



IMPIANTO EOLICO E FOTOVOLTAICO "CAMPANEDDA IBRIDO"

COMUNE DI SASSARI

PROPONENTE



**Bentusoliana Energie Rinnovabili s.r.l.**  
Via Cavour, n. 33  
07100 SASSARI (SS)

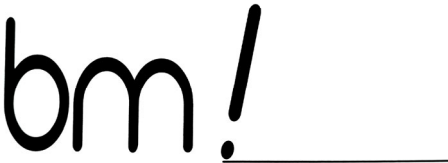
IMPIANTO EOLICO E FOTOVOLTAICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTI RINNOVABILI - PROGETTO DEFINITIVO

CODICE ELABORATO

OGGETTO:  
Relazione tecnica sulle indagini geofisiche

PD-R03  
all.01

COORDINAMENTO



BRUNO MANCA | STUDIO TECNICO DI INGEGNERIA  
LOC. RIU IS PIRAS, SN | 09040 SERDIANA (SU)  
+39 347 5965654 P.IVA 02926980927  
SDI: W7YVJK9 ATTESTATO ENAC N° I.A.P.R.A. 003678  
INGERUNOMANCA@GMAIL.COM PEC: BRUNO.MANCA@INGPEC.EU  
WWW.BRUNOMANCA.COM WWW.LMBRAS360.COM

Studio Tecnico Dott. Ing Bruno Manca

GRUPPO DI LAVORO S.I.A.

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori  
F&F Engineering Srl  
Dott. Giulio Casu  
Dott.ssa Ing. Ilaria Giovagnorlo  
Dott. Giorgio Lai  
Dott. Federcio Loddo  
Dott. Giovanni Lovigu  
Dott. Ing Bruno Manca  
Dott. Nat. Maurizio Medda  
Dott.ssa Geol. Consuelo Nicolo  
Dott.ssa Archeol. Marta Pals  
Dott.ssa Ing. Alessandra Scalas  
Dott. Nat. Fabio Schirru  
Dott. Agr. Giuseppe Puggioni  
Federica Zaccheddu

REDATTORE

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE
00	Maggio 2024	Prima emissione

FORMATO  
ISO A4 - 297 x 210

RELAZIONE TECNICA SULLE  
INDAGINI GEOFISICHE  
(M.A.S.W - SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P  
TOMOGRFIA ELETTRICA)

*Impianto Eolico*  
*Località Campanedda*

N° Tavola	Scala Disegno	Data	Data Aggiornamento	Redatto:
<b>R1</b>	varie	02/12/2022	--	A.Carcangiu D.Succu

Oggetto:	Scala Plottaggio	CTB
RELAZIONE TECNICA	1.1	--

**Committente:**

GAIA Consulting  
Loc. Scala Sa Perda, 87 09028 Sestu (CA)  
P.IVA 03191600927

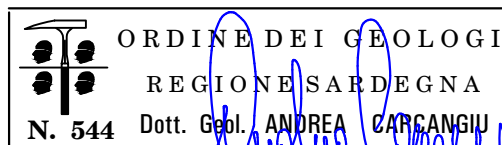
**Cantiere:** Località Campanedda  
Comune di Sassari (SS)

**GEOSERVICE****GEOSERVICE S.r.l.**

Sede: Casa Spadaccino - Loc. Su loi, km 13+400, SS 195  
Sulcitana, 09012 Torre degli Ulivi Capoterra (CA)  
Sede legale: Via D. Cimarosa, 22 - 09050 Villa San Pietro (CA)  
Capitale Sociale: € 20.000,00  
Tel. 3474032606; Fax: 1782206528;  
P.IVA/C.F.: 03008730925 - R.E.A.: 239536 di Cagliari  
mail: [info@geoservicesardegna.com](mailto:info@geoservicesardegna.com);  
PEC: [geoservice.sas@pec.it](mailto:geoservice.sas@pec.it)  
[www.geoservicesardegna.com](http://www.geoservicesardegna.com)  
L'Amministratore

Il Direttore Tecnico

Dott. Geol. Andrea Carcangiu



Collaboratore

Dott. Geol. Daniele Succu

## Sommario

1	PREMESSA .....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE .....	3
3	RILIEVO TOPOGRAFICO .....	4
4	INDAGINI SISMICHE: MASW .....	6
4.1	Tecnica e parametri utilizzati .....	6
4.2	Strumentazione utilizzata .....	7
4.3	Elaborazione dei dati .....	7
4.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018) .....	9
4.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI .....	11
4.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE .....	12
5	SISMICA A RIFRAZIONE .....	14
5.1	Strumentazione utilizzata .....	14
5.2	Elaborazione dei dati .....	15
5.3	Valutazione della escavabilità delle rocce .....	17
6	TOMOGRAFIA ELETTRICA .....	19
6.1	Metodologia impiegata, strumentazione e software .....	19
6.1.1	Tecnica e parametri utilizzati .....	19
6.1.2	Geometria delle acquisizioni .....	19
6.1.3	Strumentazione e attrezzatura utilizzata .....	20
6.1.4	Elaborazione dei dati e software .....	20
6.2	Valori di resistività di letteratura .....	21
6.3	RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TRM-1 .....	23
6.3.1	MASW M1 .....	23
6.3.2	Rifrazione R1 e Tomografia elettrica T1 .....	24
7	INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI .....	27
8	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	28

# 1 PREMESSA

La presente relazione descrive le attività delle indagini geofisiche realizzate su incarico della Dott. Geol. Cosima Atzori, nell'ambito del progetto: *"Realizzazione di una pala eolica in località Campanedda (SS)"*.

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica e geoelettrica, seguono le specifiche e le caratteristiche delle tecniche impiegate:

1. L'indagine sismica con tecnica MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del DM 17/01/2018.
2. L'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, andando a stimare lo stato di addensamento e/o fratturazione del terreno investigato. E' molto utile anche per classificare la cosiddetta "rippabilità" degli ammassi rocciosi e per ottenere per via indiretta una classificazione dell'ammasso roccioso.
3. La tomografia elettrica è una tecnica geofisica che restituisce, del sottosuolo investigato, l'immagine 2D della distribuzione della resistività elettrica. Trova le sue migliori applicazioni in situazioni complesse, dove può manifestare tutto il suo elevato potere risolutivo, sia laterale che verticale. Nel caso in esame è stata impiegata con lo scopo di individuare l'eventuale presenza di cavità di origine carsica nella formazione delle dolomie.

A supporto della progettazione geotecnica e strutturale, tramite la MASW sono stati determinati sulla base di correlazioni bibliografiche i parametri elastici dinamici derivati dalle indagini sismiche e il modulo statico di deformazione.

Come richiesto dalla committenza sono stati realizzati in totale n° 1 stendimenti di MASW, n°1 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e n° 1 stendimenti di geoelettrica.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Inquadramento generale dell'area di indagini – scala 1:10.000
- Tavola 2. Planimetria di dettaglio ubicazione indagini geofisiche – scala 1:500
- Allegato 1. MASW: Sismogramma acquisiti- spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione
- Allegato 2. Sismica a rifrazione: dromocrone osservate e calcolate e raggi sismici
- Allegato 3. Documentazione fotografica delle indagini geofisiche.

## 2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma:

1. In data 10 Novembre 2022 esecuzione di n°1 stendimenti di geoelettrica, 1 stendimenti di sismica con tecnica MASW e rifrazione in onde P. La base sismica MASW ricade lungo il medesimo allineamento della rifrazione, mentre lo stendimento geoelettrico ha il medesimo centro degli allineamenti sismici ma di lunghezza maggiore (93,0 m, v. Tabella 1).
2. Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica.
3. Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

L'ubicazione generale è riportata nella **Tavola 1** mentre quella di dettaglio nella **Tavola 2**.

Nella seguente tabella si riporta il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative, la direzione di esecuzione (da geofono o elettrodo iniziale a quello finale) e la loro lunghezza complessiva.

**Tabella 1.** Quadro riassuntivo delle indagini svolte

Stendimento	Metodo di indagine geofisico	Orientamento	Lunghezza(m)
M1	MASW	SE-NW	69,0
R1	Sismica a rifrazione in onde P	SE-NW	69,0
T1	Geoelettrica	SE-NW	93,0

### 3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Di seguito si riportano i dati del rilievo topografico in termini di coordinate Gauss Boaga e quote assolute in m.s.l.m e relative in m da p.c. eseguito tramite GPS differenziale Stonex S70G di ciascun geofono e shot/energizzazione dello stendimento di sismica a rifrazione in onde P. Si precisa che i valori altimetrici del seguente profilo, con l'aggiunta delle quote degli elettrodi iniziali e finali, sono stati utilizzati anche per l'elaborazione della tomografia elettrica in quanto è stato eseguito lungo lo stesso profilo ma presenta lunghezza maggiore (93,0 m).

Legenda:

G1: Nome Geofono;

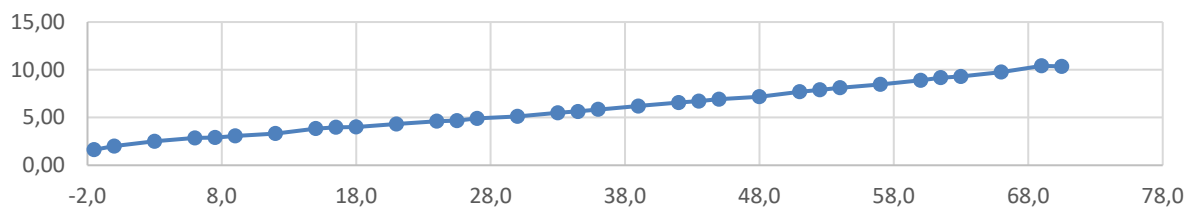
S1: Nome Shot/energizzazione

Est/Nord: Longitudine e Latitudine, Coordinate Gauss Boaga

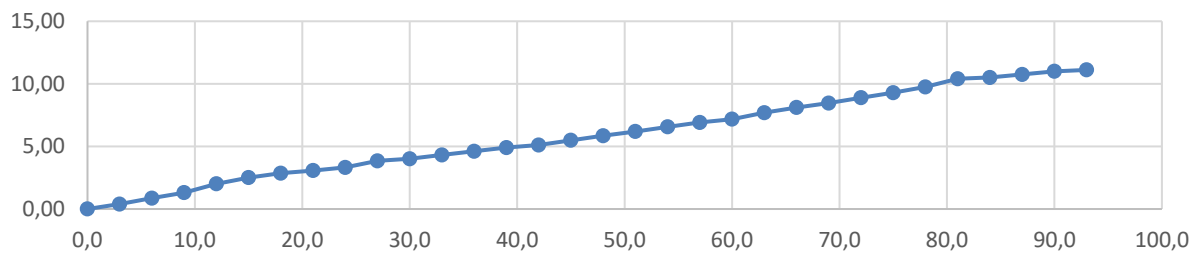
QA-QR: Quote altimetriche assolute (m.s.l.m) e relative in (m.p.c)

