PIATTO			
GALLERIA	UBICAZIONE (m da imbocco sud)	LATO LAGO	LATO MONTE
D'ACLI	43.5	MP1	MP2
	482.0	MP3	MP4
	879.0	MP5	MP6
EUTENA	30.0	MP7	MP8
CICLOPI	198.0	MP9	MP10
	545.0	MP11	MP12

SONDAGGI ESTERNI			
ID	IMBOCCO NORD	IMBOCCO SUD	DIREZIONE
S7	x		orizzontale
S9	x		orizzontale
S10		x	verticale

SONDAGGI			
GALLERIA	UBICAZIONE (m da imbocco sud)	LATO LAGO	LATO MONTE
D'ACLI	480.5		S2
	484.0		S8 (inclinato 18°)
	30.5		S4
CICLOPI	196.5		S5
	370.5		S6

PROSPEZIONI GEORADAR SU RIVESTIMENTO		
GALLERIA	POSIZIONE SEZ.	TOTALE (m da imbocco sud)
D'ACLI	lato monte	900.0
	chiave di colotta	900.0
	lato valle	929.0
CICLOPI	lato monte	430.0
	chiave di colotta	430.0
	lato valle	650.0
EUTENA	lato monte	66.0
	chiave di colotta	66.0
	lato valle	66.0

CAROTAGGI			
GALLERIA	UBICAZIONE (m da imbocco sud)	LATO LAGO	LATO MONTE
D'ACLI	480.0	C1	
EUTENA	30.0	C2	
CICLOPI	196.0	C3	
	370.0	C4	

PROSPEZIONI GPR SU PAVIMENTAZIONE STRADALE		
GALLERIA	TRATTA DA IMBOCCO SUD (m)	ANTENNA
D'ACLI	478 - 486 m	600/200 MHz
	478 - 486 m	3 GHz

ENDOSCOPIE			
GALLERIA	UBICAZIONE (m da imbocco sud)	LATO LAGO	LATO MONTE
D'ACLI	478.0	E1	
	478.0		E2
	484.0		E3

RILIEVO GEOMECCANICO			
GALLERIA	UBICAZIONE (m da imbocco sud)	LATO LAGO	LATO MONTE
CICLOPI	140.0		N°01
	655.0 (imbocco nord)		N°02
D'ACLI	40.0	N°03	

**Tratta SS 45 Bis Gardesana Occidentale**

**PLANIMETRIA**  
Ubicazione indagini

1:4.000



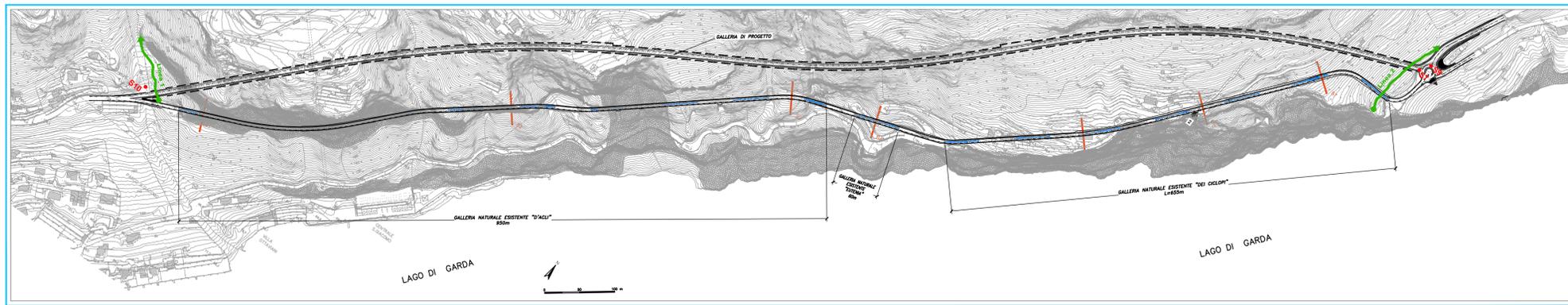
Akron  
engineering geomatics monitoring

