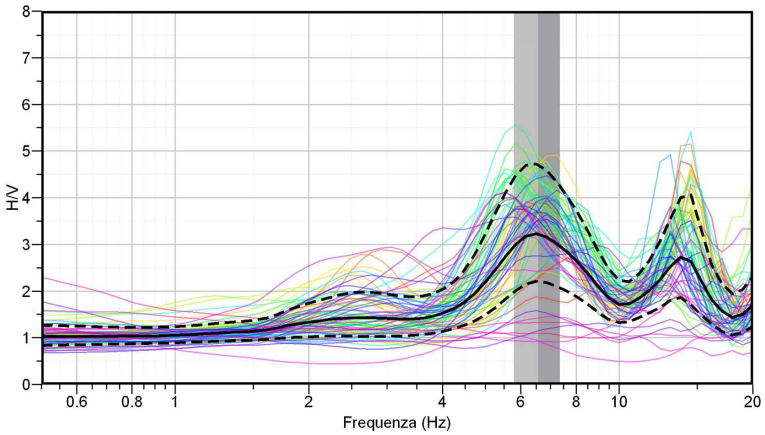
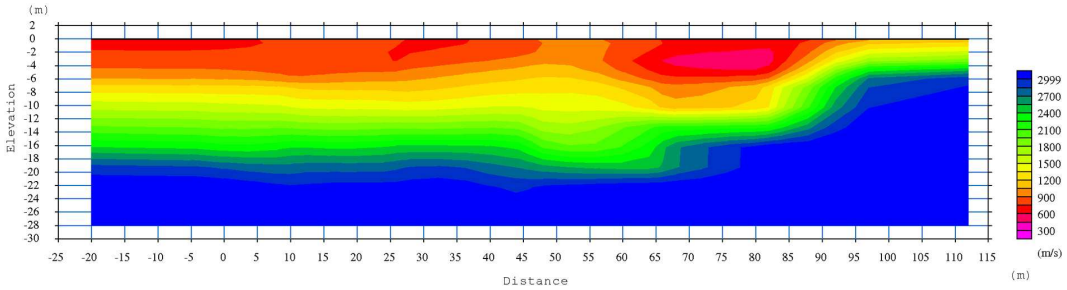
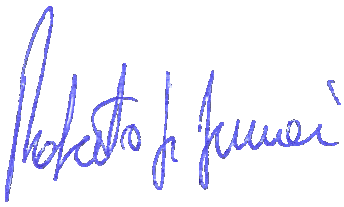
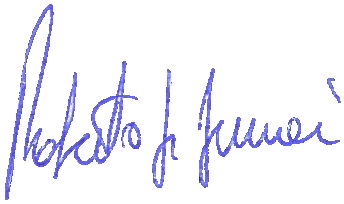
Indagini Geofisiche per la Caratterizzazione dell'Area Adibita all'Ampliamento della Discarica RSU "Rio Marsiglia", Uscio (GE)





A cura di	Firma	Data
Dott. Roberto De Ferrari		12 Luglio 2012
Ph.D. Simone Barani		12 Luglio 2012

Approvato da	Firma	Data
Dott. Roberto De Ferrari		12 Luglio 2012

I diritti di questo studio, inclusa traduzione, sono riservati. Nessuna parte di questo documento può essere divulgata a terzi, per scopi diversi da quello originale, senza il consenso scritto di GEAmb S.r.l.

Indice

1 Introduzione

2 Sismica a rifrazione

2.1 Acquisizione del segnale sismico 2

2.2 Analisi del segnale sismico 7

2.3 Tomografia sismica e caratterizzazione della sismo-stratigrafia 12

3 Microtremore

3.1 Acquisizione del microtremore 15

3.2 Elaborazione del microtremore 16

3.3 Analisi ed interpretazione delle curve H/V 17

4 Geoelettrica

4.1 Misura della differenza di potenziale 20

4.1.1 Dispositivo Wenner 22

4.1.2 Dispositivo dipolo-dipolo 24

4.2 Tomografia elettrica 25

5 Conclusioni

Indice delle figure

Figura 1 Schema di acquisizione generico per indagine sismica a rifrazione (da http://www.masw.com/). 2
Figura 2 Configurazione geometrica dello stendimento ST01. 4
Figura 3 Configurazione geometrica dello stendimento ST02. 4
Figura 4 Configurazione geometrica dello stendimento ST03. 5
Figura 5 Rumore di fondo (componente verticale). 5
Figura 6 Profilo sismico ST01 e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P. 6
Figura 7 Profilo sismico ST02 e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P. 6
Figura 8 Profilo sismico ST02 e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P. 7
Figura 9 Esempio di registrazione multicanale lungo la stesa ST01. 8
Figura 10 Esempio di registrazione multicanale lungo la stesa ST02. 8
Figura 11 Esempio di registrazione multicanale lungo la stesa ST03. 9
Figura 12 Curve dromocrone relative alla stesa ST01. 9
Figura 13 Curve dromocrone relative alla stesa ST02. 10
Figura 14 Curve dromocrone relative alla stesa ST03. 10
Figura 15 Sezione sismo-tomografica in onde P per la stesa ST01. 13
Figura 16 Sezione sismo-tomografica in onde P per la stesa ST02. 13
Figura 17 Sezione sismo-tomografica in onde P per la stesa ST03. 13
Figura 18 Strumentazione impiegata per la registrazione del microtremore. 16
Figura 19 Spettri di Fourier del microtremore acquisito: verticale (blu), NS (verde), EW (rosso). 17
Figura 20 Curva H/V. 18
Figura 21 Profilo geoelettrico GE01. 21
Figura 22 Profilo geoelettrico GE02. 21
Figura 23 Dispositivo Wenner: sequenza di misure (da Leucci, 2003). 23

Figura 24 Dispositivo dipolo-dipolo: sequenza di misure (da Leucci, 2003). 24

Figura 25 Tomografia elettrica linea El01: in alto metodo dipolo-dipolo, in basso metodo Wenner 26

Figura 26 Tomografia elettrica linea El02: in alto metodo dipolo-dipolo, in basso metodo Wenner 26

Indice delle tabelle

Tabella 1 Caratteristiche tecniche dell'apparato di acquisizione Geode (Geometrics Inc.). _ 3

Tabella 2 Tempi di primo arrivo (stesa ST01). 11

Tabella 3 Tempi di primo arrivo delle onde P (stesa ST02). 11

Tabella 4 Tempi di primo arrivo delle onde P (stesa ST03). 12

Tabella 5 Valori di resistività di alcune rocce e minerali (da Soldoveri, 2005). 20

Tabella 6 Caratteristiche tecniche del Syscal Pro Switch 48 (Iris Instruments). 22

1 Introduzione

Il report presenta i risultati delle indagini condotte per la caratterizzazione geofisica dell'area adibita all'ampliamento della discarica RSU "Rio Marsiglia" nel Comune di Uscio (GE).
Lo studio condotto ha previsto un'indagine geofisica (Tavola 1) consistente in:

- N. 3 tre profili sismici (ST01, ST02 e ST03), analizzati con la tecnica della sismica a rifrazione, allo scopo di definire modelli bi-dimensionali (2D) di velocità delle onde longitudinali (onde P) ovvero al fine di identificare possibili variazioni latero-verticali della velocità di propagazione delle onde sismiche;
- N. 1 misura di rumore ambientale, analizzata con la tecnica Nakamura (Nakamura, 1989), al fine di ricavare informazioni puntuali sullo spessore delle coltri;
- N.2 profili geo-elettrici per l'identificazione di anomalie di resistività utili a definire la distribuzione della circolazione idrica nel sotterraneo.

Scopo del presente studio, quello di fornire alla committenza un quadro dettagliato delle caratteristiche sub-superficiali dell'area, permettendo così l'individuazione, tramite tecniche indirette, di possibili criticità presenti nell'area di discarica investigata.
Nei paragrafi seguenti sono presentate le metodologie impiegate ed i risultati ottenuti.

2 Sismica a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione, come tutte le metodologie di prospezione sismica di tipo attivo, si basa sulla generazione di onde sismiche (longitudinali e/o trasversali) poi rilevate da sensori (geofoni) disposti lungo un profilo (o linea sismica). Attraverso lo studio dei tempi di percorrenza, ovvero della velocità delle onde sismiche, è possibile risalire alla sismo-stratigrafia (definita come l'insieme delle caratteristiche geometriche e geofisiche dei sismo-strati) caratterizzante l'area d'indagine.
La tecnica a rifrazione si basa sul concetto di rifrazione delle onde sismiche, fenomeno che si verifica in presenza di mezzi con caratteristiche elastiche diverse (i contrasti di proprietà possono essere associabili a cause di natura stratigrafica, strutturale o idrogeologica). Quando un'onda sismica incontra l'interfaccia tra due mezzi con proprietà differenti, cioè, in presenza di un contrasto d'impedenza sismica[1], parte dell'energia si riflette nel mezzo in cui si propaga l'onda incidente ed una parte, invece, si rifrange in quello sottostante. In particolare, le onde che giungono alla superficie di separazione tra due mezzi con angolo d'incidenza critico (secondo la legge di Snell), dette "onde di testa" (*head waves*), vengono rifratte propagandosi parallelamente all'interfaccia rifrangente (rifrattore) per poi tornare in superficie con lo stesso angolo d'incidenza.
La procedura per indagini a rifrazione consiste nelle seguenti fasi:

1) Acquisizione del segnale sismico generato da sorgente impulsiva mediante l'impiego di un acquisitore multi-canale

[1] Impedenza sismica: prodotto della velocità di propagazione delle onde sismiche in un mezzo per la densità del mezzo stesso.

2) Individuazione dei tempi di arrivo (ai singoli geofoni) delle diverse onde sismiche (onde P e onde SH) attraverso l'analisi dei sismogrammi (procedura di *phase picking*)
3) Calcolo della velocità di propagazione delle onde elastiche (nella fattispecie, secondo la tecnica tomografica) e conseguente ricostruzione del modello sismo-stratigrafico 2D del sottosuolo.

La profondità d'indagine (Z_{max}) varia in funzione della rigidezza del suolo, della lunghezza della stesa e dell'energizzatore impiegato. Una stima approssimativa di Z_{max} può essere ottenuta come:

$$Z_{max} = \frac{D}{m} \quad (1)$$

dove D indica la lunghezza della linea sismica e m varia tra 2 e 4.
Le fasi operative sopra elencate sono descritte nei paragrafi successivi.

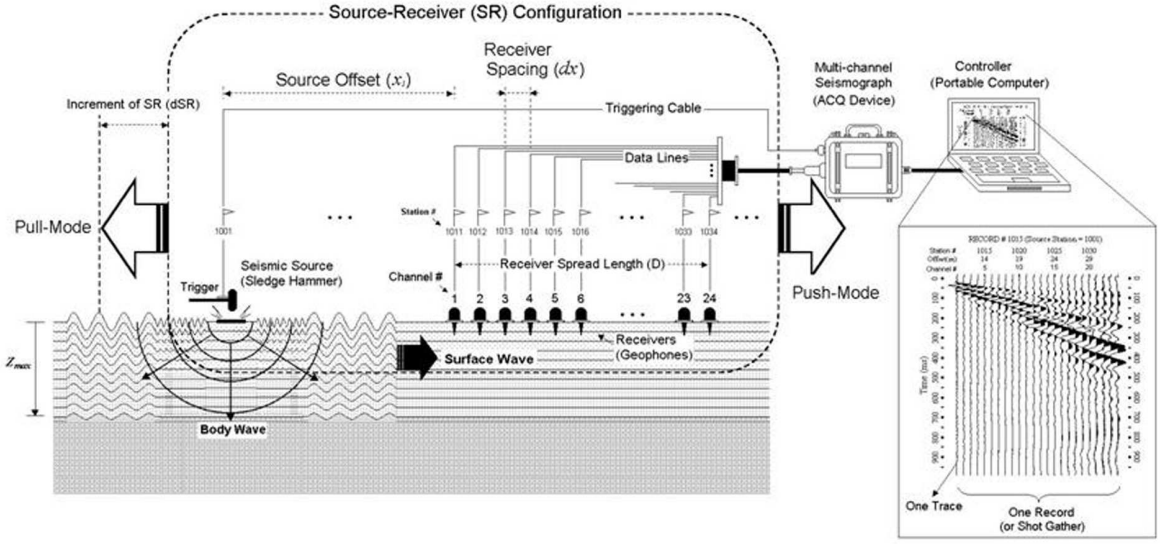


Figura 1 Schema di acquisizione generico per indagine sismica a rifrazione (da http://www.masw.com/).

