0	11/2017	PRIMA EMISSIONE	PENNINO	PENNINO	CASSANI
Revisione	**Data**	**Oggetto revisione**	**Redatto**	**Verificato**	**Approvato**

REGIONE LIGURIA

#ItaliaSicura
Presidenza del Consiglio dei Ministri

COMUNE DI GENOVA

PIANO STRALCIO PER LE AREE METROPOLITANE E LE AREE URBANE CON ALTO LIVELLO DI POPOLAZIONE ESPOSTA AL RISCHIO DI ALLUVIONI

Presidenza del Consiglio dei Ministri

PRESIDENZA DEL CONSIGLIO DEI MINISTRI
COMMISSARIO STRAORDINARIO
delegato per l'attuazione degli interventi inseriti nell'A.d.P. del 16.09.2010 e ss.ii.
(ex art. 10 del D.L. n. 91 del 24.06.2014)

Commissario straordinario
Dott. Giovanni TOTI

PROGETTISTI

CAPOGRUPPO MANDATARIA:

ROCKSOIL S.p.A.
CONSULENZA E ASSISTENZA TECNICA
nel campo della GEOINGEGNERIA

MANDANTI:

art ambiente risorse territorio

HYDRODATA INGEGNERIA DELLE RISORSE IDRICHE

Ing. Mario CANGIANO

Ing. Paolo GALLO

Ing. Francesco DE SANCTIS

Dott.ssa Francesca GIOMI

RESPONSABILE STRUTTURA COMMISSARIALE
Ing. Luca BERRUTI

RESPONSABILE UNICO PROCEDIMENTO
Ing. Stefano PINASCO

Progettista responsabile integrazioni prestazioni specialistiche e Direttore Tecnico della mandataria.
Rocksoil S.p.A.
Ing. Giovanna Cassani
Ord. Ingg. Milano N° 20997

ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI MILANO
DOTT. ING. CASSANI GIOVANNA
Sez. A Settori:
a) civile e ambientale
b) industriale
c) dell'informazione
n° A 20997

Progettista/Geologo specialista responsabile elaborato
Rocksoil S.p.A.
Dott. Geol. Fiorenza Pennino
Ord. Reg. Geologi Lombardia N°1575 AP - sezione A

ORDINE DEI GEOLOGI della LOMBARDIA
FIORENZA PENNINO
geologo specialista
Albo n. 1575 AP
sezione A

Intervento/Opera

SECONDO LOTTO DEI LAVORI RELATIVI ALLA REALIZZAZIONE DELLA GALLERIA SCOLMATRICE DEL TORRENTE BISAGNO IN COMUNE DI GENOVA

PROGETTO ESECUTIVO

N° Progr. ----

Codice elaborato
BIS2E - R - IND01 -SC02- 0

Oggetto della tavola

INDAGINI

INDAGINI GEOGNOSTICHE

Piano Indagini Integrative (PE) - Certificati indagini e prove in situ (indirette)

Scala
-

Data
NOVEMBRE 2017

Codice FILE BIS2E-R-IND01-SC02-0

I DISEGNI E LE INFORMAZIONI IN ESSI CONTENUTE SONO PROPRIETA' ESCLUSIVA DELLA STRUTTURA COMMISSARIALE E NON POSSONO ESSERE MODIFICATI, RIPRODOTTI, RESI PUBBLICI O UTILIZZATI PER USI DIFFERENTI DA QUELLI PER CUI SONO STATI REDATTI, SALVO AUTORIZZAZIONE SCRITTA.

engineering . geophysics . monitoring

Galleria scolmatrice del Torrente Bisagno - Genova

Indagini Geofisiche



Commessa	*Committente*	*Documento*
17143	Rocksoil S.p.A.	17143_rel
Redatto da	*Revisione*	*Allegati*
Marta Bergamin	00	sì
Approvato da	*Data*	*Firma*
Gianluca Ascari	16/11/2017	

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

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

Sede Legale e operativa
Via Di Vittorio 26 - Bovisio Masciago – MB - Italy
tel. +39 +362 55 99 02 – fax +39 +362 59 26 34
info@akronservizi.it
www.akronservizi.it

Sommario

1 Premessa 3

2 Descrizione metodologica 4

2.1 Indagine sismica 4

2.1.1 Sismica a riflessione 6
2.1.2 Sismica a rifrazione 7
2.1.3 Inversione tomografica del dato sismico 8
2.1.4 Tomografia cross-hole Vp 11
2.1.5 Cross-hole Vp/Vs 11

3 Strumentazione 13

3.1 Indagini sismiche 13

3.1.1 Acquisizione dati 13
3.1.2 Sorgenti 13
3.1.3 Ricevitori 14

3.2 Rilievo topografico 15

4 Descrizione del rilievo 16

4.1 Sismica a riflessione 16

4.2 Tomografia sismica a rifrazione 16

4.3 Tomografia cross-hole Vp e prova cross-hole Vp/Vs 17

5 Elaborazione dati 18

5.1 Sismica a riflessione 18

5.2 Tomografia sismica a rifrazione Vp e Vs 20

5.3 Tomografia cross-hole Vp e prova cross-hole Vp/Vs 21

6 Risultati del rilievo 24

6.1 Sismica a riflessione 24

6.2 Tomografia sismica a rifrazione Vp e Vs 25

6.3 Tomografia cross Hole Vp e prova cross-hole Vp/Vs 26

7 Documentazione fotografica 27

Allegati

Rif.	*Descrizione*
01	***Tavola 01 - Planimetria del rilievo, sezioni sismiche e interpretative***
02	***Report prova cross-hole Vp/Vs***