ANAS

00

## ALLEGATO 02

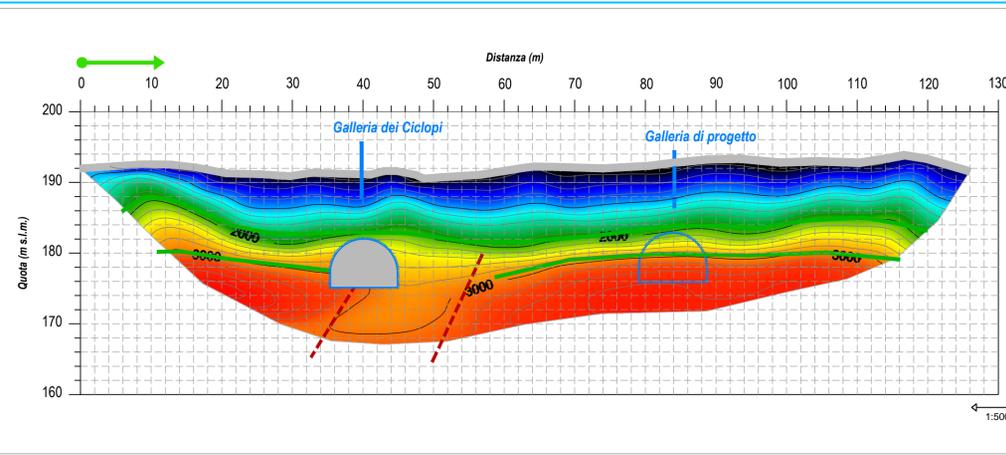
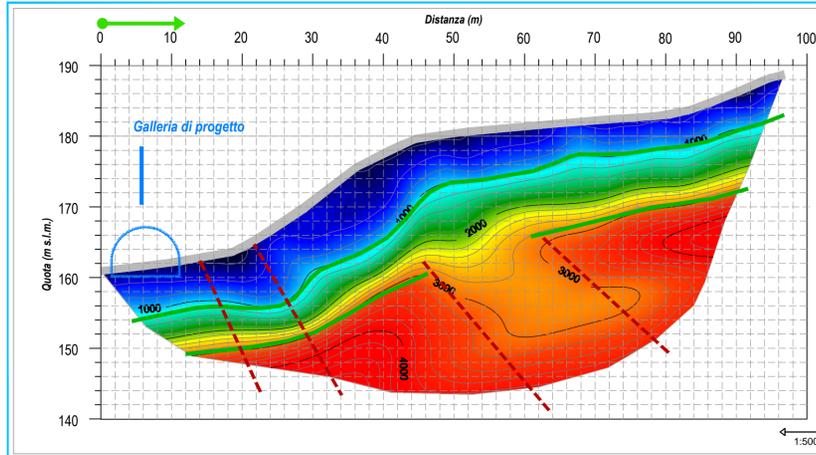
### *Indagini geofisiche*



