

VENTO SOLARE SRL VIA DELLA CHIMICA 103 - 85100 POTENZA P.IVA 01981860768 ventosolaresrl@pec.it		<i>CODE</i> SCS.DES.R.GEO.ITA.W.6411.003.00
		<i>PAGE</i> 1 di/of 40

AVAILABLE LANGUAGE: IT

IMPIANTO EOLICO SERRACAPRIOLA COMUNE DI SERRACAPRIOLA (FG)

INDAGINI GEOFISICHE PRELIMINARI (DOCUMENTO PREDISPOSTO A CURA DI "ENGINEERING GEOLOGY SRL")

File name: SCS.DES.R.GEO.ITA.W.6411.003.00_INDAGINI GEOFISICHE PRELIMINARI.docx

00	09/11/2023	EMISSIONE	ENGINEERING GEOLOGY SRL DOTT.RAFFAELE NARDONE	ENGINEERING GEOLOGY SRL DOTT.RAFFAELE NARDONE	ENGINEERING GEOLOGY SRL DOTT.RAFFAELE NARDONE
<i>REV.</i>	<i>DATE</i>	<i>DESCRIPTION</i>	<i>PREPARED</i>	<i>VERIFIED</i>	<i>APPROVED</i>
IMPIANTO / Plant IMPIANTO EOLICO SERRACAPRIOLA		CODE			
	<i>GROUP</i>	<i>FUNCIÓN</i>	<i>TYPE</i>	<i>DISCIPLINE</i>	<i>COUNTRY</i>
	SCS	DES	R	G E O I T A	W 6 4 1 1 0 0 3 0 0
CLASSIFICATION:			UTILIZATION SCOPE : PROGETTO DEFINITIVO		



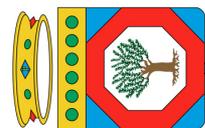
PROVINCIA DI FOGGIA

REGIONE PUGLIA



COMUNE DI SERRACAPRIOLA

"INDAGINI SISMICHE PRESSO L'IMPIANTO EOLICO
SITUATO NEL COMUNE DI SERRACAPRIOLA (FG)"



N° ELABORATO

RAPPORTO TECNICO DELLE INDAGINI

DATA OTTOBRE 2023

COMMITTENTE:
Vento Solare S.r.l.



ENGINEERING GEOLOGY
Via del Gallitello n°90/A
85100 Potenza
Tel.0971 26378 Fax 0971 1940737

ENGINEERING GEOLOGY SRL
AMMINISTRATORE UNICO
DIRETTORE TECNICO
Dott. Raffaele NARDONE



Società con sistema di gestione certificato
UNI EN ISO 9001:2008 - UNI EN ISO
14001:2005 UNI EN ISO 45001:2018
per la fornitura dei servizi di ingegneria e di
esplorazione geologica del sottosuolo



INDICE

1. Premessa	2
2. PROSPEZIONI SISMICHE DI TIPO MASW	3
2.1 ATTREZZATURA E METODOLOGIA UTILIZZATA	3
2.2 ELABORAZIONE DATI.....	5
2.3 INTERPRETAZIONE DATI MASW-01	6
2.4 INTERPRETAZIONE DATI MASW-02	12
2.5 INTERPRETAZIONE DATI MASW-03	18
3. Prospezioni sismiche a rifrazione	24
3.1. Generalità sulle prospezioni sismiche a rifrazione	24
3.2 POSSIBILITA' E LIMITI DEL METODO SISMICO A RIFRAZIONE	25
3.3 Attrezzatura e metodologia utilizzata	27
3.4. ELABORAZIONE E INTERPRETAZIONE DELLE SISMICHE A RIFRAZIONE	30
3. Rapporto fotografico	34
3.1 Indagine sismica di tipo MASW	34
3.2 tomografia sismica in onde P	36



1. PREMESSA

La Vento Solare S.r.l. ha commissionato alla scrivente la realizzazione delle **“Indagini sismiche presso l’impianto eolico situato nel comune di Serracapriola (FG)”**.

In particolare sono state effettuate le seguenti indagini geognostiche:

- Esecuzione di n° 3 Masw (Multichannel Analysis of Surface Waves);
- Esecuzione di n° 3 Tomografie sismiche in onde P;

Tali indagini sono state eseguite in conformità a quanto disposto da D.M. 17/01/2018 *“Norme tecniche per le Costruzioni”*, oltre che secondo le modalità tecnologiche dell’ANISIG.

Si riportano in allegato alla presente:

1. Allegato n° 1 - Carta ubicazione delle indagini.



2. PROSPEZIONI SISMICHE DI TIPO MASW

MASW è l'acronimo di Multi-Channel Analysis of Surface Waves (Analisi Multi-canale di Onde di Superficie). Ciò indica che il fenomeno che si analizza è la propagazione delle onde di superficie.

La MASW classica/standard consiste nella registrazione della propagazione di una classe di onde di superficie (specificatamente delle onde di Rayleigh). Più in dettaglio, le onde di Rayleigh vengono generate da una sorgente ad impatto verticale (in genere mediante massa battente del peso di 10 Kg su piastra in alluminio) o da un cannoncino sismico e vengono poi registrate tramite geofoni a componente verticale a frequenza propria di 4.5 Hz.

Più specificatamente si analizza la dispersione delle onde di superficie sapendo che frequenze diverse - e quindi lunghezze d'onda diverse - viaggiano a velocità diversa. Il principio di base quindi è piuttosto semplice: le varie componenti (frequenze) del segnale (cioè della perturbazione sismica che si propaga) viaggiano ad una velocità che dipende dalle caratteristiche del mezzo.

In particolare, le lunghezze d'onda più ampie (cioè le frequenze più basse) sono influenzate dalla parte più profonda (in altre termini "sentono" gli strati più profondi), mentre le piccole lunghezze d'onda (le frequenze più alte) dipendono dalle caratteristiche della parte più superficiale.

Poiché tipicamente la velocità delle onde sismiche aumenta con la profondità, ciò si rifletterà nel fatto che le frequenze più basse (delle onde di superficie) viaggeranno ad una velocità maggiore rispetto le frequenze più alte.

2.1 ATTREZZATURA E METODOLOGIA UTILIZZATA

La strumentazione utilizzata è il sismografo W2Z a 24 canali Wireless della DOLANG GEOPHYSICAL dalle seguenti caratteristiche tecniche: gestione a microprocessore, Sampling Frequency 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz, 16000 Hz; Number of samples in trigger mode 256, 516, 1024, 4096, 8192, 16384; risoluzione a 24 bit; acquisizione dei dati e codifica dei file in formato Seg-2-Y E DAT.

I geofoni sono connessi al pc in modalità wireless con range massimo di 500 m in campo aperto con la possibilità di inserire in serie 256 geofoni con frequenza propria di 4,5 Hz, il sensore trigger è inserito all'interno della mazza battente di 10 kg.

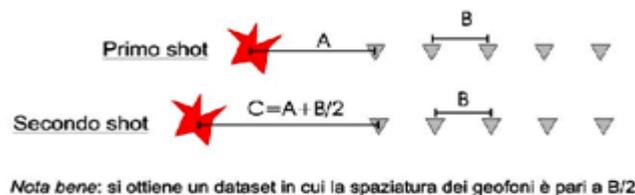




Le indagini si sono svolte secondo la seguente geometria:

- Numero di geofoni: 24
- Spaziatura tra i geofoni: 5 m
- Numero di offset: 1 rispettivamente a 5 m dal primo geofono.

Per l'interpretazione dei dati è stato utilizzato il software *WinMasw Pro 4.4.2* della *Eliosoft*. I dati sperimentali, acquisiti in formato SEG-2, sono stati trasferiti su PC e convertiti in un formato compatibile (.sgy format file). Il software a questo punto permette di sommare due dataset acquisiti con offset diversi in modo da ottenere un unico dataset equivalente ad un'acquisizione effettuata con 24 canali e spaziatura tra i geofoni pari a $B/2$ rispetto a quella utilizzata in campagna.





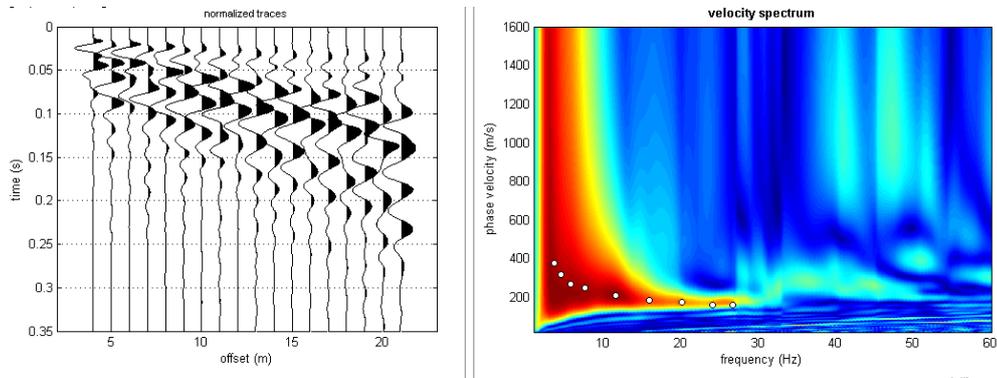
2.2 ELABORAZIONE DATI

L'analisi consiste nella trasformazione dei segnali registrati in uno spettro bidimensionale "phase velocity-frequency (c-f)" che analizza l'energia di propagazione delle onde superficiali lungo la linea sismica. Dallo spettro bidimensionale ottenuto dalle registrazioni è possibile distinguere il "modo fondamentale" delle onde di superficie, in quanto le onde di Rayleigh presentano un carattere marcatamente dispersivo che le differenzia da altri tipi di onde (onde riflesse, onde rifratte, onde multiple). Sullo spettro di frequenza viene eseguito un "picking" attribuendo ad un certo numero di punti una o più velocità di fase per un determinato numero di frequenze. Tali valori vengono successivamente riportati su un diagramma periodo-velocità di fase per l'analisi della curva di dispersione e l'ottimizzazione di un modello interpretativo. Variando la geometria del modello di partenza ed i valori di velocità delle onde S si modifica automaticamente la curva calcolata di dispersione fino a conseguire un buon "fitting" con i valori sperimentali.