2.1 Acquisizione del segnale sismico

La strumentazione adottata in fase di acquisizione consiste in:

- un sistema di energizzazione costituito da una mazza del peso di 8kg battente verticalmente su una piastra circolare d'acciaio del diametro di 20cm posta sul piano campagna (p.c.)
- un sistema di ricezione costituito da 24 geofoni verticali (Oyo Geospace SNG 11D/PC-21 di tipo verticale) con frequenza naturale pari a 4.5Hz ed un opportuno cavo di collegamento per la trasmissione del segnale all'apparato di acquisizione

- un sistema di acquisizione costituito da un acquisitore Geode (Geometrics Inc.), le cui caratteristiche tecniche sono specificate in Tabella 1, ed un Personal Computer, dotato di un opportuno software di acquisizione (Geometrics SeisModule Controller v. 9.09.0.0) per l'immagazzinamento del flusso di dati

Tabella 1 Caratteristiche tecniche dell'apparato di acquisizione Geode (Geometrics Inc.).

Caratteristiche tecniche GEODE	
A/D Conversion	24 bit result using Crystal Semiconductor sigma-delta converters and Geometrics proprietary over sampling
Dynamic Range	144 dB (system), 110 dB (instantaneous, measured) at 2 ms, 24 dB
Distortion	0.0005% @ 2 ms, 1.75 to 208 Hz
Bandwidth	1.75 Hz to 20 kHz. Low corner frequency option available
Common Mode Rejection	> 100dB at <= 100 Hz, 36 dB
Crosstalk	-125 dB at 23.5 Hz, 24 dB, 2 ms
Noise Floor	0.20 uV, RFI at 2 ms, 36 dB, 1.75 to 208 Hz
Sample Interval	0.02, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 ms
Stacking Trigger Accuracy	1/32 of sample interval
Maximum Input Signal	2.8V PP at 0Db
Input Impedance	20 kOhm, 0.02 uf
Pre-trigger Data	Up to 4,096 Samples
Preamplifier Gains	Software selectable between 24 and 36 dB. Can be jumpered to allow selection of 12 or 24 dB or jumpered to 0
Anti-alias Filters	-3 dB at 83% of Nyquist frequency, down 90 dB
Acquisition and Display Filters	Low Cut: 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. High Cut: OUT, 250, 500 or 1000 Hz, 24 or 48 dB/ octave
Maximum Record Length	16,384 samples per channel standard, 65,536 samples per channel optional
Data Formats	SEG-2 standard with SGOS. SEG-D and SEG-Y available2
System Software	Single Geode Operating Software (SGOS): Includes full compliment of acquisition, display, plotting, filtering and storage features
Power	Requires 12V external battery. Uses 0.65W/channel during acquisition, sleep mode reduces power consumption by 70% while in standby.
Environmental	Geode:-30 to 70degrees C. Waterproof and submersible. Withstands a 1 m drop onto concrete on 6 sides and 8
Operating System	Windows 98/NT/XP/2000

L'acquisizione del segnale sismico è stata effettuata lungo tre linee di 24 ricevitori ciascuna con le seguenti configurazioni:

- ST01 (Figura 2):

- lunghezza totale dello stendimento: 92m
- numero di geofoni: 24
- distanza inter-geofonica: 4m

- numero di basi di energizzazione per ciascun estremo: 2, a distanze di 20m e 5m rispetto al primo/ultimo geofono dello stedimento
- numero di energizzazioni interne alla stesa: 5 (con disposizione centro-simmetrica), di cui una a centro stesa, due a +/- 36m dal centro e 2 a +/- 20m dal centro
- numero di energizzazioni per ciascuna base (*stacking on*): 3
- durata acquisizione: 1s
- intervallo di campionamento: 0.25ms

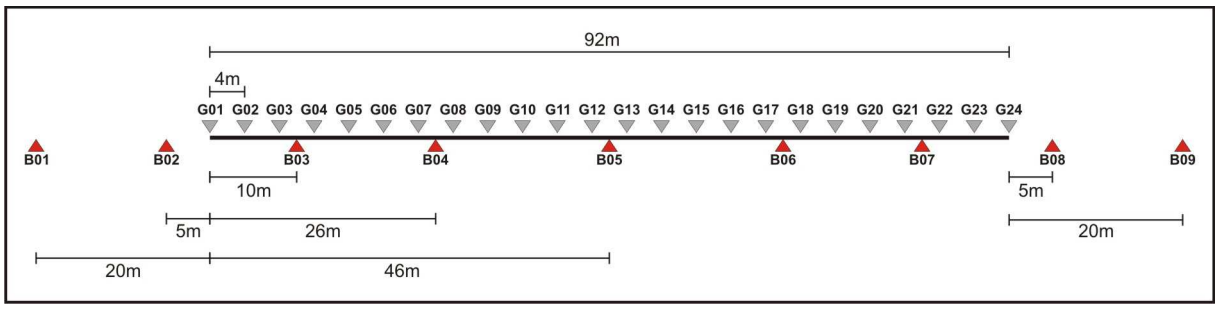


Figura 2 Configurazione geometrica dello stendimento ST01.

- ST02 (Figura 3):

- lunghezza totale dello stendimento: 57.5m
- numero di geofoni: 24
- distanza inter-geofonica: 2.5m
- numero di basi di energizzazione per ciascun estremo: 2, a distanze di 20m e 5m rispetto al primo/ultimo geofono dello stedimento
- numero di energizzazioni interne alla stesa: 3 (con disposizione centro-simmetrica), di cui una a centro stesa e due a +/- 17.5m dal centro
- numero di energizzazioni per ciascuna base (*stacking on*): 3
- durata acquisizione: 1s
- intervallo di campionamento: 0.25ms

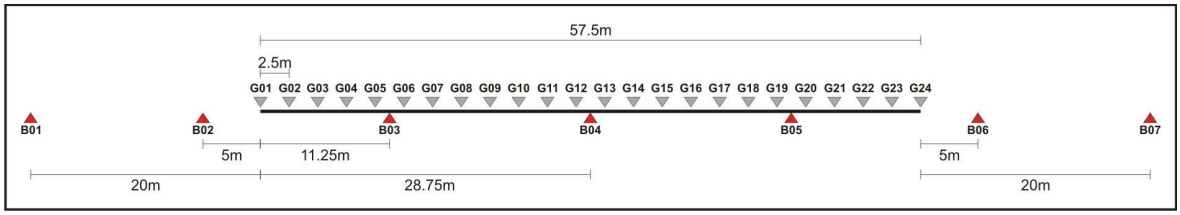


Figura 3 Configurazione geometrica dello stendimento ST02.

- ST03 (Figura 4):

- lunghezza totale dello stendimento: 46m
- numero di geofoni: 24
- distanza inter-geofonica: 2m
- numero di basi di energizzazione per ciascun estremo: 2, a distanze di 19.9m e 2m rispetto al primo/ultimo geofono dello stedimento
- numero di energizzazioni interne alla stesa: 3 (con disposizione centro-simmetrica), di cui una a centro stesa e due a +/- 12.5m dal centro
- numero di energizzazioni per ciascuna base (*stacking off*): 1
- durata acquisizione: 1s
- intervallo di campionamento: 0.125ms

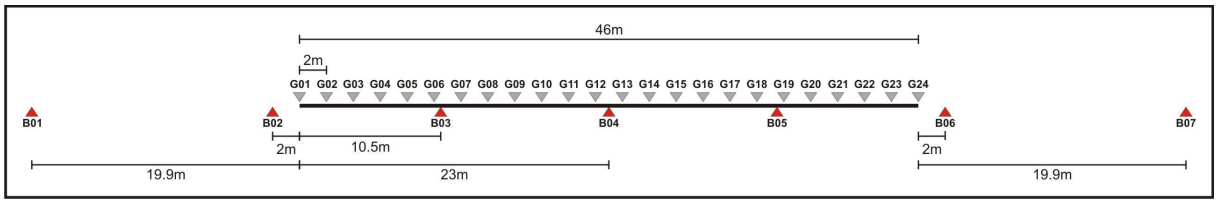


Figura 4 Configurazione geometrica dello stendimento ST03.

Al fine di ridurre l'influenza del rumore antropico ed ambientale, cioè allo scopo di aumentare il rapporto segnale-disturbo, per le stese ST01 e ST02 sono state effettuate 3 energizzazioni per ciascuna base (*shot point*) ed i segnali corrispondenti sono stati sommati (tecnica di *stacking*), ottenendo così un'unica storia temporale per ciascun ricevitore. Il livello del rumore di fondo presente nell'area di studio, da basso a moderato, può essere apprezzato in Figura 5.

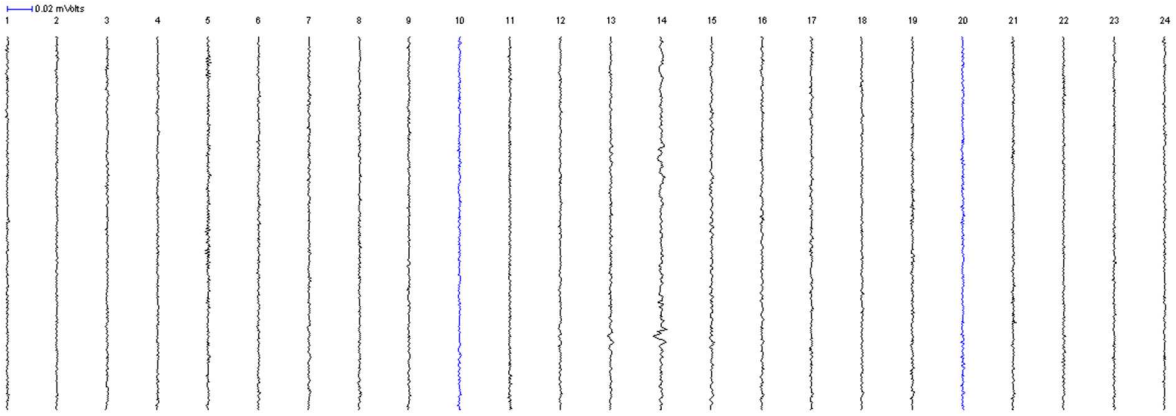


Figura 5 Rumore di fondo (componente verticale).

Figura 6, 7 e 8 mostrano la disposizione dei tre stendimenti e gli apparati strumentali impiegati. Si noti che lo stendi mento ST03 è stato collocato in corrispondenza di un'area dalla topografia non regolare e pertanto si è provveduto ad un'opportuna correzione topografica in fase di elaborazione del dato.



Figura 6 Profilo sismico ST01 e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P.



Figura 7 Profilo sismico ST02 e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P.

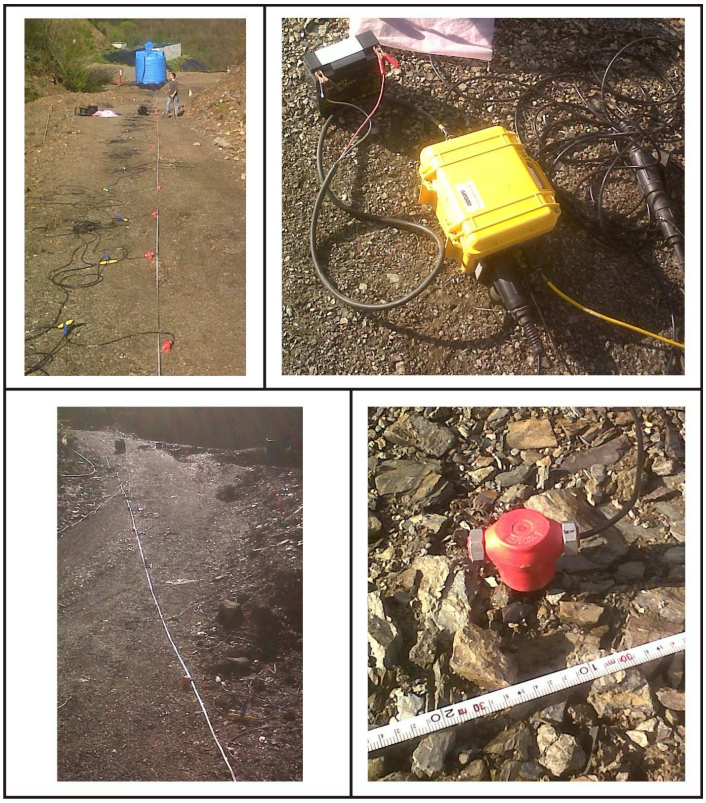


Figura 8 Profilo sismico ST02 e apparati per la generazione e l'acquisizione delle onde P.