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	QA: Quota assoluta (m.s.l.m)	QR: Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,5	1464959,03	4342324,35	603,72	0,00
G1	0	1464960,49	4342324,71	603,93	0,20
G2	3	1464963,02	4342325,78	604,24	0,52
G3	6	1464966,09	4342326,88	604,52	0,80
S2	7,5	1464967,39	4342327,39	604,64	0,92
G4	9	1464968,71	4342327,86	604,73	1,01
G5	12	1464971,42	4342328,85	605,00	1,28
G6	15	1464974,12	4342329,98	605,24	1,52
S3	16,5	1464975,70	4342330,65	605,36	1,64
G7	18	1464976,93	4342331,12	605,46	1,74
G8	21	1464979,68	4342332,27	605,74	2,02
G9	24	1464982,55	4342333,49	606,10	2,38
S4	25,5	1464983,92	4342334,01	606,27	2,54
G10	27	1464985,29	4342334,48	606,37	2,65
G11	30	1464987,89	4342335,70	606,63	2,91
G12	33	1464991,01	4342336,37	606,89	3,17
S5	34,5	1464992,05	4342337,16	607,10	3,38
G13	36	1464993,52	4342337,51	607,13	3,41
G14	39	1464996,18	4342338,49	607,51	3,79
G15	42	1464998,97	4342339,62	607,85	4,13
S6	43,5	1465000,38	4342340,11	607,93	4,21
G16	45	1465001,86	4342340,45	608,17	4,45
G17	48	1465004,80	4342341,51	608,52	4,80
G18	51	1465007,30	4342342,23	608,72	5,00
S7	52,5	1465008,83	4342342,89	609,37	5,65
G19	54	1465010,28	4342343,53	609,73	6,01
G20	57	1465013,01	4342344,38	610,01	6,29
G21	60	1465015,85	4342345,50	610,18	6,45
S8	61,5	1465017,11	4342345,96	610,30	6,58
G22	63	1465018,52	4342346,37	610,41	6,68
G23	66	1465021,40	4342347,54	610,61	6,89
G24	69	1465024,41	4342348,43	610,85	7,13
S9	70,5	1465025,69	4342348,86	610,97	7,25

Rilievo Stendimento Sismico R1



Rilievo Stendimento Geoelettrico T1

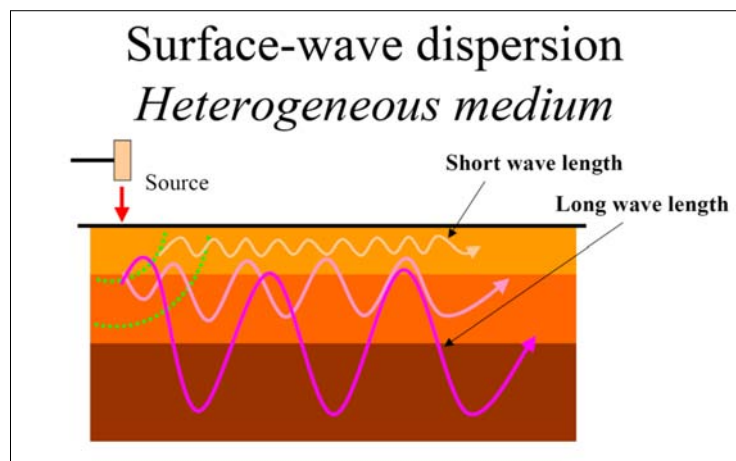


## 4 INDAGINI SISMICHE: MASW

### 4.1 Tecnica e parametri utilizzati

“Il metodo MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves) è una tecnica di indagine non invasiva, che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo.” (da *Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of SurfaceWaves – V. Roma 2006)*. L'indagine svolta ha visto l'applicazione di tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un'energizzazione.



da SAGEEP2003

L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in “andata” e in “ritorno” con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema).

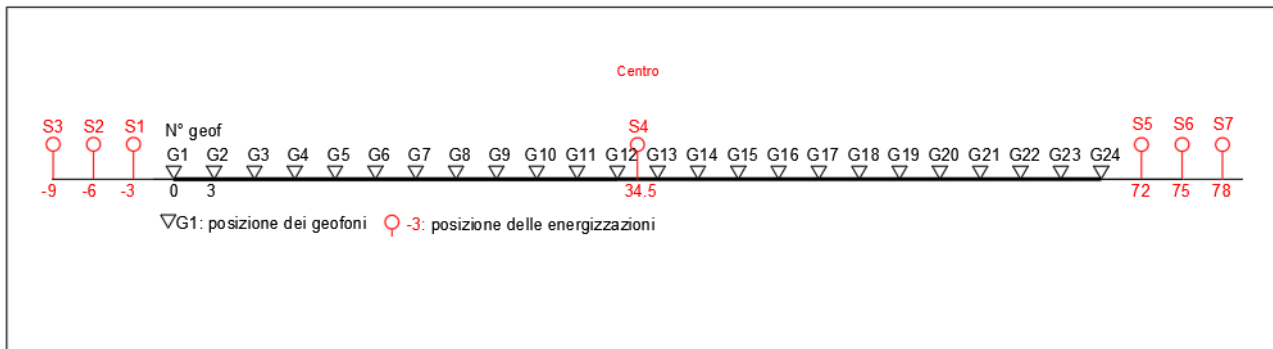
Il metodo risulta efficace se la base sismica è ubicata su piano a pendenza costante e per una stratificazione piano parallela al piano topografico. Al fine di svolgere al meglio la campagna geofisica M.A.S.W., è utile che lo sviluppo lineare della base sismica sia limitata in lunghezza secondo i siti.



La maggior profondità di caratterizzazione raggiunta è legata alla minor frequenza registrata. Come già indicato nella figura, una frequenza alta caratterizza gli strati superficiali. La registrazione delle frequenze minori è destinata ai geofoni più lontani dalla sorgente.

Il numero di geofoni utile all'esecuzione ottimale di un'indagine M.A.S.W. è risultato, per il cantiere svolto, di 24 geofoni dei quali sono state utilizzate tutte le tracce. Il tempo dell'acquisizione è stato definito tra 1.00 e 2.00 secondi.

**Schema 1.** Schema geometrico di acquisizione dei dati per gli stendimenti di lunghezza L=69,0 m



#### 4.2 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, ci siamo avvalsi di una strumentazione di acquisizione DoReMi, prodotto dalla SARA electronicinstruments, 24bit con frequenza di campionamento 1000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali SARA electronics con frequenza propria di 4.5 Hz. Per l'energizzazione ci siamo avvalsi di mazza battente da 10 kg impattante su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

#### 4.3 Elaborazione dei dati

Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

- individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
- analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
- stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

A posteriori dell'analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all'inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

A seguire è indicato il procedimento di elaborazione che ha prodotto il profilo di velocità grazie all'impiego del software ZondST2D.

## $\tau$ -p transform in Frequency domain (MASW)

$$f(x, t)$$

Fourier transform

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$$

$$F(x, \omega)$$

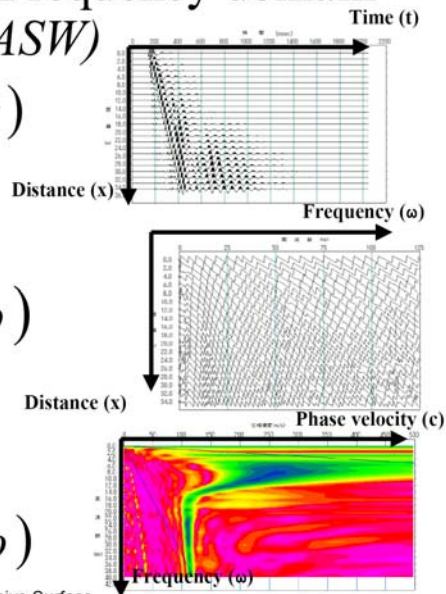
Phase shift  $\square$  Stack

$$F(c, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, \omega) \cdot e^{i\omega \frac{x}{c}} dx$$

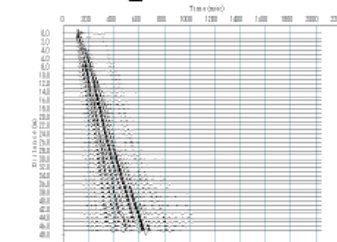
$$F(c, \omega)$$

SAGEEP2003

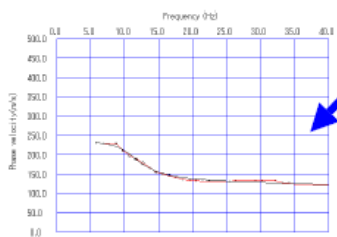
Active and Passive Surface



## Dispersion curve and its analysis



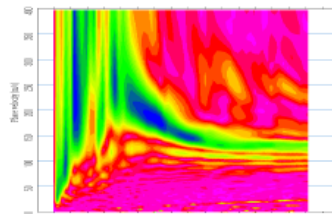
Common shot gather



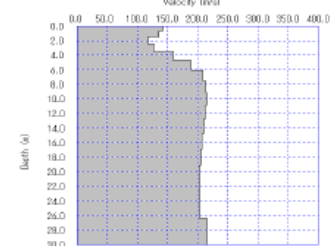
Dispersion curve inversion

SAGEEP2003

Active and Passive Surface Waves



Phase-velocity image in frequency domain (dispersion curve)



1D S-wave velocity model

76

#### 4.4 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica.

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale.

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3 del citato Decreto. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II del suddetto decreto, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio,  $V_s$ . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità  $V_s$  per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2 del Decreto.

I valori di  $V_s$  sono ottenuti mediante specifiche prove, tra le quali le MASW costituiscono la metodologia maggiormente adoperata.

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio,  $V_{s,eq}$  (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

$h_i$  spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

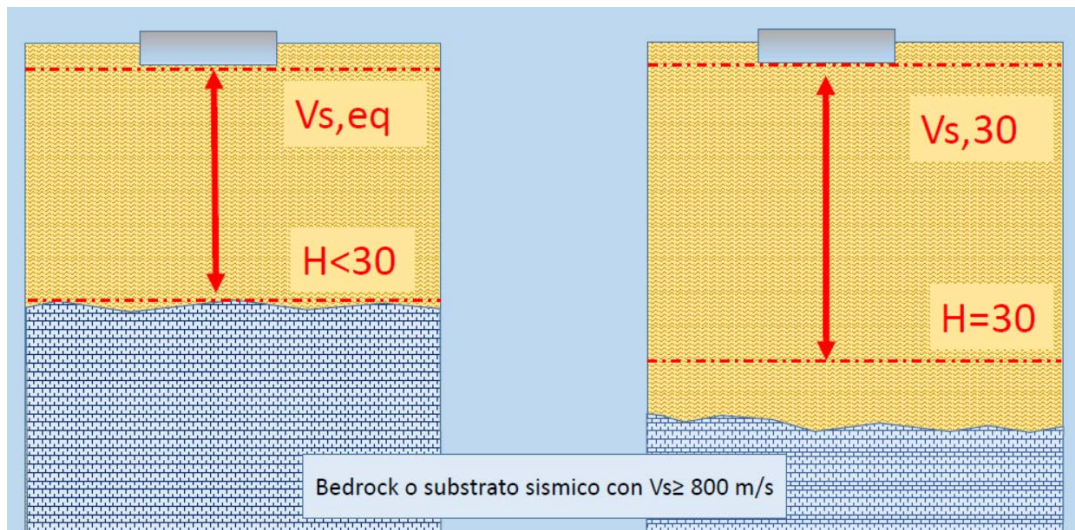
$N$  numero di strati;

$H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato  $H$  è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione (v. schema seguente).

Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s,30}$ , ottenuto ponendo  $H=30$  m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Schema di Calcolo delle  $V_{s,eq}$  e delle  $V_{s,30}$



Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2. II.

Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

**Tabella 3.2.II.**Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

Categoria	Descrizione
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , 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.
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> 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.
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , 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 100 e 180 m/s.
<b>E</b>	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

#### 4.5 VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI

Nella seguente tabella si riportano i valori di velocità delle onde P ed S dei principali litotipi riferibili anche al contesto geologico in esame (Fonte: Hearey e Brooks 1991, Bala et al 2005, Corrao e Coco 2006, bibliografia specialistica reperibile in rete).