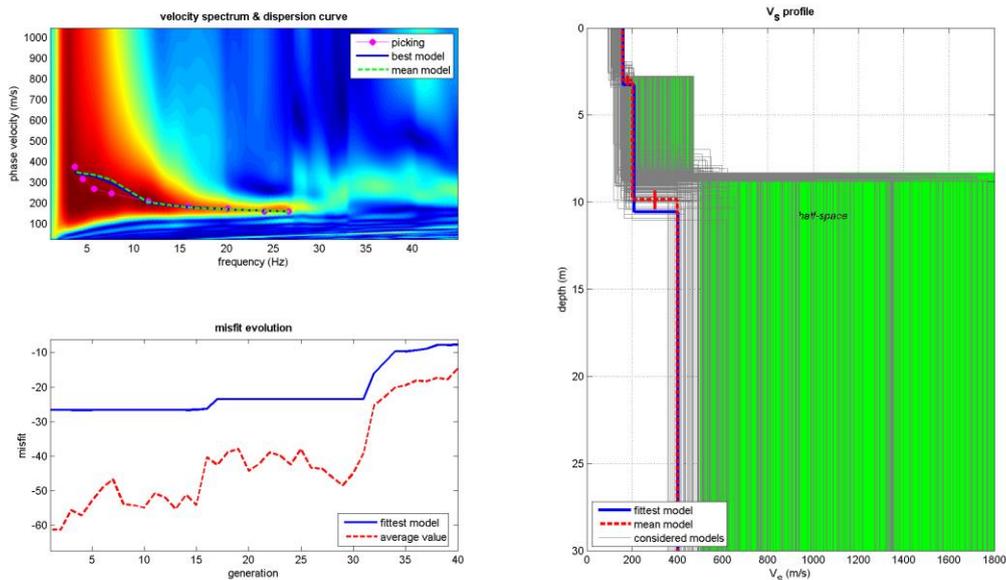
Di seguito i dati di campagna acquisiti e lo spettro di velocità calcolato per ogni indagine effettuata.

2.3 INTERPRETAZIONE DATI MASW-01

Masw- 01.



Nelle figure sottostanti sono riportati i risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi di dati MASW. In alto a sinistra: spettro osservato, curve di dispersione piccate e curve del modello individuato dall'inversione. Sulla destra il profilo verticale VS identificato (vedi anche Tabella 1). In basso a sinistra l'evolversi del modello al passare delle "generazioni" (l'algoritmo utilizzato per l'inversione delle curve di dispersione appartiene alla classe degli Algoritmi Genetici – Dal Moro et al., 2007).



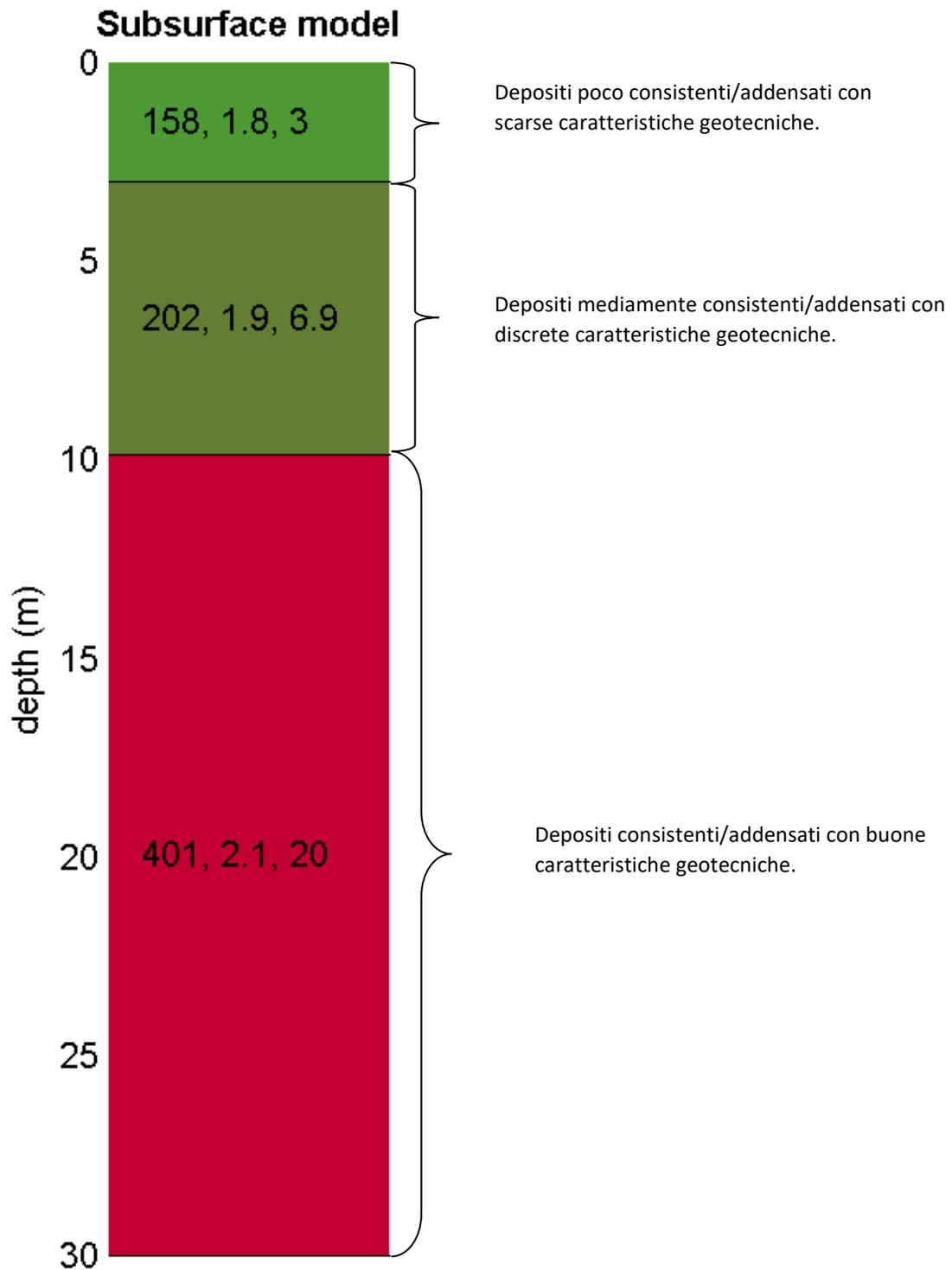


In tabella e in figura sottostante sono riportati gli strati del modello medio individuato a cui corrisponde una V_{s30} di **290,2** m/s a partire dal p.c secondo la D.M. 17/01/2018 “*Norme tecniche per le Costruzioni*”.

Spessore (m)	V_s (m/s) e deviazioni standard
3.0	158± 5
6.9	202± 8
20.0	401± 3

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 17 gennaio 2018), il sito in esame rientra quindi nella categoria **C** ovvero:

- ***Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti*** con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.





La stratigrafia del sottosuolo può essere assimilata ad un modello costituito da tre sismostrati in cui:

- Il primo sismostrato presenta uno spessore di circa 3.0 m, con velocità media delle onde di taglio di 158 m/s a depositi poco consistenti/addensati con scarse caratteristiche geotecniche;
- Il secondo sismostrato presenta uno spessore di circa 6.9 m, con velocità media delle onde di taglio di 202 m/s e corrisponde a depositi mediamente consistenti/addensati con discrete caratteristiche geotecniche;
- Il terzo sismostrato, che si rinviene a profondità maggiori di 10 m dal p.c. e fino alla profondità di investigazione, superiore ai 25 m di profondità, presenta velocità V_s media di 401 m/s, e rappresenta depositi consistenti e addensati con buone caratteristiche geotecniche.

Calcolo dei parametri elastici dinamici dei terreni

A partire dai valori di velocità delle onde sismiche V_s (m/s), ed adottando opportuni valori del Peso di volume γ (Kg/m^3) e del rapporto di Poisson rappresentativo dei litotipi presenti, è possibile inoltre stimare attraverso relazioni empiriche, la velocità delle onde di compressione V_p e i moduli dinamici del sottosuolo per ogni orizzonte sismico individuato.

La velocità delle onde P è stata ricavata empiricamente attraverso la seguente relazione:

$$V_p^2 = V_s^2 * (2-2\lambda) / (1-2\lambda)$$

Sono stati definiti inoltre i seguenti moduli dinamici:

- Modulo di taglio dinamico (G)

È definito dalla seguente equazione:

$$G = \gamma \cdot V_s^2$$

Dove γ = densità

Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua.