2.2 Analisi del segnale sismico

Il dato acquisito così come descritto nel paragrafo precedente è stato processato al fine di definire modelli 2D (sezioni sismo-tomografiche) indicanti la distribuzione della velocità di propagazione delle onde longitudinali nel sottosuolo. A tal scopo, sono stati impiegati i software Pickwin v. 3.14 (Oyo Co., 2005) e Plotrefa v. 2.73 (Oyo Co., 2005).

In primo luogo, i segnali registrati sono stati analizzati per la determinazione dei tempi di primo arrivo a ciascun ricevitore (procedura di *phase picking*). Successivamente, questi sono stati impiegati quali input in un processo d'inversione tomografica.

Figura 9, 10 e 11 mostrano esempi di sismogrammi registrati lungo i tre profili sismici. Da questi sono stati ricavati i tempi di primo arrivo delle onde sismiche a ciascun ricevitore. L'operazione di *phase picking* è ripetuta per ciascun punto di energizzazione. I tempi di arrivo così ottenuti sono riportati in un diagramma tempo-distanza in cui si individuano le cosiddette curve dromocrone (Figure 12 13 e 14). Da queste ultime è possibile ricavare la velocità di propagazione delle onde dirette e rifratte. I tempi di arrivo così come ottenuti dalla procedura di *phase picking*, ovvero i valori puntuali in Figura 12, 13 e 14 sono riportati in Tabella 2, 3 e 4.

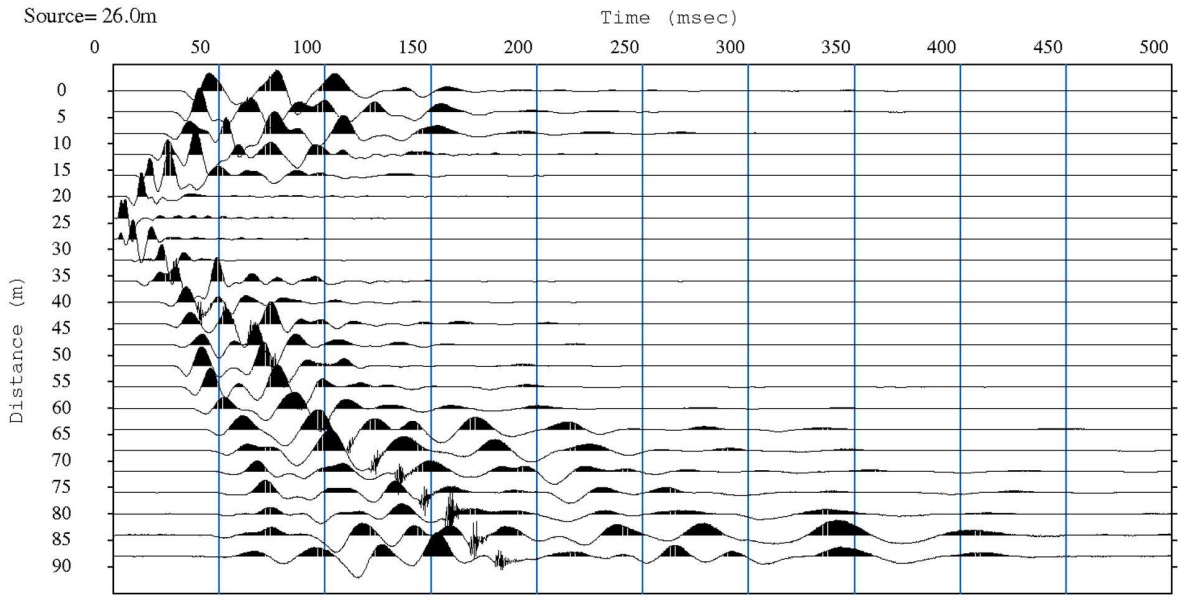


Figura 9 Esempio di registrazione multicanale lungo la stesa ST01.

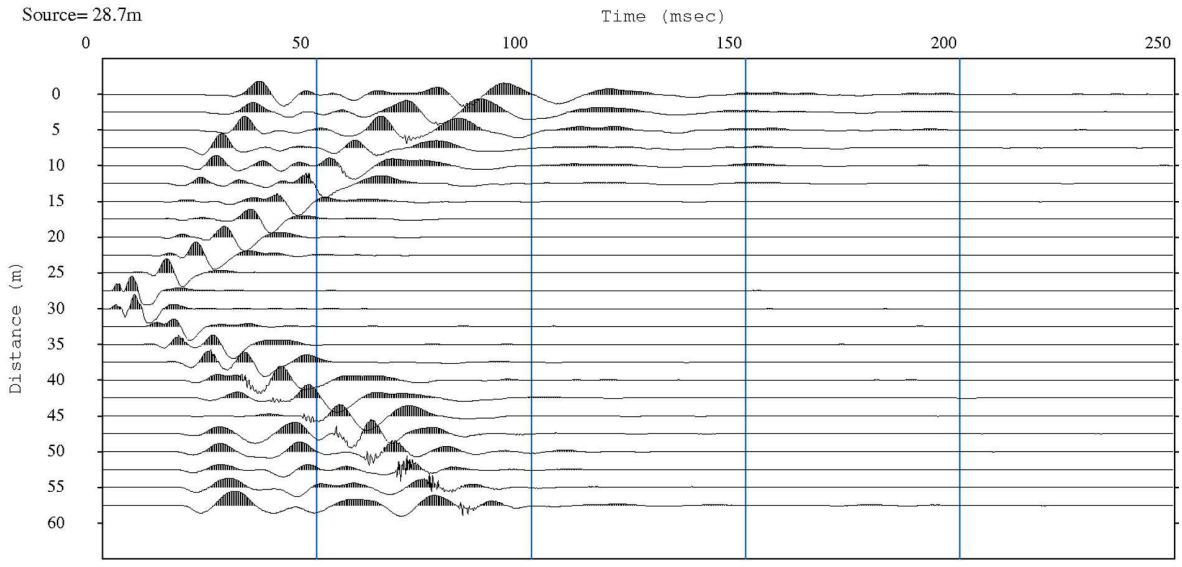


Figura 10 Esempio di registrazione multicanale lungo la stesa ST02.

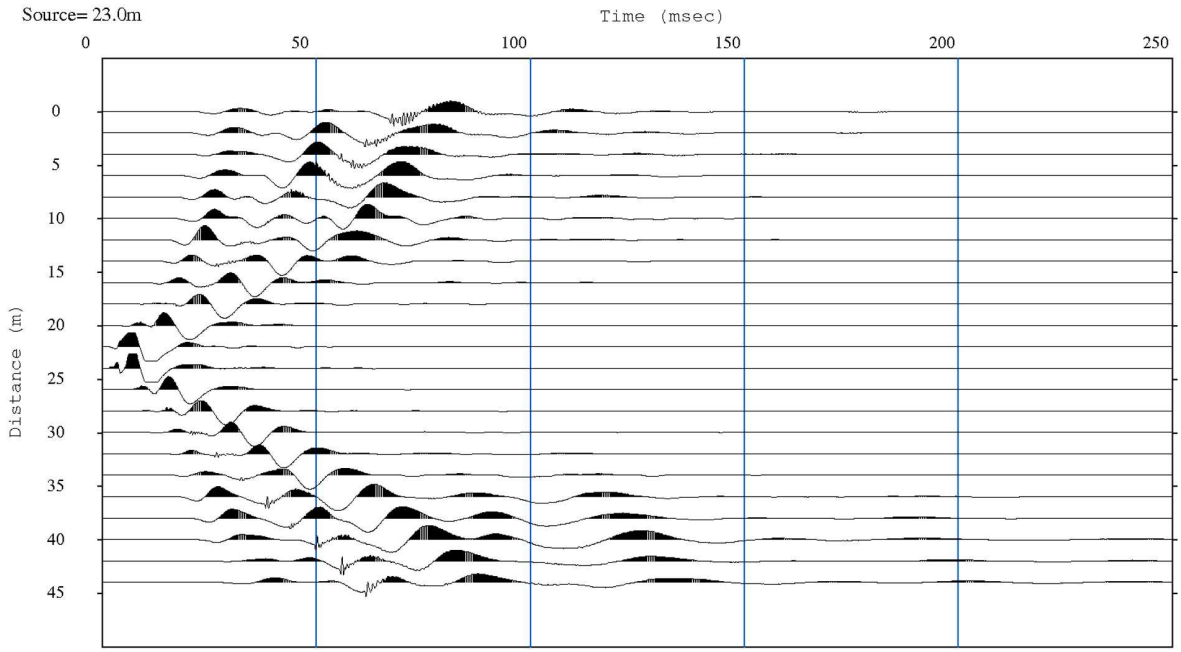


Figura 11 Esempio di registrazione multicanale lungo la stesa ST03.

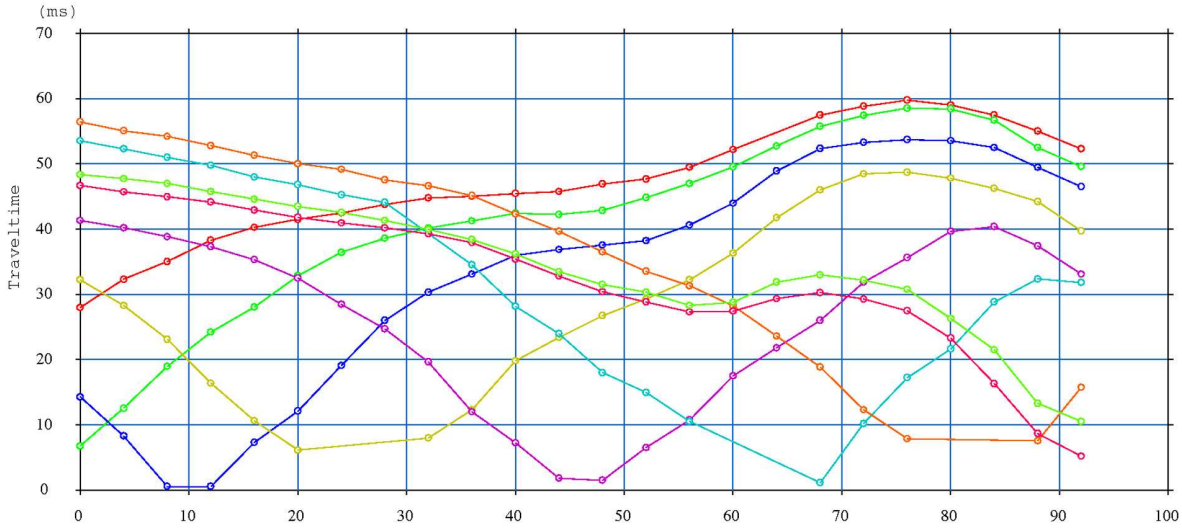


Figura 12 Curve dromocrone relative alla stesa ST01.