Litotipi	Vp [m/s] min-max	Vs [m/s] min-max
<b>TERRENI E ACQUA</b>		
Alluvioni	400 - 2000	200 - 800
Sabbia asciutta	200 - 1000	80 - 400
Sabbia satura (in funzione anche del grado di saturazione)	600 - 2300	250 - 450
Sabbia siltosa	600 - 1900	200 - 600
Sabbia e ghiaia	300 - 1800	300 - 600
Limo	650 - 1250	240 - 480
Argilla	1000 - 2500	300 - 600
Argilla sabbiosa	600 - 2500	200 - 450
Acqua	1450 - 1500	0
<b>ROCCE SEDIMENTARIE</b>		
Argillite	2100 - 4400	550 - 2100
Arenaria	1500 - 6000	950 - 3100
Arenaria fratturate	800 - 2100	360 - 950
Calcare	2000 - 7000	1000 - 3300
Calcare fratturato	750 - 1500	330 - 1000
Calcarenite	1400 - 4400	800 - 2500
Calcarenite fratturata	600 - 1300	330 - 800
Marna	1500 - 4500	600 - 1.500
<b>ROCCE IGNEE</b>		
Basalto	1800 - 5000	1000 - 3000
Basalto fratturato	950 - 1350	480 - 700
Granitoidi	1600 - 5000	900 - 3000
Granitoidi fratturati	1000 - 1750	500 - 900
Piroclastite coerente	750 - 2500	350 - 1100
Piroclastite incoerente	350 - 1000	160 - 450

In particolare si ricorda che le velocità delle onde P misurate per terreni perfettamente saturi ( $S_r = 100\%$ ) dipendono talora in maniera decisiva dalle vibrazioni trasmesse dal fluido interstiziale e non dallo scheletro solido del materiale e perciò tale valore può non essere rappresentativo delle proprietà meccaniche del materiale in questione. Invece le velocità delle onde S sono caratteristiche delle vibrazioni trasmesse prevalentemente dal solo scheletro solido e perciò rappresentative delle proprietà meccaniche del terreno. Ne consegue che per alcuni terreni al di sotto della falda le uniche onde in grado di fornire informazioni precise sulla rigidezza del terreno sono quelle di taglio (S).

#### 4.6 DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE

Di seguito si indicano le correlazioni bibliografiche che possono essere utilizzate per il calcolo dei parametri di deformazione dinamici calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input  $V_p$ ,  $V_s$  e densità per ciascun sismostato definito dalle indagini geofisiche.

$$\text{Coefficiente di Poisson } \nu = \frac{V_p^2 - 2 V_s^2}{2 (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$\text{Modulo di Young dinamico } E_d = \gamma V_s^2 [(3V_p^2 - 4 V_s^2) / (V_p^2 - V_s^2)]$$

$$\text{Modulo di taglio (rigidità) } G_0 = \gamma V_s^2$$

$$\text{Modulo di comprimibilità o di Bulk } K = \gamma (V_p^2 - 4/3 V_s^2)$$

##### Determinazione del modulo di Young statico $E_s$

Per la determinazione del modulo di Young statico  $E_s$  dal modulo dinamico  $E_d$  si può applicare la nota relazione proposta da Rzhevsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm<sup>2</sup>:

$$E_{\text{stat}} = \frac{E_{\text{din}} - 0.97}{8.3}$$

Per gli ammassi rocciosi la bibliografia specialistica suggerisce di applicare un coefficiente pari a 0,8-1,0 per la roccia integra e un coefficiente via via più basso per quelle fratturate in relazione al grado di fratturazione.

$$E_{\text{stat}} = E_{\text{din}} \times (0.3/1.0)$$

Si sottolinea tuttavia come i valori ottenuti con la suddetta formulazione sia un modulo di elasticità e quindi non può essere utilizzato per determinare ad esempio cedimenti di fondazione quando il carico delle fondazioni dà luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

##### Correlazioni con $N_{\text{spt}}$ e parametri geotecnici

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi ( $N_{\text{spt}}$ ) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con  $N_{\text{spt}} = (V_s / \alpha)^\beta$  con i coefficienti  $\alpha$  e  $\beta$  variabili in funzione del tipo di terreno. Si ricorda che il numero di colpi di cui si parla è quello necessario per far avanzare di 30 cm nel terreno la punta del campionatore Raymond standard.

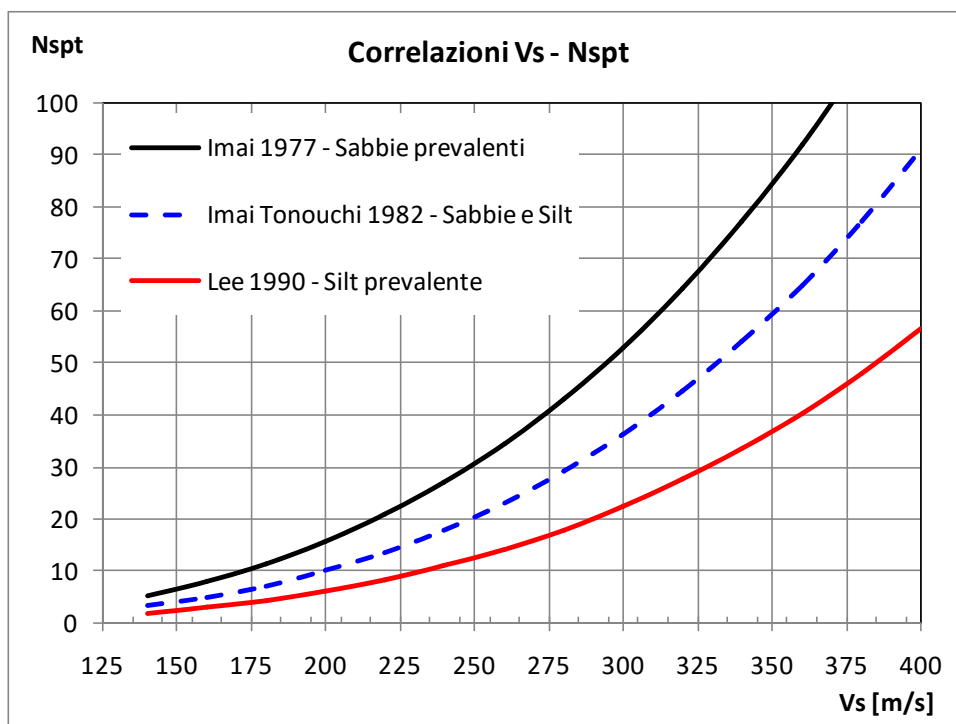
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

$$N_{\text{SPT}} = \left( \frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

$$N_{\text{SPT}} = \left( \frac{V_s}{97,0} \right)^{3,184} \text{ valida per i terreni misti sabbioso-siltosi - Imai e Tonuchi (1982)}$$

$$N_{\text{SPT}} = \left( \frac{V_s}{114,43} \right)^{3,226} \text{ valida per terreni prevalentemente fini/siltosi - Lee (1990)}$$

Dove:  $N_{\text{spt}}$  = numero di colpi del Penetrometro Standard e  $V_s$  = Velocità delle onde di taglio



Noto il valore di Nspt si calcolano i seguenti parametri geotecnici dei terreni:

Parametri geotecnici	Metodologie – Relazioni
Resistenza al taglio $\phi$	<p><u>Terreni sabbiosi</u>  Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&amp;Thornburn, <math>\phi = 0,28 N_{spt} + 27,2</math>  Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway <math>\phi = 0,30 N_{spt} + 27</math></p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u>  <math>\phi = \sqrt{15N_{spt} + 15}</math></p>
Modulo di deformazione <b>E</b> (o di Young)	<p><b>Schmertmann</b> (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi)  <math>E(\text{Kg/cm}^2) = 2B N_{spt}</math> dove  <math>B=4</math> (sabbia fine), <math>B=6</math> (sabbia media), <math>B=10</math> (sabbia grossolana)</p> <p><b>D'Appolonia et Alii.</b> (valido per sabbia + ghiaia e sabbie sovraconsolidate)  <math>E(\text{Kg/cm}^2) = 7,71 N_{spt} + 191</math> (ghiaia + sabbia)</p> <p><b>Tornaghi</b> (valido per sabbia + ghiaia)  <math>E(\text{MPa}) = B N_{spt}</math> (<math>B=7 \text{ MPa}</math>)</p>

## 5 SISMICA A RIFRAZIONE

In ambito d'indagini indirette l'esplorazione geofisica di sismica a rifrazione in onde P risulta tra le metodologie più affermate e meglio sperimentate. Il metodo si basa sugli effetti di rifrazione del segnale sismico in corrispondenza dell'interfaccia tra un mezzo soprastante a velocità sismica minore rispetto ad uno strato sottostante al primo con velocità sismica inferiore.

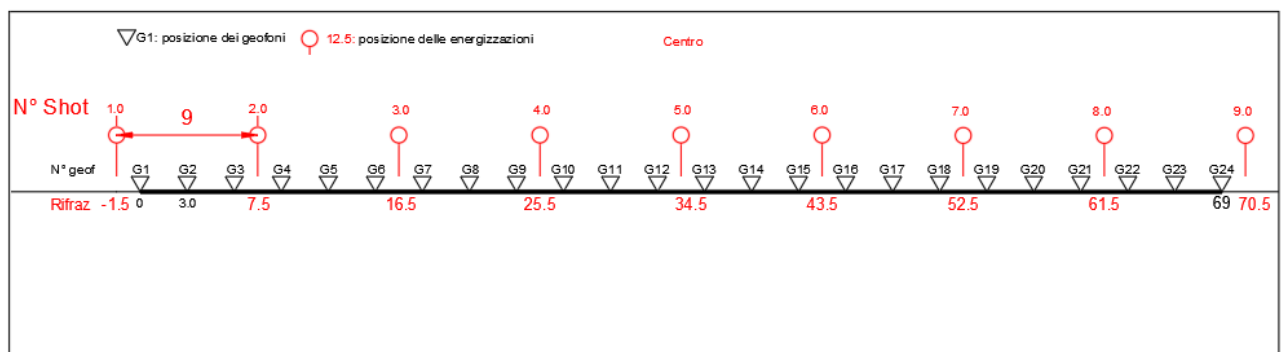
La tecnica di prospezione sismica a rifrazione consiste nella misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in un punto in superficie (punto di energizzazione/sparo), in corrispondenza di una molteplicità di ricevitori (geofoni) disposti allineati sulla superficie topografica.

Varie metodologie di interpretazione si sono susseguite nel tempo, passando dalle valutazioni di spessori e velocità in funzione del tempo all'intercetta fino a giungere alle più classiche interpretazioni mediante il General Reciprocal Method di Palmer '72.

Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati. Le profondità raggiunte sono al massimo la metà della distanza compresa tra lo shot esterno e l'ultimo geofono della stesa sismica sviluppata. È comunque generalmente considerato che la profondità esplorata non superi 1/3 dello sviluppo geometrico sopradescritto. La capacità risolutiva in termini di spessore degli strati sismici viene ad essere valutato in circa il 25/30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite 9 energizzazioni-shot rispettivamente per tutti gli stendimenti, al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica come meglio specificato nello schema di seguito rappresentato.

### Schema delle acquisizioni di sismica a rifrazione in onde P



**Schema 2:** Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

### 5.1 Strumentazione utilizzata

Per l'indagine eseguita è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello DoReMi a 24 bit, prodotto dalla SARA electronicsinstruments, con frequenza di campionamento 5000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della SARA electronics con frequenza propria di 10 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 per tutti gli stendimenti.

Per l'energizzazione delle onde P ci siamo avvalsi di una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite GPS differenziale STONEX S70G in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.