- Modulo di Young (Ea)

È definito dalla seguente equazione:

$$E_a = [V_p^2 \cdot \gamma \cdot (1+\lambda) \cdot (1-2\lambda)] / (1-\lambda)$$





Con λ = coeff. di Poisson

-Rigidità sismica

$$R_s = \gamma V_s$$

Tale modulo dipende dalla porosità e dalla pressione litostatica.

-Modulo di incompressibilità dinamica

È definito dalla seguente equazione:

$$K = \gamma[V_p^2 - 4/3 \cdot V_s^2]$$

ed è detto *Bulk Modulus*.

Calcolo dei parametri elastici statici dei terreni

I moduli elastici dinamici sono misurati per piccole deformazioni (<10⁻⁴) e si osserva che i loro valori decrescono con l'aumentare delle deformazioni. I moduli elastici statici misurati in laboratorio sono pertanto più piccoli di quelli misurati in sito e delle correlazioni empiriche permettono di ottenerli partendo da quelli elastici dinamici.

Nelle misure di laboratorio il rapporto E_d/E_s (E_d modulo di Young o elastico dinamico - E_s modulo di Young o elastico statico) è comunemente 2.0 (Cheng and Johnston, 1981), ma per misure in sito questo rapporto varia fra 1.5 e 9.1 (Gudmundsson, 1990; Link, 1968).

Rzhevsky e Novik hanno proposto le seguenti relazioni:

$$E_{din} = 8.3 E_{stat} + 0.97 E_{stat} = (E_{din} - 0.97) / 8.3$$

Massarch (1984) ha proposto la seguente relazione per passare dal modulo di taglio dinamico a quello statico:

$$G_{stat} = R * G$$

Dove R è un parametro che 0.18 per le ghiaie, 0.15 per le sabbie mediamente dense e 0.11 per le argille, dai due parametri si ricavano gli altri parametri elastici.

Modulo di Poisson

$$v = (E - 2G) / (2G)$$

Modulo di compressibilità volumetrico

$$K = G * E / [3(3G - E)]$$

Modulo edometrico

$$E_{ed} = G * (4G - E) / (3G - E)$$

Modulo di carico su piastra

$$M_e = 16G^2 / [\pi(4G - E)]$$





PARAMETRI FISICI E DINAMICI MEDI DEL SOTTOSUOLO INDAGATO CON LA MASW 01

STRATO	SPESSORE	Vp	Vs	γ'	λ	MODULO DI YOUNG	R	MODULO DI TAGLIO	Mod.di Incompressibilità
	m	m/s	m/s	g/cm ³	(-)	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	3.0	387	158	1.8	0,4	1258	0,284	449	2097
2	6.9	495	202	1.9	0,4	2171	1,384	775	3618
3	20.0	982	401	2,1	0,4	9455	2,842	3377	15758

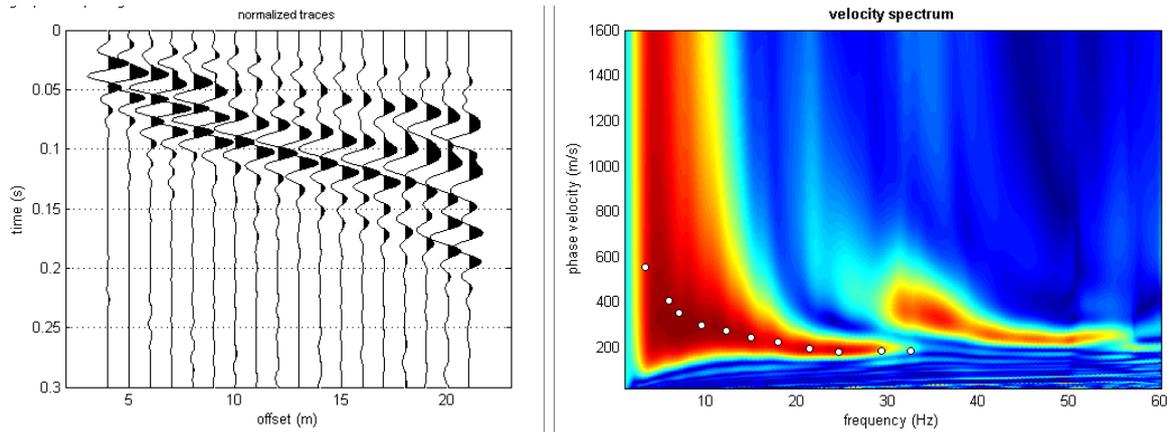
PARAMETRI STATICI MEDI DEL SOTTOSUOLO INDAGATO CON LA MASW 01

STRATO	SPESSORE	Vp	γ'	λ	Modulo di carico su piastra	MODULO DI YOUNG	Modulo Edometrico	MODULO DI TAGLIO	Mod.di Incompressibilità
	m	m/s	g/cm ³	(-)	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	3.0	387	1.8	0,4	211.64	151.45	202	58.37	311
2	6.9	495	1.9	0,4	365.40	261.45	350	100.75	1076
3	20.0	982	2.1	0,4	1227.67	1139.04	1522	439.01	3122

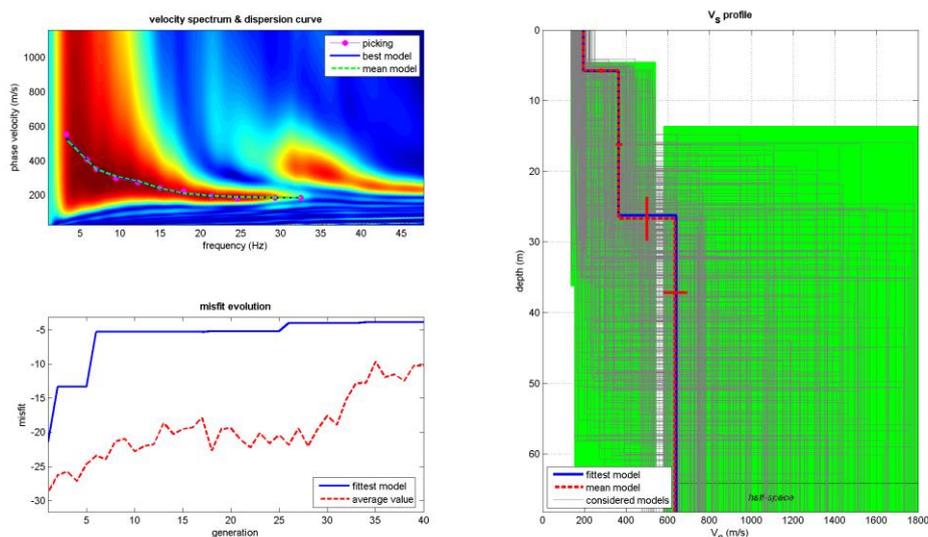


2.4 INTERPRETAZIONE DATI MASW-02

Masw- 02.



Nelle figure sottostanti sono riportati i risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi di dati MASW. In alto a sinistra: spettro osservato, curve di dispersione piccate e curve del modello individuato dall'inversione. Sulla destra il profilo verticale VS identificato (vedi anche Tabella 1). In basso a sinistra l'evolversi del modello al passare delle "generazioni" (l'algoritmo utilizzato per l'inversione delle curve di dispersione appartiene alla classe degli Algoritmi Genetici – Dal Moro et al., 2007).



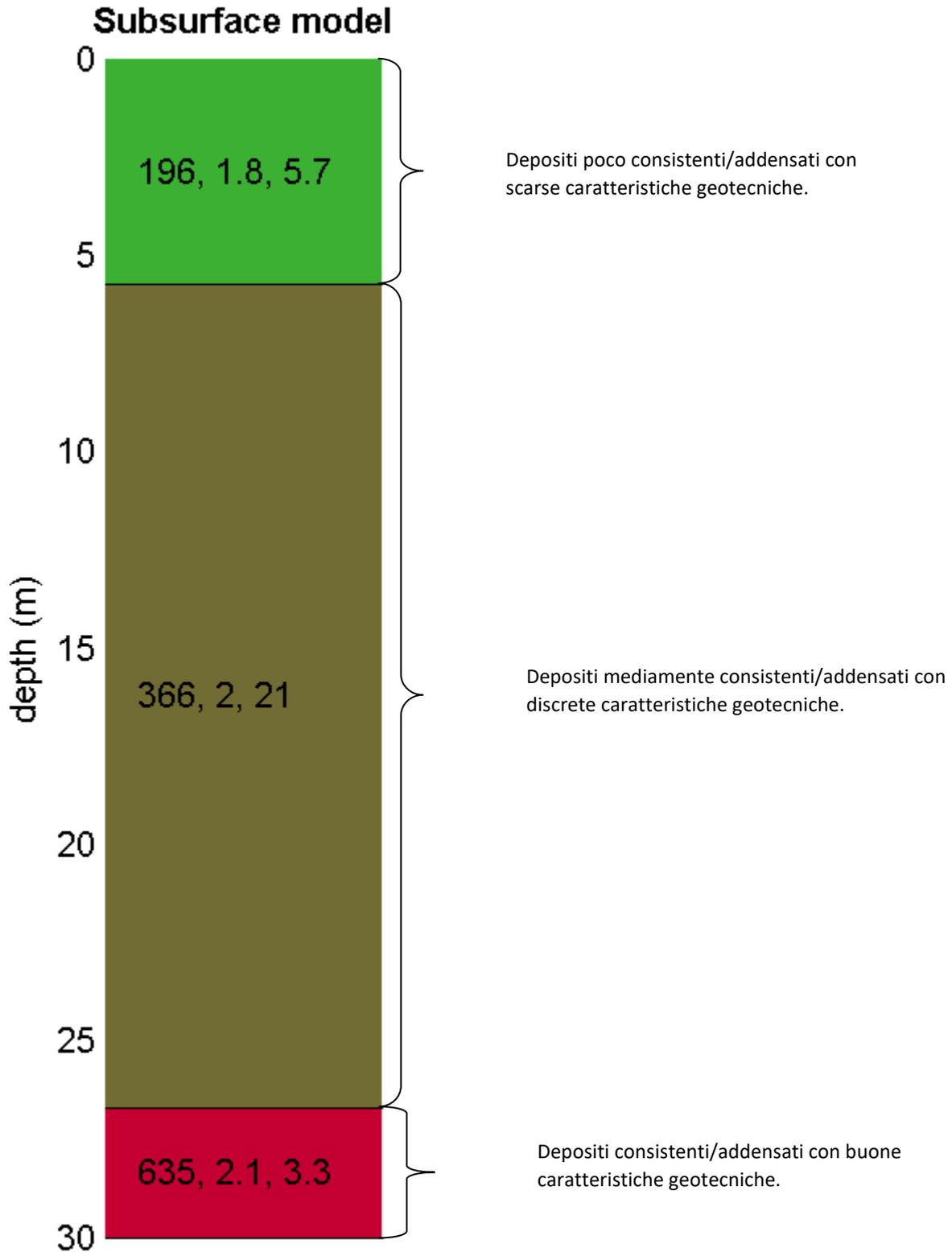


In tabella e in figura sottostante sono riportati gli strati del modello medio individuato a cui corrisponde una V_{s30} di **327,3** m/s a partire dal p.c secondo la D.M. 17/01/2018 “*Norme tecniche per le Costruzioni*”.

Spessore (m)	V_s (m/s) e deviazioni standard
5.7	196± 3
21.0	366± 15
3.3	635± 56

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 17 gennaio 2018), il sito in esame rientra quindi nella categoria **C** ovvero:

- ***Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti*** con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.





La stratigrafia del sottosuolo può essere assimilata ad un modello costituito da tre sismostrati in cui:

- Il primo sismostrato presenta uno spessore di circa 5.7 m, con velocità media delle onde di taglio di 196 m/s a depositi poco consistenti/addensati con scarse caratteristiche geotecniche;
- Il secondo sismostrato presenta uno spessore di circa 21.0 m, con velocità media delle onde di taglio di 366 m/s e corrisponde a depositi mediamente consistenti/addensati con discrete caratteristiche geotecniche;
- Il terzo sismostrato, che si rinviene a profondità maggiori di 5 m dal p.c. e fino alla profondità di investigazione, superiore ai 25 m di profondità, presenta velocità V_s media di 635 m/s, e rappresenta depositi consistenti e addensati con buone caratteristiche geotecniche.

Calcolo dei parametri elastici dinamici dei terreni

A partire dai valori di velocità delle onde sismiche V_s (m/s), ed adottando opportuni valori del Peso di volume γ (Kg/m^3) e del rapporto di Poisson rappresentativo dei litotipi presenti, è possibile inoltre stimare attraverso relazioni empiriche, la velocità delle onde di compressione V_p e i moduli dinamici del sottosuolo per ogni orizzonte sismico individuato.

La velocità delle onde P è stata ricavata empiricamente attraverso la seguente relazione:

$$V_p^2 = V_s^2 * (2-2\lambda) / (1-2\lambda)$$

Sono stati definiti inoltre i seguenti moduli dinamici:

- Modulo di taglio dinamico (G)

È definito dalla seguente equazione:

$$G = \gamma \cdot V_s^2$$

Dove γ = densità

Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua.

- Modulo di Young (E_d)

È definito dalla seguente equazione:

$$E_d = [V_p^2 \cdot \gamma \cdot (1+\lambda) \cdot (1-2\lambda)] / (1-\lambda)$$





Con λ = coeff. di Poisson

-Rigidità sismica

$$R_s = \gamma V_s$$

Tale modulo dipende dalla porosità e dalla pressione litostatica.

-Modulo di incompressibilità dinamica

È definito dalla seguente equazione:

$$K = \gamma[V_p^2 - 4/3 \cdot V_s^2]$$

ed è detto *Bulk Modulus*.

Calcolo dei parametri elastici statici dei terreni

I moduli elastici dinamici sono misurati per piccole deformazioni (<10⁻⁴) e si osserva che i loro valori decrescono con l'aumentare delle deformazioni. I moduli elastici statici misurati in laboratorio sono pertanto più piccoli di quelli misurati in sito e delle correlazioni empiriche permettono di ottenerli partendo da quelli elastici dinamici.

Nelle misure di laboratorio il rapporto E_d/E_s (E_d modulo di Young o elastico dinamico - E_s modulo di Young o elastico statico) è comunemente 2.0 (Cheng and Johnston, 1981), ma per misure in sito questo rapporto varia fra 1.5 e 9.1 (Gudmundsson, 1990; Link, 1968).

Rzhevsky e Novik hanno proposto le seguenti relazioni:

$$E_{din} = 8.3 E_{stat} + 0.97 E_{stat} = (E_{din} - 0.97) / 8.3$$

Massarch (1984) ha proposto la seguente relazione per passare dal modulo di taglio dinamico a quello statico:

$$G_{stat} = R * G$$

Dove R è un parametro che 0.18 per le ghiaie, 0.15 per le sabbie mediamente dense e 0.11 per le argille, dai due parametri si ricavano gli altri parametri elastici.

Modulo di Poisson

$$v = (E - 2G) / (2G)$$

Modulo di compressibilità volumetrico

$$K = G * E / [3(3G - E)]$$

Modulo edometrico

$$E_{ed} = G * (4G - E) / (3G - E)$$

Modulo di carico su piastra

$$M_e = 16G^2 / [\pi(4G - E)]$$





PARAMETRI FISICI E DINAMICI MEDI DEL SOTTOSUOLO INDAGATO CON LA MASW 02

STRATO	SPESSORE	Vp	Vs	γ'	λ	MODULO DI YOUNG	R	MODULO DI TAGLIO	Mod.di Incompressibilità
	m	m/s	m/s	g/cm ³	(-)	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	5.7	480	196	1.8	0,4	1936	0,353	691	3227
2	21	897	366	2.0	0,4	7502	1,732	2679	12503
3	3.3	1555	635	2,1	0,4	23710	1,334	8468	39516

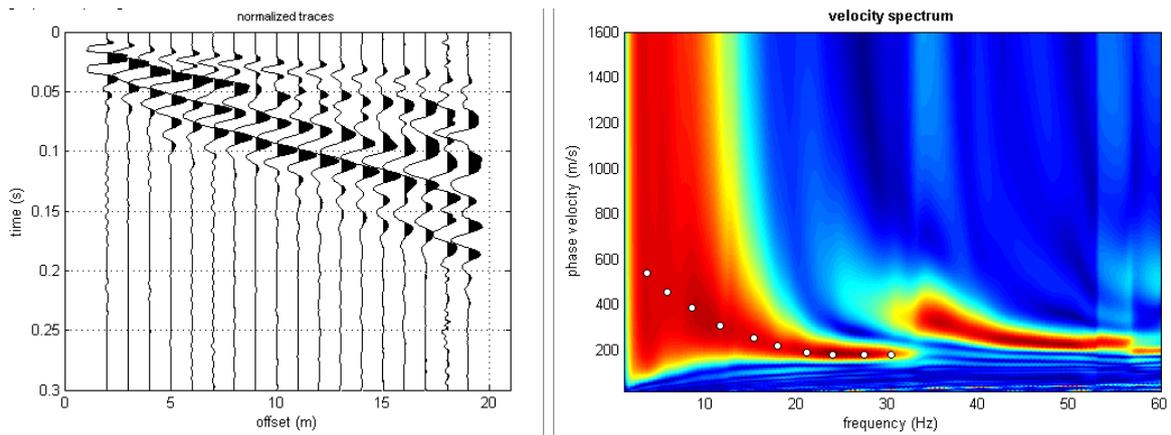
PARAMETRI STATICI MEDI DEL SOTTOSUOLO INDAGATO CON LA MASW 02

STRATO	SPESSORE	Vp	γ'	λ	Modulo di carico su piastra	MODULO DI YOUNG	Modulo Edometrico	MODULO DI TAGLIO	Mod.di Incompressibilità
	m	m/s	g/cm ³	(-)	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	5.7	480	1.8	0,4	325.86	233.14	312	89.83	480
2	21	897	2.0	0,4	1263.02	903.74	1208	348.27	3719
3	3.3	1555	2.1	0,4	3079.82	2856.51	3818	1100.84	7834

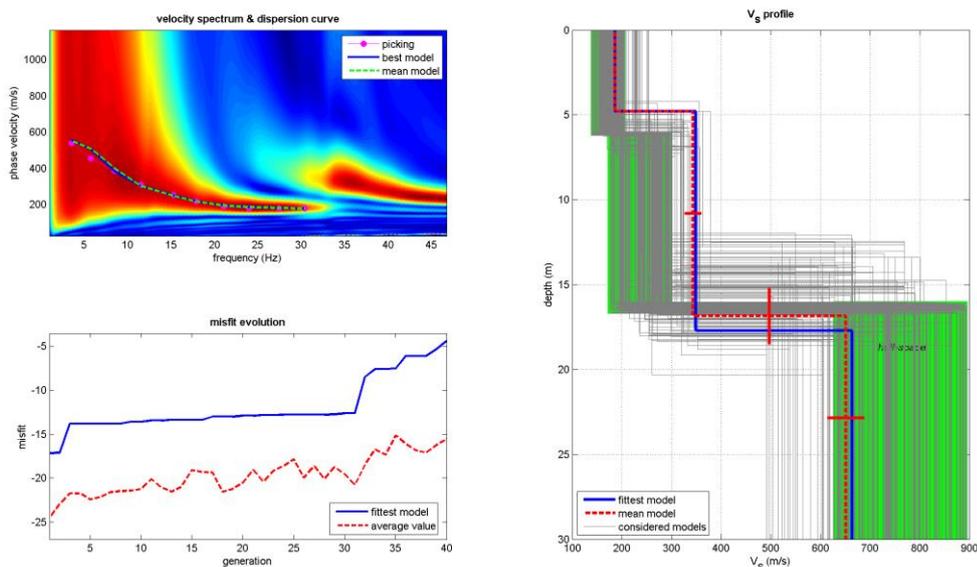


2.5 INTERPRETAZIONE DATI MASW-03

Masw- 03.



Nelle figure sottostanti sono riportati i risultati dell'inversione della curva di dispersione determinata tramite analisi di dati MASW. In alto a sinistra: spettro osservato, curve di dispersione piccate e curve del modello individuato dall'inversione. Sulla destra il profilo verticale VS identificato (vedi anche Tabella 1). In basso a sinistra l'evolversi del modello al passare delle "generazioni" (l'algoritmo utilizzato per l'inversione delle curve di dispersione appartiene alla classe degli Algoritmi Genetici – Dal Moro et al., 2007).



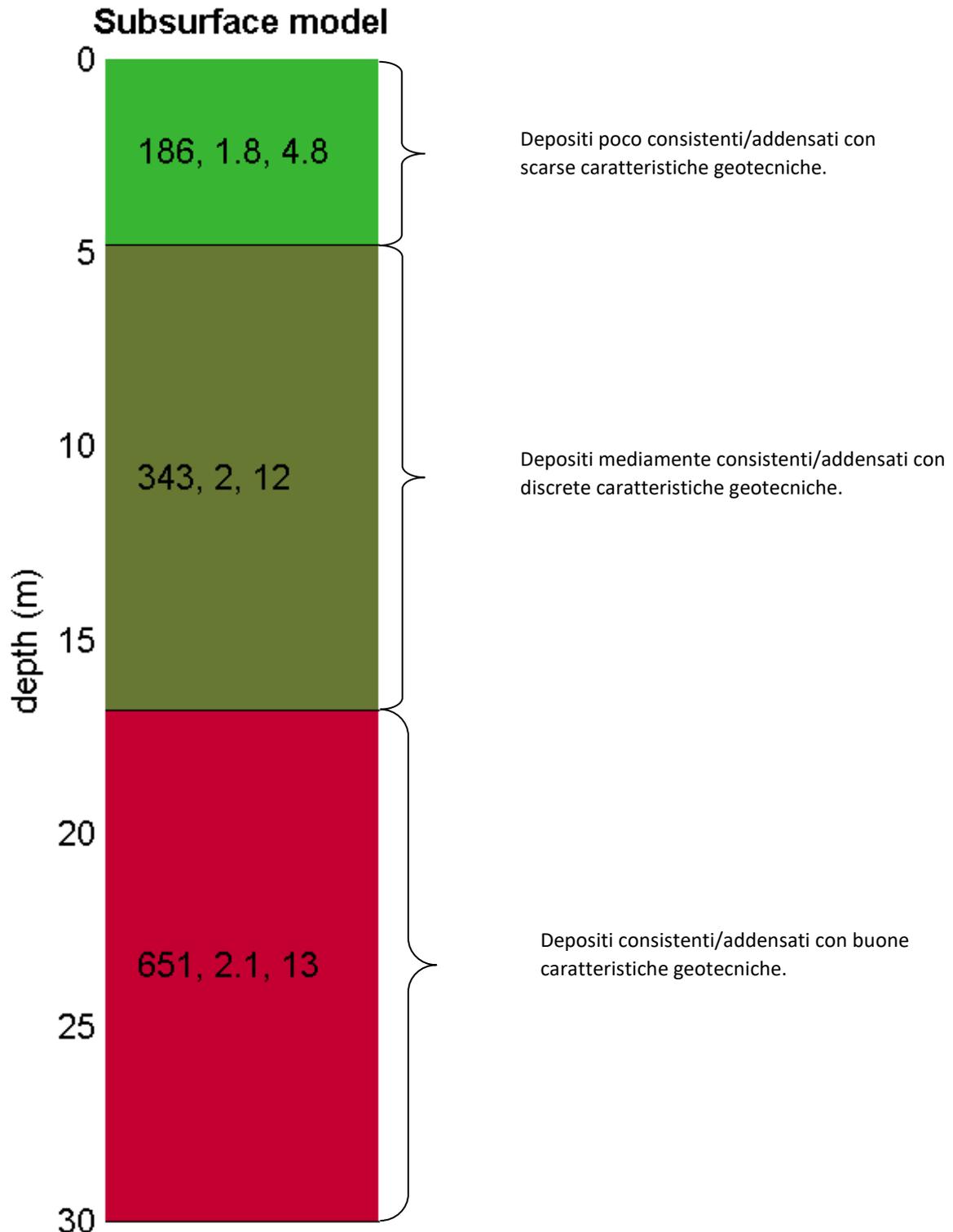


In tabella e in figura sottostante sono riportati gli strati del modello medio individuato a cui corrisponde una V_{s30} di **369,0** m/s a partire dal p.c secondo la D.M. 17/01/2018 “*Norme tecniche per le Costruzioni*”.

Spessore (m)	V_s (m/s) e deviazioni standard
4.8	186± 2
12	343± 16
13	651± 37

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 17 gennaio 2018), il sito in esame rientra quindi nella categoria **B** ovvero:

- ***Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti***, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.





La stratigrafia del sottosuolo può essere assimilata ad un modello costituito da tre sismostrati in cui:

- Il primo sismostrato presenta uno spessore di circa 4.8 m, con velocità media delle onde di taglio di 186 m/s a depositi poco consistenti/addensati con scarse caratteristiche geotecniche;
- Il secondo sismostrato presenta uno spessore di circa 12 m, con velocità media delle onde di taglio di 343 m/s e corrisponde a depositi mediamente consistenti/addensati con discrete caratteristiche geotecniche;
- Il terzo sismostrato, che si rinviene a profondità maggiori di 16 m dal p.c. e fino alla profondità di investigazione, superiore ai 25 m di profondità, presenta velocità V_s media di 651 m/s, e rappresenta depositi consistenti e addensati con buone caratteristiche geotecniche.

Calcolo dei parametri elastici dinamici dei terreni

A partire dai valori di velocità delle onde sismiche V_s (m/s), ed adottando opportuni valori del Peso di volume γ (Kg/m³) e del rapporto di Poisson rappresentativo dei litotipi presenti, è possibile inoltre stimare attraverso relazioni empiriche, la velocità delle onde di compressione V_p e i moduli dinamici del sottosuolo per ogni orizzonte sismico individuato.

La velocità delle onde P è stata ricavata empiricamente attraverso la seguente relazione:

$$V_p^2 = V_s^2 * (2-2\lambda) / (1-2\lambda)$$

Sono stati definiti inoltre i seguenti moduli dinamici:

- Modulo di taglio dinamico (G)

È definito dalla seguente equazione:

$$G = \gamma \cdot V_s^2$$

Dove γ = densità

Tale parametro è fortemente dipendente dalla porosità e dalla pressione; assume valori più bassi in litotipi ad alta porosità, sottoposti a basse pressioni e saturati in acqua.

- Modulo di Young (Ea)

È definito dalla seguente equazione:

$$E_a = [V_p^2 \cdot \gamma \cdot (1+\lambda) \cdot (1-2\lambda)] / (1-\lambda)$$





Con λ = coeff. di Poisson

-Rigidità sismica

$$R_s = \gamma V_s$$

Tale modulo dipende dalla porosità e dalla pressione litostatica.

-Modulo di incompressibilità dinamica

È definito dalla seguente equazione:

$$K = \gamma[V_p^2 - 4/3 \cdot V_s^2]$$

ed è detto *Bulk Modulus*.

Calcolo dei parametri elastici statici dei terreni

I moduli elastici dinamici sono misurati per piccole deformazioni (<10⁻⁴) e si osserva che i loro valori decrescono con l'aumentare delle deformazioni. I moduli elastici statici misurati in laboratorio sono pertanto più piccoli di quelli misurati in sito e delle correlazioni empiriche permettono di ottenerli partendo da quelli elastici dinamici.

Nelle misure di laboratorio il rapporto E_d/E_s (E_d modulo di Young o elastico dinamico - E_s modulo di Young o elastico statico) è comunemente 2.0 (Cheng and Johnston, 1981), ma per misure in sito questo rapporto varia fra 1.5 e 9.1 (Gudmundsson, 1990; Link, 1968).

Rzhevsky e Novik hanno proposto le seguenti relazioni:

$$E_{din} = 8.3 E_{stat} + 0.97 E_{stat} = (E_{din} - 0.97) / 8.3$$

Massarch (1984) ha proposto la seguente relazione per passare dal modulo di taglio dinamico a quello statico:

$$G_{stat} = R * G$$

Dove R è un parametro che 0.18 per le ghiaie, 0.15 per le sabbie mediamente dense e 0.11 per le argille, dai due parametri si ricavano gli altri parametri elastici.