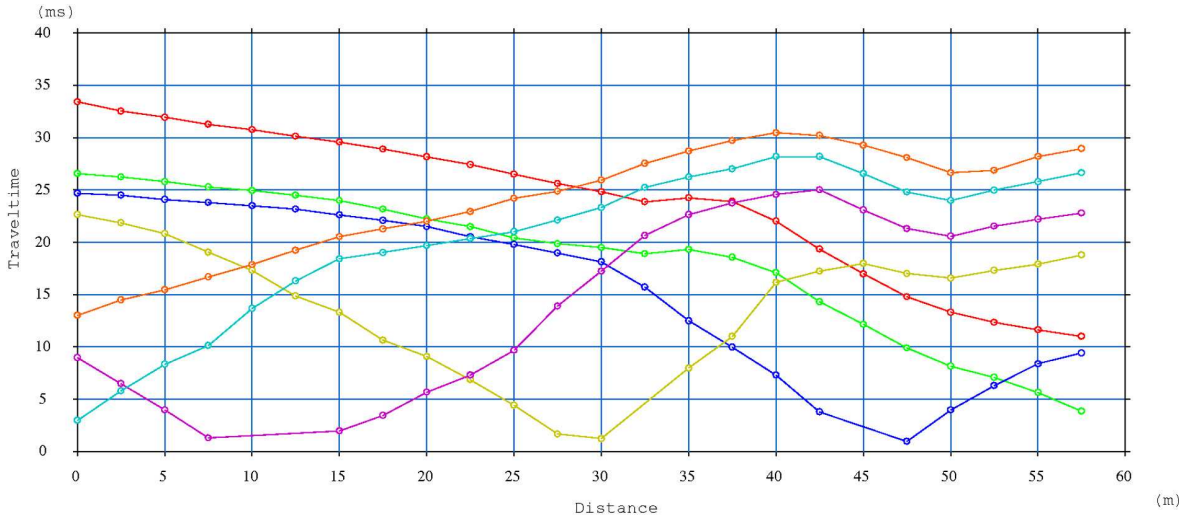


Figura 13 Curve dromocrone relative alla stesa ST02.

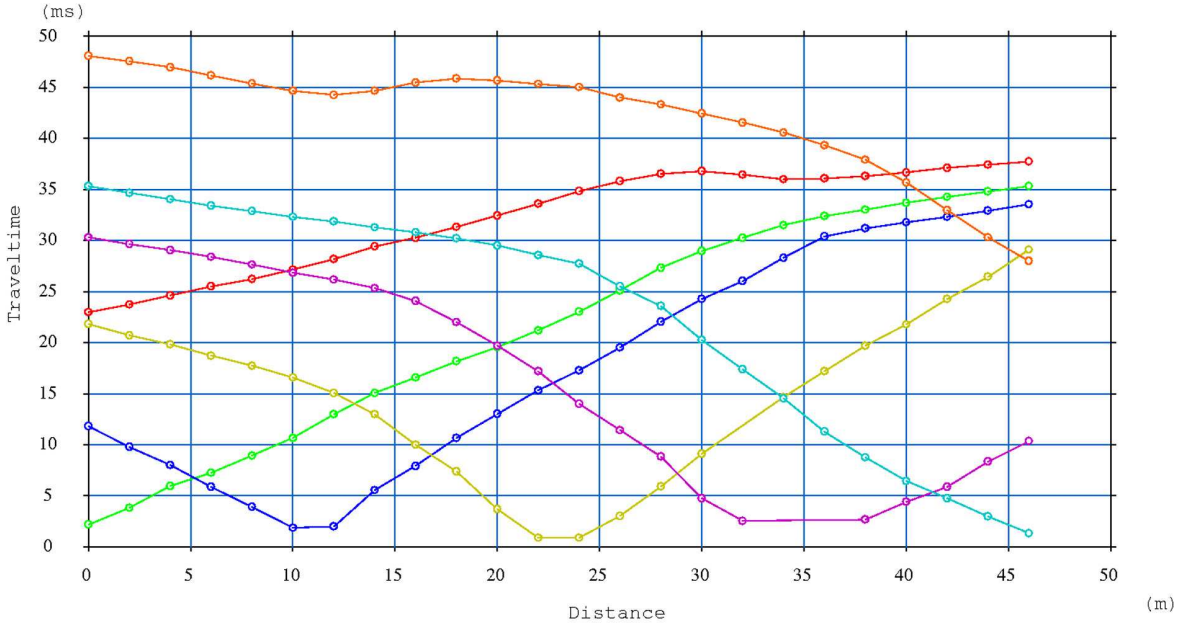


Figura 14 Curve dromocrone relative alla stesa ST03.

Tabella 2 Tempi di primo arrivo (stesa ST01).

Shot #			1	2	3	4	5	6	7	8	9
Distanza dal primo geofono (m)			-20	-5	10	26	46	66	82	97	112
Quota relativa (m)			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Geofono	Distanza (m)	Quota (m)	Tempi di primo arrivo per ciascun shot (ms)								
1	0	0.0	28.000	6.750	14.300	32.237	41.333	53.570278	56.454	46.716	48.355
2	4	0.0	32.300	12.578	8.300	28.296	40.200	52.300	55.111	45.689	47.778
3	8	0.0	35.000	19.000	0.593	23.111	38.867	51.000	54.222	45.000	47.022
4	12	0.0	38.300	24.200	0.593	16.385	37.333	49.800	52.830	44.148	45.750
5	16	0.0	40.300	28.049	7.300	10.667	35.333	48.000	51.348	42.963	44.578
6	20	0.0	41.500	32.889	12.148	6.163	32.500	46.800	50.015	41.837	43.467
7	24	0.0	42.500	36.450	19.111	-	28.500	45.300	49.185	40.988	42.578
8	28	0.0	43.800	38.617	26.015	-	24.750	44.133	47.555	40.197	41.333
9	32	0.0	44.800	40.158	30.370	7.967	19.689	39.333	46.667	39.309	40.000
10	36	0.0	45.000	41.250	33.126	12.291	12.010	34.533	45.126	37.926	38.444
11	40	0.0	45.450	42.444	36.000	19.858	7.269	28.200	42.300	35.417	36.180
12	44	0.0	45.750	42.222	36.889	23.407	1.800	24.000	39.644	32.800	33.481
13	48	0.0	46.950	42.867	37.555	26.756	1.500	18.000	36.533	30.420	31.500
14	52	0.0	47.700	44.867	38.222	29.300	6.500	15.000	33.570	28.839	30.356
15	56	0.0	49.500	47.000	40.667	32.237	10.800	10.533	31.309	27.300	28.300
16	60	0.0	52.200	49.533	44.000	36.300	17.500	-	28.250	27.417	28.800
17	64	0.0	-	52.741	48.889	41.750	21.800	-	23.625	29.333	31.911
18	68	0.0	57.500	55.800	52.385	46.000	26.035	1.126	18.867	30.281	33.022
19	72	0.0	58.864	57.467	53.274	48.500	31.901	10.200	12.333	29.300	32.222
20	76	0.0	59.812	58.578	53.719	48.750	35.667	17.250	7.875	27.500	30.800
21	80	0.0	59.063	58.444	53.556	47.800	39.667	21.630	-	23.333	26.356
22	84	0.0	57.500	56.667	52.500	46.250	40.395	28.830	-	16.333	21.500
23	88	0.0	55.013	52.500	49.500	44.250	37.432	32.385	7.533	8.667	13.300
24	92	0.0	52.313	49.580	46.500	39.704	33.146	31.793	15.800	5.200	10.500

Tabella 3 Tempi di primo arrivo delle onde P (stesa ST02).

Shot #			1	2	3	4	5	6	7
Distanza dal primo geofono (m)			-20	-5	11.25	28.75	46.25	72.5	77.5
Quota relativa (m)			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Geofono	Distanza (m)	Quota (m)	Tempi di primo arrivo per ciascun shot (ms)						
1	0	0.0	13.000	3.000	9.000	22.667	24.685	26.568	33.422
2	2.5	0.0	14.500	5.800	6.500	21.867	24.500	26.250	32.527
3	5	0.0	15.450	8.356	4.000	20.830	24.099	25.800	31.934
4	7.5	0.0	16.681	10.133	1.300	19.052	23.802	25.284	31.276
5	10	0.0	17.867	13.669	-	17.333	23.500	24.948	30.749
6	12.5	0.0	19.259	16.329	-	14.889	23.170	24.500	30.130
7	15	0.0	20.533	18.444	2.000	13.333	22.617	24.000	29.590
8	17.5	0.0	21.274	19.022	3.467	10.667	22.084	23.170	28.899
9	20	0.0	22.015	19.689	5.689	9.111	21.500	22.250	28.181
10	22.5	0.0	22.950	20.356	7.333	6.889	20.543	21.500	27.430
11	25	0.0	24.200	21.022	9.689	4.444	19.800	20.444	26.500
12	27.5	0.0	24.867	22.133	13.911	1.689	19.000	19.858	25.625
13	30	0.0	25.950	23.309	17.244	1.244	18.133	19.500	24.849
14	32.5	0.0	27.533	25.258	20.667	-	15.738	18.923	23.862
15	35	0.0	28.741	26.250	22.667	8.000	12.500	19.300	24.257
16	37.5	0.0	29.718	27.022	23.744	11.022	10.000	18.568	23.901
17	40	0.0	30.459	28.222	24.578	16.158	7.300	17.093	22.000
18	42.5	0.0	30.222	28.222	25.022	17.244	3.800	14.328	19.333
19	45	0.0	29.274	26.574	23.111	17.975	-	12.155	17.000
20	47.5	0.0	28.089	24.800	21.333	17.022	1.000	9.916	14.800
21	50	0.0	26.667	24.000	20.578	16.578	4.000	8.165	13.300
22	52.5	0.0	26.867	25.000	21.556	17.333	6.313	7.085	12.352
23	55	0.0	28.200	25.800	22.222	17.911	8.395	5.663	11.654
24	57.5	0.0	28.950	26.667	22.800	18.800	9.442	3.858	11.035

Tabella 4 Tempi di primo arrivo delle onde P (stesa ST03).

Shot #			1	2	3	4	5	6	7
Distanza dal primo geofono (m)			-19.9	-2	10.5	23	35.5	48	65.9
Quota relativa (m)			2.5	2.2	1.6	1.0	0.3	0.0	0.0
Geofono	Distanza (m)	Quota (m)	Tempi di primo arrivo per ciascun shot (ms)						
1	0	2.1	22.963	2.163	11.793	21.800	30.311	35.333	48.066
2	2	2.0	23.704	3.800	9.778	20.675	29.630	34.627	47.533
3	4	1.9	24.593	5.952	8.000	19.793	29.037	34.035	46.946
4	6	1.8	25.481	7.225	5.867	18.673	28.385	33.398	46.156
5	8	1.7	26.222	8.911	3.911	17.712	27.644	32.849	45.366
6	10	1.6	27.121	10.667	1.867	16.566	26.815	32.296	44.667
7	12	1.5	28.148	12.938	2.000	15.052	26.163	31.862	44.247
8	14	1.4	29.410	15.052	5.556	12.971	25.333	31.269	44.625
9	16	1.3	30.250	16.578	7.911	9.982	24.089	30.775	45.432
10	18	1.2	31.300	18.155	10.625	7.374	22.000	30.222	45.827
11	20	1.1	32.444	19.516	13.022	3.687	19.667	29.480	45.689
12	22	1.0	33.570	21.200	15.320	0.849	17.200	28.576	45.300
13	24	0.9	34.815	23.000	17.251	0.889	14.000	27.714	45.000
14	26	0.8	35.800	25.086	19.490	3.022	11.407	25.481	44.000
15	28	0.7	36.500	27.303	22.018	5.911	8.830	23.565	43.300
16	30	0.6	36.800	28.971	24.257	9.093	4.741	20.250	42.444
17	32	0.5	36.444	30.250	26.013	-	2.519	17.356	41.555
18	34	0.4	36.000	31.506	28.269	14.667	-	14.525	40.578
19	36	0.3	36.082	32.395	30.393	17.159	-	11.259	39.333
20	38	0.2	36.306	32.988	31.192	19.661	2.667	8.751	37.911
21	40	0.1	36.642	33.679	31.737	21.768	4.385	6.420	35.654
22	42	0.0	37.096	34.232	32.290	24.250	5.867	4.741	32.948
23	44	0.0	37.407	34.765	32.904	26.444	8.333	2.937	30.281
24	46	0.0	37.728	35.333	33.514	29.076	10.333	1.333	28.000

2.3 Tomografia sismica e caratterizzazione della sismo-stratigrafia

I tempi di arrivo ottenuti dall'analisi dei sismogrammi sono stati utilizzati quali input per il processo di inversione tomografica. Tale metodo è stato impiegato in quanto conduce a risultati più accurati rispetto ad altri approcci comunemente utilizzati in sismica a rifrazione soprattutto in presenza di incrementi graduali di velocità anziché di forti contrasti, in caso di marcate variazioni laterali di velocità ed in caso di topografie accidentate, poco regolari o pendii acclivi. Tale operazione permette di ricavare la distribuzione della velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo (modello bidimensionale di velocità) dato un insieme di misure dei tempi di percorrenza e un modello iniziale del terreno a strati piano paralleli. L'inversione dei tempi di percorso consente quindi di ricavare i parametri del modello del terreno, ossia la velocità dei diversi strati e la profondità delle superfici di discontinuità. La tomografia sismica prevede l'applicazione di una tecnica di "*ray-tracing*" che, data una distribuzione iniziale di velocità del sottosuolo, permette di simulare la propagazione dei raggi sismici all'interno del modello, ovvero di stimare i tempi di percorrenza sintetici. La minimizzazione dei residui tra tempi osservati e sintetici conduce alle definizione del modello finale di velocità.