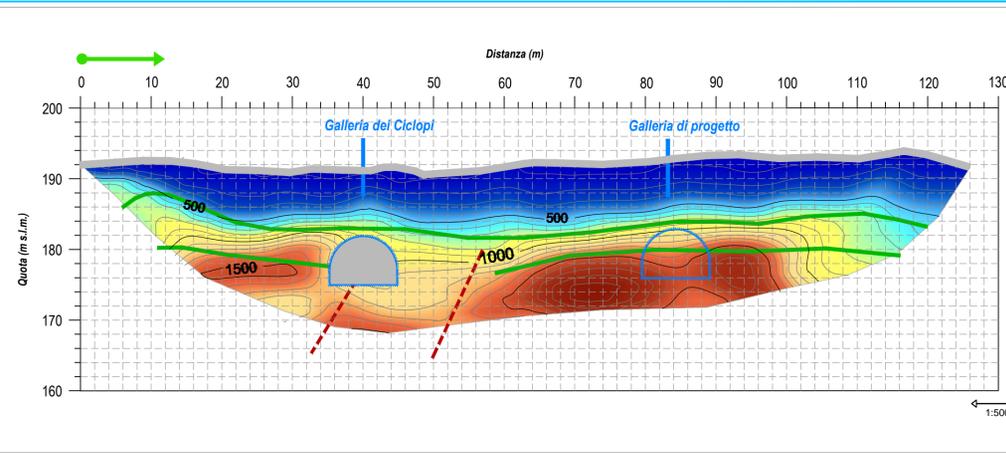
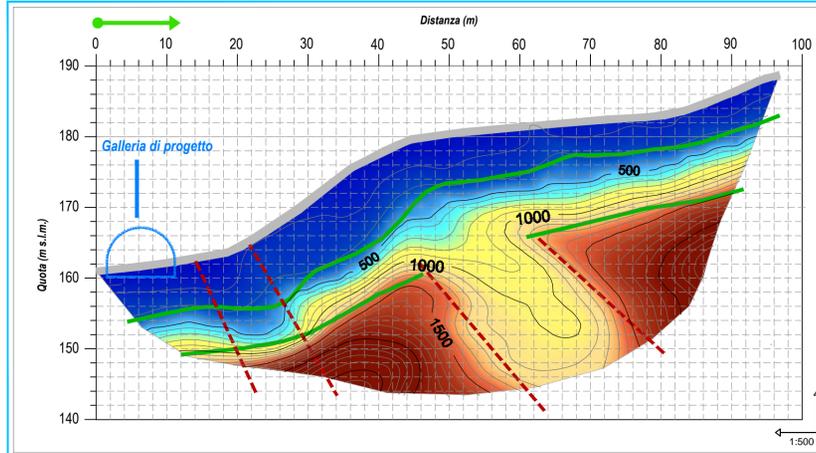
LINEA 1

LINEA 2

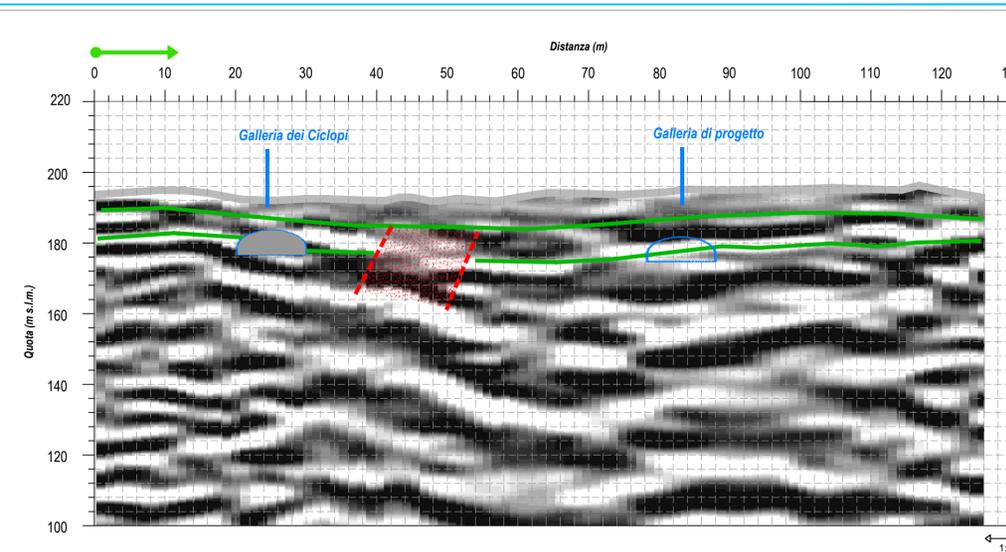
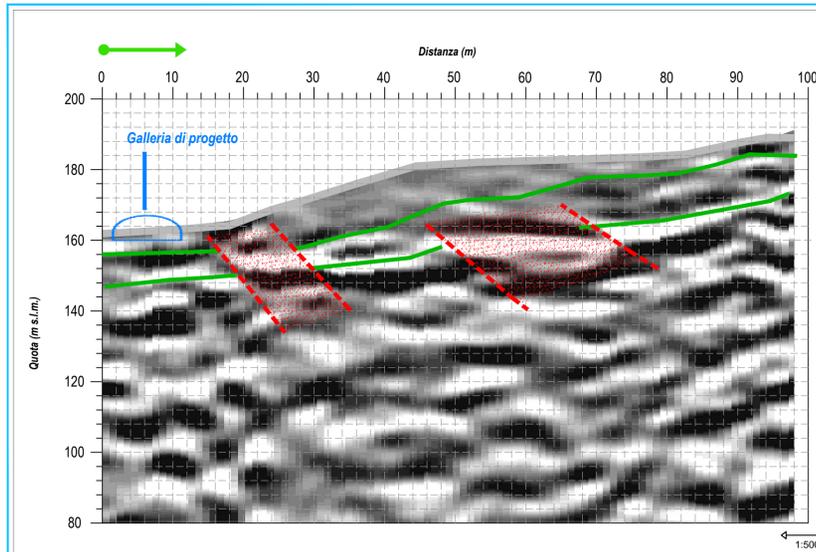
SISMICA A RIFRAZIONE ONDE P



SISMICA A RIFRAZIONE ONDE S



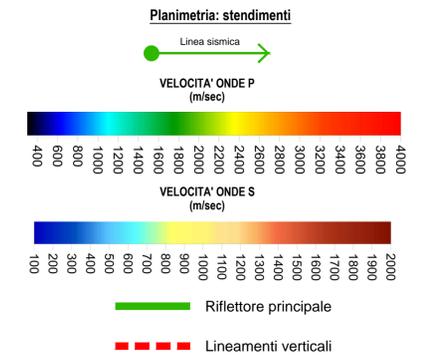
SISMICA A RIFLESSIONE



DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



LEGENDA



GARDESANA  
Tratta SS 45 Bis Gardesana Occidentale

Indagini Geofisiche



DATA	20.05.19	27.08.19		
EMISSIONE / REVISIONE	00	01	02	03
REDATTO	BERGAMIN	BERGAMIN		
APPROVATO	ASCARI	ASCARI		
Sismica a rifrazione onde P. Sismica a rifrazione onde S. Sismica a riflessione.				TAVOLA <b>01</b>
COMMITTENTE ANAS				SCALA 1:500 1:1000
Akron servizi per geologia, ingegneria, ambiente				COMMESSA 18124

Via Di Vittorio 24 - 20030 Rovello Mastaglio (MI)  
www.akronservizi.it - info@akronservizi.it  
tel. 0362 559922 - fax 0362 392834

*Indagini down-hole*

INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

<b>CANTIERE</b>	Gardesana
<b>COMMESSA</b>	18124
<b>DATA</b>	20/05/19

<b>CODICE PROVA</b>	DH
<b>DISTANZA</b>	1.00 m

Depth	D	Tp	Ts	Vp	Vs	Vp/Vs	$\gamma$	$\nu$	Edin	Gdin
1.0	1.41	0.0010	0.0181	697	214	3.26	20.0	0.45	269	93
2.0	2.24	0.0022	0.0219	707	216	3.28	20.0	0.45	275	95
3.0	3.16	0.0034	0.0269	766	185	4.14	20.0	0.47	206	70
4.0	4.12	0.0045	0.0310	829	235	3.52	20.0	0.46	329	113
5.0	5.10	0.0056	0.0339	899	334	2.69	20.0	0.42	647	228
6.0	6.08	0.0066	0.0361	979	451	2.17	20.0	0.37	1134	415
7.0	7.07	0.0076	0.0385	1051	410	2.57	20.0	0.41	965	342
8.0	8.06	0.0084	0.0407	1139	451	2.53	20.0	0.41	1167	415
9.0	9.06	0.0092	0.0424	1208	602	2.01	20.0	0.33	1972	738
10.0	10.05	0.0100	0.0439	1312	637	2.06	20.0	0.35	2224	826
11.0	11.05	0.0105	0.0449	2011	1008	1.99	20.0	0.33	5518	2071
12.0	12.04	0.0110	0.0459	1973	996	1.98	20.0	0.33	5378	2023
13.0	13.04	0.0115	0.0468	2100	1108	1.90	20.0	0.31	6539	2501
14.0	14.04	0.0119	0.0477	2239	1121	2.00	20.0	0.33	6823	2560
15.0	15.03	0.0123	0.0484	2696	1386	1.95	20.0	0.32	10337	3914
16.0	16.03	0.0127	0.0491	2525	1444	1.75	20.0	0.26	10690	4252
17.0	17.03	0.0130	0.0497	3055	1666	1.83	20.0	0.29	14586	5661
18.0	18.03	0.0133	0.0502	3391	1997	1.70	20.0	0.23	20072	8128
<b>maximum</b>		0.0133	0.0502	3391	1997	4.14		0.47	20072	8128
<b>minimum</b>		0.0010	0.0181	697	185	1.70		0.23	206	70
<b>average</b>		0.0086	0.0398	1643	803	2.41		0.36	4952	1914
<b>standard deviation</b>		0.0039	0.0099	869	557	0.70		0.07	5725	2283

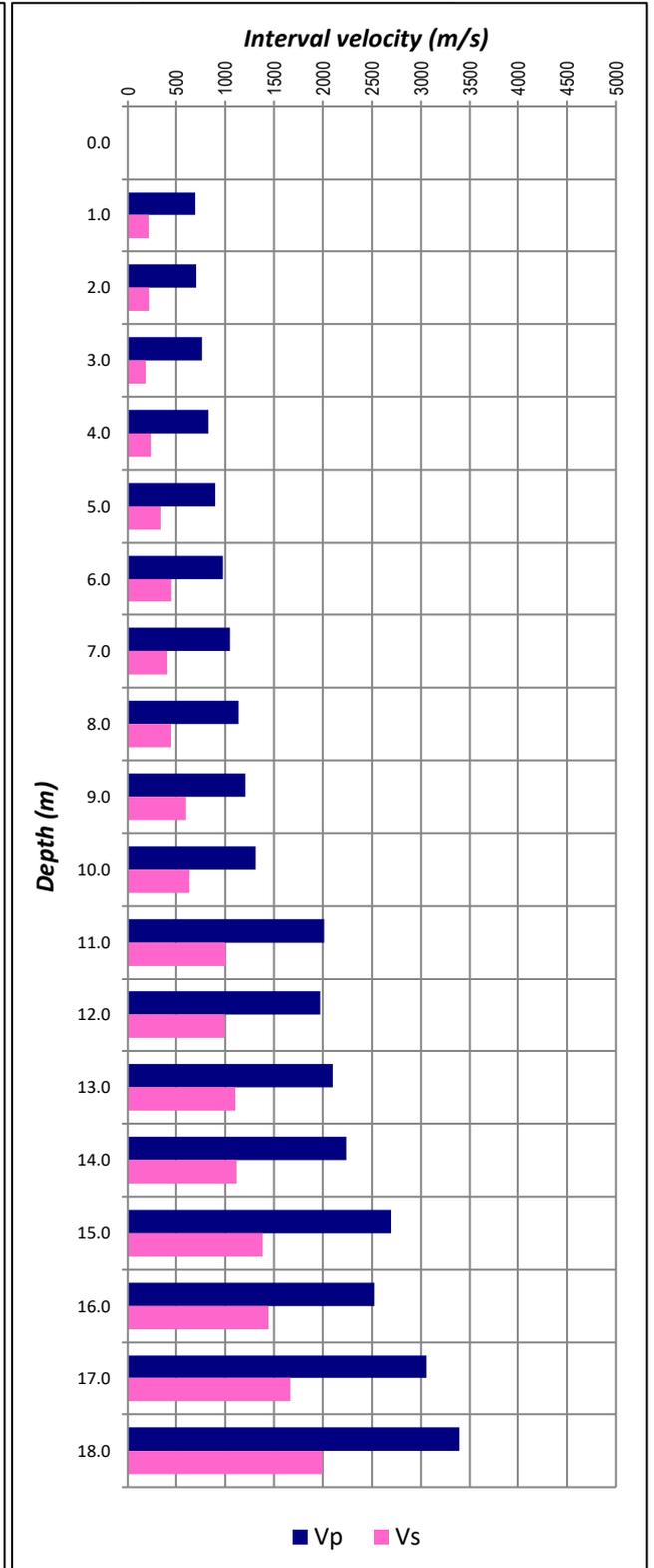
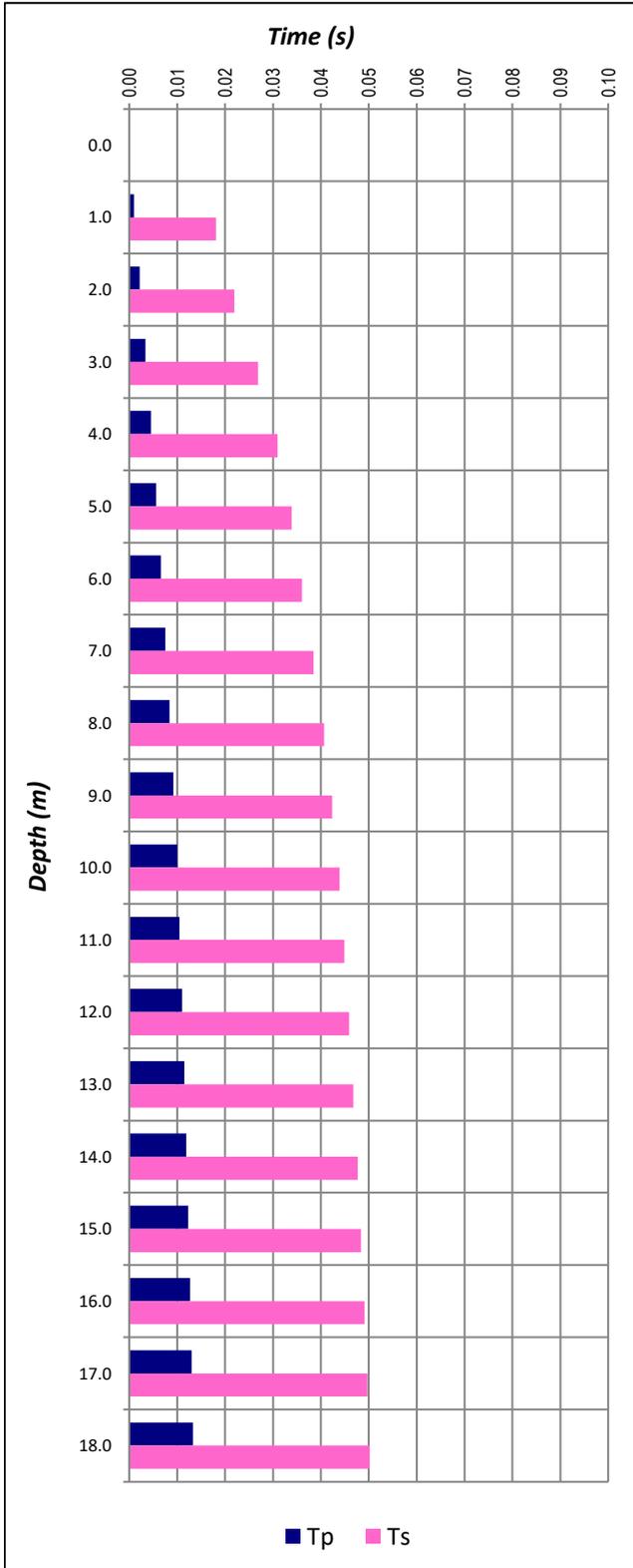
PARAMETER	DEFINITION	UNIT OF MEASUREMENT
<b>Depth</b>	depth from land surface	<i>m</i>
<b>D</b>	distance between source and receiver	<i>m</i>
<b>Tp</b>	P waves arrival time	<i>s</i>
<b>Ts</b>	S waves arrival time	<i>s</i>
<b>Vp</b>	P waves interval velocity	<i>m/s</i>
<b>Vs</b>	S waves interval velocity	<i>m/s</i>
<b>Vp/Vs</b>	P velocity and S velocity ratio	
<b><math>\gamma</math></b>	density	<i>kN/m<sup>3</sup></i>
<b><math>\nu</math></b>	Poisson's ratio	
<b>Edin</b>	Dynamic elastic modulus	<i>MPa</i>
<b>Gdin</b>	Dynamic shear modulus	<i>MPa</i>

# INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

<b>CANTIERE</b>	Gardesana
<b>COMMESSA</b>	18124
<b>DATA</b>	20/05/19

<b>CODICE PROVA</b>	DH
<b>DISTANZA</b>	1.00 m

<i>Time profile</i>	<i>Velocity profile</i>
---------------------	-------------------------

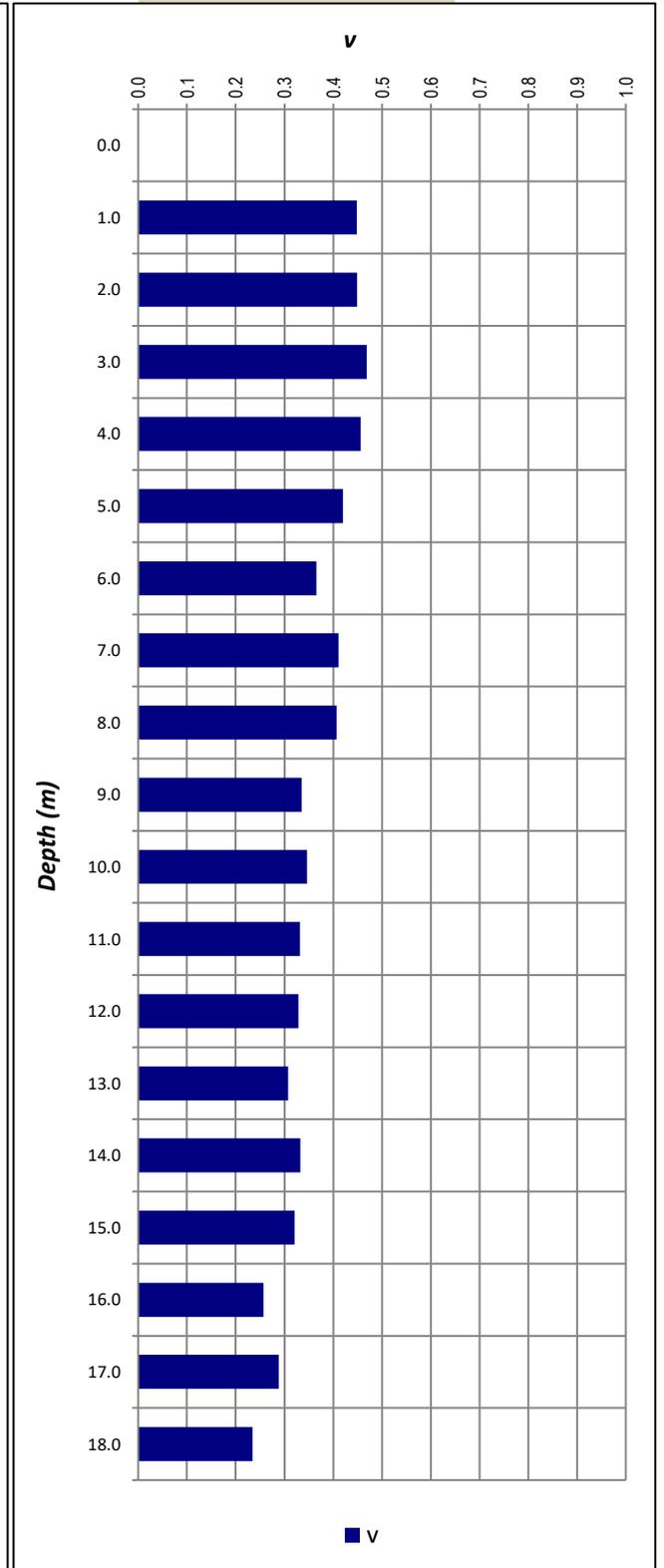
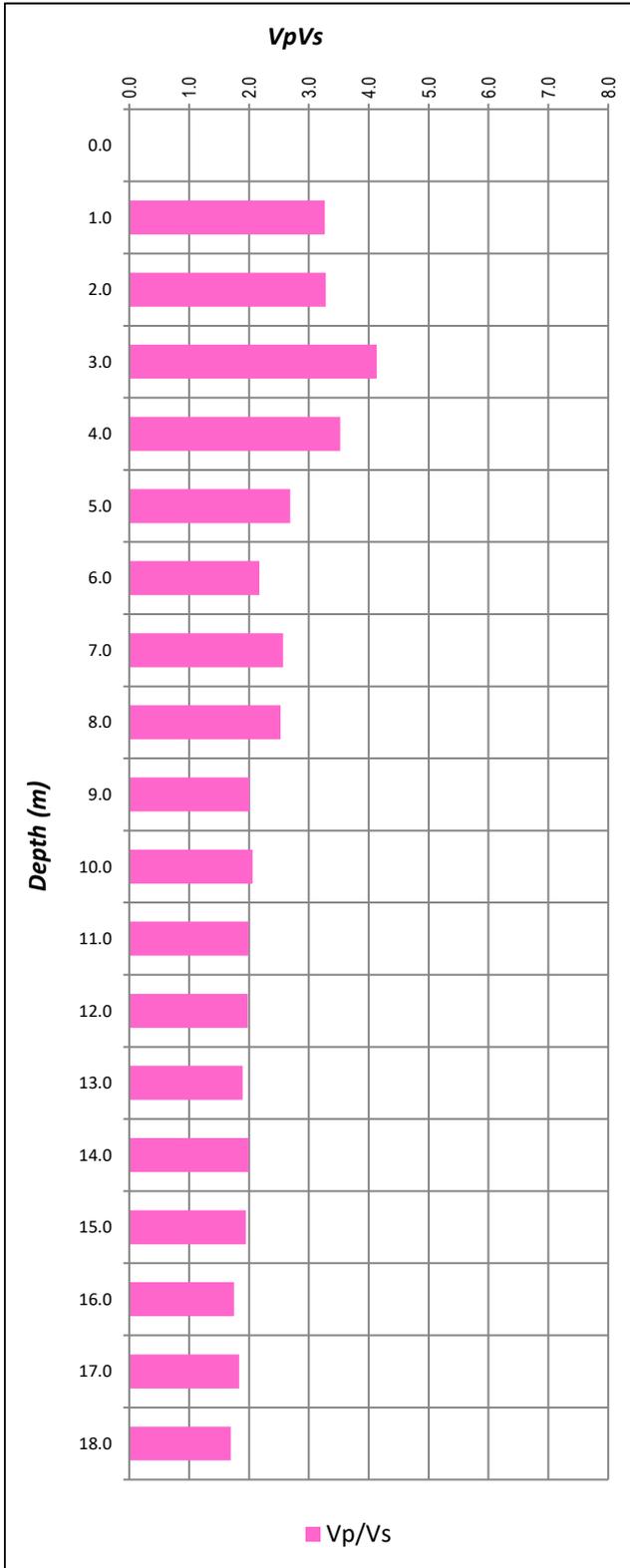


INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

CANTIERE	Gardesana
COMMESSA	18124
DATA	20/05/19

CODICE PROVA	DH
DISTANZA	1.00 m

<i>Vp/Vs ratio</i>	<i>Poisson's ratio</i>
--------------------	------------------------



INDAGINE SISMICA DOWN-HOLE

<b>CANTIERE</b>	Gardesana
<b>COMMESSA</b>	18124
<b>DATA</b>	20/05/19

<b>CODICE PROVA</b>	DH
<b>DISTANZA</b>	1.00 m

<i>Dynamic elastic modulus</i>	<i>Dynamic shear modulus</i>
--------------------------------	------------------------------