Modulo di Poisson

$$v = (E - 2G) / (2G)$$

Modulo di compressibilità volumetrico

$$K = G * E / [3(3G - E)]$$

Modulo edometrico

$$E_{ed} = G * (4G - E) / (3G - E)$$

Modulo di carico su piastra

$$M_e = 16G^2 / [\pi(4G - E)]$$





PARAMETRI FISICI E DINAMICI MEDI DEL SOTTOSUOLO INDAGATO CON LA MASW 03

STRATO	SPESSORE	Vp	Vs	γ'	λ	MODULO DI YOUNG	R	MODULO DI TAGLIO	Mod.di Incompressibilità
	m	m/s	m/s	g/cm ³	(-)	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	4.8	456	186	1.8	0,4	1744	0,335	623	2906
2	12	840	343	2	0,4	6588	0,686	2353	10981
3	13	1595	651	2,1	0,4	24919	1,367	8900	41532

PARAMETRI STATICI MEDI DEL SOTTOSUOLO INDAGATO CON LA MASW 03

STRATO	SPESSORE	Vp	γ'	λ	Modulo di carico su piastra	MODULO DI YOUNG	Modulo Edometrico	MODULO DI TAGLIO	Mod.di Incompressibilità
	m	m/s	g/cm ³	(-)	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²
1	4.8	456	1.8	0,4	293.30	210	280	80.99	430
2	12	840	2	0,4	1108.95	793.62	1060	305.89	3262
3	13	1595	2.1	0,4	3236.81	3002.17	4012	1157	8232





3. PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

Come accennato in premessa, nell'ambito della campagna geofisica è stata eseguita n. 1 prospezione di sismica a rifrazione in onde P.

L'acquisizione è stata eseguita su profili della lunghezza di 110 m, utilizzando una configurazione a 24 geofoni equidistanziati di 5.0m.

L'interpretazione dei dati acquisiti in campagna ha consentito di ricavare i profili sismostratigrafici, relativi alle aree di indagine, con suddivisione in strati aventi analoghe caratteristiche delle velocità di propagazione delle onde sismiche.

3.1. GENERALITÀ SULLE PROSPEZIONI SISMICHE A RIFRAZIONE

Le indagini sismiche a rifrazione si basano sulla misurazione del tempo necessario perché la perturbazione elastica causata nel terreno da una sorgente di energia pervenga ad una serie di strumentazioni di ricezione (geofoni) dopo aver percorso uno strato superficiale di terreno (onde dirette) e superfici di separazione fra strati a velocità crescente verso il basso (mediante onde rifratte). Le apparecchiature di misurazione, di solito in numero di 12 o 24 geofoni, sono spaziate regolarmente lungo un allineamento; viene registrato il tempo di arrivo delle onde ad ogni geofono, a costituire un diagramma, detto sismogramma.

Il sismogramma registra:

- le onde dirette: che rappresentano la perturbazione che attraversando solo il primo strato va al geofono dalla sorgente di energia;
- le onde riflesse: che vengono riflesse dalle superfici di discontinuità;
- le onde rifratte: date dal raggio che subisce la rifrazione totale e percorre la superficie di discontinuità a velocità pari a quella dello strato più veloce.

-

L'angolo critico di incidenza dipende dal rapporto delle velocità di propagazione delle onde sismiche nei due materiali, secondo la Legge di Snell:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{V_1}{V_2}$$





Si ha l'angolo critico quando $\sin\alpha = V_1/V_2$, cioè $\beta = 90^\circ$.

Le spezzate diagrammate in un sistema di riferimento tempi/distanze relativamente ai tempi di primo arrivo sono le dromocrone. In ogni dromocrona si hanno punti che possono essere relativi alle onde dirette e alle onde rifratte.

I primi tempi di arrivo sono quelli relativi ai raggi diretti attraverso il primo strato, e la pendenza della linea che passa per tali punti è il reciproco della velocità di questo strato.

A partire da una certa distanza dal punto di energizzazione (detta distanza critica) il tempo impiegato per arrivare al geofono dai raggi che percorrono il tetto dello strato sottostante (più veloce) risulta inferiore a quello degli arrivi diretti. I punti relativi a questi arrivi si alleneranno secondo una retta avente la pendenza di $1/V_2$, e così via per gli strati inferiori.

Il tempo che corrisponde all'intersezione di ciascun segmento di retta con l'asse dei tempi è detto tempo intercetto. Questo valore, come quello della distanza critica, dipendono direttamente dalla velocità dei materiali e dallo spessore degli strati, e possono quindi essere utilizzati per determinare le profondità dei tetti degli strati stessi.

In sostanza, una volta determinate le varie velocità, vi sono infatti due metodi per determinare le profondità dei vari strati sotto i punti di energizzazione: il metodo dell'intercetta e quello della distanza critica.

Una volta note queste entità è poi possibile calcolare la profondità dei vari strati in corrispondenza di ogni geofono; con il metodo ABC (delay times) o con il GRM (Generalized Reciprocal Method).

3.2 POSSIBILITA' E LIMITI DEL METODO SISMICO A RIFRAZIONE

Come è noto, le onde elastiche provocate da una vibrazione si trasmettono nel suolo con velocità differenti per ogni litotipo. Nella prospezione sismica a rifrazione si sfrutta la diversa velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P o "di compressione e dilatazione"), che sono le più veloci fra le diverse onde elastiche, o trasversali (onde S o "di taglio") per determinare spessori e andamenti dei livelli presenti.

La velocità di propagazione delle onde elastiche nel suolo è compresa in un range piuttosto ampio; per lo stesso litotipo di roccia essa diminuisce col grado di alterazione, di fessurazione e/o di fratturazione; aumenta per contro con la profondità e l'età geologica.

Sensibili differenze si possono avere, in rocce stratificate, tra le velocità rilevate lungo i piani di





strato e quelle rilevate perpendicolarmente a questi. La velocità delle onde compressionali, diversamente da quelle trasversali che non si trasmettono nell'acqua, è fortemente influenzata dalla presenza della falda acquifera e dal grado di saturazione.

Questo comporta che anche litotipi differenti possano avere uguali velocità delle onde sismiche compressionali, per cui non necessariamente l'interpretazione sismostratigrafica corrisponde con la reale situazione geologico-stratigrafica.

Il metodo sismico a rifrazione è soggetto inoltre alle seguenti limitazioni:

- un livello potrà essere evidenziato soltanto se la velocità di trasmissione delle onde longitudinali in esso risulterà superiore a quella dei livelli soprastanti (effetto della inversione di velocità);
- un livello di spessore limitato rispetto al passo dei geofoni e alla sua profondità può non risultare rilevabile;
- un livello di velocità intermedia compreso tra uno strato sovrastante a velocità minore ed uno sottostante a velocità sensibilmente maggiore può non risultare rilevabile perché mascherato dagli "arrivi" dello strato sottostante (effetto dello strato nascosto e "zona oscura");
- aumentando la spaziatura tra i geofoni aumenta la profondità di investigazione ma può ovviamente ridursi la precisione della determinazione della profondità dei limiti di passaggio tra i diversi livelli individuati. In presenza di successioni di livelli con velocità (crescenti) di poco differenti tra loro, orizzonti a velocità intermedia con potenza sino anche ad 1/3 del passo adottato possono non essere evidenziati. Il limite tra due orizzonti può quindi in realtà passare "attraverso" un terzo intermedio non evidenziabile;
- analogamente, incrementi graduali di velocità con la profondità danno origine a dromocrone che consentono più schemi interpretativi.

Per contro i moderni metodi di elaborazione del dato sismico consentono di ricostruire la morfologia sepolta di più rifrattori sovrapposti, variamente accidentati e con velocità variabili lungo il profilo, anche in presenza di morfologia di superficie non piane.

3.3 ATTREZZATURA E METODOLOGIA UTILIZZATA

La strumentazione utilizzata è il sismografo W2Z a 24 canali Wireless della DOLANG GEOPHYSICAL dalle seguenti caratteristiche tecniche: gestione a microprocessore, Sampling Frequency 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz, 16000 Hz; Number of samples in trigger mode 256, 516, 1024, 4096, 8192, 16384; risoluzione a 24 bit; acquisizione dei dati e codifica dei file in formato Seg-2-Y E DAT.

I geofoni sono connessi al pc in modalità wireless con range massimo di 500 m in campo aperto con la possibilità di inserire in serie 256 geofoni con frequenza propria di 4,5 Hz, il sensore trigger è inserito all'interno della mazza battente di 10 kg.



Le indagini si sono svolte secondo la seguente geometria:

- Numero di geofoni: 24
- Spaziatura tra i geofoni: 5.0 m
- Numero di offset: 7.

Dal modello ottenuto è stata effettuata l'inversione tomografica utilizzando il software RAYFRACT® della Intelligent Resources Inc., formulato per consentire l'elaborazione di dati ottenuti con prospezioni sismiche eseguite in superficie, sia onde P che S, per scopi geotecnico-ingegneristici, ambientali e per l'esplorazione nel campo delle georisorse.



RAYFRACT® consente sia la ricostruzione della geometria dei rifrattori con la sismica a rifrazione tradizionale, che la realizzazione di dettagliati modelli di velocità del sottosuolo con le più evolute tecniche tomografiche, soprattutto nel caso di strutture profonde. Tali tecniche consistono in due metodi, quello di inversione DELTA T-v, mediante il quale si ottengono dei profili 1D "profondità-velocità" dai dati di cronometrie e il metodo di inversione 2D, WET, mediante il quale si ottimizzano i modelli di velocità ottenuti con il metodo DELTA t-V. Inoltre le release più recenti di RAYFRACT sono supportate dal software SURFER 8 mediante il quale è stato eseguito il gridding, l'imaging ed il contouring dei suddetti modelli di velocità.

Sismica in Onde P

L'acquisizione è stata realizzata utilizzando la configurazione geometrica di seguito riportata per la *Sism01*

- n. geofoni: 24 + 1 trigger
- distanza tra i geofoni: 5.0 m
- n. shots: 7 di cui:
 - shot 1 esterno al geofono G1;
 - shot 2 tra geofono G4 e G5;
 - shot 3 tra geofono G8 e G9;
 - shot 4 tra geofono G12 e G13;
 - shot 5 tra geofono G16 e G17;
 - shot 6 tra geofono G20 e G21;
 - shot 7 esterno al geofono G24

L'acquisizione è stata realizzata utilizzando la configurazione geometrica di seguito riportata per la *Sism02*

- n. geofoni: 24 + 1 trigger
- distanza tra i geofoni: 4.0 m
- n. shots: 7 di cui:
 - shot 1 esterno al geofono G1;
 - shot 2 tra geofono G4 e G5;
 - shot 3 tra geofono G8 e G9;
 - shot 4 tra geofono G12 e G13;





- shot 5 tra geofono G16 e G17;
- shot 6 tra geofono G20 e G21;
- shot 7 esterno al geofono G24

L'acquisizione è stata realizzata utilizzando la configurazione geometrica di seguito riportata per la *Sism03*

- n. geofoni: 24 + 1 trigger
- distanza tra i geofoni: 4.0 m
- n. shots: 7 di cui:
 - shot 1 esterno al geofono G1;
 - shot 2 tra geofono G4 e G5;
 - shot 3 tra geofono G8 e G9;
 - shot 4 tra geofono G12 e G13;
 - shot 5 tra geofono G16 e G17;
 - shot 6 tra geofono G20 e G21;
 - shot 7 esterno al geofono G24

SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P				
Stendimento Sismico	N° Canali	Distanza intergeofonica	Lunghezza base sismica	Tipo Onde Sismiche
<i>Sism01</i>	24	5.0m	110m	P
<i>Sism02</i>	24	5.0m	110m	P
<i>Sism02</i>	24	5.0m	110m	P

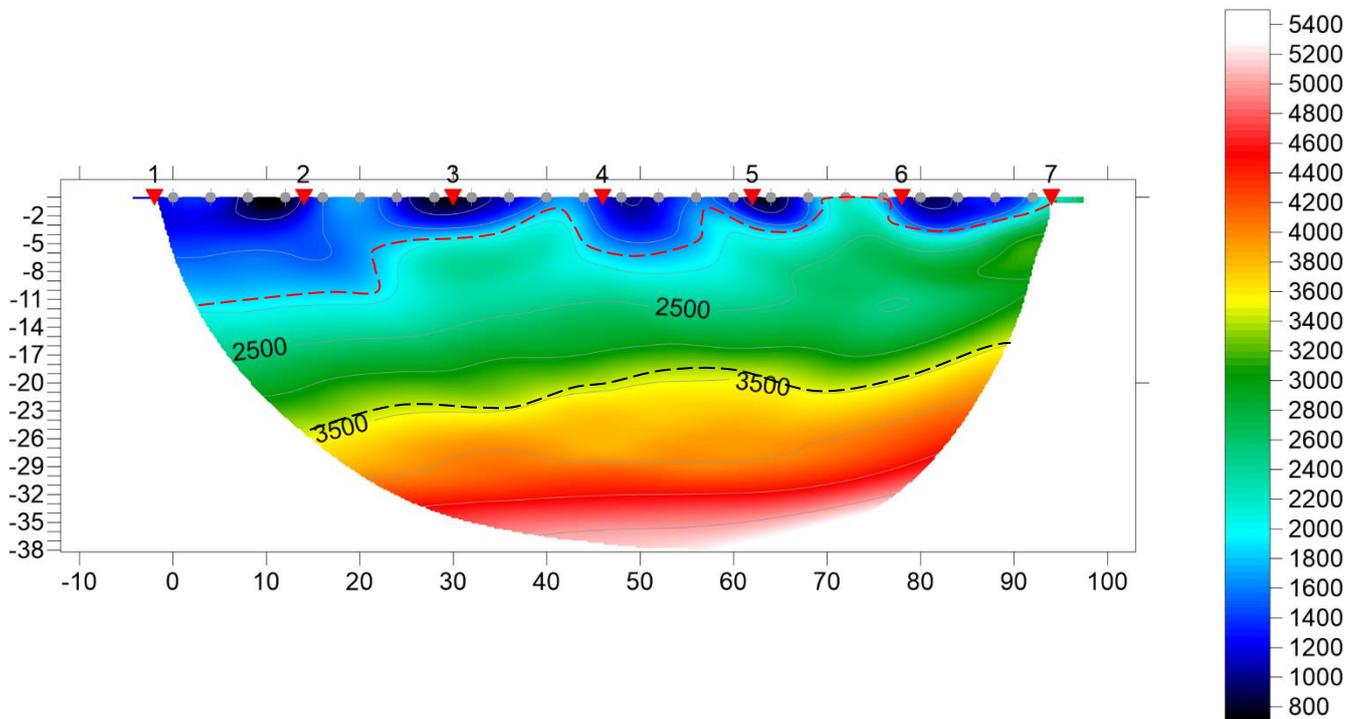
3.4. ELABORAZIONE E INTERPRETAZIONE DELLE SISMICHE A RIFRAZIONE

Sismosezione: Sism01

La prospezione sismica a rifrazione in onde P è stata denominata Sism01.

L'analisi della Sism01 **in onde P** (110 m) evidenzia la presenza di tre unità geosismiche di cui di seguito si procede a darne una interpretazione basata sui valori delle velocità delle onde sismiche misurate, ma la cui lettura deve essere effettuata anche in relazione alla situazione litologica e stratigrafica locale:

Sism 01, 20 WET iterations, RMS error 1.4 %, 1D-Gradient smooth initial model, Version 3.33



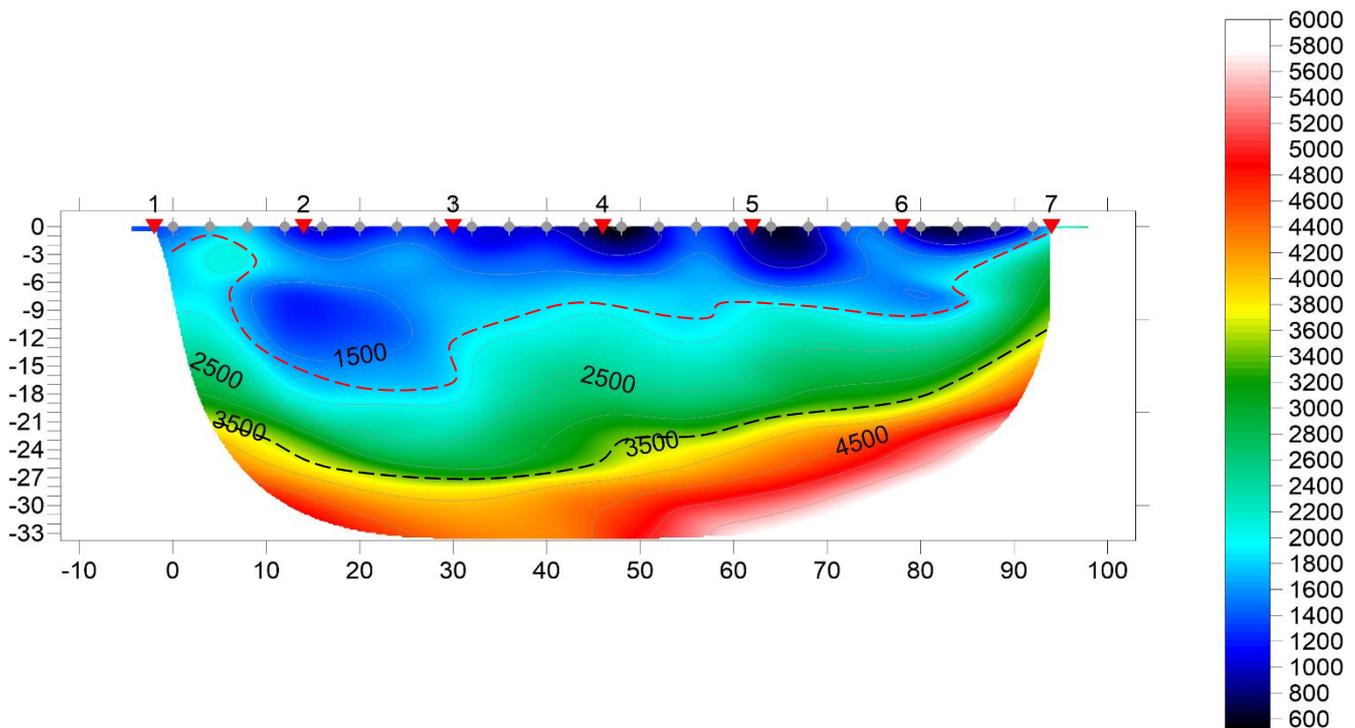
- Il **primo sismostrato**, quello più superficiale, ha uno spessore medio di 8 m, con velocità delle onde P compresa tra 800 e 1800 m/s, riferibile a terreni superficiali con scarse capacità geotecniche;
- Il **secondo sismostrato** ha uno spessore medio di circa 20 m, con velocità delle onde P compresa tra 2000 e 3400 m/s che tende ad aumentare gradualmente con la profondità, ad un orizzonte molto consistente e con buone proprietà geotecniche.
- Il **Terzo sismostrato** è caratterizzato da una velocità v_P compresa tra 3600 e 5200 m/s che tende ad aumentare gradualmente con la profondità, corrisponde ad un orizzonte molto consistente e con ottime proprietà geotecniche.