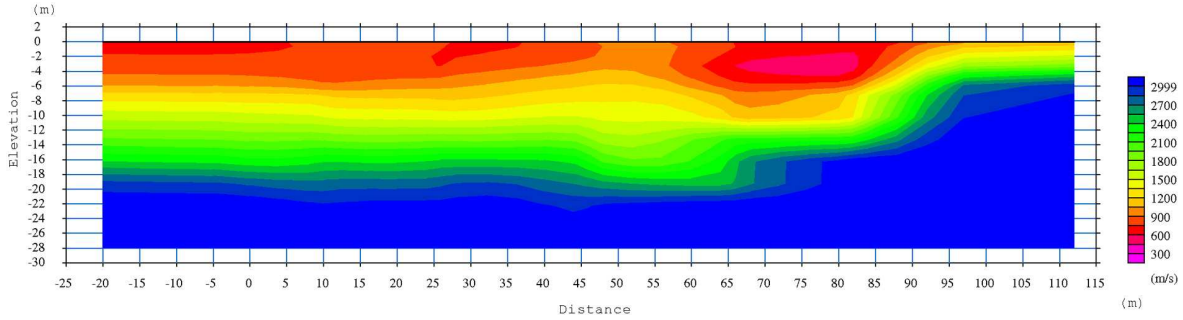


Figura 15 Sezione sismo-tomografica in onde P per la stesa ST01.

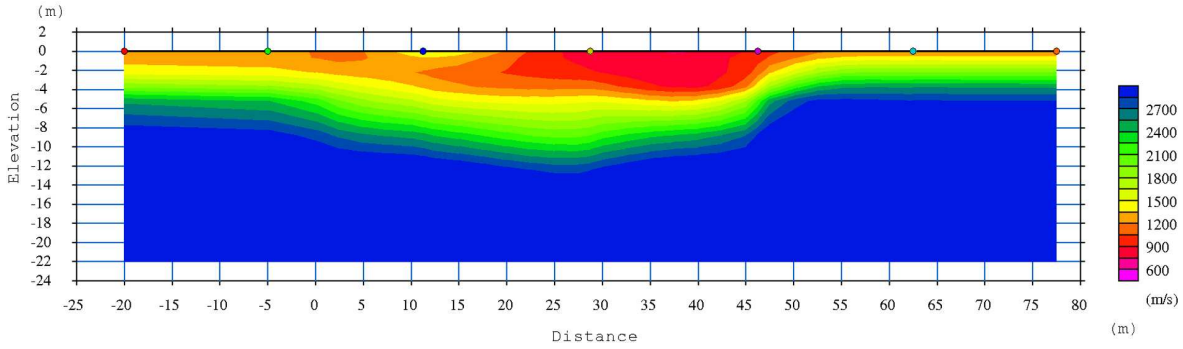


Figura 16 Sezione sismo-tomografica in onde P per la stesa ST02.

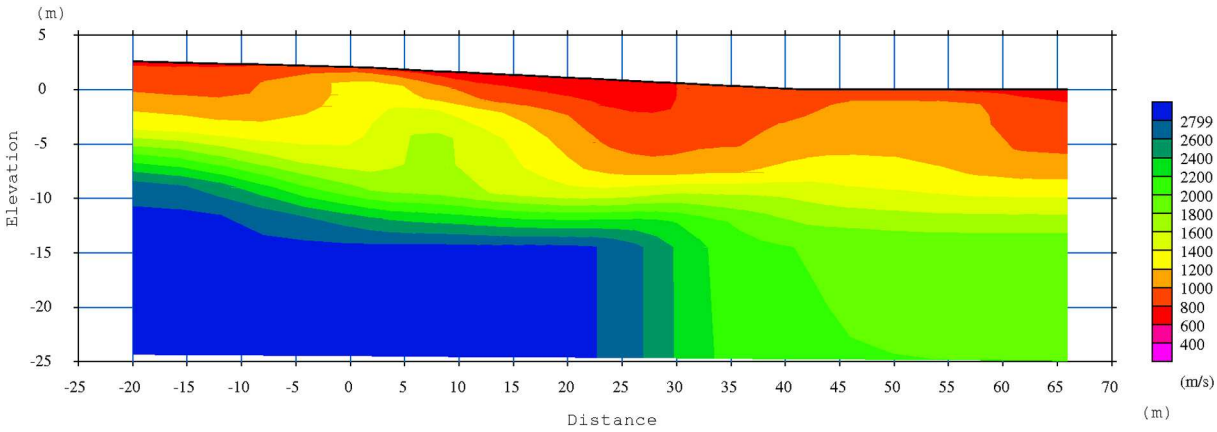


Figura 17 Sezione sismo-tomografica in onde P per la stesa ST03.

Figura 15, 16 e 17 mostrano le sezioni sismo-tomografiche per i tre stendimenti. Dal tomogramma in Figura 15 si evincono sensibili variazioni laterali del gradiente di velocità, più marcato nella porzione meridionale (+110m sull'immagine) rispetto a quella settentrionale (-20m) dove è possibile osservare un netto aumento dei valori di Vp in posizione meno superficiale rispetto all'altro lato dello stendimento. Nonostante le variazioni laterali nella distribuzione dei valori di Vp nel sottosuolo, è possibile fornire un modello interpretativo del sottosuolo a partire sia dal tomogramma in Figura 15 che dall'andamento delle dromocrone in Figura 12. In particolare, è possibile distinguere un rifrattori principali posto ad una profondità variabile tra tra circa 1m e 8m dal p.c., che separa il sismostrato superficiale,

caratterizzato da valori di V_P compresi tra circa 400 e 1000m/s, da quello sottostante, caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1400m/s e 2400m/s. Si noti l'inspessimento dei livelli superficiali nella porzione settentrionale della sezione tomografica; il secondo sismostrato mostra invece un netto inspessimento nella porzione più occidentale, caratterizzata da un minor gradiente di velocità. Le velocità del sismostrato più profondo raggiungono valori di circa 2600-2800m/s.

Figura 16 mostra la sezione sismo-tomografica ottenuta dalle acquisizioni delle onde longitudinali per lo stendimento ST02. Dal tomogramma in Figura 16 si osservano variazioni sostanziali nel gradiente di velocità nella parte centrale della sezione dove si osservano valori di V_P inferiori fino a profondità di circa 6m. Dall'interpretazione della sezione sismo-tomografica, è possibile definire un modello semplificato a 2 strati, ovvero con un rifrattore principale posto ad una profondità compresa tra 1m e 6m dal p.c., che separa il sismostrato superficiale, caratterizzato nuovamente da valori di V_P compresi tra circa 400 e 1000m/s, da quello sottostante, caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1400m/s e 2400m/s; anche in questo caso, il secondo sismostrato può contenere un materiale roccioso particolarmente che passa in un livello sottile da alterato e fratturato ad un materiale in discrete condizioni. Anche in questo caso le velocità del sismostrato più profondo raggiungono valori di circa 2600-2800m/s.

Figura 17 mostra la sezione sismo-tomografica ottenuta dalle acquisizioni delle onde longitudinali per lo stendimento ST03. Dal tomogramma in Figura 17 si osservano variazioni sostanziali nel gradiente di velocità nella parte centrale della sezione dove si osservano valori di V_P inferiori fino a profondità di circa 6m. Dall'interpretazione della sezione sismo-tomografica, è possibile definire un modello semplificato a 2 strati, ovvero con un rifrattore principale posto ad una profondità compresa tra 1m e 5m dal p.c., che separa il sismostrato superficiale, caratterizzato nuovamente da valori di V_P compresi tra circa 400 e 1000m/s, da quello sottostante, caratterizzato da valori di V_P compresi tra 1400m/s e 2400m/s; anche in questo caso, il secondo sismostrato può contenere un materiale roccioso particolarmente che passa in un livello sottile da alterato e fratturato ad un materiale in discrete condizioni. Anche in questo caso le velocità del sismostrato più profondo, che sembra comparire nel settore occidentale della stesa raggiungono valori di circa 2600-2800m/s.

3 Misura di microtremore (metodo Nakamura)

Il metodo Nakamura (Nakamura, 1989) è una tra le tecniche più utilizzate per lo studio della risposta sismica di un sito. Tale metodo, ormai consolidato a livello scientifico (es. SESAME Working Group, 2004; De Ferrari et al., 2008; Castellaro & Mulargia, 2009) ed in via di diffusione in ambito professionale, consente di determinare la frequenza fondamentale di vibrazione del terreno (o frequenza di risonanza), f0, a partire da registrazioni di microtremore. Quest'ultimo si assume sia principalmente costituito da onde sismiche superficiali, nella fattispecie onde di Rayleigh. Il contrasto d'impedenza sismica tra gli strati di terreno superficiali ed il substrato roccioso è la causa dell'amplificazione al sito.

L'ipotesi fondamentale su cui si basa il metodo Nakamura è quella per cui la componente verticale del moto sia esente da effetti di amplificazione. Verificata tale ipotesi, la funzione di amplificazione è determinabile come il rapporto tra le componenti spettrali orizzontali (H) e

quella verticale (V) di una stessa registrazione in superficie. Tale funzione è propriamente indicata come curva H/V (per questo spesso si parla di tecnica HVSR – Horizontal to Vertical Spectral Ratio technique) ed esprime la variazione dell'amplificazione del terreno in funzione della frequenza.
La frequenza di risonanza corrisponde al primo picco di amplificazione individuabile sulla curva H/V (con ampiezza maggiore di 2 in base a quanto indicato nelle linee guida stilate nell'ambito del progetto internazionale SESAME (SESAME Working Group, 2004)) e, nel caso di terreno a comportamento lineare, può essere messa in relazione allo spessore dei sedimenti, h, e alla velocità media di propagazione delle onde di taglio, VS, nei sedimenti stessi (es. Kramer, 1996):

$$f_0 = \frac{V_S}{4h} \tag{2}$$

Si specifica che, per definizione, la curva H/V non può considerarsi quale significativa del livello assoluto di amplificazione del sito.
Nei paragrafi successivi sono descritte le procedure di acquisizione ed elaborazione del microtremore nonché l'analisi dei risultati.

3.1 Acquisizione del microtremore

L'acquisizione del rumore ambientale ha previsto l'installazione di una stazione sismica (velocimetro). La strumentazione adottata è elencata di seguito e mostrata in Figura 18:

- Sismometro (velocimetro): Nanometrics Trillium Compact (larghezza di banda: 0.01s - 120s)
- Acquisitore: Nanometrics Taurus (risoluzione strumentale: 24bit; dinamica strumentale: > 140db; frequenza di campionamento impostata a 100Hz)

Riguardo al sismometro, si precisa che, rispetto ad altri strumenti impiegati per applicazioni analoghe basati su geofoni con periodi propri di 4.5Hz, il Trillium Compact è un sismometro broadband con geofono tri-assiale condizionato elettronicamente in modo da fornire una curva di risposta piatta per periodi fino a 120s (0.0083Hz). Nella pratica questo si traduce nella possibilità di studiare la risposta sismica di aree caratterizzate da contrasti d'impedenza molto profondi, (ad esempio, valli alluvionali), cosa che non sarebbe possibile nel caso di strumenti con frequenze naturali maggiori (es. 4.5Hz).



Figura 18 Strumentazione impiegata per la registrazione del microtremore.