## 5.2 Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi).

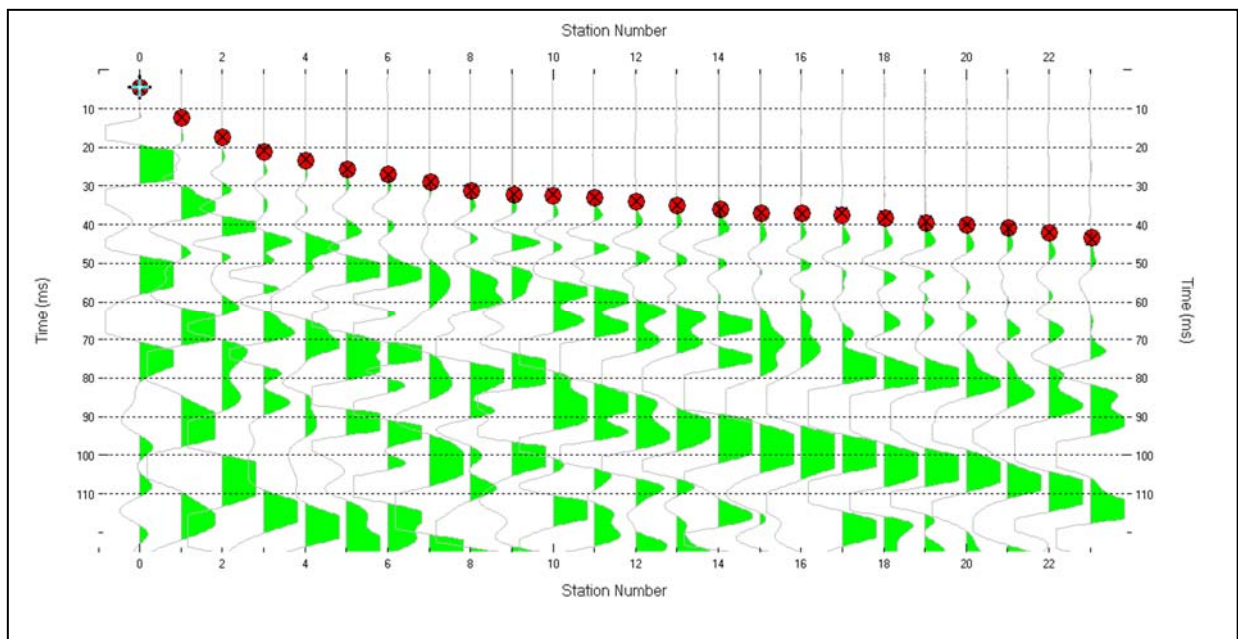
La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. La sovrapposizione tra dromocrone sperimentali e calcolate ha portato a valori ottimi con valori dell'RMS <5%.

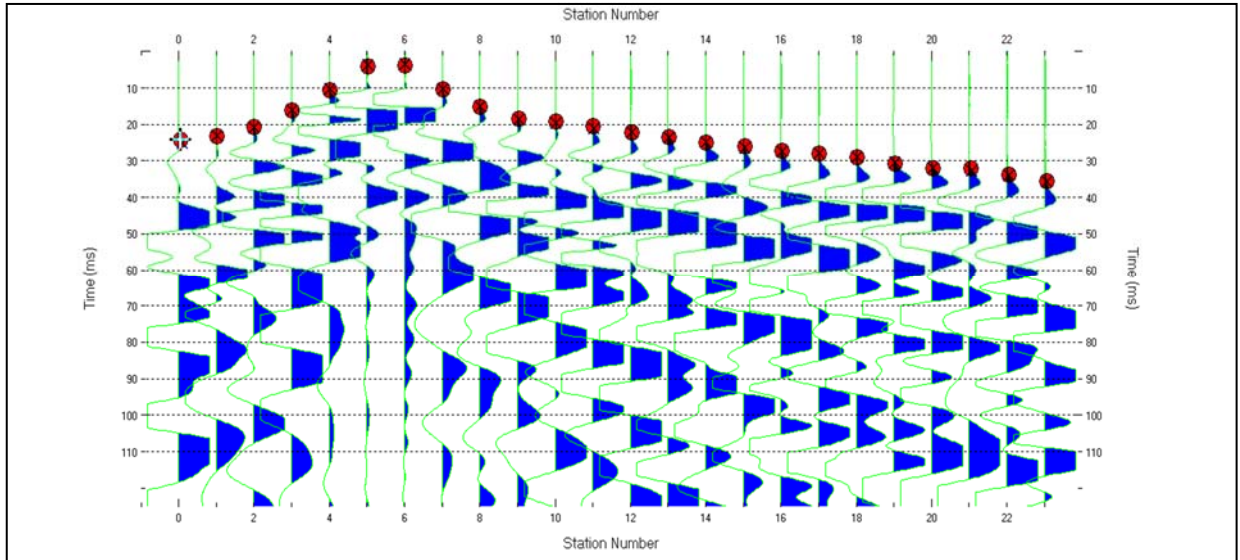
In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (WavepathEikonalTraveltimetomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono.

Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati

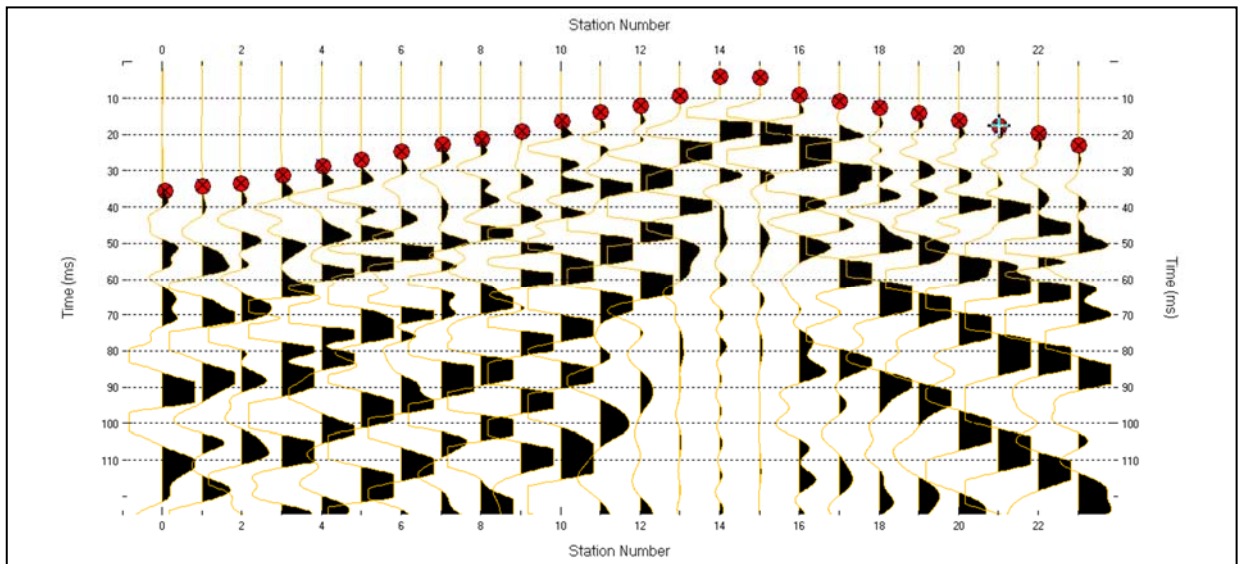
**Figura 1:** Sismogramma shot a -1,5 m di R1



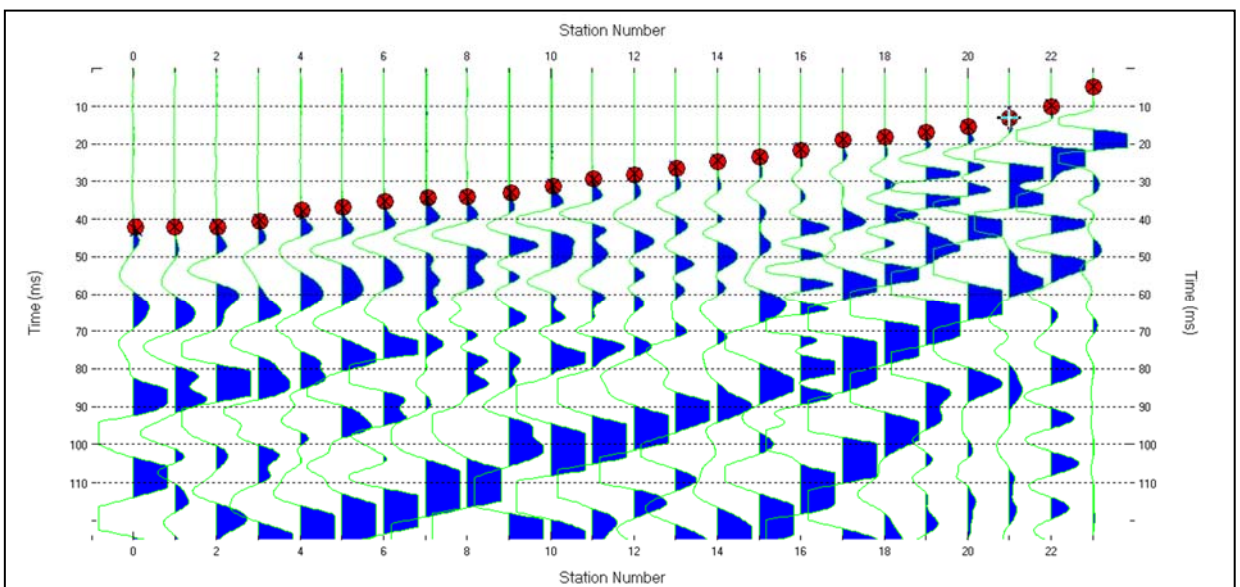
**Figura 2:** Sismogramma shot a 16,5 m di R1



**Figura 3:** Sismogramma shot a 43,5 m di R1



**Figura 4:** Sismogramma shot a 70,5 m di R1



### 5.3 Valutazione della escavabilità delle rocce

Per escavabilità o *rippabilità* si intende la facilità con cui un terreno o una roccia possono essere scavati meccanicamente e dipende, secondo la letteratura tecnica, da diversi fattori della roccia quali la resistenza a compressione monoassiale, il grado di fratturazione, la spaziatura delle discontinuità, la velocità di propagazione delle onde sismiche, le caratteristiche delle discontinuità (apertura, continuità, grado di alterazione... etc) nonché dalle caratteristiche proprie dei mezzi di scavo.

Il *ripping* è di solito eseguito da un mezzo meccanico (dozer) opportunamente attrezzato e le cui dimensioni sono determinate dalla durezza e compattezza dei materiali da abbattere. La roccia che risultasse troppo difficile per essere strappata a causa della mancanza di superfici interne di debolezza, viene generalmente frammentata con altri metodi (tra cui l'uso del martello demolitore e l'uso dell'esplosivo) e per questo definita "roccia da mina".

In genere, la rippabilità può essere desunta direttamente dal valore della velocità delle onde sismiche superficiali misurate in sito attraverso la prospezione sismica a rifrazione (onde P, longitudinali). Tale metodo risulta forse il più speditivo ed esaustivo poiché indirettamente tiene conto anche dei altri fattori e caratteristiche della roccia sopracitati.

In letteratura sono disponibili numerosi studi volti a correlare la velocità delle onde sismiche con le caratteristiche di scavabilità e rippabilità degli ammassi rocciosi. Il più conosciuto è quello sintetizzato nella tabella riportata nel "*Handbook of Ripping*"<sup>1</sup> della Caterpillar che però generalmente risulta eccessivamente "ottimista", nel senso che, ad esempio, ammassi rocciosi con velocità sino a 2200 m/s sono definiti *rippabili*, quando in realtà richiedono l'uso di martello demolitore.