Lista di distribuzione

Riferimento	*n. copie*	
	cartacee	*digitali*
Rocksoil S.p.A.	***1***	***1***

1 PREMESSA

Su incarico di Rocksoil S.p.A. sono state eseguite indagini geofisiche propedeutiche alla progettazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno, in Comune di Genova. Le indagini sono state effettuate nei giorni compresi tra il 28 settembre e 3 novembre 2017 con le seguenti metodologie:

- sismica a riflessione
- sismica a rifrazione (Vp e Vs)
- tomografia sismica cross-hole Vp
- prova cross-hole Vp/Vs

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva del rilievo eseguito (vedi planimetria di tavola 1 allegata):

TIPO DI INDAGINE	LINEA	DATA
tomografia sismica a rifrazione Vp e Vs	SIS01	*16/10/2017*
	SIS02	*16/10/2017*
	LINEA A	*19/10/2017*
	LINEA B	*19/10/2017*
	LINEA C	*02-03/11/2017*
	LINEA D	*02-03/11/2017*
sismica a riflessione	SIS05	*28/09/2017*
	SIS06	*02/10/2017*
tomografia cross-hole Vp	SEB2bis-SEB2	*25/10/2017*
cross-hole Vp/Vs	SEB2bis-SEB2	*25/10/2017*

Per ogni linea di indagine (sismica a riflessione e sismica a rifrazione) è stato effettuato il rilievo topografico dei singoli punti geofonici tramite GPS.

Nel presente documento vengono descritte:

- metodologia d'indagine
- strumentazione impiegata per singola metodologia
- array geofisico
- modalità di elaborazione dati
- risultati

I risultati completi dell'indagine sono riportati negli allegati di seguito descritti:

- **Tav.01:**
  - Planimetria con ubicazione stendimenti
  - Sezioni di rilievo e sezioni interpretative in sismica a rifrazione (velocità onde P ed S)
  - Sezioni interpretative in sismica a riflessione
  - Tomografia cross-hole Vp
- **All.02:** Risultati indagine cross-hole Vp/Vs

2 DESCRIZIONE METODOLOGICA

Nel capitolo seguente si descrivono le metodologie di indagine utilizzate.

2.1 INDAGINE SISMICA

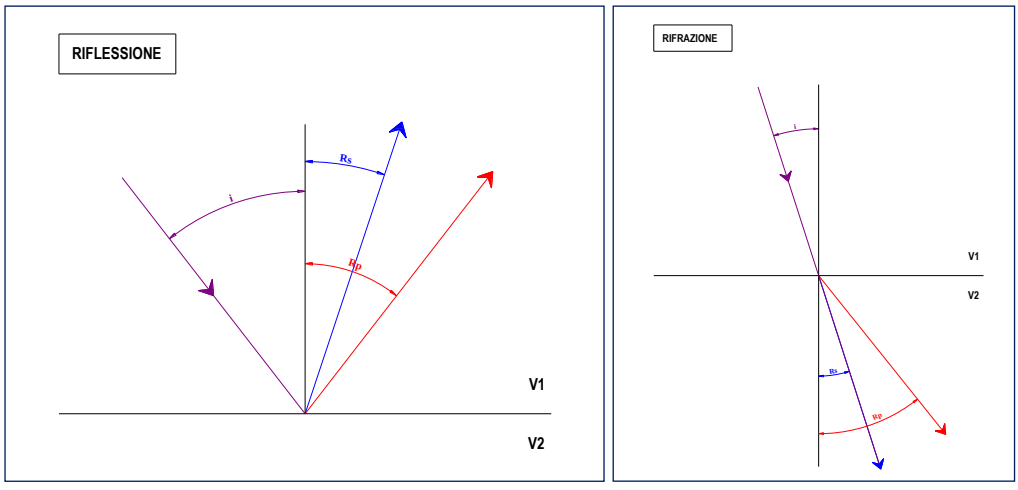
I metodi sismici sono le tecniche geofisiche più comunemente utilizzate in ambito ingegneristico. Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori. Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e 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 (Rp), mentre l'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (Rs) 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 (Rp) 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 (Rs) 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(Rp) risulta pari a 1 e l'angolo pari a 90°; 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 (γ), coefficiente di Poisson (ρ), modulo di Young (E) e modulo di taglio (G).

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

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

$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g}$$

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
Calcare	1.500-4.200
Arenaria	1.400-4.000
Sabbie	1.200-1.800
Argilla	1.100-2.500

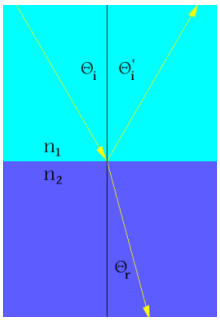
2.1.1 SISMICA A RIFLESSIONE

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 θ_i.

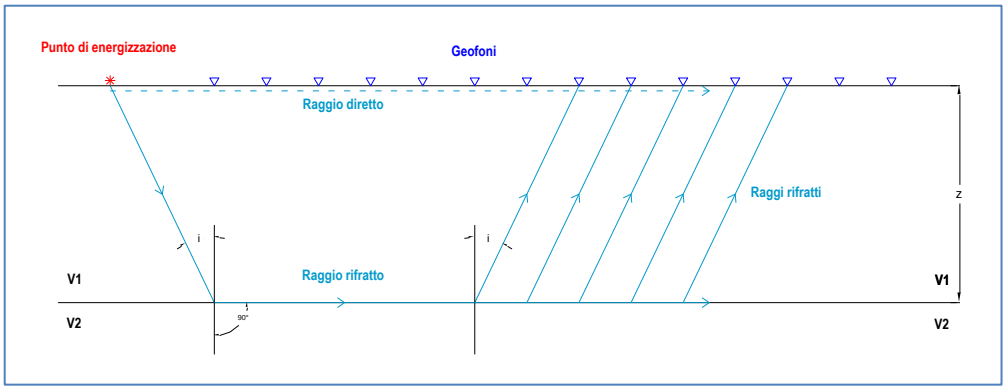
Secondo la **Terza legge di Snell** il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza ed il seno dell'angolo di rifrazione è uguale al rapporto tra l'indice di rifrazione del secondo mezzo e l'indice di rifrazione del primo:

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

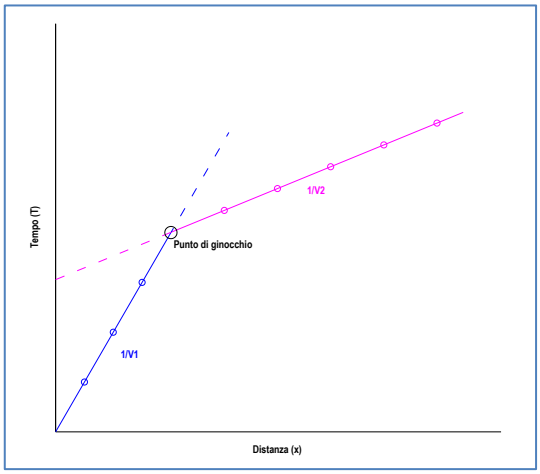
Sulla base di quanto detto consegue che se $v_2 > v_1$ il raggio rifratto si allontanerà dalla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi; se, invece, $v_2 < v_1$ allora il raggio rifratto si avvicinerà alla normale.

2.1.2 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 V1 (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea che dall'origine ha una pendenza pari a 1/V1) 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/V2 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 rifrattore.

2.1.3 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.

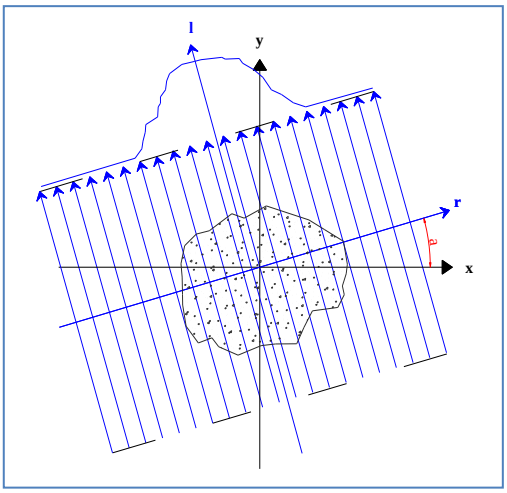
L'obiettivo della tomografia è definire le caratteristiche di un oggetto/sezione mediante la misura delle proiezioni esterne (somma di alcune proprietà interne) di queste caratteristiche.

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 α 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:

$$D_i = t_{obs_i} - t_{calc_i}$$

dove $i = 1,2 \ldots N$

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 (Δl) 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

$\Delta v = |v_a - v_m|$

Δt = 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.

2.1.4 TOMOGRAFIA CROSS-HOLE VP

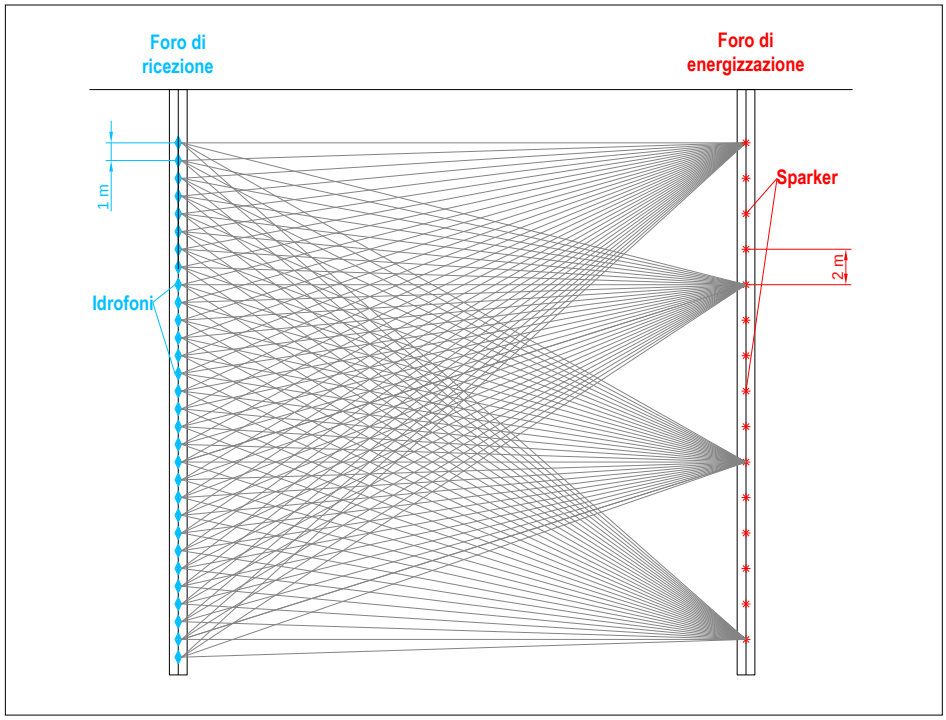
L'indagine in tomografia cross-hole permette di superare le limitazioni poste dalle indagini da superficie relativamente alle zone di inversione di velocità e alla scarsa densità della matrice di dato acquisito a profondità significative.

L'indagine in tomografia cross-hole viene eseguita attraverso le seguenti fasi:

- in un foro viene posizionata la sorgente di energia;
- nel foro adiacente vengono posizionati gli idrofoni con interdistanza fissa (geofoni che non hanno bisogno di contatto fisico con il mezzo circostante ma necessitano presenza di acqua nel foro);
- esecuzione dell'energizzazione e registrazione dell'arrivo degli impulsi;
- spostamento verso l'alto della sorgente di energia.

La sezione tra i due fori interessati dall'indagine viene attraversata da una notevole quantità di impulsi sismici, creando le condizioni migliori per una ricostruzione agli elementi finiti delle velocità dei singoli pixel.

Di seguito è riportato uno schema esemplificativo della geometria di acquisizione e dei raggi sismici che attraversano i materiali:



2.1.5 CROSS-HOLE VP/VS

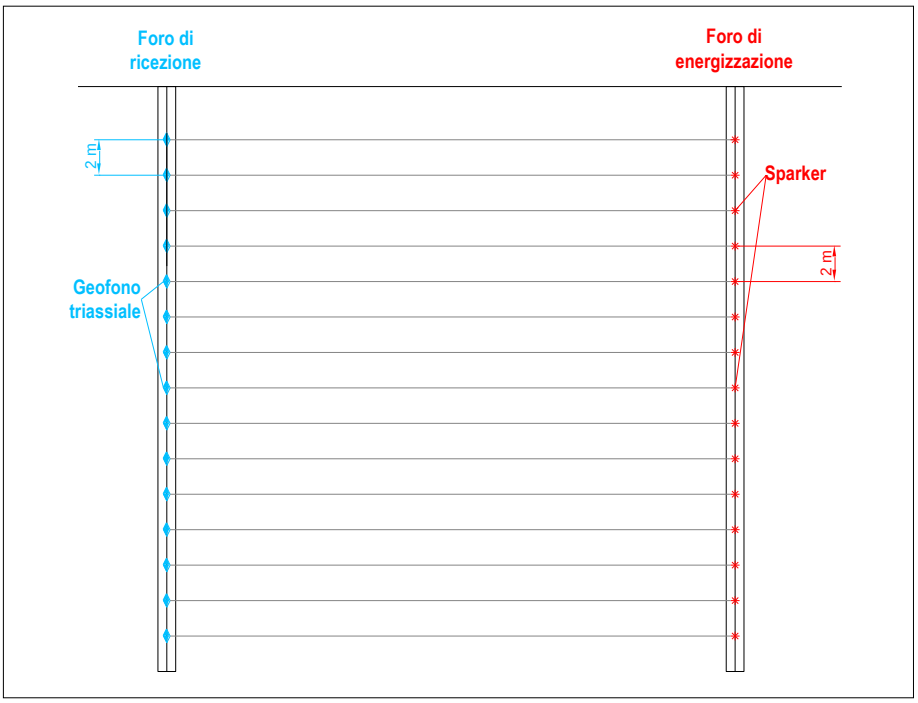
Il rilievo cross-hole permette la determinazione dei tempi di arrivo dell'impulso delle onde di taglio S.

- posizionamento e bloccaggio del ricevitore (in foro) a fondo foro;
- posizionamento e bloccaggio dello sparker (in foro) a fondo foro;
- generazione dell'impulso da foro controllato da sistema di trigger;
- ripetizione delle medesime operazioni in risalita per ogni mezzo metro di profondità.

Dai tempi di arrivo è possibile calcolare, nota la distanza in superficie dei fori, la velocità dell'impulso S. Successivamente, dal parametro Vs ipotizzando la densità del mezzo attraversato (γ) è possibile definire i seguenti parametri:

- ***v***: coefficiente di Poisson
- ***G***: modulo di deformazione a taglio
- ***E***: modulo di Young

Di seguito è riportato lo schema esemplificativo della geometria di acquisizione.



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 3 moduli del 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.

A/D Conversion	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary oversampling
Dynamic Range	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2ms, 24dB
Sample Interval	0.02, 0.3125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
Record Length	16,000 samples
Maximum Input Signal	2.8 VPP
Distortion	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
Bandwidth	1.75 Hz to 20 kHz
Common Mode Rejection	>-100 dB at <=100 Hz, 36 dB
Crosstalk	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
Noise Floor	0.2uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
Stacking Trigger Accuracy	1/32 of sample interval
Input Impedance	20 kOhm, 0.02 uf
Anti-alias Filters	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
Delay	0 to 9999 ms in 1 ms steps
Acquisition and DisplayFilters	¬ LowCut: OUT, 10, 15, 25, 35, 50, 70, 100, 140, 200, 280, 400 Hz, 24 or 48 dB/octave, Butterworth. ¬ Notch: 50, 60, 150, 180 Hz and OUT, with the 50 dB rejection bandwidth 2% of center frequency. ¬ HighCut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/octave.
Triggering	Positive, negative or contact closure, software adjustable threshold
Power	12V external battery

3.1.2 SORGENTI

Sismica da superficie

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.

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.

Cross hole Vp e Vp/Vs

Le indagini cross-hole Vp e Vs sono state realizzate grazie all'impiego di un sistema di energizzazione elettrodinamico (sparker) della Geotomographie dotato di sonda per onde P e onde S di cui si riportano le caratteristiche tecniche:

Unità di controllo IPG 1005	
Impulso (scarica da condensatore)	5kV
Impulso (energia)	1kJ
Frequenza	200-500 (Hz)
Intervallo di ripetizione impulso	da 4 a 7 sec
Alimentazione	230 V

3.1.3 RICEVITORI

Indagine Sismica

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.

Cross hole Vp

Per la tomografia cross-hole Vp sono state impiegate n. 2 catene idrofoniche con interdistanza dei 24 sensori pari a 1 m e frequenza di 10 Hz.

Gli idrofoni sono trasduttori piezoelettrici che generano una tensione proporzionale alla variazione istantanea della pressione dell'acqua in funzione del segnale sismico.

L'accoppiamento del sensore al mezzo circostante è dato dall'acqua con la quale viene riempito il foro di sondaggio che pertanto deve essere realizzato a tenuta, opportunamente cementato e dotato di tappo di fondo.

Cross hole Vp/Vs

Per la misura del parametro Vs è stato utilizzato un doppio geofono triassiale da foro con interdistanza 2m (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 cavi utilizzati per l'acquisizione del dato sismico sono cavi con guaina in polipropilene schermati con connettori tipo militare Cannon.

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 sitema GPS Stonex S8N Plus avente le seguenti caratteristiche:

- ***Receiver***
  - Channels: 120
  - Satellite tracked: GPS - Simultaneus L1, L2, L2C, L5. GLONASS - Simultaneus L1,L2; GALILEO - E5a, E5b, Alt-BOC; BeiDou - B1, B2; SBAS - Simultaneus 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[2]
- ***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/IIe, trimmark 3, TRIMTALK 450S.

4 DESCRIZIONE DEL RILIEVO

Su incarico di Rocksoil S.p.A. sono state eseguite indagini geofisiche propedeutiche alla progettazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno, in Comune di Genova. La fase di acquisizione dati in campo è stata eseguita nei giorni compresi tra il 28 settembre e 3 novembre 2017 con le seguenti metodologie (rif. piano di indagine del progettista):

- sismica a riflessione
- tomografia sismica a rifrazione (Vp e Vs)
- tomografia sismica cross-hole Vp
- cross-hole sismica Vp/Vs

La planimetria con l'ubicazione delle linee (rilievo topografico mediante GPS) sono riportati nella tavola in allegato (tav.01).

4.1 SISMICA A RIFLESSIONE

Sono state eseguite n.2 sezioni di rilievo con metodo sismico a riflessione. Si riporta di seguito la tabella riassuntiva del rilievo.

LINEA	LUNGHEZZA (m)	CANALI	INTERDISTANZA GEOFONICA (m)
SIS05	357.5	144	2.5
SIS06	360	145	2.5

4.2 TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE

L'indagine ha previsto l'esecuzione di n. 6 linee in tomografia sismica a rifrazione (P ed S). Si riportano nella tabella seguente le quantità eseguite:

LINEA	LUNGHEZZA (m)	CANALI	INTERDISTANZA GEOFONICA (m)
SIS01	115	24	5
SIS02	175	36	5
LINEA A	115	24	5
LINEA B	115	24	5
LINEA C	115	24	5
LINEA D	115	24	5

Le linee C e D sono state eseguite in regime di interruzione del traffico in orario notturno.

4.3 TOMOGRAFIA CROSS-HOLE VP E PROVA CROSS-HOLE VP/VS

E' stato eseguita una prova cross-hole in corrispondenza della sezione tra i sondaggi SEB2 e SEB2bis aventi entrambi profondità pari a 30m. L'indagine è stata eseguita sia in modalità tomografica cross-hole P (con catene idrofoniche) e sia secondo metodo classico con doppio geofono triassiale da foro in modalità P ed S.

Si riportano di seguito le quantità di rilievo eseguite:

TIPO DI INDAGINE	SEZIONE	PROFONDITA' (m)	CANALI	DISTANZA TRA I FORI (m)
Tomografia cross-hole Vp	SEB2bis-SEB2	30	24	5
Cross-hole Vp/Vs	SEB2bis-SEB2	30	24	5

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 wethered 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.

5.2 TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE VP E VS

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

Sono stati previsti i seguenti step:

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 e delle onde di taglio S (FBP - First Break Peak).

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:

- matrici Vp;
- matrici Vs;

- 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).

Restituzione e interpretazione e delle sezioni sismiche

I dati delle matrici Vp e Vs sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer 13. 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 la 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 2017 (Autodesk).

5.3 TOMOGRAFIA CROSS-HOLE VP E PROVA CROSS-HOLE VP/VS

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 (arrivi diretti) delle onde compressionali P (FBP - First Break Peak).

Costruzione delle matrici per l'inversione tomografica

La costruzione delle matrici di elaborazione è stata effettuata con i software Textpad e Excel.

Per ogni sezione è stata costruita una matrice così strutturata:

Sezione	ID	Xs (m)	Ys (m)	Zs (m)	H	Xh (m)	Yh (m)	Zh (m)	T (sec)

Sezione = coppia di fori utilizzati
ID= numero progressivo delle tracce sismiche
Xs = x del punto di scoppio
Ys = y del punto di scoppio
Zs = quota del punto di energizzazione
H = identificativo dei punti di ricezione
Xh = x del punto di ricezione
Yh = y del punto di ricezione
Zh = quota s.l.m. del punto di ricezione
T = tempo di arrivo

Le singole matrici sono state successivamente assemblate per la costruzione di un'unica matrice di elaborazione 3D comprensiva di tutti i 10 fori di sondaggio e di tutte le 18 sezioni sismiche eseguite.

Elaborazione tomografica

L'elaborazione è stata eseguita con il software GeoTom che utilizza l'algoritmo di ricostruzione tomografica SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Tecnique) con R.T.C. (Ray Tracing Curvilineo).

Il “ray-tracing” che utilizza raggi curvilinei si basa sulla suddivisione di un raggio iniziale rettilineo in un numero crescente di segmenti rettilinei.

Il primo step di questa suddivisione in segmenti consiste nel costruire un raggio rettilineo che collega la sorgente al ricevitore; individuato il punto centrale del raggio, quest’ultimo viene suddiviso in due segmenti. Il gradiente di velocità viene calcolato in corrispondenza del punto centrale del raggio sorgente-ricevitore. L’operazione di calcolo del gradiente e di posizionamento del punto centrale viene ripetuta iterativamente prima di procedere ad una nuova suddivisione dei raggi.

Il secondo step consiste nell’applicare lo stesso procedimento descritto in precedenza ad ogni singolo segmento. In questo modo ad ogni step si raddoppia il numero di segmenti in cui è suddiviso il raggio iniziale generando un raggio curvilineo sempre più definito.

Ad ogni step viene calcolato il tempo di transito lungo ogni raggio fino a quando non viene individuato il tempo di arrivo minimo.

L’algoritmo di inversione si basa sulla creazione di un modello iniziale a velocità uniforme (valore medio delle velocità calcolate utilizzando raggi sismici rettilinei), attraverso il quale calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Calcolando i tempi residui, 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 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 3D delle velocità P (cross-hole);
- valori di RMS dei tempi residui;

Restituzione dei risultati

Le sezioni sismiche 2D sono state ricavate dal modello 3D attraverso il software GeoTom in formato ASCII.

L’interpolazione dati per la rappresentazione in contouring 2D (riportata nelle tavole allegate) è stata effettuata mediante il software Surfer 13.

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 delle grandezza (Vp), cioè l’assunto che la grandezza in oggetto vari nello spazio con continuità.

Le sezioni ottenute sono state riportate su tavola in allegato (sezione verticale tra i fori di sondaggio SEB2bis – SEB2).

Analisi Vp/Vs

Al fine della realizzazione della diagrafia V_P e V_S si è proceduto secondo i seguenti step:

a) individuazione degli arrivi S (convertita SH) sulle tracce da tomografia cross-hole

b) definizione dei valori di minimo del tempo di arrivo sulla matrice “tempi di arrivo onde P” per ogni posizione in quota (step 1m) e individuazione delle relative posizioni energizzazione-ricevitore
c) tabellazione dei dati di arrivo onde P ed onde SH
d) calcolo dei parametri V_P e V_S in relazione alle distanze delle posizioni coniugate per ogni metro di profondità
e) calcolo dei relativi parametri di modulo
f) graficizzazione 2D (parametro vs profondità)

6 RISULTATI DEL RILIEVO

Su incarico di Rocksoil S.p.A. sono state eseguite indagini geofisiche in ambito dei lavori relativi alla realizzazione della galleria scolmatrice del Torrente Bisagno, in Comune di Genova. Le indagini sono state effettuate nei giorni compresi tra il 28 settembre e 3 novembre 2017 come segue:

- sismica a riflessione;
- sismica a rifrazione (Vp e Vs);
- tomografia sismica cross-hole Vp (tra i fori di sondaggio SEB2bis e SEB2);
- prova cross-hole Vp/Vs (tra i fori di sondaggio SEB2bis e SEB2);

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

I risultati completi dell'indagine sono riportati negli allegati di seguito descritti:

- **Tav.01:**
  - planimetria con ubicazione stendimenti
  - sezioni di rilievo e sezioni interpretative in sismica a rifrazione (velocità onde P ed S)
  - sezioni interpretative in sismica a riflessione
  - tomografia cross-hole Vp
- **All.02:** Risultati analisi cross-hole Vp/Vs

Nei paragrafi successivi vengono brevemente commentati i risultati delle indagini effettuate.

6.1 SISMICA A RIFLESSIONE

L'elaborazione del dato sismica a riflessione ha permesso di individuare un modello di sottosuolo fino ad una profondità di oltre 200m da piano campagna. Il dato acquisito è stato elaborato preliminarmente in tomografia sismica a rifrazione al fine di determinare le caratteristiche di velocità (finalizzate al modello di velocità di base per la sismica a riflessione) delle prime decine di metri di sottosuolo.

Si riportano di seguito le quantità eseguite per ogni linea di rilievo:

LINEA	LUNGHEZZA (m)	CANALI	INTERDISTANZA (m)
SIS05	357.5	144	2.5
SIS06	360	145	2.5

Le sezioni elaborate identificano una copertura di materiali sciolti a vario grado di addensamento con spessori variabili da un minimo di 5-6m sino ad un massimo di circa 20-30m (lineamenti riportati in tavola con colore verde).

Inferiormente a tale strato i valori di velocità mostrano la presenza di valori di velocità superiori riferibili a un substrato lapideo a vario grado di alterazione (soprattutto nella parte sommitale); gli effetti di tali differenti competenze all'interno dell'ammasso determinano lineamenti (riflettori - sono riportati nelle sezioni in tavola allegata con lineamenti blu) corrispondenti alle interfacce (o meglio zone di transizione) tra porzioni di ammasso a differente velocità sismica. Tali riflettori sono sostanzialmente due a differenti profondità e con evidenti oscillazioni di quota che delineano diverse zone lungo il pendio a forma concava.

Inferiormente a tali riflettori da ultimo è identificabile una zona di diffrazione/riflessione del segnale sismico riferibile a una zona di debolezza strutturale (fatturazione) con pendenza sub verticale; tale zona, non delimitata da riflessioni nette, è evidenziata in tavola da retino di colorazione rosso.

Le sezioni in sismica a riflessione con indicazione dei riflettori individuati sono riportati nella tavola in allegato (tav.01).

6.2 TOMOGRAFIA SISMICA A RIFRAZIONE VP E VS

L'indagine in sismica a rifrazione ha permesso di rappresentare il modello del sottosuolo mediante i parametri di velocità delle onde di compressione (P) e delle onde di taglio (S).

I modelli di velocità sismica derivanti dall'elaborazione sono stati verificati con le stratigrafie disponibili al fine di realizzare le sezioni interpretative geofisico-geologiche.

L'indagine è stata eseguita su n.6 linee di rilievo di cui si riporta codifica geofonica, lunghezza:

LINEA	LUNGHEZZA (m)	CANALI	INTERDISTANZA (m)
SIS01	115	24	5
SIS02	175	36	5
LINEA A	115	24	5
LINEA B	115	24	5
LINEA C	115	24	5
LINEA D	115	24	5

Nel dettaglio l'indagine ha identificato un modello di sottosuolo come di seguito riportato:

- ***Unità 1*** - materiale sciolto a vario grado di addensamento
- ***Unità 2*** – substrato roccioso (con orizzonte a spessore variabile di alterazione nella porzione sommitale – cappellaccio)

Si riporta di seguito il modello stratigrafico individuato (legenda esemplificativa):

STRATO	Descrizione
	Materiale sciolto
	Substrato roccioso

Le sezioni interpretative e la suddivisione delle due fondamentali unità sono basate sull'analisi sia dei rifrattori (zone ad elevato gradiente di velocità) e sia dei valori di velocità P e S definiti nei tomogrammi); è stato inoltre utilizzato il parametro Vs e del rapporto Vp/Vs identificato nella indagine cross-hole correlato alle stratigrafie dei relativi sondaggi (valori di Vs>1.300m/s sono riferiti a substrato lapideo).

I risultati completi dell'indagine eseguita sono riportati nella **tav.01** (sezioni sismiche e sezioni interpretative).

6.3 TOMOGRAFIA CROSS HOLE VP E PROVA CROSS-HOLE VP/VS

L'indagine in sismica Cross Hole Vp e Vp/vs è stata effettuata tra i fori di sondaggio SEB2bis e SEB2, distanti 5 m. L'indagine ha permesso l'analisi del sottosuolo sino ad una profondità di 30 m da piano campagna (profondità dei sondaggi).

Tomografia cross-Hole Vp

L'elaborazione dei dati ha permesso di identificare tre differenti unità:

- ***zona 1***: compresa tra piano campagna e profondità di circa 11m è caratterizzata da valori di velocità Vp fino a 1.800m/s. E' riferibile a materiali sciolti.
- ***zona 2***: posizionata inferiormente alla precedente con spessore di qualche metro; è una zona di transizione (velocità comprese tra 1.800 e 3.300m/s) tra copertura e materiale lapideo con vario grado di alterazione
- ***zona 3***: identificata oltre i 13m di profondità è costituita da materiale lapideo con valori di velocità Vp superiori a 3.300m/s.

I risultati sono illustrati nella tavola 01 allegata.

Analisi Vp/Vs

Il rilievo del dato Vs ha permesso di definire il rapporto Vp/Vs e i valori di modulo dinamico dei materiali indagati. Il parametro Vs viene misurato solo su diagrafia (variazione del parametro in funzione della profondità) e non in tomografia.

L'indagine cross-hole Vp/Vs ha messo in evidenza, per il substrato roccioso (a profondità >13 m da piano campagna), valori di velocità delle onde P comprese tra 3300 – 4700 m/sec (e 1300 – 2200 m/sec per le onde S), ed un rapporto Vp/Vs compreso tra 2.50 e 2.20.

Per il calcolo dei moduli dinamici E e G è stato utilizzato un valore medio di densità pari a 18kN/mc per il materiale sciolto, e di 21kN/mc per il materiale lapideo. Si ricorda che i valori di modulo indicati sono relativi a parametri dinamici.

Per una maggior completezza dei risultati delle indagini effettuate si rimanda alle restituzioni tabellari e grafiche allegate (Allegato 02).

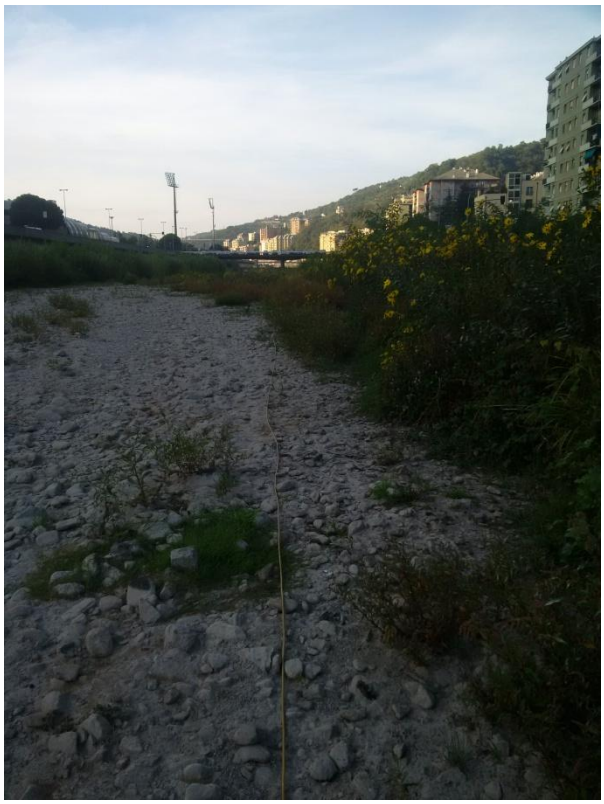
7 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA



Indagine Cross-Hole – strumentazione



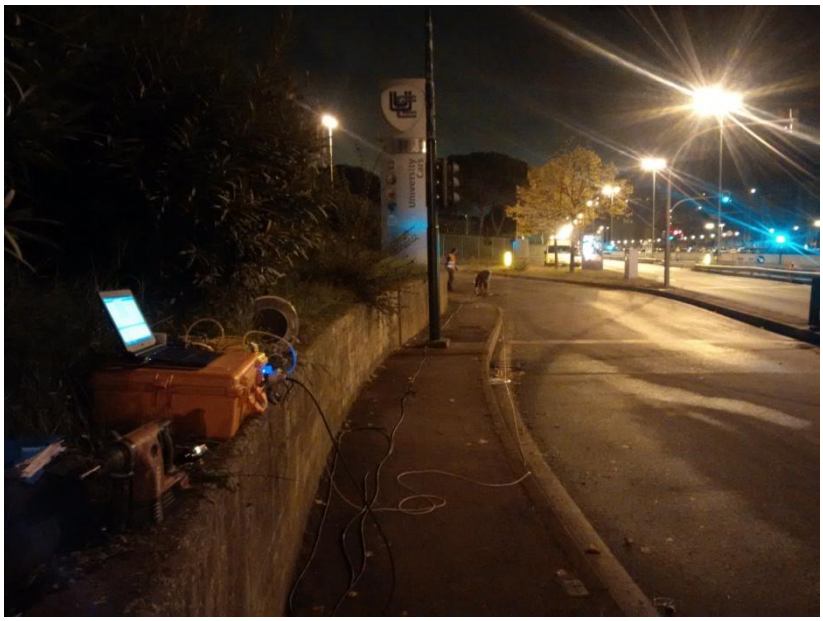
Indagine Cross-Hole



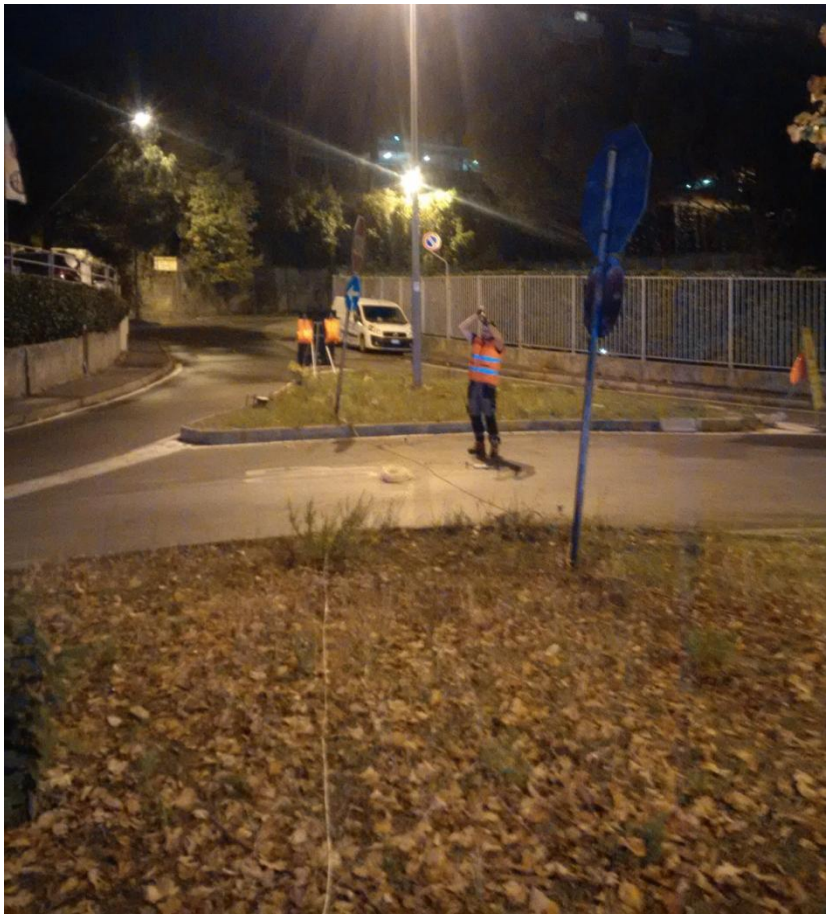
Indagine Sismica rifrazione – Linea B



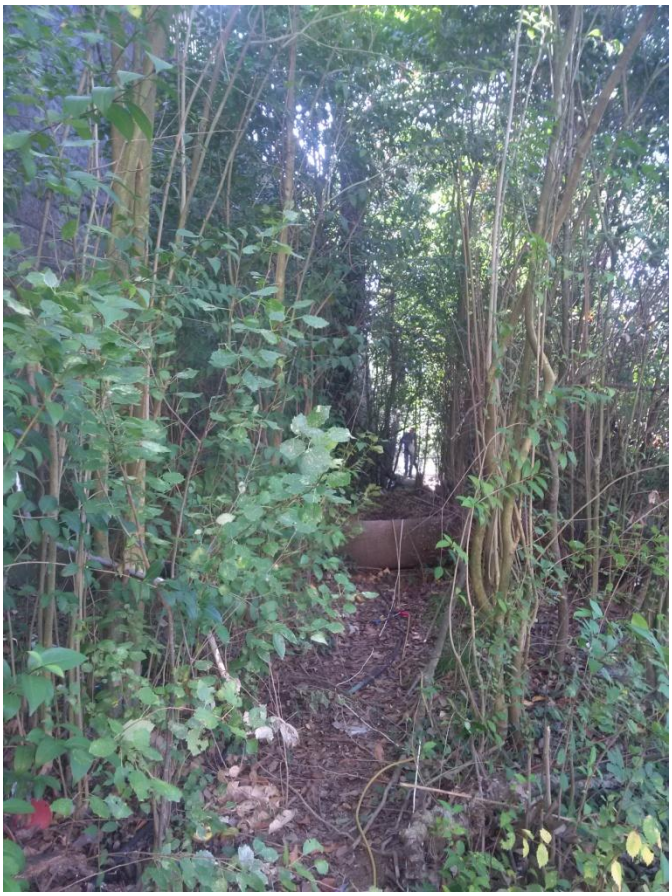
Indagine Sismica rifrazione – Linea A



Indagine Sismica rifrazione – Linea C



Indagine Sismica rifrazione – Linea D



Indagine Sismica rifrazione – SIS01



Indagine Sismica rifrazione – SIS02



Indagine Sismica riflessione – SIS05



Indagine Sismica riflessione – SIS05



Indagine Sismica riflessione – SIS06