Il *survey* ha previsto un punto di misura (vedere Tavola 1) presso cui è stata effettuata una registrazione di durata pari a circa 40 minuti.

3.2 Elaborazione del microtremore

Come osservato precedentemente, il metodo Nakamura (Nakamura, 1989) consiste nel calcolo dei rapporti degli spettri di Fourier relativi alle componenti orizzontali e verticale del segnale registrato (rapporti H/V). Per ogni sito di misura saranno quindi calcolati due rapporti spettrali: uno relativo alla componente Nord-Sud (NS) rispetto a quella verticale (Z) ed uno relativo alla componente Est-Ovest (EW) sempre rispetto alla verticale (Z).
Ai fini della determinazione dei rapporti H/V è stato impiegato il software di elaborazione Geopsy V. 2.6.3 (http://www.geopsy.org/). Ciascun segnale registrato è stato suddiviso in finestre temporali della durata di 40s ciascuna. Successivamente è stata effettuata un'analisi spettrale (calcolo dello spettro di Fourier) per ciascuna finestra e, al fine di eliminare eventuali spike (es. variazioni improvvise del segnale dovute a rumore antropico) e facilitare così l'interpretazione dei rapporti H/V, gli spettri di Fourier sono stati "lisciati" applicando una opportuna funzione di smoothing (funzione Konno-Omachi con costante di smoothing uguale a 25). Infine, la funzione di amplificazione è stata determinata come la media dei rapporti H/V degli spettri di Fourier relativi a ciascuna finestra di segnale. La curva così calcolata risulta quindi una misura statistica effettuata su diverse porzioni di segnale di ampiezza costante.

3.3 Analisi ed interpretazione delle curve H/V

Figura 19 mostra gli spettri di Fourier medi relativi a ciascuna componente del segnale acquisito. La curva H/V (determinata come la media delle curve H/V per le due componenti NS e EW) è presentata in Figura 20. La linea continua rappresenta la curva media mentre quelle tratteggiate delimitano la banda d'incertezza. Dalla curva si evincono chiaramente due distinti fenomeni di amplificazione, uno a circa 6.5Hz (frequenza fondamentale del sito di studio) ed uno tra a circa 15Hz. Dal punto di vista sismo-stratigrafico, i due picchi di amplificazione potrebbero essere associati a due distinti contrasti d'impedenza: uno più superficiale (identificato dall'amplificazione a 15Hz) ed uno più profondo (individuato dal picco a 2.9Hz).

Mettendo in relazione la frequenza fondamentale di vibrazione (f_0 = 6.5Hz) con i dati stratigrafici ricavati dalla sismica a rifrazione e dai sondaggi geognostici è possibile desumere, in modo approssimativo, la profondità del *bedrock* sismico, ovvero la profondità dell'interfaccia a cui corrisponde un marcato contrasto tra le proprietà dei materiali al contatto. Ipotizzando, per i terreni più superficiali (coltre detritica superficiale), un valor medio di V_S compreso tra 180m/s e 280m/s (estrapolato da misure geofisiche pregresse condotte in siti caratterizzati da terreni simili) e applicando Equazione 1 si ricava valore di *h* compreso tra circa 7m 11m.

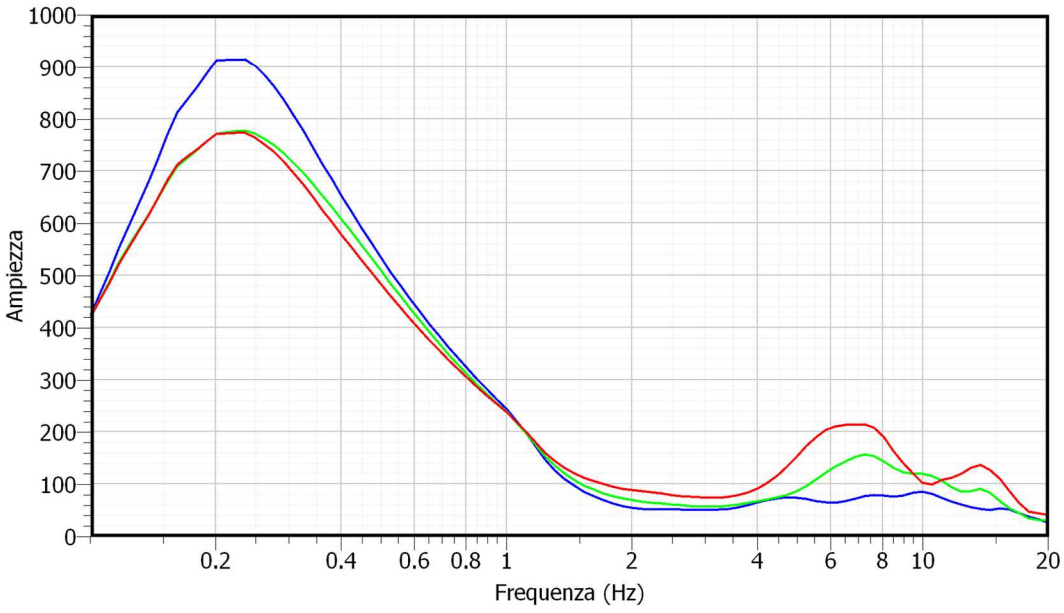


Figura 19 Spettri di Fourier del microtremore acquisito: verticale (blu), NS (verde), EW (rosso).

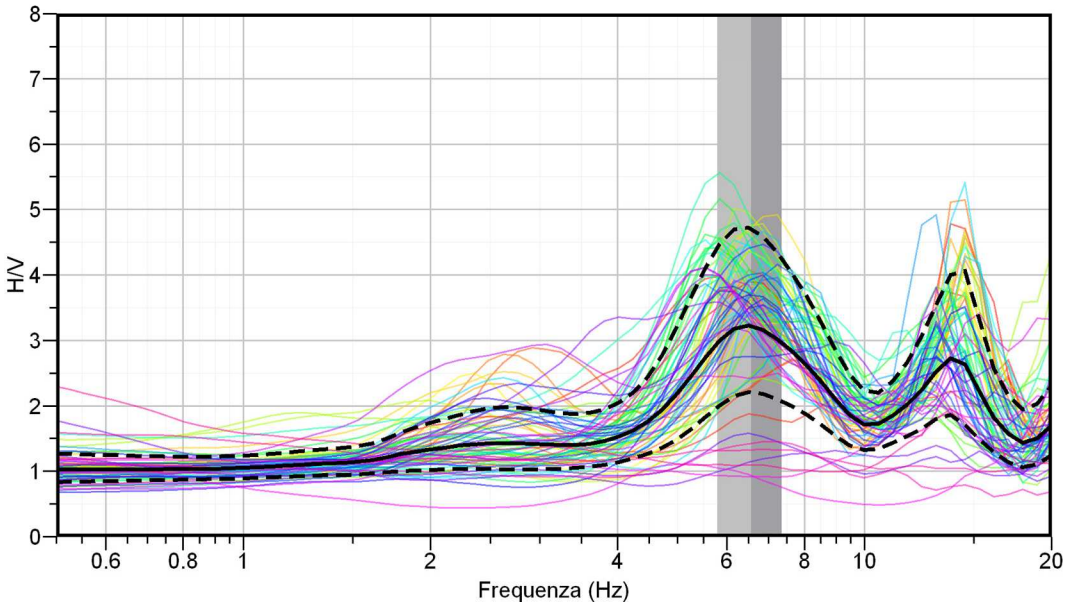


Figura 20 Curva H/V.

4 Geoelettrica

Il metodo impiegato, noto come metodo di resistività, consiste nella misura della resistività del terreno, effettuata inviando nel sottosuolo, tramite due elettrodi (elettrodi di corrente), una corrente di intensità nota e misurando, tramite due ulteriori elettrodi (elettrodi di potenziale), la differenza di potenziale prodotta, la quale varierà in funzione dei mezzi attraversati ovvero in funzione della presenza di minerali conduttori e della percentuale d'acqua. Ricavata quindi la distribuzione di resistività nel sottosuolo è possibile fornire una descrizione geologica dell'area d'indagine. Tabella 5 riassume i valori di resistività per alcuni tipi di rocce. Da questa si deduce una parziale sovrapposizione nei valori dei diversi tipi di materiale. Tale sovrapposizione, come già detto, è dovuta sia alla concentrazione di minerali conduttori che alla percentuale d'acqua. Quest'ultima ha una resistività variabile da circa 10 a $10^2\Omega$m, a seconda della concentrazione dei sali disciolti. Una maggiore concentrazione di sali disciolti implicherà una maggior conducibilità ovvero una minor resistività. Pertanto, il metodo della resistività appare una tecnica ideale per individuare e mappare interfacce d'acqua oltre che, unitamente ad indagini sismiche, per identificare con maggior dettaglio corpi isolati, come massi o zone inquinate. Altri fattori che influenzano la resistività di una roccia sono la porosità (ad esempio, le rocce sedimentarie, che sono usualmente più porose ed hanno un maggiore contenuto in acqua, normalmente hanno valori di resistività più bassi delle rocce ignee e metamorfiche), il grado di cementazione, il grado di fatturazione, la tessitura, il contenuto in argilla (un terreno argilloso ha sempre valori di resistività più bassi di quelli di un terreno sabbioso) e la temperatura (aumentando la temperatura la resistività tende a diminuire). Tutto ciò si rifletterà nei valori di resistività misurati. In altri termini, un dato tipo di roccia potrà avere un ampio intervallo di resistività, da 10^3 a $10^6\Omega$m, a seconda che essa sia asciutta o bagnata ed in funzione delle sue caratteristiche intrinseche.
La procedura per indagini geolettriche secondo il metodo della resistività consiste in:

1) generazione di corrente nel sottosuolo e misura della differenza di potenziale in corrispondenza di coppie di elettrodi per la definizione di una sezione bi-dimensionale (2D) di resistività apparente (nota come pseudo-sezione)
2) calcolo della resistività "reale" e definizione di un modello 2D del sottosuolo (nella fattispecie, secondo la tecnica tomografica) identificante possibili variazioni latero-verticali nella distribuzione della resistività stessa.

La resistività apparente è definita come la resistività di un semispazio elettricamente omogeneo ed isotropo che presenti gli stessi rapporti tra la corrente applicata e la differenza di potenziale per una data disposizione e spaziatura degli elettrodi. In altre parole, la resistività apparente ρ_a è la resistività che dovrebbe avere un terreno omogeneo affinché, immettendo una corrente I, si misuri una differenza di potenziale pari a ΔV.

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \tag{4}$$

dove K è il fattore geometrico, che varia in funzione della disposizione elettrodica.
Se il terreno è omogeneo, la resistività apparente coinciderà con quella reale; al contrario, varierà al variare della posizione degli elettrodi rispetto ai mezzi presenti nel sottosuolo. La resistività "reale" può essere ricavata da quella apparente risolvendo un problema inverso.
La profondità d'indagine varia in funzione della distanza inter-elettrodica e, più in generale, della disposizione degli elettrodi, sia quelli di corrente che quelli di potenziale. Una stima approssimativa della massima profondità d'indagine (Z_{max}) può essere ottenuta impiegando Equazione 1 con m variabile tra 5 e 7.
Le fasi operative sopra elencate sono descritte nei paragrafi successivi.

Tabella 5 Valori di resistività di alcune rocce e minerali (da Soldoveri, 2005).