Una ricerca approfondita nella letteratura internazionale, ha permesso di rintracciare correlazioni alternative che, nella pratica risultano più realistiche, soprattutto considerate le attrezzature normalmente utilizzate nelle nostre zone. Esse sono riportate nelle tabelle seguenti e sono quelle utilizzate per le valutazioni successive, permettendo la divisione degli ammassi rocciosi presenti nelle aree indagate nelle seguenti classi:

- A.  $V_p < 600$  m/s: ammasso roccioso scavabile;
- B.  $600 < V_p < 1000$  m/s: ammasso facilmente rippabile;
- C.  $1000 < V_p < 1400$  m/s: ammasso rippabile con difficoltà;
- D.  $V_p > 1400$  m/s: ammasso non rippabile (indispensabile l'uso di martello demolitore).

A titolo esaustivo si riportano anche la correlazione utilizzata dal **California Department of Transportations**, che risulta *leggermente più ottimista in termini di scavabilità*:

Velocity (m/s)	Rippability
< 1050	<i>Easily Ripped</i>
1050 – 1500	<i>Moderately Difficult</i>
1500 – 2000	<i>Difficult Ripping / Light Blasting</i>
> 2000	<i>Blasting Required</i>

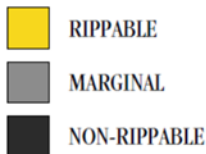
---

<sup>1</sup>twelfth edition - February 2000 - Caterpillar inc- Peoria , Illinois

nonché la correlazione edita dalla **Caterpillar** valida per la macchina operatrice D8 Ripper e relativa a varie tipologie di roccia. L'esame del grafico mostra che nel caso in esame (v. "limestone") per velocità oltre 2400 m/s il mezzo meccanico D8 non è più sufficiente e sarà necessario, un mezzo meccanico più grande (D9 o D10) o l'utilizzo di altri metodi di abbattimento quali la demolizione meccanica, l'uso di micro-cariche o in estrema ipotesi, se le strutture esistenti lo permettono, l'uso dell'esplosivo.

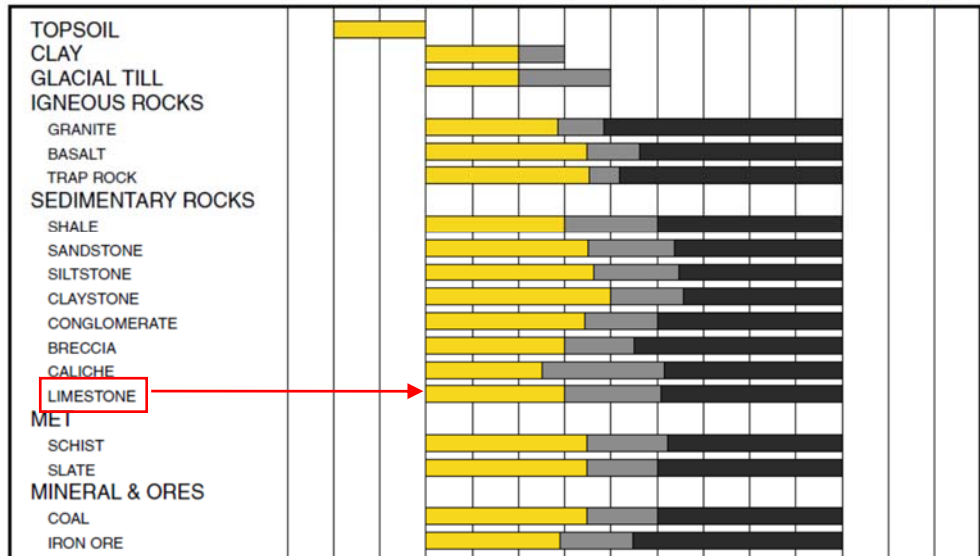
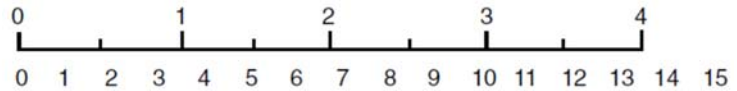
### D8R Ripper Performance

- Multi or Single Shank No. 8 Series D Ripper
- Estimated by Seismic Wave Velocities



### Seismic Velocity

Meters Per Second x 1000  
Feet Per Second x 1000



## 6 TOMOGRAFIA ELETTRICA

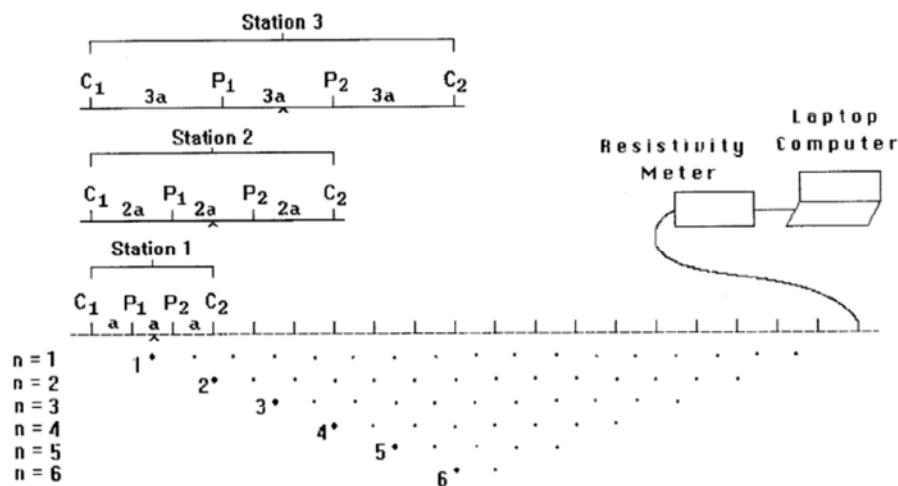
### 6.1 Metodologia impiegata, strumentazione e software

#### 6.1.1 Tecnica e parametri utilizzati

La scopo dei metodi geofisici è quello di ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo attraverso una serie di misure opportunamente effettuate in superficie. Il metodo utilizzato in questa indagine ricade fra i metodi geoelettrici "attivi", cioè quelli che utilizzano correnti elettriche artificialmente immesse nel terreno, con l'intento di misurare la resistività apparente degli strati attraversati dalla corrente elettrica.

La tecnica tomografica si compone di uno stendimento costituito nel caso specifico da un massimo di 32 elettrodi posti ad un'interdistanza costante l'uno dall'altro, che vengono gestiti automaticamente dallo strumento di misura e commutati alternativamente come elettrodi di corrente e di misura di differenza di potenziale (d.d.p.).

La metodologia permette l'acquisizione di una considerevole quantità di dati sulla resistività "apparente", rappresentativi sia delle variazioni laterali, che verticali lungo il profilo così da generare una Tomografia Elettrica lungo una linea sul terreno.



L'utilizzo appropriato dei programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico. La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante, poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti, etc.

La **profondità d'esplorazione** è variabile secondo il dispositivo e della risoluzione richiesta; mediamente è pari a circa 1/5 della lunghezza dello stendimento.

#### 6.1.2 Geometria delle acquisizioni

Per ciascun stendimento sono state impiegate tre geometrie di acquisizione, come di seguito specificato:

- Quadripolo di Wenner
- Quadripolo di Wenner Schlumberger
- Quadripolo Dipolo-Dipolo

Ogni metodo utilizzato ha delle caratteristiche proprie e come tale tende meglio a rappresentare specifiche strutture presenti nel sottosuolo. In particolare:



- Il quadripolo di Wenner (di seguito W) presenta caratteristiche per il quale risulta maggiormente idoneo nell'investigazione di strutture orizzontali (quali quelle sedimentarie o laviche).
- Il quadripolo di Wenner-Schlumberger (di seguito WS) risulta essere un buon compromesso per l'investigazione sia di strutture orizzontali che verticali (faglie, dicchi, cavità),
- Il quadripolo Dipolo-Dipolo (di seguito DD) è prevalentemente idoneo nell'investigazione di strutture verticali (faglie, dicchi, cavità), mentre risulta essere poco adatto in presenza di strutture orizzontali, quali quelle sedimentarie.

Il W e il WS si distinguono anche per un minore “rumore” delle acquisizioni, ossia una miglior rapporto tra segnale acquisito e disturbo della misura, nonché per una maggiore capacità di investigazione in profondità.

### 6.1.3 Strumentazione e attrezzatura utilizzata

La strumentazione utilizzata per lo studio è composta dai seguenti dispositivi:

- sistema di misurazione ed acquisizione formato da un georesistivimetro completo di unità di energizzazione ed un computer per la gestione automatica delle acquisizioni (apparecchiatura per tomografia elettrica Mod. Polares della PASI) che fornisce la corrente da immettere nel sottosuolo con una tensione in uscita di picco di  $\pm 700V$  ed una corrente variabile fra 5 e 2.000 mA.;
- n° 2MUX per la gestione automatica delle acquisizioni in cui gli elettrodi collegati all'unità di acquisizione ed energizzazione sono in grado di funzionare alternativamente come elettrodi di corrente e di potenziale;
- N° 2 cavi per 16 elettrodi *cabla A-B-M-N* con connettore per MUX
- 32 elettrodi in acciaio inox



### 6.1.4 Elaborazione dei dati e software

L'**elaborazione tomografica** consiste, nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle secondo uno schema definito con riferimento alla distribuzione e alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle è calcolata la resistività apparente che soddisfi il complesso delle misure eseguite, su questo schema è applicato il metodo d'ottimizzazione dei minimi quadrati modificando il modello di partenza, in maniera iterativa in modo che si riduca la differenza tra i valori di resistività apparente calcolati e quelli effettivamente misurati.

Il **grafico** che ne deriva è una sezione bidimensionale in cui le zone ad uguale resistività sono raffigurate da aree caratterizzate dal medesimo colore. Le tinte blu rappresentano resistività basse, poi si passa a colori che vanno dal verde al giallo e infine al rosso che rappresenta litologie a resistività via via sempre più alte.

Le misure sperimentali sono state elaborate mediante uno specifico programma di interpretazione tomografica denominato “ZONDRES2D”. Il programma d'interpretazione tomografica ZONDRES2D elabora un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo che soddisfa i valori sperimentali acquisiti con le varie interdistanze dello stendimento.

## 6.2 Valori di resistività di letteratura

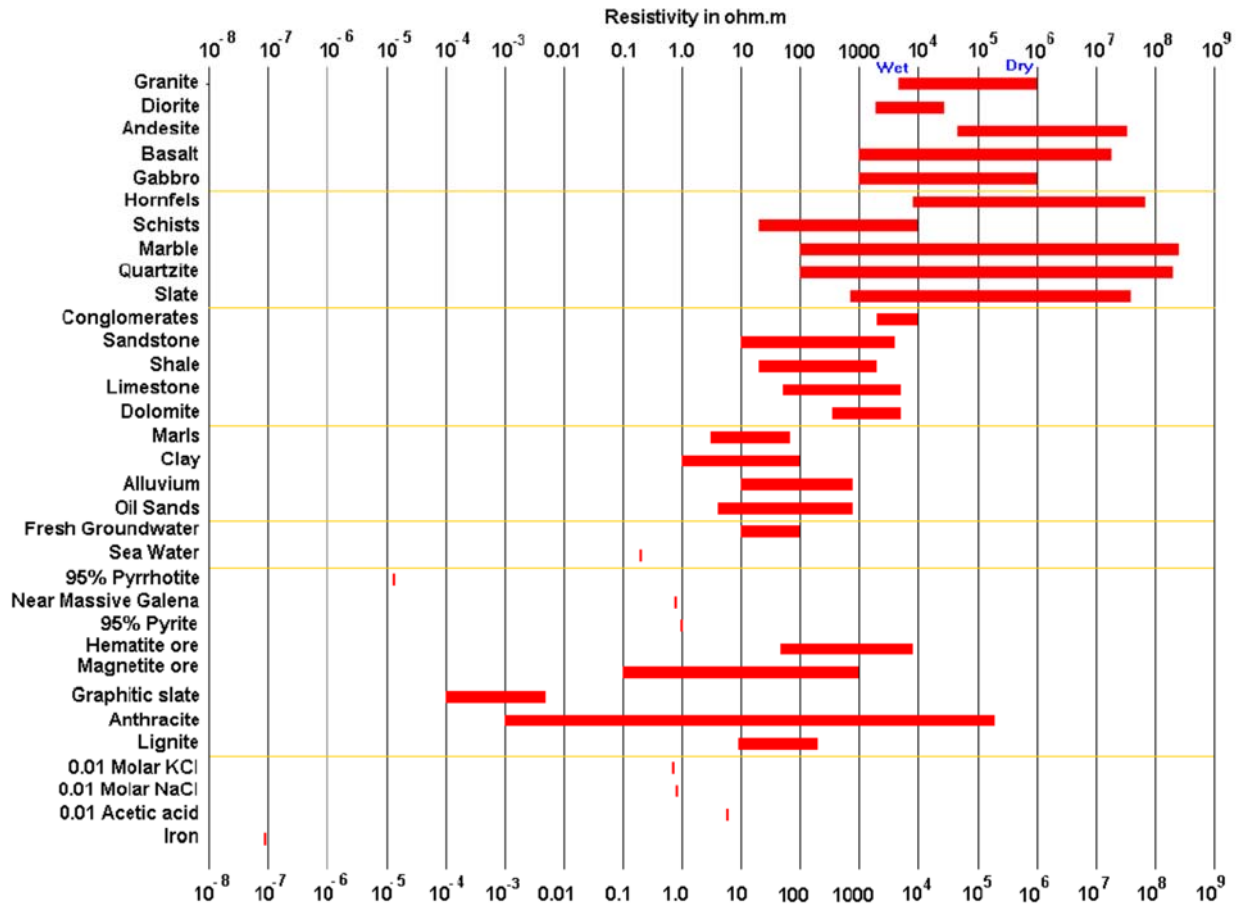
La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti etc. Nella **tabella 2** e nella **Figura 1** si riporta il range di resistività dei materiali geologici tratta rispettivamente da Telford *et al.* del 1990 e da *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys by Dr. M.H.Loke (1996-2015)*, utili per un raffronto con i valori misurati lungo le sezioni di resistività.

Per quanto riguarda l'eventuale presenza di vuoti e cavità naturali si ricorda che questi in genere sono identificati con delle anomalie di elevata resistività rispetto ai valori dei terreni circostanti, salvo che non siano colme d'acqua (v. in cavità carsiche) e in questi casi le anomalie possono assumere un valore di resistività minore rispetto all'ammasso roccioso circostante.

**Tabella 2.** Valori di resistività di rocce, terreni e acqua

<b>Litotipi - terreni</b>	<b>Resistività elettrica (Ohm·m)</b>	
	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Alluvioni	10	800
Argilla (acqua dolce)	5	15
Argilla (acqua salata)	1	10
Ghiaia, ciottoli e massi	100	500
Limo	8	20
Sabbia asciutta	80	200
Sabbia satura d'acqua dolce	30	50
Sabbia satura d'acqua salata	10	30
Sabbia e olio	4	800
Torba	8	20
<b>Litotipi – rocce sedimentarie</b>	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Arenaria	1	$6,4 \cdot 10^8$
Argillite	10	800
Calcare poroso	50	$5 \cdot 10^3$
Calcare compatto	$10^3$	$10^7$
Conglomerato	$2 \cdot 10^3$	$10^4$
Dolomia	350	$8 \cdot 10^3$
Duomo salino	30	$6 \cdot 10^5$
Marna	3	70
Carbone	0,70	2,0
<b>Litotipi – rocce ignee</b>	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Andesite	150	$4,5 \cdot 10^4$
Basalto	10	$1,3 \cdot 10^7$
Riolite	100	$5 \cdot 10^4$
Granito	300	$10^6$
Tufo	500	$10^5$
<b>Acqua</b>	<b>Resistività elettrica (Ohm·m)</b>	
	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Dolce	7	30-50
Salmastra	0,2	0,5
Di mare	-	< 0,2
Salamoia	-	0,04

**Figura 1.** Valori di resistività di rocce, terreni e minerali





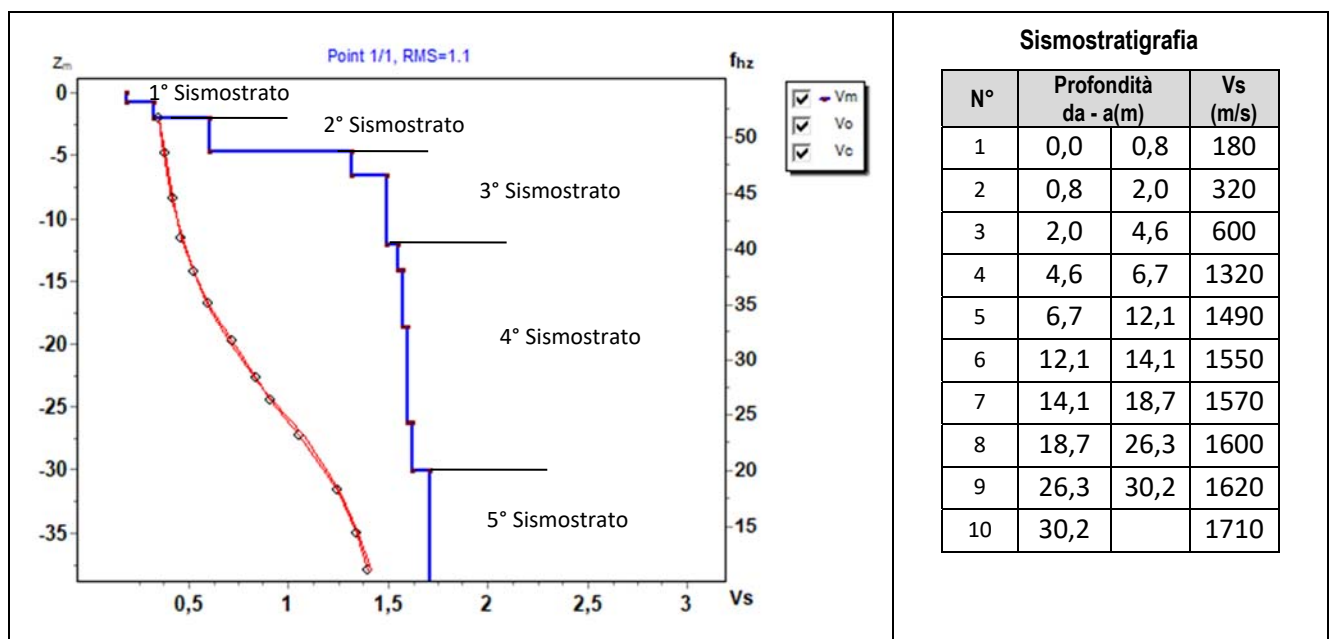
## 6.3 RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TRM-1

### 6.3.1 MASW M1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 2,0	1° sismostrato con Vs tra <b>180 e 320 m/s</b> , terre da poco a mediamente addensate
2,0 – 4,6	2° sismostrato con Vs di <b>600 m/s</b> , Roccia fratturata
4,6 – 12,1	3° sismostrato con Vs tra <b>1320 e 1490 m/s</b> , Substrato roccioso debolmente fratturato
12,1 – 30,2	4° sismostrato con Vs tra <b>1550 e 1620 m/s</b> , Substrato roccioso sano
>30,2	5° sismostrato con Vs di <b>1710 m/s</b> , Substrato roccioso sano

#### MASW M1 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

con:

$h_i$  spessore dell'*i*-esimo strato;

$V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

$N$  numero di strati;

$H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **4,6 m** ( $V_s > 800$  m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **4,6 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 4,6/0,0124 = 371$  m/s.**

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina 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.

## Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Nella **tabella 4** si illustrano i parametri di deformazione dinamici medi calcolati tramite correlazione bibliografica dei parametri di input Vs, e Vp e densità (da bibliografia/correlazione) per ciascun sismostrato definito dalle indagini eseguite.

**Tabella 4.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,0	terre	1.600	500	250	0,33	265	32	98	265
2	2,0-4,6	10%	1.800	1.200	600	0,33	1.726	173	647	1.726
3	4,6-12,1	15%	2.000	2.810	1.405	0,33	10.533	1.580	3.952	10.533
4	12,-30,2	20%	2.100	3.170	1.585	0,33	14.073	2.815	5.276	14.073
5	>30,2	30%	2.200	3.420	1.710	0,33	17.152	5.146	6.433	17.152

## Indicazioni per la determinazione di Nspt e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e Nspt, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

$$N_{SPT} = \left( \frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

### 6.3.2 Rifrazione R1 e Tomografia elettrica T1

Nella sezione di sismica a rifrazione **R1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R1	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 0,5/2,5	400-800
B: Unità delle rocce fratturate (rippabili)	Da 0,5/2,5 a 3,5/8,0	800-1600
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,5/8,0 a 10,0/14,0	1600-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 6,0/12,0 a 20,0/26,0	2400-4400

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4400 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori molto ridotti (tra 0,5 e 2,5 metri da p.c) e un andamento quasi parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce fratturate (rippabili) presenta delle variazioni di spessore maggiori rispetto al primo, infatti si osservano spessori maggiori nella parte sinistra della sezione e si rileva fino a profondità comprese tra 3,5 e 8,0 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 10,0 e 14,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un

substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte e si riscontra fino alla massima profondità di indagine, ovvero 20,0/26,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle  $V_p$  con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,5 e 8,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 10,0 e 14,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

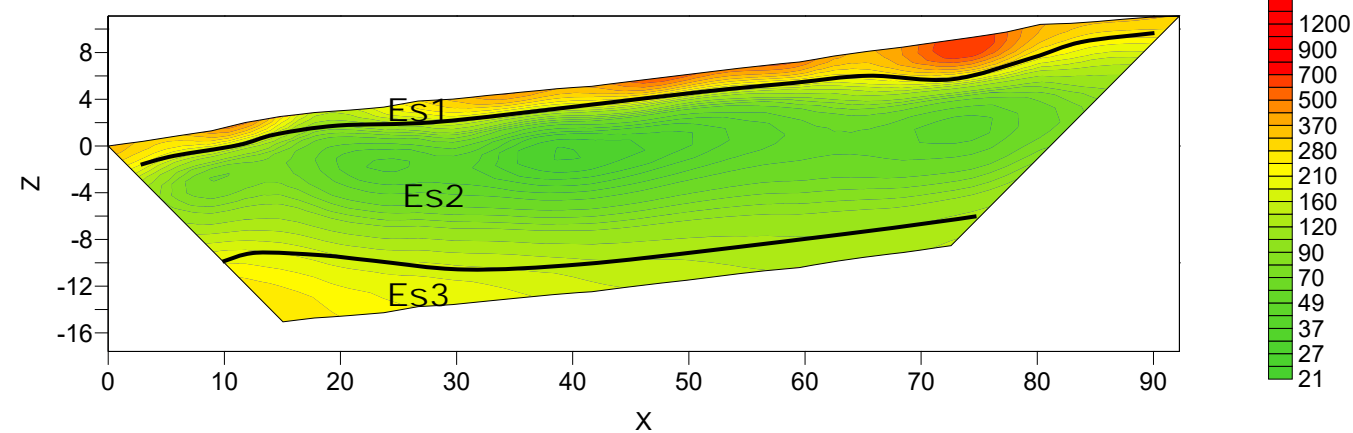
La sezione di tomografia elettrica T1, realizzata con le tre differenti geometrie di acquisizione, mette in luce la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 2 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali caratterizzati da resistività media, con valori tra 600 e 1000  $\Omega \cdot m$ ; segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori bassi di resistività (tra 20 e 200  $\Omega \cdot m$ ) riconducibile alla presenza del substrato roccioso fratturato. Segue un terzo elettrostrato (Es3) caratterizzato dai valori più alti (tra 200 e 1200  $\Omega \cdot m$ ) riconducibile ai materiali rocciosi con un grado di fratturazione più basso. Tale elettrostrato è maggiormente distinguibile nell'acquisizione Dipolo-Dipolo

Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che fino alla profondità di circa 12,0 m dal piano campagna si riscontrano materiali rocciosi fratturati i quali giacciono sotto una copertura di terre e rocce intensamente fratturate dallo spessore di 2,0 m circa.

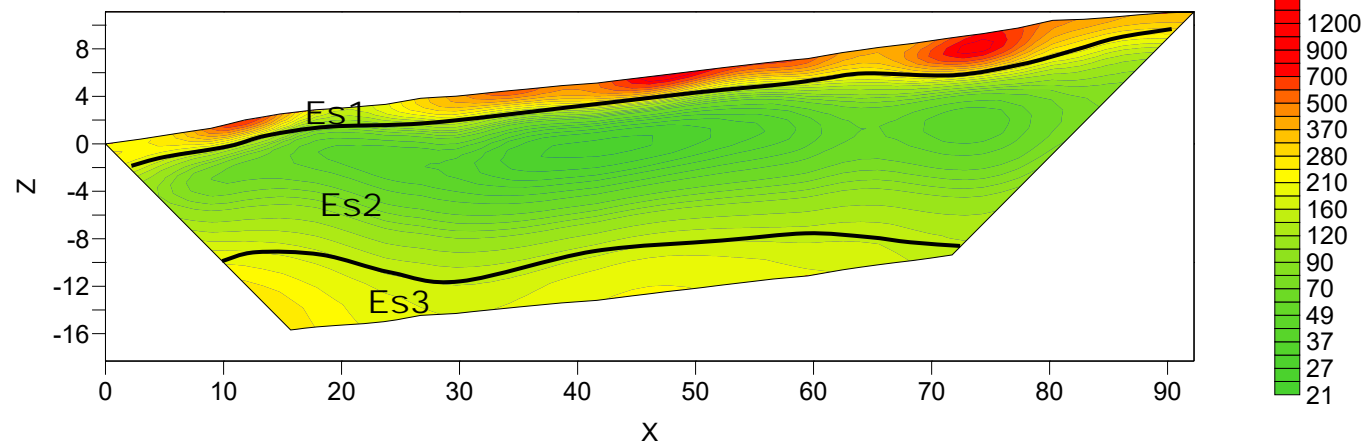
Lungo l'allineamento in cui sono state realizzate le indagini, salvo una stratificazione di litotipi caratterizzati da velocità crescenti con la profondità, non si riscontrano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. bassissima velocità) tali da consigliare un approfondimento delle indagini.

Stendimento di tomografia elettrica: T1-Lungh: 93,0 m - Orientazione: SE-NW  
Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 148,45m slm

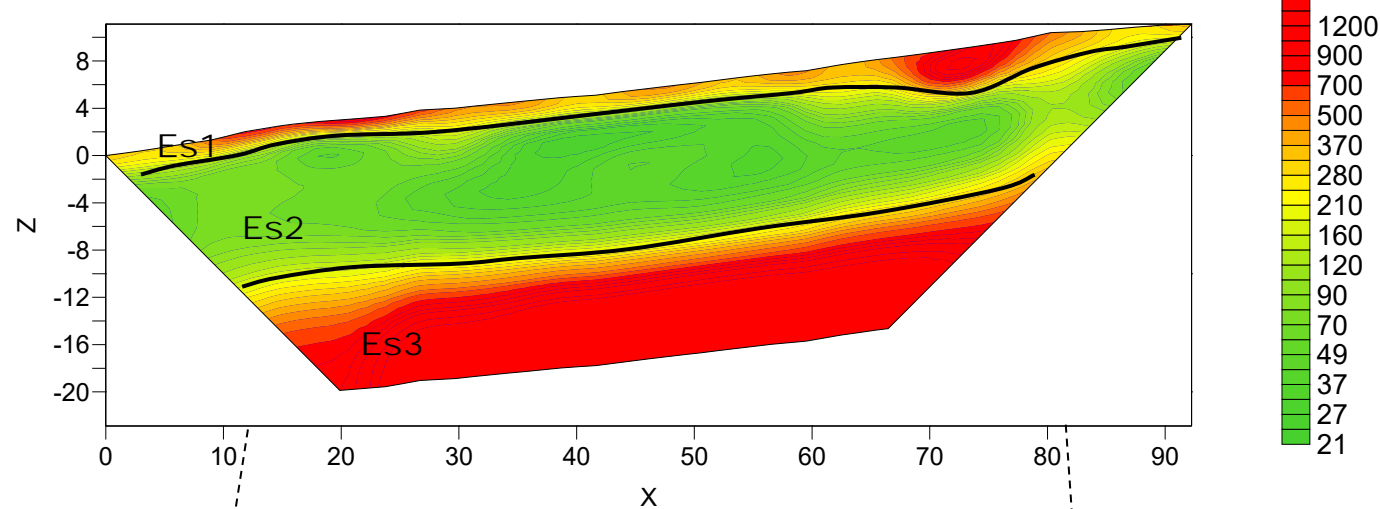
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger

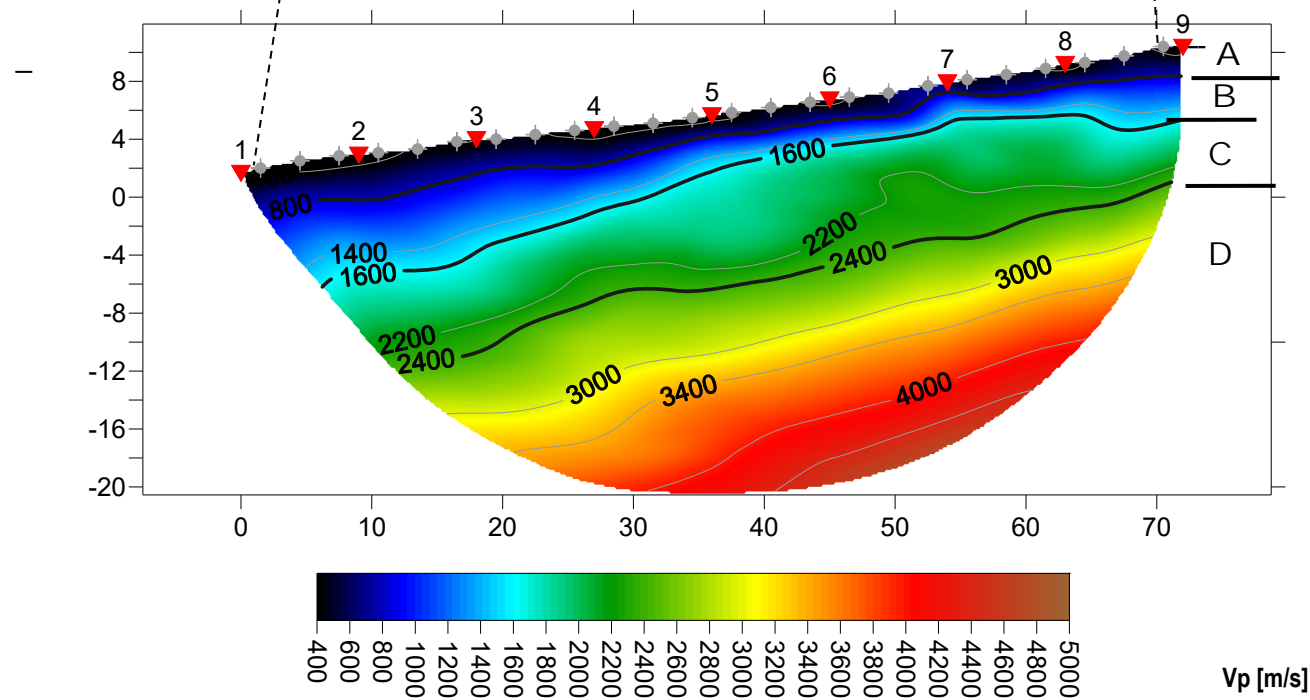


Quadripolo: Dipolo-Dipolo



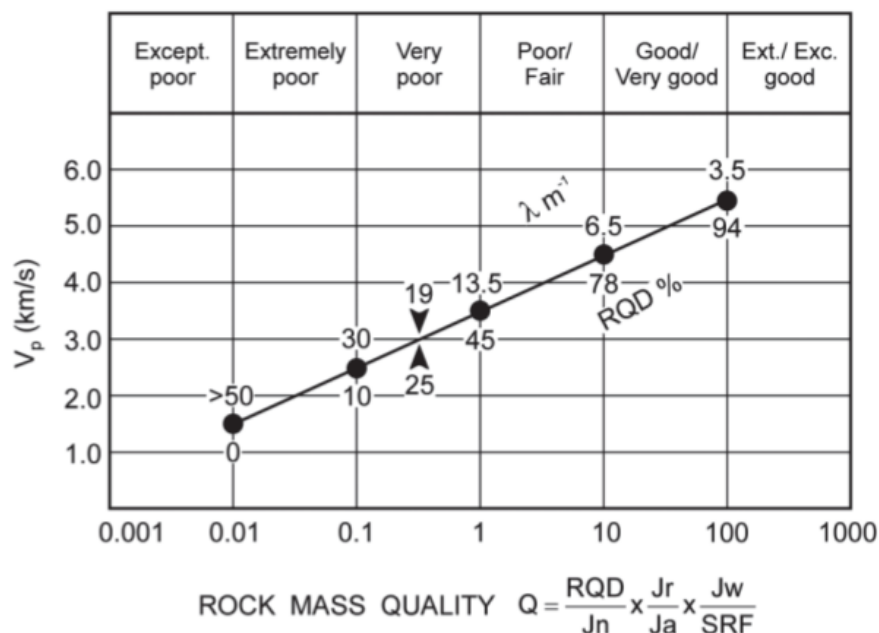
Base Sismica R1 - Rifrazione in onde P - Orientazione: SE-NW  
Quota relativa 0,00= 148,45 m slm

R1 RMS error 4.2%=0.98ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



## 7 INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

Le prospezioni geofisiche possono essere utilizzate in situazioni molto complesse quali gli ammassi metamorfici molto fratturati o in assenza di indagini dirette (v. sondaggi geognostici) per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc). Tra questi quello che potrebbe essere impiegato nel contesto in esame, è quello di N. Barton (2002) – che ha cercato di correlare, attraverso relazioni empiriche, le velocità delle onde P con la qualità della roccia Q e quest'ultima con una serie di parametri meccanici. Il grafico mostra la correlazione tra  $V_p$  con RQD e  $\lambda$  (fratture per metro) e il relativo indici di qualità dell'ammasso roccioso di Barton (Q).



Sulla base dei litotipi individuati potranno essere realizzate le opportune correlazioni.

## 8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche.

Per quanto riguarda la MASW, lungo lo stendimento si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_s$  crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi. La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il sito di indagine, che si ricorda sarà anche funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	$V_{seq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1	4,6	371	B

I dati derivati dalla MASW messi in correlazione con le bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio.

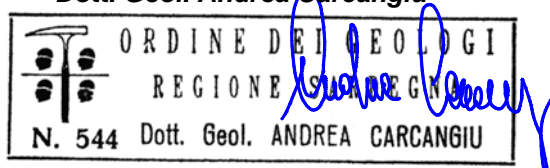
L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione e di tomografia elettrica ha permesso di ricostruire l'assesto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato roccioso e i vari gradi di fratturazione della roccia. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che fino a profondità comprese 10,0 e 14,0 m dal p.c. si riscontrano materiali rippabili.

Lungo l'allineamento in cui sono state realizzate le indagini, salvo una stratificazione di litotipi caratterizzati da velocità crescenti con la profondità, non si riscontrano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. bassissima velocità) tali da consigliare un approfondimento delle indagini.

Villa San Pietro, li 02 dicembre 2022

**Collaboratori**  
**Dott. Geol. Daniele Succu**

**Geoservice S.r.l.**  
**Il Direttore Tecnico**  
**Dott. Geol. Andrea Carcangiu**





## Tavola 1 : INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI INDAGINE

Progetto: Parco eolico Campanedda (SS)

Scala 1:10.000

## Legenda

 AREA DI INDAGINE







Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE


Progetto: Parco eolico Campanedda (SS)


Scala 1:500

Legenda

- Stendimento Sismico - Lunghezza = 69,0 m
- Stendimento Geoelettrico - Lunghezza = 93,0 m
- 

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono
- 

 Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo
- 

 Posizione della pala eolica
- 

 NORD

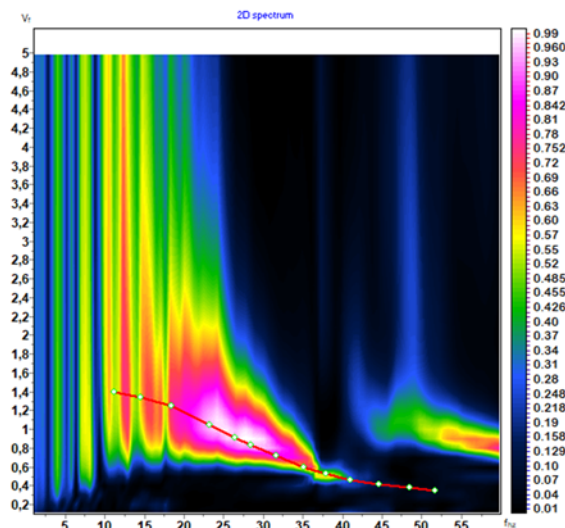
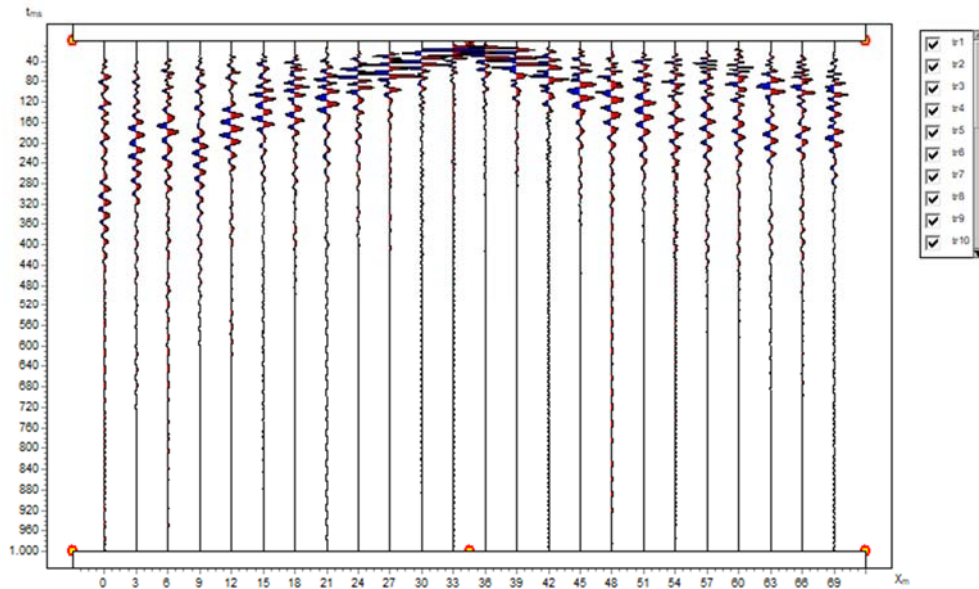




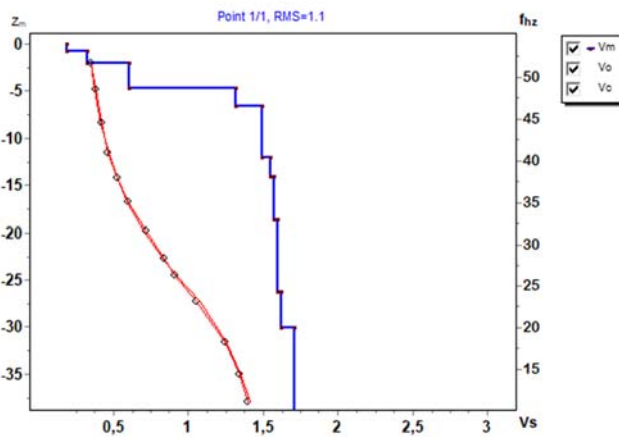
## ALLEGATO 1

### MASW: M1

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a 34,5,0 m)



Profilo Vs – Bedrock a 4,6 metri da p.c. (Vseq=371 m/s) - Categoria B

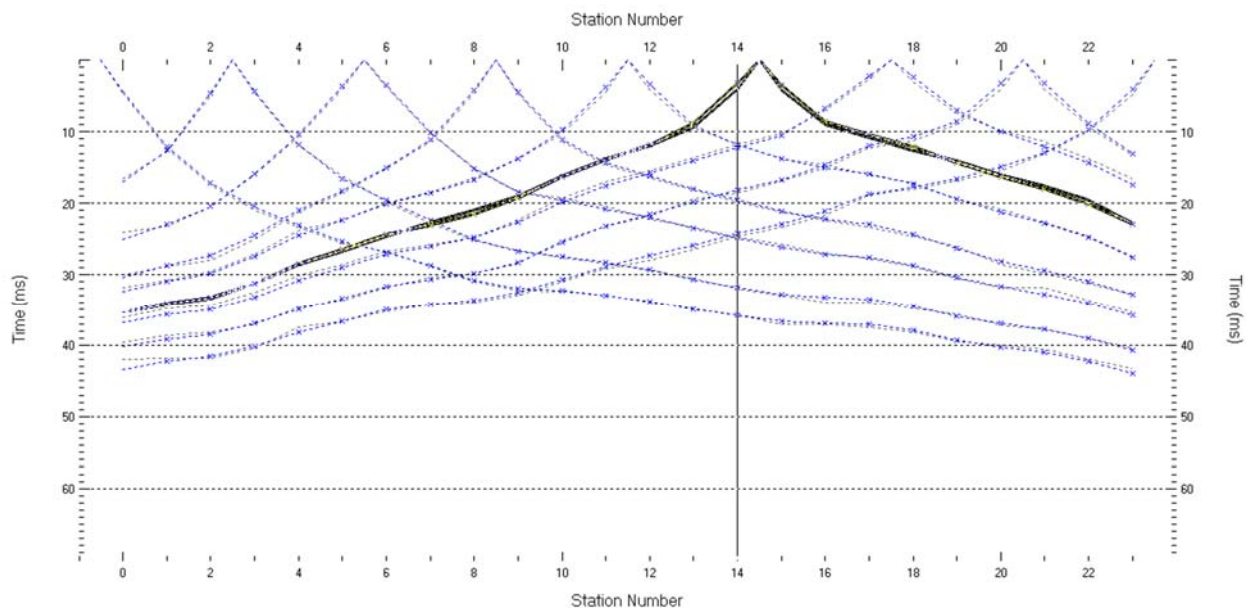


N	Vs	PR	$\rho$	Z	H
1	0.18	0.22	2	0	0.8
2	0.32	0.22	2	0.8	1.2
3	0.60	0.22	2	2.0	2.7
4	1.32	0.22	2	4.6	2.0
5	1.49	0.22	2	6.7	5.4
6	1.55	0.22	2	12.1	2.0
7	1.57	0.22	2	14.1	4.6
8	1.60	0.22	2	18.7	7.6
9	1.62	0.22	2	26.3	3.8
10	1.71	0.22	2	30.2	*

## ALLEGATO 2

### Sismica a rifrazione - dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici

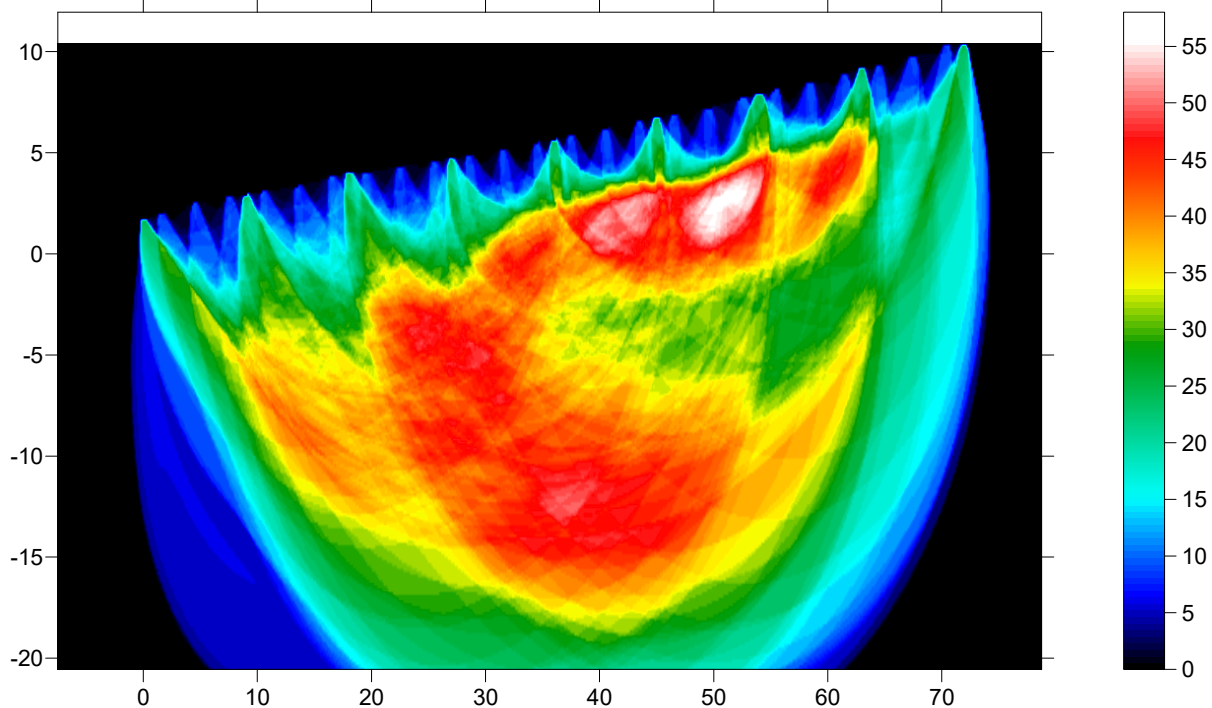
#### R1 - Sismica a rifrazione in onde P - dromocrone osservate e calcolate



#### R1 - Sismica a rifrazione in onde P

##### Copertura raggi sismici

R1 RMS error 4.2%=0.98ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



## Allegato 3: Documentazione fotografica delle indagini geofisiche

**Tomografia elettrica T1 dall'elettrodo 16  
all'elettrodo 1**



**Tomografia elettrica T1 dall'elettrodo 16  
all'elettrodo 32**



**Tomografia elettrica T1 dall'elettrodo 1**



**Tomografia elettrica T1 dall'elettrodo 32**





**Sismica a rifrazione e MASW dal geofono 13  
al geofono 24**



**Sismica a rifrazione e MASW dal geofono 12  
al geofono 1**



**Sismica a rifrazione e MASW dal geofono 1**



**Sismica a rifrazione e MASW dal geofono 24**



### Dettaglio strumentazione per tomografia elettrica