Sismosezione: Sism02

La prospezione sismica a rifrazione in onde P è stata denominata Sism02.

L'analisi della Sism02 **in onde P** (110 m) evidenzia la presenza di tre unità geosismiche di cui di seguito si procede a darne una interpretazione basata sui valori delle velocità delle onde sismiche misurate, ma la cui lettura deve essere effettuata anche in relazione alla situazione litologica e stratigrafica locale:

Sism 02, 20 WET iterations, RMS error 1.3 %, 1D-Gradient smooth initial model, Version 3.33



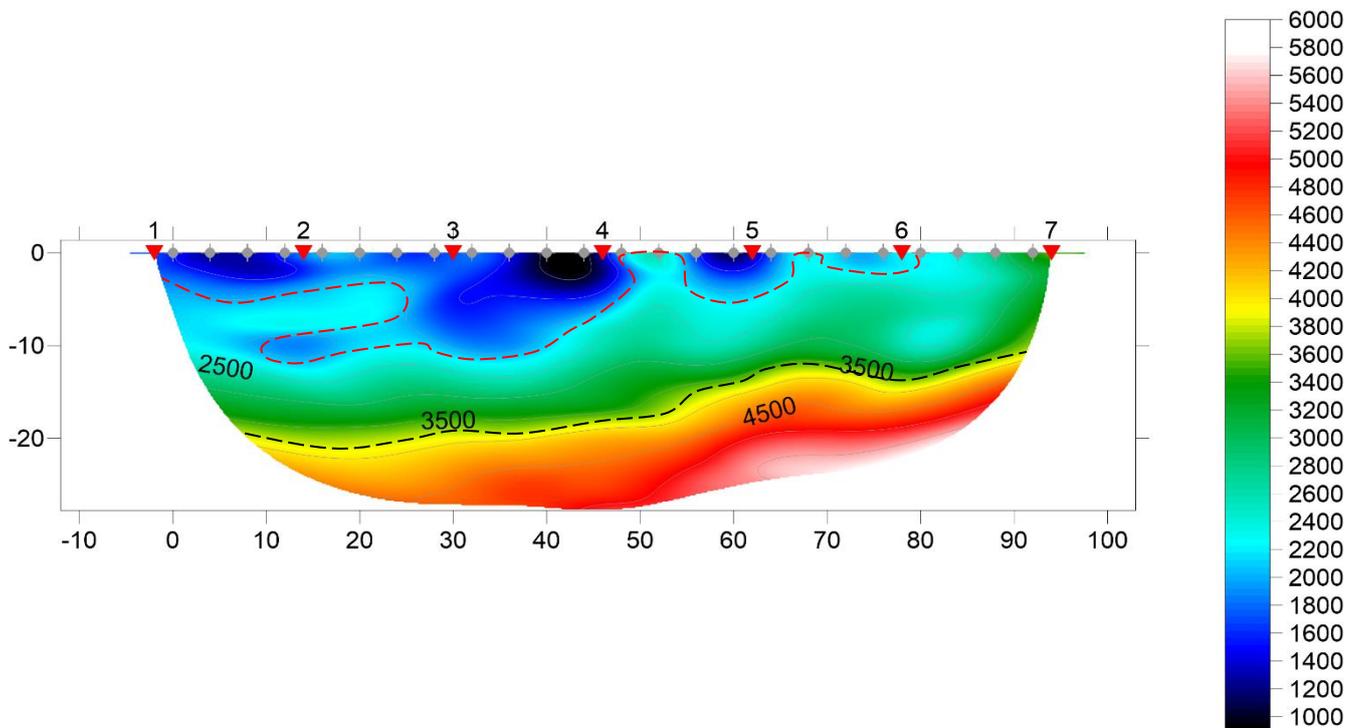
- Il **primo sismostrato**, quello più superficiale, ha uno spessore medio di 10 m, con velocità delle onde P compresa tra 600 e 1800 m/s, riferibile a terreni superficiali con scarse capacità geotecniche;
- Il **secondo sismostrato** ha uno spessore medio di circa 11 m, con velocità delle onde P compresa tra 2000 e 3400 m/s che tende ad aumentare gradualmente con la profondità, ad un orizzonte molto consistente e con buone proprietà geotecniche.
- Il **Terzo sismostrato** è caratterizzato da una velocità v_p compresa tra 3600 e 5600 m/s che tende ad aumentare gradualmente con la profondità, corrisponde ad un orizzonte molto consistente e con ottime proprietà geotecniche.

Sismosezione: Sism03

La prospezione sismica a rifrazione in onde P è stata denominata Sism03.

L'analisi della Sism03 **in onde P** (110 m) evidenzia la presenza di tre unità geosismiche di cui di seguito si procede a darne una interpretazione basata sui valori delle velocità delle onde sismiche misurate, ma la cui lettura deve essere effettuata anche in relazione alla situazione litologica e stratigrafica locale:

Sism3, 20 WET iterations, RMS error 1.1 %, 1D-Gradient smooth initial model, Version 3.33



- Il **primo sismostrato**, quello più superficiale, ha uno spessore medio di 5 m, con velocità delle onde P compresa tra 1000 e 18000 m/s, riferibile a terreni superficiali con scarse capacità geotecniche;
- Il **secondo sismostrato** ha uno spessore medio di circa 12 m, con velocità delle onde P compresa tra 2000 e 3600 m/s che tende ad aumentare gradualmente con la profondità, ad un orizzonte molto consistente e con buone proprietà geotecniche.
- Il **Terzo sismostrato** è caratterizzato da una velocità v_p compresa tra 3800 e 5600 m/s che tende ad aumentare gradualmente con la profondità, corrisponde ad un orizzonte molto consistente e con ottime proprietà geotecniche.

3.RAPPORTO FOTOGRAFICO

3.1 INDAGINE SISMICA DI TIPO MASW



Postazione dell'indagine MASW 01.



Postazione dell'indagine MASW 02.

3.2 TOMOGRAFIA SISMICA IN ONDE P



Postazione dell'indagine Sism 01.



Postazione dell'indagine Sism 02.



ENGINEERING GEOLOGY SRL
Via del Gallitello 90/A - 85100 Potenza - Tel. 0971/26378 Fax 0971/1940737
www.engeosrl.it E_mail info@engeosrl.it



Postazione dell'indagine Sism 03.



Società con sistema di gestione certificato UNI EN ISO 9001:2015 – UNI EN ISO 14001:2015 - UNI EN ISO 45001:2018 per la fornitura dei servizi di ingegneria e di esplorazione geologica del sottosuolo – IAF 34



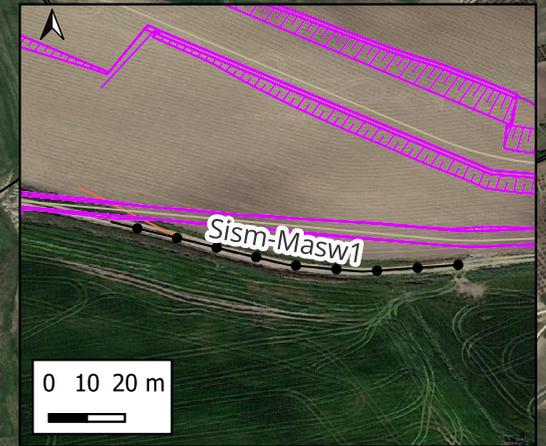
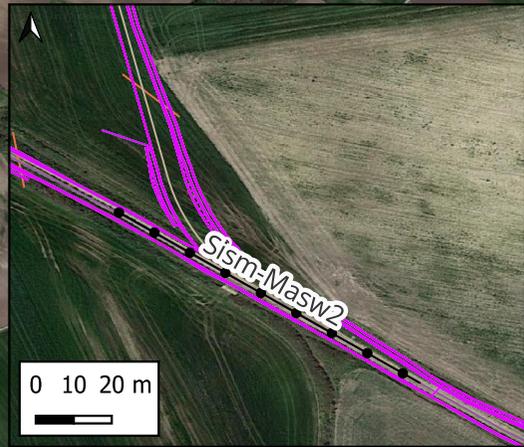
ENGINEERING GEOLOGY SRL
Via del Gallitello 90/A - 85100 Potenza - Tel. 0971/26378 Fax 0971/1940737
www.engeosrl.it E_mail info@engeosrl.it

Allegato n° 1 Carta ubicazione delle indagini



Società con sistema di gestione certificato UNI EN ISO 9001:2015 – UNI EN ISO 14001:2015 - UNI EN ISO 45001:2018 per la fornitura dei servizi di ingegneria e di esplorazione geologica del sottosuolo – IAF 34

CARTA UBICAZIONE DELLE INDAGINI
Scala 1:10.000
Dettaglio in scala 1:15.000



Legenda

- Indagini sismiche a rifrazione in onde P e MASW
- ⬡ Aerogeneratori
- Strade esistenti
- Cavidotto
- Attraversamenti