Rocce e minerali metallici	Resistività (Ω m)
Sedimentarie	
Calcare chalk	50 ÷ 150
Argilla (clay)	1 ÷ 100
Ghiaia (gravel)	100 ÷ 5000
Calcare (limestone)	50 ÷ 10^7
Marna (marl)	1 ÷ 100
Quarzite (quartzite)	10 ÷ 10^8
Argilla (shale)	10 ÷ 1000
Sabbia (sand)	500 ÷ 5000
Arenaria (sandstone)	1 ÷ 10^8
Ignee e Metamorfiche	
Basalto	10 ÷ 10^7
Gabbro	10^3 ÷ 10^6
Granito	10^2 ÷ 10^6
Marmo	10^2 ÷ 10^8
Scisto	10 ÷ 10^4
Ardesia	10^2 ÷ 10^7
Minerali e minerali metallici	
Argento	1,6 ·10^{-8}
Grafite (giacimento massivo)	10^{-4} ÷ 10^{-3}
Galena (Pbs)	10^{-3} ÷ 10^2
Magnetite di giacimento	1 ÷ 10^5
Sfalerite (ZnS)	10^3 ÷ 10^6
Pirite	10^2
Calcopirite	10^{-5} ÷ 0,3
Quarzo	10^{10} ÷ 2 · 10^{14}
Salgemma	10 ÷ 10^{13}
Acque ed effetto del contenuto in sale	
Acqua pura	10^6
Acque naturali	1 ÷ 10^3
Acqua di mare	0,2
Sale 20%	5 · 10^{-2}
Granito 0% di acqua	10^{10}
Granito 0,19% di acqua	10^6
Granito 0,31% di acqua	4 · 10^3

4.1 Misura della differenza di potenziale

Le misure di resistività sono state effettuate lungo due allineamenti circa ortogonali tra loro, corrispondenti agli stendimenti sismici ST01 ed ST02 (Figura 21 e 22). In dettaglio, sono state installate due linee di 48 elettrodi con distanza inter-elettrodica di 3m la prima (ST01) e 2m la seconda (ST02) per lunghezze complessive di 141m e 94m rispettivamente.



Figura 21 Profilo geoelettrico GE01.



Figura 22 Profilo geoelettrico GE02.

L'apparecchiatura adottata per la misura di resistività consiste in:

- un sistema per l'immissione di corrente nel terreno (batteria)
- una serie di elettrodi (impiegati a serie di quattro, due di corrente e due di potenziale) di acciaio inox collegati tra loro tramite cavo multipolare

- un sistema di acquisizione costituito da un georesistimetro Syscal Pro Switch 48 (Iris Instruments) a 48 canali in configurazione multielettrodica le cui caratteristiche tecniche sono specificate in Tabella 6

Il georesistivimetro impiegato è dotato di un sistema di gestione e commutazione automatica degli elettrodi, permettendo quindi di considerare tutte le possibili combinazioni quadripolari. Specificamente, l'indagine è stata effettuata con un'acquisizione multielettrodo in configurazioni Wenner e dipolo-dipolo per un totale di 1063 misure (equivalenti a 1063 quadripoli) nel primo caso e 360 nel secondo. Le due configurazioni d'acquisizione sono descritte nei paragrafi successivi.
La fase di acquisizione è stata preceduta dalla verifica dell'assenza di resistenze di contatto, dovute all'interferenza elettrica data da uno scadente contatto elettrodo-terreno.

Tabella 6 Caratteristiche tecniche del Syscal Pro Switch 48 (Iris Instruments).

Syscal Pro Switch 48
Transmitter
Max voltage: 800V in switch mode
Max voltage: 1000V in manual mode
Max current: 2.5A, typ. accuracy 0.2%
Max Power: 250W with internal DC/DC converter and 12V external battery; 1200W with external AC/DC and Motor Gene
Option 25mA max for readings on samples
Pulse duration: 0.2s, 0.5s, 1s, 2s, 4s, 8s
Internal 12V, 7Ah battery, plug for external battery
Receiver
Automatic ranging, 10 input channels
Input impedance: 100 Mohm
Max voltage channel 1: 15V
Max voltage sum of channel 2 to 10: 15V
Protection up to 1 000V
Typ accuracy: 0.2%, resolution: 1 microV
50 to 60Hz power line frequency rejection
Stacking process, SP linear drift correction
Reading of current, voltage, standard dev., 20 IP windows (preset or selectable)
Internal 12V, 7Ah battery
General
Memory: 21 000 readings USB & SD card link
GPS input for coordinates
Fiber glass casing, weather proof
Temperature range: -20 to +70°C
SYSCAL Pro Switch 48: 31x23x36cm
Weight: 13kg, Cable w/ 24 take-out: 23kg

4.1.1 Dispositivo Wenner

Il dispositivo Wenner è di tipo simmetrico con uguale spaziatura tra gli elettrodi di corrente (indicati con le sigle A e B) e gli elettrodi di potenziale (indicati con le sigle M e N). Per ogni spaziatura elettrodica vengono misurati i valori di potenziale agli elettrodi M e N e, contemporaneamente, i valori di intensità di corrente immessa nel terreno per mezzo degli elettrodi A e B. Nella configurazione di Wenner il fattore geometrico è dato da:

$$K = 2\pi a = \frac{2}{3}\pi L \qquad (5)$$

Dove *a* rappresenta la distanza tra ogni coppia di elettrodi contigui ed *L* la lunghezza del dispositivo quadripolare. Nell'esecuzione delle misure, *a* assumerà valori via via crescenti pari a *ms*, dove *s* è la spaziatura tra gli elettrodi ed *m* un intero che va da 1 alla parte intera di (*N*-1)/3 (*N* indica il numero totale di elettrodi). Il numero totale di misure che si possono ottenere per ogni valore di *m* è *N*-3*m*. Operativamente, le prime misure saranno eseguite con *a* = *s*, cominciando dai primi quattro elettrodi posti ad una delle estremità dello stendimento e spostandosi poi man mano verso l'altra estremità. Il numero totale di queste misure sarà quindi *N*-3. Si effettuano poi le misure con *a* = 2*s*. Il loro numero sarà *N*-3·2. Si continua in questo modo finché non si raggiunge il valore massimo di *a* per il numero di elettrodi disponibili. A titolo d'esempio, in Figura 23 è rappresentata la sequenza di misure nel caso di 24 elettrodi. Dall'esempio, si deduce che il numero totale di misure che si possono fare con 24 elettrodi utilizzando un dispositivo Wenner è 84.

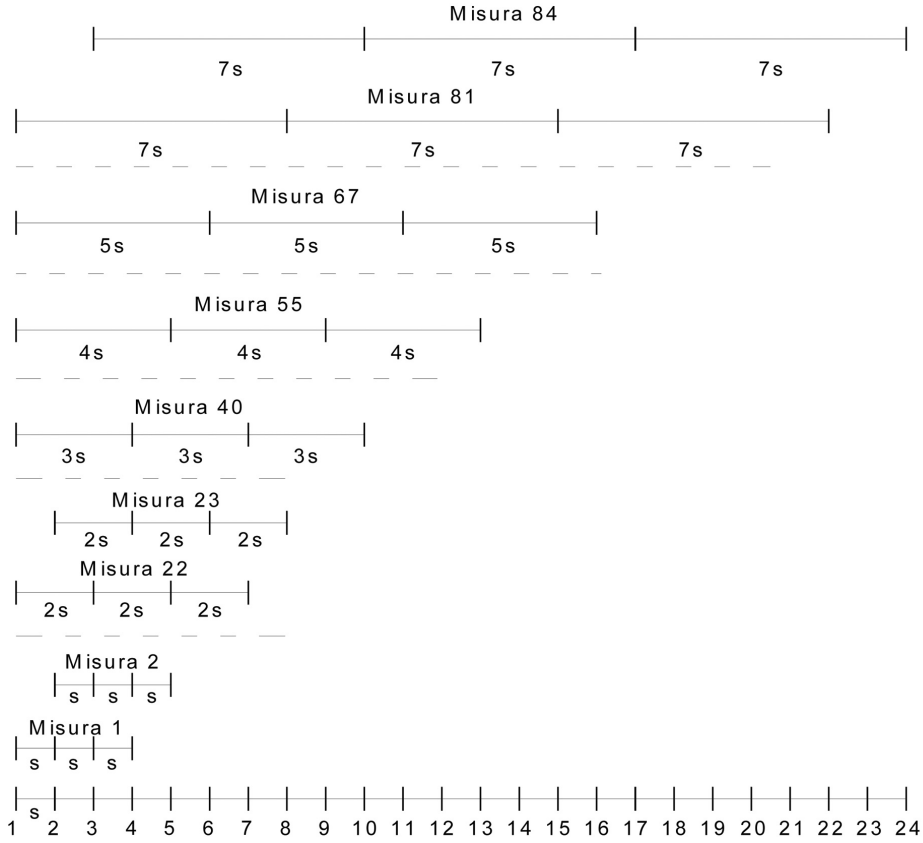


Figura 23 Dispositivo Wenner: sequenza di misure (da Leucci, 2003).

La configurazione Wenner è piuttosto sensibile ai cambiamenti verticali di resistività (buona risoluzione verticale) al di sotto del centro dello stendimento, mentre è meno sensibile alle variazioni orizzontali. Pertanto, tale configurazione di acquisizione risulta essere adeguata per individuare variazioni verticali di resistività ma relativamente poco idonea ad evidenziare discontinuità laterali. In altri termini, questa tipologia di *array* è più adatta per l'individuazione di strutture estese in orizzontale piuttosto che strutture verticali.

Riguardo alla profondità d'indagine, la configurazione Wenner permette di investigare profondità limitate, pari a circa 0.5 volte la spaziatura tra gli elettrodi. La copertura orizzontale diminuisce con l'aumentare della spaziatura tra gli elettrodi.

4.1.2 Dispositivo dipolo-dipolo

Il dispositivo dipolo-dipolo è caratterizzato dal fatto che il dipolo di corrente (C1-C2) e quello di potenziale (P1-P2) presentano la stessa distanza elettrodica, definita dal parametro *a*. Inoltre, le distanze tra gli elettrodi di corrente e quelli di potenziale aumentano secondo multipli interi di *n*, che rappresenta il rapporto tra la distanza C1-P1 ed *a*. Nella configurazione dipolo-dipolo, il fattore geometrico è dato da:

$$K = \pi n(n+1)(n+2)a = \pi n(n+1)L \qquad (6)$$

dove *L* è sempre la lunghezza del quadripolo.
Per questo tipo di dispositivo, è consigliabile assumere $n \leq 6$. Per valori maggiori, infatti, il segnale misurato dovuto alla corrente immessa nel terreno, può diventare confrontabile con il rumore di fondo.

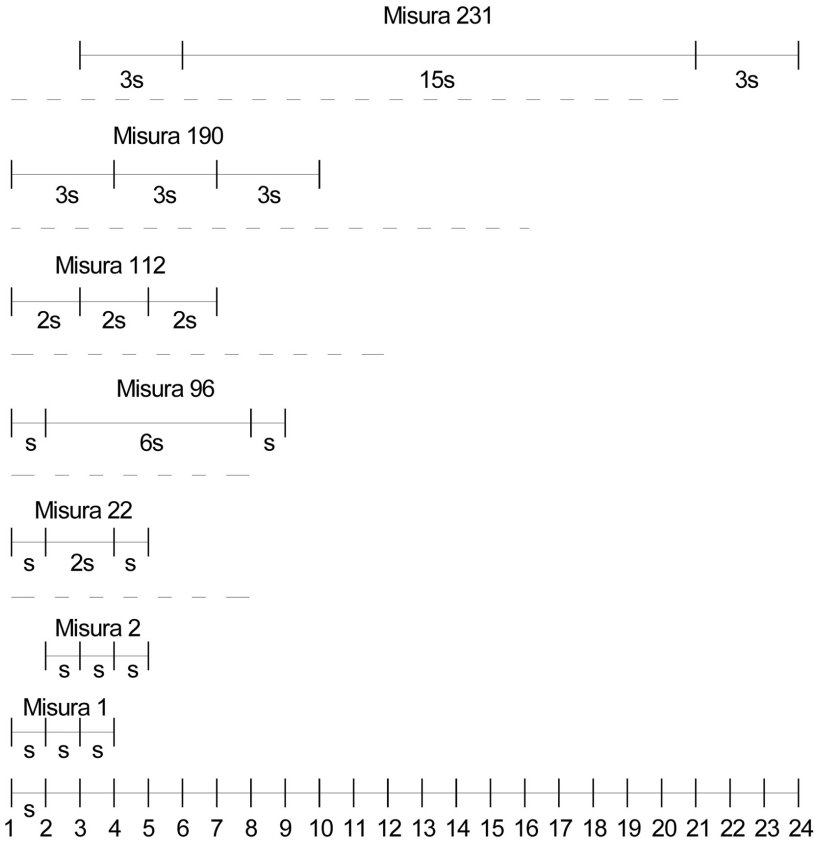


Figura 24 Dispositivo dipolo-dipolo: sequenza di misure (da Leucci, 2003).

Dal punto di vista operativo, si eseguono misure per ogni possibile combinazione di valori di *a* ed *n*. In pratica, fissato un valore di *a* si effettuano tutte le possibili misure incrementando

man mano il valore di *n* ovvero la distanza tra i due dipoli di corrente e potenziale; quindi, si incrementa *a* e di nuovo si attribuiscono ad *n* tutti i possibili valori. Se, come sopra, si pone *a* = *ms*, per ciascun valore di *m*, *n* può variare tra 1 ed [(*N*-1)/*m*]-2.
In Figura 24 sono rappresentate tutte le misure che si possono fare con valori di *a* pari ad 1s, 2s e 3s e con valori di *n* non maggiori di 6. Il numero totale di misure, pari a 231, risulta molto maggiore rispetto a quello per il dispositivo Wenner (84).
Contrariamente al Wenner, il dispositivo dipolo-dipolo assiale ha una buona risoluzione orizzontale. Tale dispositivo risulta essere maggiormente adatto per l'individuazione di dicchi e cavità mentre appare poco adatto per la ricostruzione di strutture orizzontali quali ad esempio livelli sedimentari.
In generale, la profondità media di investigazione è confrontabile o superiore a quella del dispositivo Wenner ma, a parità di elettrodi, la copertura orizzontale raggiunta dal dispositivo dipolo-dipolo risulta essere maggiore.

4.2 Tomografia elettrica

I dati di resistività apparente ottenuti in fase di acquisizione costituiscono una matrice di valori la cui inversione numerica, mediante algoritmi di calcolo agli elementi finiti o alle differenze finite, permette di ricavare sezioni 2D rappresentanti la distribuzione della resistività "reale" nel sottosuolo. Le misure di resistività acquisite sono state elaborate tramite il *software* RES2DINV (GEOTOMO SOFTWARE SDN. BHD.). Come per la tomografia sismica, l'errore quadratico medio (RMS *error*) fornisce lo scarto (in percentuale) tra i valori misurati e quelli calcolati, per cui tanto minore è il valore del parametro RMS tanto maggiore risulterà l'accordo tra il dato osservato e quello calcolato. In tutte le analisi presentate in questo studio, l'errore quadratico medio è risultato variabile da 2,2% a 3,9 %, bassi valori che indicano un buon accordo tra modello numerico e dati osservati.
In figura 25 e 26 sono riportati i risultati delle tomografie elettriche che mostrano valori di resistività tipici di coltri nei primi 2-5m di profondità e a profondità maggiori sono presenti valori riconducibili a quelli di ammasso roccioso di tipo argillitico quale quello presente nell'area. La sezione in alto della figura riporta i risultati del metodo dipolo-dipolo mentre quella bassa i risultati del metodo Wenner.
Tuttavia si può notare la presenza di alcune anomalie di resistività in corrispondenza di alcune lineazioni all'interno dell'ammasso roccioso presumibilemte riconducibili alla presenza di circolazione idrica in roccia lungo vene e fratture.

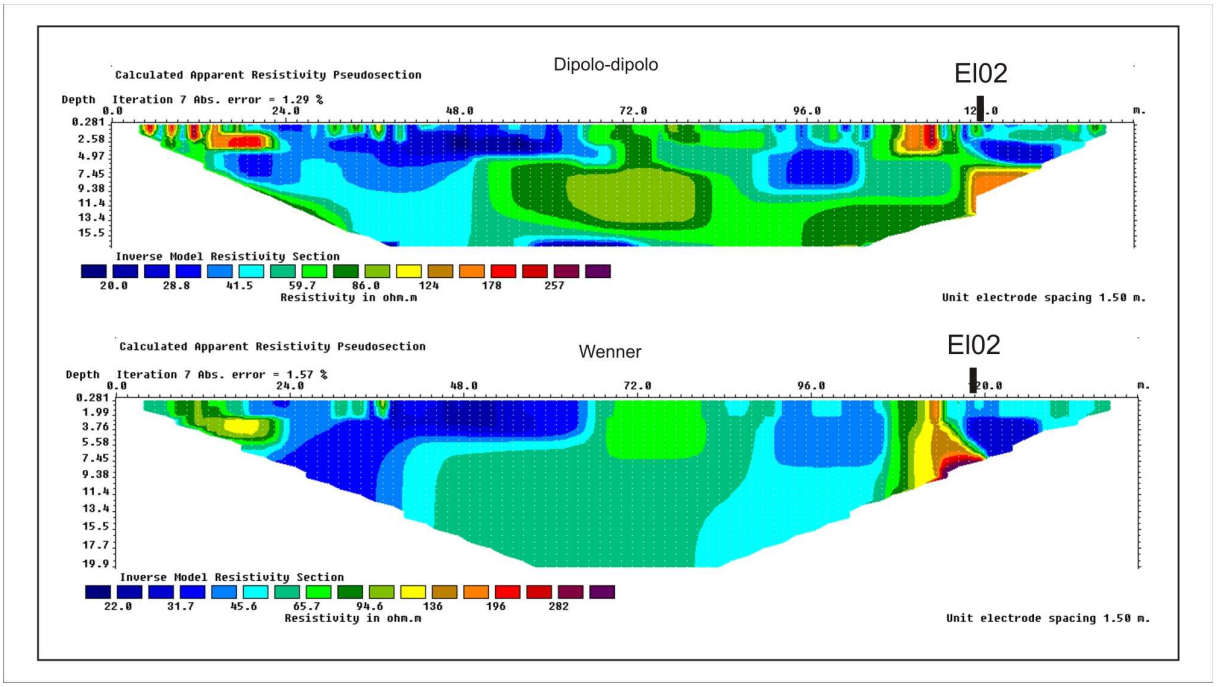


Figura 25 Tomografia elettrica linea El01: in alto metodo dipolo-dipolo, in basso metodo Wenner

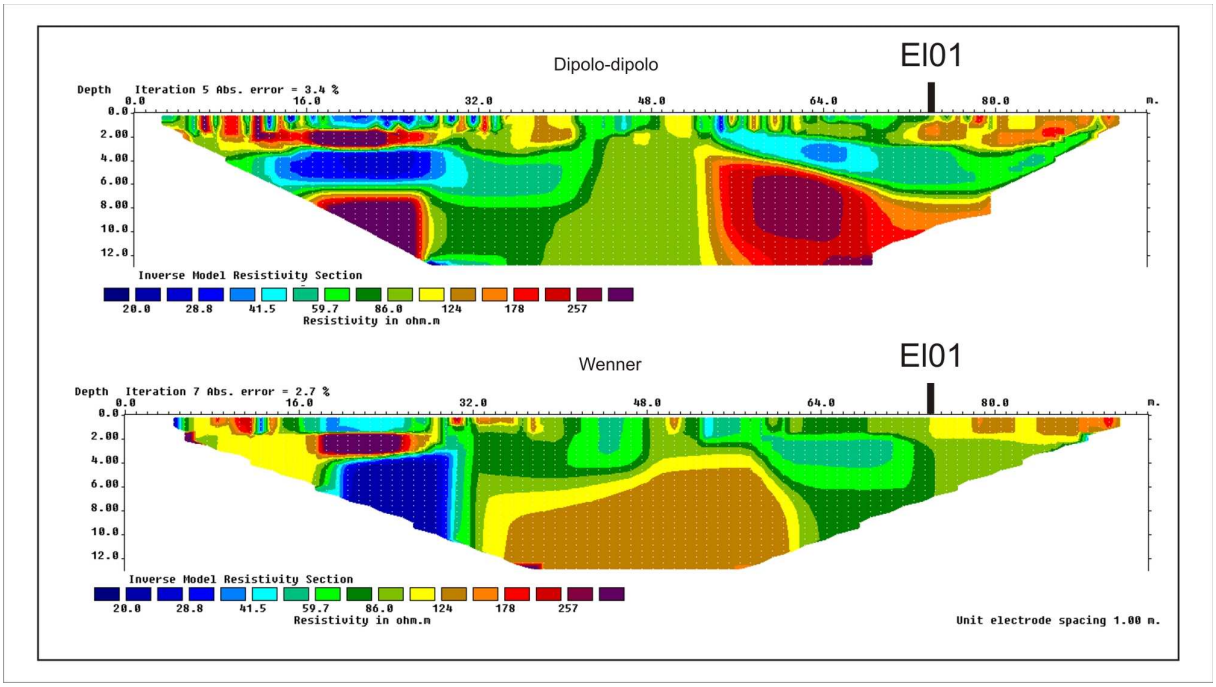


Figura 26 Tomografia elettrica linea El02: in alto metodo dipolo-dipolo, in basso metodo Wenner

5 Conclusioni

Il report ha presentato i risultati delle indagini condotte per la geofisica dell'area adibita all'ampliamento della discarica RSU "Rio Marsiglia" nel Comune di Uscio (GE). A tal scopo, sono stati eseguiti N.3 profili sismici con la tecnica della sismica a rifrazione in onde P, N. 1 misura di rumore ambientale e N2 profili geoelettrici con metodi Dipolo-Dipolo e Wenner.
A seguito dei risultati ottenuti dall'indagine di sismica a rifrazione e di microtremore, è possibile definire un modello geofisico interpretativo costituito da 3 unità sismo-sistratigrafiche principali:

- **Unità 1 – coltre detritica superficiale**: si tratta di terreni poco omogenei con valori medi di V_P pari a circa 500-700m/s e V_S di circa 200-300m/s che si estende per i primi 2 - 5m di profondità.

- **Unità 2 – substrato roccioso fratturato:** tale unità, che si estende localmente in zone limitate all'interno dell'ammasso roccioso e come livello alterato con spessori di circa 1m - 2m, presenta valori medi di V_P pari a circa 1200 -1600m/s e V_S presumibilmente di circa 500-600m/s.

- **Unità 3 – materiale lapideo:** tale unità, che si estende oltre i 5-6m di profondità dal p.c. nel settore centrale (in corrispondenza del sondaggio S1) e a profondità inferiori a 3m nel resto dell'area della linea sismica, presenta valori di V_P superiori ai 2400m/s e V_S di circa 800-900m/s.

Le indicazioni emerse dalle indagini geoelettriche evidenziano la presenza diffusa su gran parte dell'area di indagine già a partire da 2-4m dal p.c di un materiale ad alta resistività con valoricompresi tra 50 e 100 ohm.m, poco ricco in acqua, riconducibile ad un ammasso roccioso poco permeabile e con fatturazione superficiale. Localmente sono stati individuati corpi con valori di resisitività inferiori a 30 ohm.m nei primi 3-5m di profondità, in corrispondenza di un volume di coltre sciolta individuato nella sezione 2 anche attraverso le indagini sismiche. Inoltre è stato possibile, attraverso l'applicazione di metodi di acquisizione di dati geoelettrici tipo Wenner investigare l'ammasso roccioso in profondità con una buona risoluzione per cercare le fasce di fatturazione ricche di acqua: da tale indagini si è ricostrutito un andamento di tali superfici caratterizzate da anomalie di resistività elettrica negative (e quindi presumibilmente con contenuto di acqua maggiore) orientate secondo le direttrici.

Bibilografia

Castellaro S. & Mulargia F. (2009), The effect of velocity inversion on H/V, Pure and Appl. Geophys., 166, 567-592.

De Ferrari R., Ferretti G. & Spallarossa D. (2008), Utilizzo di misure di rumore ambientale per la definizione degli effetti di sito: limiti di applicabilità della metodologia Nakamura, Giornale di Geologia Tecnica e Ambientale, 2, 5-18.

Kramer S. L. (1996), Geotechnical earthquake engineering, Prentice-Hall, New Jersey, 653 pp.

Nakamura Y. (1989), A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface, Quarterly Rep. RTRI Jpn., 30, 25-33.

Oyo Co. (2005a), SeisImager/2D Manual, PickWin v. 3.14, Plotrefa v. 2.70.

Oyo Co. (2005b), SeisImager/SW Manual, Windows Software for Analysis of Surface Waves, Version 3.14.

SESAME Working Group (2004), Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations Measurements, Processing and Interpretation, SESAME (Site EffectS assessment using AMbient Excitations) European Research Project, Deliverable D23.12, http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf.