

# PARCO EOLICO

**COMUNE DI ISILI**

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



## STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

**Elaborato:**

ELABORAZIONI SIA

**Relazione indagini geofisiche**

Codice elaborato:

**IS\_SIA\_AII.01**

Data: Dicembre 2023

**Il committente:** Sardeolica s.r.l.

**Coordinamento:** FAD SYSTEM SRL - Società di ingegneria

*Dott. Ing. Ivano Distinto*

*Dott. Ing. Carlo Foddis*

**Elaborazione SIA:**

*BIA s.r.l.*

*Società di ingegneria*

**Elaborato a cura di:**

*GEOSERVICE S.r.l.*

rev.	data	descrizione revisione	rev.	data	descrizione revisione
0	01/12/2023	Emesso per procedura di VIA			

COMUNE DI ISILI  
PROVINCIA SUD SARDEGNA

RELAZIONE TECNICA SULLE  
INDAGINI GEOFISICHE  
(M.A.S.W - Sismica a Rifrazione - Tomografia Elettrica)  
*Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Isili (SU)*

N° Tavola	Scala Disegno	Data	Data Aggiornamento	Redatto:
<b>R1</b>	varie	26/06/2023	--	A.Carcangiu M. Usai

Oggetto:	Scala Plottaggio	CTB
<b>RELAZIONE TECNICA</b>	1.1	--

**Committente:**  
FAD SYSTEM S.R.L. - Società di ingegneria  
Via Argiolas, 134 - 09134 Cagliari  
P.I. 03167950926

**Cantiere:** Comune di Isili (SU)

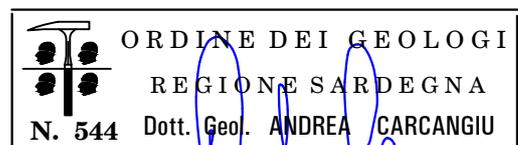


**GEOSERVICE**

**GEOSERVICE S.r.l.**

Sede: Località Su Moriscau - 09028 Sestu (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. Marco Usai



## Sommario

1	PREMESSA .....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE.....	2
3	RILIEVO TOPOGRAFICO .....	3
4	INDAGINI SISMICHE: MASW.....	13
4.1	Tecnica e parametri utilizzati .....	13
4.2	Strumentazione utilizzata.....	14
4.3	Elaborazione dei dati.....	14
4.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018).....	16
4.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI.....	18
4.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE.....	19
5	SISMICA A RIFRAZIONE.....	20
5.1	Strumentazione utilizzata.....	21
5.2	Elaborazione dei dati.....	21
5.3	Valutazione della escavabilità delle rocce.....	25
6	TOMOGRAFIA ELETTRICA .....	27
6.1	Metodologia impiegata, strumentazione e software.....	27
6.1.1	Tecnica e parametri utilizzati .....	27
6.1.2	Geometria delle acquisizioni .....	27
6.1.3	Strumentazione e attrezzatura utilizzata .....	28
6.1.4	Elaborazione dei dati e software .....	28
6.2	Valori di resistività di letteratura.....	29
6.3	RISULTATI INDAGINI DEL SITO SMT01.....	31
6.3.1	MASW M1 (SMT01).....	31
6.3.2	Rifrazione R1 e Tomografia elettrica T1 .....	33
6.4	RISULTATI INDAGINI DEL SITO ST02 .....	35
6.4.1	Rifrazione R2 e Tomografia elettrica T2 .....	35
6.5	RISULTATI INDAGINI DEL SITO ST03 .....	37
6.5.1	Rifrazione R3 e Tomografia elettrica T3 .....	37
6.6	RISULTATI INDAGINI DEL SITO SMT04.....	39
6.6.1	MASW M4 (SMT04).....	39
6.6.2	Rifrazione R4 e Tomografia elettrica T4 .....	41
7	INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI.....	43
8	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	44

## 1 PREMESSA

La presente relazione redatta su incarico della FAD SYSTEM Srl - Società di Ingegneria, descrive le attività delle indagini geofisiche per il progetto di realizzazione di un Parco Eolico sito in agro di Isili (SU).

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica e geoelettrica, seguono le specifiche e le caratteristiche delle metodologie 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  $V_s$ , 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. È 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.

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

Come previsto dal Piano Indagini di progetto sono stati realizzati in totale n° 2 stendimenti di MASW, n°4 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e n° 4 stendimenti di tomografia elettrica.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini – scala 1:25.000
- Tavole 2-3-4-5. Planimetria di dettaglio ubicazione indagini geofisiche – scala 1:1.000
- 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 indagini geofisiche.

## 2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma, mentre le acquisizioni in campo sono state realizzate nei giorni 29 Maggio, 5 e 6 Giugno 2023:

1. Esecuzione di n°4 stendimenti complessivi, rispettivamente:
  - n°2 stendimenti (SMT01; SMT04) costituiti da tomografia elettrica, sismica con tecnica MASW e rifrazione in onde P;
  - n°2 stendimenti (ST02; ST03) costituiti da tomografia elettrica e sismica con tecnica a rifrazione.

- Le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni così come le tomografie elettriche che hanno il medesimo centro ma sono leggermente più estese (v. schema seguente).
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.

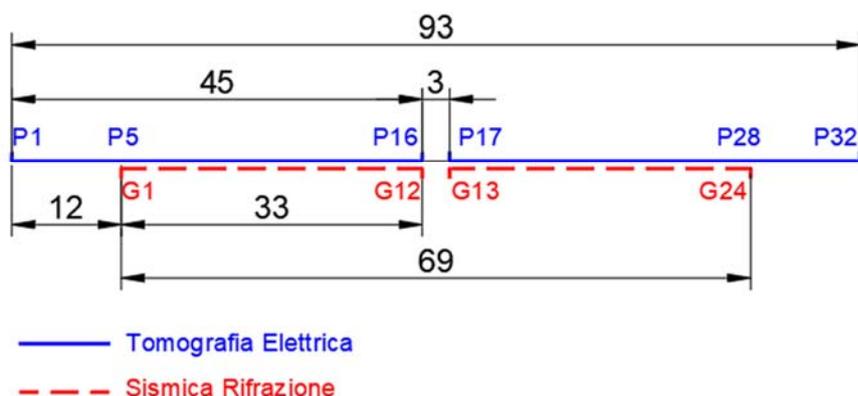
L'ubicazione generale è riportata nella **Tavola 1**, mentre quella di dettaglio nelle **Tavole 2, 3, 4, e 5**.

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	Metodologie	Orientamento	Geofoni/ Picchetti	Interdistanza	Lunghezza(m)
R/M 1 (SMT01)	Rifrazione/Masw	SO-NE	24	3,0	69,0
R2 (ST02)	Rifrazione	SSE-NNO	24	3,0	69,0
R3 (ST03)	Rifrazione	ONO-ESE	24	3,0	69,0
R/M 4 (SMT04)	Rifrazione/Masw	NNO-SSE	24	3,0	69,0
T1 (SMT01)	Tomografia Elettrica	SO-NE	32	3,0	93,0
T2 (ST02)	Tomografia Elettrica	SSE-NNO	32	3,0	93,0
T3 (ST03)	Tomografia Elettrica	ONO-ESE	32	3,0	93,0
T4 (SMT04)	Tomografia Elettrica	NNO-SSE	32	3,0	93,0

Corrispondenza Tomografia Elettrica con Sismica a Rifrazione  
Acquisizioni con interdistanza pari a 3 m



### 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 degli stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e MASW. Si precisa che i valori altimetrici dei seguenti profili, con l'aggiunta delle quote degli elettrodi iniziali e finali, sono stati utilizzati anche per l'elaborazione delle tomografie elettriche in quanto sono stati eseguiti lungo lo stesso profilo.

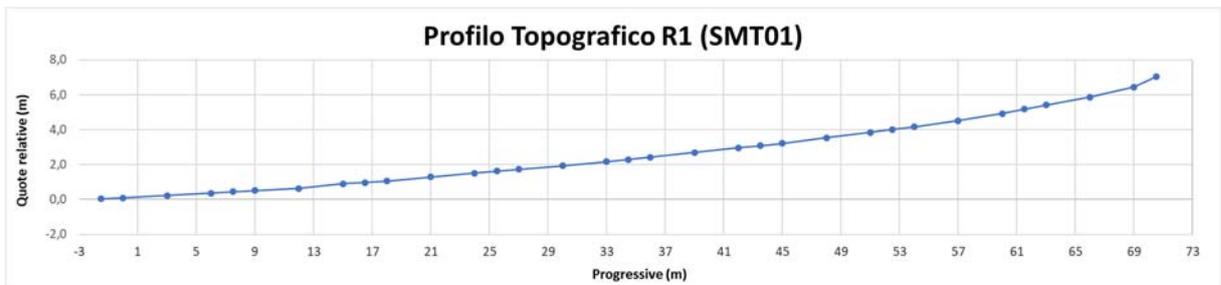
**Legenda:**

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)

**Tabella 2. Dati topografici sismica a rifrazione R1 (SMT01)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	QA: Quota assoluta (m.s.l.m)	QR: Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1511448,33	4405121,41	532,54	0,04
G1	0,00	1511450,12	4405123,69	532,58	0,09
G2	3,00	1511451,91	4405125,97	532,73	0,24
G3	6,00	1511453,85	4405128,34	532,85	0,36
S2	7,50	1511454,78	4405129,52	532,93	0,44
G4	9,00	1511455,72	4405130,70	533,02	0,52
G5	12,00	1511457,71	4405132,93	533,13	0,64
G6	15,00	1511459,53	4405135,32	533,39	0,90
S3	16,50	1511460,52	4405136,46	533,47	0,97
G7	18,00	1511461,50	4405137,61	533,54	1,05
G8	21,00	1511463,26	4405139,93	533,79	1,30
G9	24,00	1511465,23	4405142,30	534,00	1,51
S4	25,50	1511466,19	4405143,43	534,12	1,62
G10	27,00	1511467,15	4405144,56	534,23	1,74
G11	30,00	1511469,02	4405146,84	534,43	1,94
G12	33,00	1511470,78	4405149,21	534,66	2,17
S5	34,50	1511471,75	4405150,39	534,79	2,29
G13	36,00	1511472,73	4405151,57	534,91	2,42
G14	39,00	1511474,63	4405153,85	535,18	2,69
G15	42,00	1511476,44	4405156,17	535,45	2,96
S6	43,50	1511477,35	4405157,35	535,58	3,09
G16	45,00	1511478,26	4405158,52	535,71	3,22
G17	48,00	1511480,20	4405160,95	536,03	3,54
G18	51,00	1511482,00	4405163,26	536,34	3,85
S7	52,50	1511482,90	4405164,43	536,50	4,01
G19	54,00	1511483,80	4405165,59	536,66	4,17
G20	57,00	1511485,69	4405167,85	537,01	4,52
G21	60,00	1511487,65	4405170,09	537,41	4,92
S8	61,50	1511488,63	4405171,23	537,66	5,17
G22	63,00	1511489,61	4405172,38	537,91	5,42
G23	66,00	1511491,32	4405174,81	538,36	5,87
G24	69,00	1511493,29	4405177,00	538,94	6,45
S9	70,50	1511495,26	4405179,20	539,52	7,03

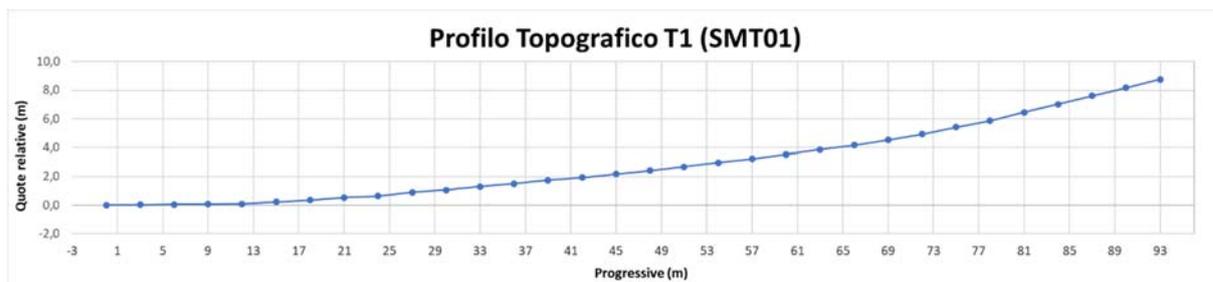
*Profilo topografico R/1*



**Tabella 3. Dati topografici tomografia elettrica T1 (SMT01)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
P1	0,00	1511442,41	4405114,76	532,49	0,00
P2	3,00	1511444,34	4405116,99	532,51	0,02
P3	6,00	1511446,27	4405119,23	532,54	0,04
P4	9,00	1511448,19	4405121,46	532,56	0,06
P5	12,00	1511450,12	4405123,69	532,58	0,09
P6	15,00	1511451,91	4405125,97	532,73	0,24
P7	18,00	1511453,85	4405128,34	532,85	0,36
P8	21,00	1511455,72	4405130,70	533,02	0,52
P9	24,00	1511457,71	4405132,93	533,13	0,64
P10	27,00	1511459,53	4405135,32	533,39	0,90
P11	30,00	1511461,50	4405137,61	533,54	1,05
P12	33,00	1511463,26	4405139,93	533,79	1,30
P13	36,00	1511465,23	4405142,30	534,00	1,51
P14	39,00	1511467,15	4405144,56	534,23	1,74
P15	42,00	1511469,02	4405146,84	534,43	1,94
P16	45,00	1511470,78	4405149,21	534,66	2,17
P17	48,00	1511472,73	4405151,57	534,91	2,42
P18	51,00	1511474,63	4405153,85	535,18	2,69
P19	54,00	1511476,44	4405156,17	535,45	2,96
P20	57,00	1511478,26	4405158,52	535,71	3,22
P21	60,00	1511480,20	4405160,95	536,03	3,54
P22	63,00	1511482,00	4405163,26	536,34	3,85
P23	66,00	1511483,80	4405165,59	536,66	4,17
P24	69,00	1511485,69	4405167,85	537,01	4,52
P25	72,00	1511487,65	4405170,09	537,41	4,92
P26	75,00	1511489,61	4405172,38	537,91	5,42
P27	78,00	1511491,32	4405174,81	538,36	5,87
P28	81,00	1511493,29	4405177,00	538,94	6,45
P29	84,00	1511495,13	4405179,32	539,52	7,03
P30	87,00	1511496,96	4405181,63	540,10	7,60
P31	90,00	1511498,80	4405183,95	540,67	8,18
P32	93,00	1511500,63	4405186,27	541,25	8,76

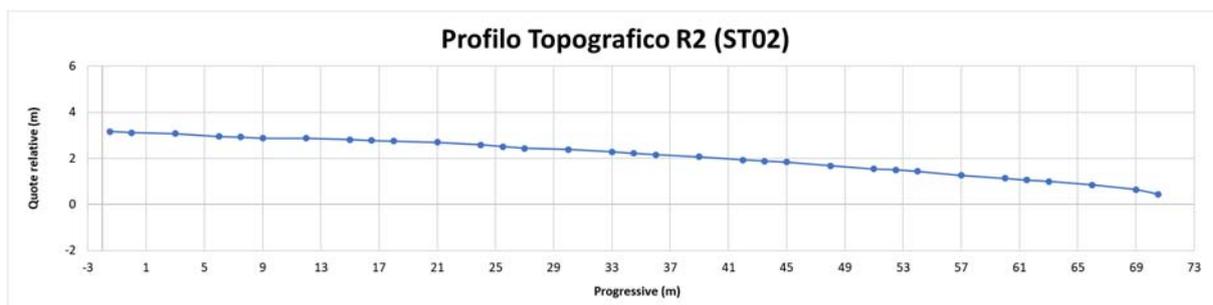
*Profilo topografico T/1*



**Tabella 4. Dati topografici sismica a rifrazione R2 (ST02)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1512486,63	4404207,44	566,02	3,16
G1	0,00	1512484,30	4404209,19	565,98	3,12
G2	3,00	1512481,97	4404210,93	565,94	3,08
G3	6,00	1512479,65	4404212,65	565,81	2,95
S2	7,50	1512480,80	4404211,78	565,88	2,93
G4	9,00	1512481,95	4404210,91	565,95	2,88
G5	12,00	1512477,22	4404214,43	565,73	2,87
G6	15,00	1512474,75	4404216,20	565,67	2,81
S3	16,50	1512473,58	4404217,18	565,64	2,78
G7	18,00	1512472,41	4404218,15	565,62	2,76
G8	21,00	1512469,98	4404219,88	565,56	2,70
G9	24,00	1512467,57	4404221,69	565,45	2,58
S4	25,50	1512466,50	4404222,58	565,37	2,51
G10	27,00	1512465,42	4404223,47	565,30	2,44
G11	30,00	1512462,82	4404225,31	565,25	2,39
G12	33,00	1512460,36	4404227,07	565,14	2,28
S5	34,50	1512459,20	4404227,95	565,08	2,22
G13	36,00	1512458,03	4404228,83	565,01	2,15
G14	39,00	1512455,52	4404230,62	564,93	2,07
G15	42,00	1512453,13	4404232,51	564,79	1,93
S6	43,50	1512451,92	4404233,31	564,74	1,88
G16	45,00	1512450,72	4404234,11	564,70	1,84
G17	48,00	1512448,28	4404235,81	564,54	1,68
G18	51,00	1512445,82	4404237,65	564,40	1,54
S7	52,50	1512444,54	4404238,47	564,37	1,50
G19	54,00	1512443,27	4404239,29	564,33	1,44
G20	57,00	1512440,87	4404240,97	564,12	1,26
G21	60,00	1512438,41	4404242,74	563,99	1,13
S8	61,50	1512437,18	4404243,56	563,93	1,07
G22	63,00	1512435,96	4404244,37	563,86	1,00
G23	66,00	1512433,48	4404245,96	563,71	0,85
G24	69,00	1512430,91	4404247,62	563,51	0,65
S9	70,50	1512425,88	4404250,85	563,31	0,45

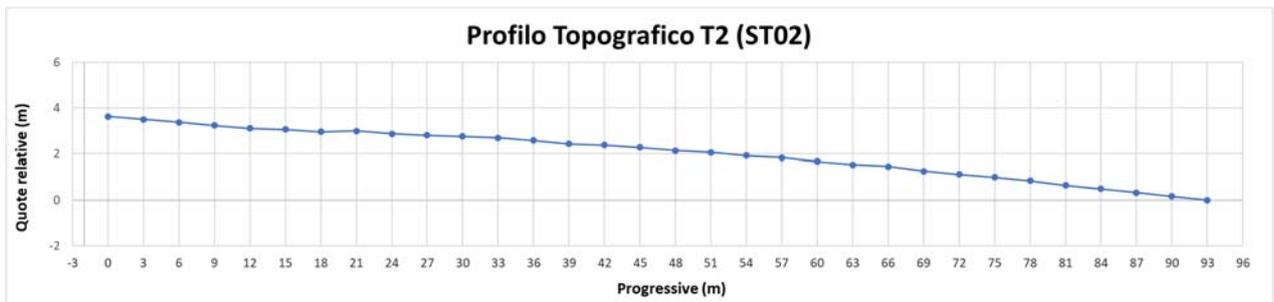
*Profilo topografico R/2*



**Tabella 5. Dati topografici tomografia elettrica T2 (ST02)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
P1	0,00	1512496,34	4404200,22	566,49	3,63
P2	3,00	1512493,33	4404202,46	566,36	3,50
P3	6,00	1512490,32	4404204,71	566,23	3,37
P4	9,00	1512487,31	4404206,95	566,11	3,25
P5	12,00	1512484,3	4404209,19	565,98	3,12
P6	15,00	1512481,97	4404210,93	565,94	3,06
P7	18,00	1512479,65	4404212,65	565,81	2,96
P8	21,00	1512481,95	4404210,91	565,95	3,00
P9	24,00	1512477,22	4404214,43	565,73	2,87
P10	27,00	1512474,75	4404216,2	565,67	2,81
P11	30,00	1512472,41	4404218,15	565,62	2,76
P12	33,00	1512469,98	4404219,88	565,56	2,70
P13	36,00	1512467,57	4404221,69	565,45	2,59
P14	39,00	1512465,42	4404223,47	565,3	2,44
P15	42,00	1512462,82	4404225,31	565,25	2,39
P16	45,00	1512460,36	4404227,07	565,14	2,28
P17	48,00	1512458,03	4404228,83	565,01	2,15
P18	51,00	1512455,52	4404230,62	564,93	2,07
P19	54,00	1512453,13	4404232,51	564,79	1,93
P20	57,00	1512450,72	4404234,11	564,7	1,84
P21	60,00	1512448,28	4404235,81	564,54	1,68
P22	63,00	1512445,82	4404237,65	564,4	1,54
P23	66,00	1512443,27	4404239,29	564,33	1,47
P24	69,00	1512440,87	4404240,97	564,12	1,26
P25	72,00	1512438,41	4404242,74	563,99	1,13
P26	75,00	1512435,96	4404244,37	563,86	1,00
P27	78,00	1512433,48	4404245,96	563,71	0,85
P28	81,00	1512430,91	4404247,62	563,51	0,65
P29	84,00	1512428,40	4404249,23	563,35	0,49
P30	87,00	1512425,88	4404250,85	563,19	0,32
P31	90,00	1512423,37	4404252,46	563,02	0,16
P32	93,00	1512420,86	4404254,08	562,86	0,00

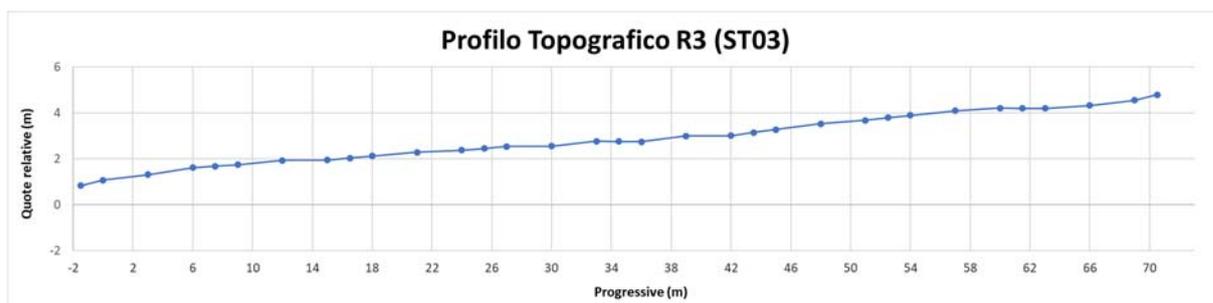
*Profilo topografico T/2*



**Tabella 6. Dati topografici sismica a rifrazione R3 (ST03)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1513438,80	4404044,46	613,40	0,82
G1	0,00	1513441,65	4404043,74	613,64	1,07
G2	3,00	1513444,49	4404043,03	613,88	1,31
G3	6,00	1513447,40	4404042,01	614,19	1,62
S2	7,50	1513448,83	4404041,68	614,25	1,68
G4	9,00	1513450,25	4404041,34	614,31	1,74
G5	12,00	1513453,09	4404040,44	614,50	1,93
G6	15,00	1513455,95	4404039,59	614,52	1,95
S3	16,50	1513457,40	4404039,12	614,60	2,03
G7	18,00	1513458,86	4404038,64	614,69	2,12
G8	21,00	1513461,41	4404037,66	614,85	2,28
G9	24,00	1513464,28	4404036,68	614,95	2,38
S4	25,50	1513465,75	4404036,20	615,03	2,45
G10	27,00	1513467,21	4404035,72	615,11	2,53
G11	30,00	1513470,08	4404034,86	615,12	2,54
G12	33,00	1513472,99	4404034,03	615,34	2,76
S5	34,50	1513474,38	4404033,59	615,32	2,75
G13	36,00	1513475,78	4404033,14	615,31	2,74
G14	39,00	1513478,57	4404032,15	615,57	3,00
G15	42,00	1513481,47	4404031,16	615,58	3,01
S6	43,50	1513482,83	4404030,81	615,71	3,14
G16	45,00	1513484,20	4404030,46	615,84	3,27
G17	48,00	1513487,13	4404029,59	616,09	3,52
G18	51,00	1513489,91	4404028,68	616,25	3,68
S7	52,50	1513491,34	4404028,21	616,36	3,79
G19	54,00	1513492,77	4404027,73	616,47	3,90
G20	57,00	1513495,63	4404026,81	616,67	4,10
G21	60,00	1513498,38	4404025,87	616,78	4,21
S8	61,50	1513499,80	4404025,43	616,77	4,20
G22	63,00	1513501,23	4404024,99	616,77	4,19
G23	66,00	1513504,01	4404023,80	616,89	4,32
G24	69,00	1513506,98	4404022,93	617,13	4,55
S9	70,50	1513509,95	4404022,05	617,36	4,79

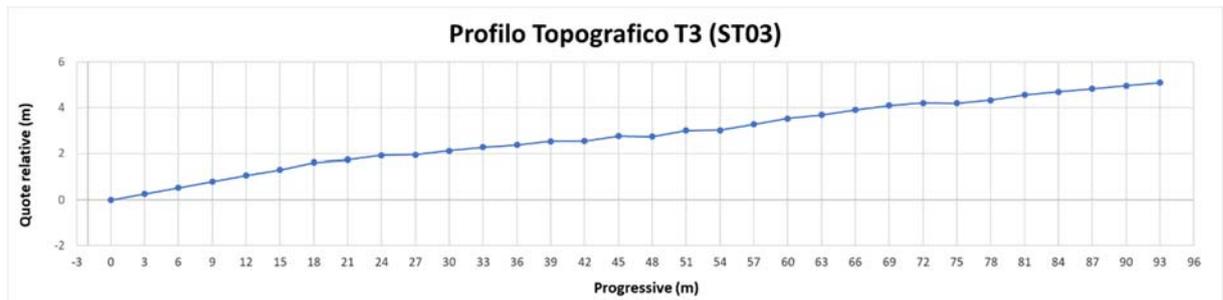
*Profilo topografico R/M3*



**Tabella 7. Dati topografici tomografia elettrica T3 (ST03)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
P1	0,00	1513430,45	4404047,40	612,57	0,00
P2	3,00	1513433,25	4404046,49	612,84	0,27
P3	6,00	1513436,05	4404045,57	613,11	0,53
P4	9,00	1513438,85	4404044,66	613,37	0,80
P5	12,00	1513441,65	4404043,74	613,64	1,07
P6	15,00	1513444,49	4404043,03	613,88	1,31
P7	18,00	1513447,40	4404042,01	614,19	1,62
P8	21,00	1513450,25	4404041,34	614,31	1,74
P9	24,00	1513453,09	4404040,44	614,50	1,93
P10	27,00	1513455,95	4404039,59	614,52	1,95
P11	30,00	1513458,86	4404038,64	614,69	2,12
P12	33,00	1513461,41	4404037,66	614,85	2,28
P13	36,00	1513464,28	4404036,68	614,95	2,38
P14	39,00	1513467,21	4404035,72	615,11	2,53
P15	42,00	1513470,08	4404034,86	615,12	2,54
P16	45,00	1513472,99	4404034,03	615,34	2,76
P17	48,00	1513475,78	4404033,14	615,31	2,74
P18	51,00	1513478,57	4404032,15	615,57	3,00
P19	54,00	1513481,47	4404031,16	615,58	3,01
P20	57,00	1513484,20	4404030,46	615,84	3,27
P21	60,00	1513487,13	4404029,59	616,09	3,52
P22	63,00	1513489,91	4404028,68	616,25	3,68
P23	66,00	1513492,77	4404027,73	616,47	3,90
P24	69,00	1513495,63	4404026,81	616,67	4,10
P25	72,00	1513498,38	4404025,87	616,78	4,21
P26	75,00	1513501,23	4404024,99	616,77	4,19
P27	78,00	1513504,01	4404023,80	616,89	4,32
P28	81,00	1513506,98	4404022,93	617,13	4,55
P29	84,00	1513509,75	4404022,01	617,26	4,69
P30	87,00	1513512,53	4404021,09	617,40	4,82
P31	90,00	1513515,31	4404020,17	617,53	4,96
P32	93,00	1513518,09	4404019,26	617,67	5,09

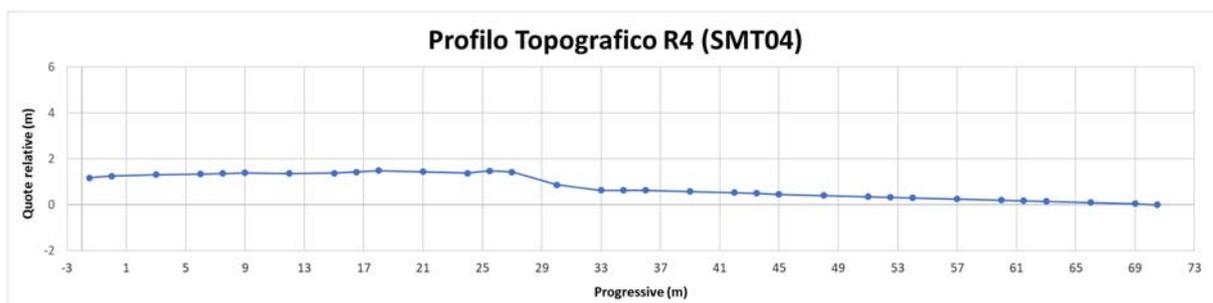
*Profilo topografico T/3*



**Tabella 8. Dati topografici sismica a rifrazione R4 (SMT04)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1513859,03	4402465,85	586,52	1,17
G1	0,00	1513860,55	4402463,31	586,59	1,25
G2	3,00	1513862,07	4402460,78	586,66	1,32
G3	6,00	1513863,66	4402458,19	586,69	1,34
S2	7,50	1513864,36	4402456,90	586,71	1,37
G4	9,00	1513865,07	4402455,62	586,74	1,39
G5	12,00	1513866,65	4402453,03	586,72	1,37
G6	15,00	1513868,16	4402450,53	586,73	1,38
S3	16,50	1513868,98	4402449,21	586,78	1,43
G7	18,00	1513869,79	4402447,89	586,83	1,49
G8	21,00	1513871,22	4402445,31	586,79	1,43
G9	24,00	1513872,92	4402442,75	586,73	1,38
S4	25,50	1513873,63	4402441,47	586,82	1,40
G10	27,00	1513874,34	4402440,19	586,92	1,43
G11	30,00	1513876,59	4402437,44	586,09	1,22
G12	33,00	1513878,27	4402434,67	585,97	1,01
S5	34,50	1513879,05	4402433,35	585,98	0,82
G13	36,00	1513879,83	4402432,03	585,98	0,64
G14	39,00	1513881,29	4402429,49	585,93	0,58
G15	42,00	1513882,89	4402427,01	585,88	0,53
S6	43,50	1513883,57	4402425,31	585,85	0,51
G16	45,00	1513884,25	4402423,62	585,80	0,46
G17	48,00	1513885,33	4402421,87	585,75	0,41
G18	51,00	1513887,32	4402419,57	585,70	0,36
S7	52,50	1513887,99	4402418,26	585,68	0,33
G19	54,00	1513888,67	4402416,95	585,65	0,31
G20	57,00	1513889,73	4402414,56	585,60	0,25
G21	60,00	1513891,47	4402411,71	585,55	0,20
S8	61,50	1513892,47	4402410,56	585,52	0,18
G22	63,00	1513893,46	4402409,42	585,50	0,15
G23	66,00	1513894,03	4402406,29	585,45	0,10
G24	69,00	1513895,77	4402404,21	585,40	0,05
S9	70,50	1513898,79	4402399,07	585,34	0,00

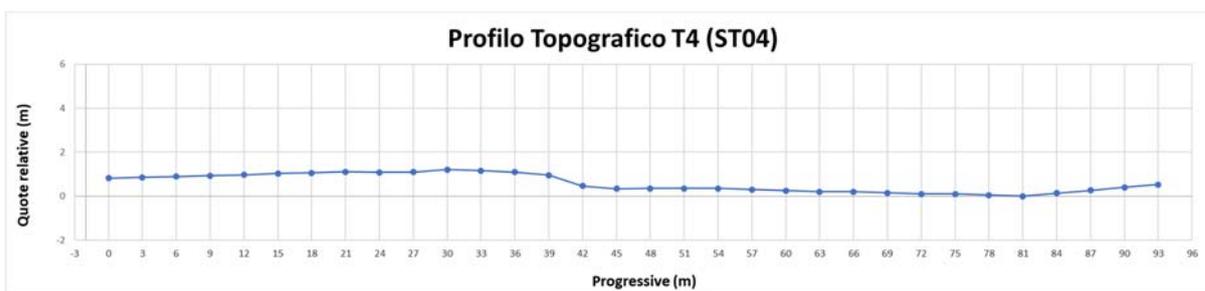
*Profilo topografico R/4*



**Tabella 9. Dati topografici tomografia elettrica T4 (SMT04)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
P1	0,00	1513854,57	4402473,50	586,44	0,81
P2	3,00	1513856,06	4402470,95	586,48	0,85
P3	6,00	1513857,56	4402468,41	586,51	0,89
P4	9,00	1513859,06	4402465,86	586,55	0,93
P5	12,00	1513860,55	4402463,31	586,59	0,97
P6	15,00	1513862,07	4402460,78	586,66	1,04
P7	18,00	1513863,66	4402458,19	586,69	1,06
P8	21,00	1513865,07	4402455,62	586,74	1,11
P9	24,00	1513866,65	4402453,03	586,72	1,09
P10	27,00	1513868,16	4402450,53	586,73	1,10
P11	30,00	1513869,79	4402447,89	586,83	1,21
P12	33,00	1513871,22	4402445,31	586,79	1,17
P13	36,00	1513872,92	4402442,75	586,73	1,10
P14	39,00	1513874,34	4402440,19	586,58	0,96
P15	42,00	1513876,59	4402437,44	586,09	0,46
P16	45,00	1513878,27	4402434,67	585,97	0,35
P17	48,00	1513879,83	4402432,03	585,98	0,36
P18	51,00	1513881,29	4402429,49	585,98	0,36
P19	54,00	1513882,89	4402427,01	585,98	0,36
P20	57,00	1513884,25	4402423,62	585,93	0,31
P21	60,00	1513885,33	4402421,87	585,88	0,25
P22	63,00	1513887,32	4402419,57	585,83	0,20
P23	66,00	1513888,67	4402416,95	585,83	0,20
P24	69,00	1513889,73	4402414,56	585,78	0,15
P25	72,00	1513891,47	4402411,71	585,73	0,10
P26	75,00	1513893,46	4402409,42	585,73	0,10
P27	78,00	1513894,03	4402406,29	585,68	0,05
P28	81,00	1513895,77	4402404,21	585,62	0,00
P29	84,00	1513897,28	4402401,64	585,76	0,13
P30	87,00	1513898,79	4402399,07	585,89	0,27
P31	90,00	1513900,31	4402396,50	586,03	0,40
P32	93,00	1513901,82	4402393,94	586,16	0,54

*Profilo topografico T/4*



**STENDIMENTO M1 (SMT01)**

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1511450,12	4405123,69	532,58
G24	69,00	1511493,29	4405177,00	538,94

**STENDIMENTO M4 (SMT04)**

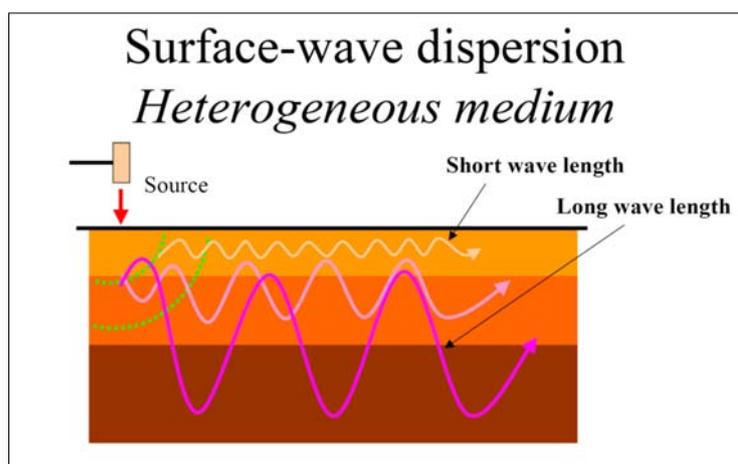
Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1513860,55	4402463,31	586,59
G24	69,00	1513895,77	4402404,21	585,40

## 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 Vs, 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 rigidezza della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, ovvero onde con diverse lunghezze d'onda si propagano a 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

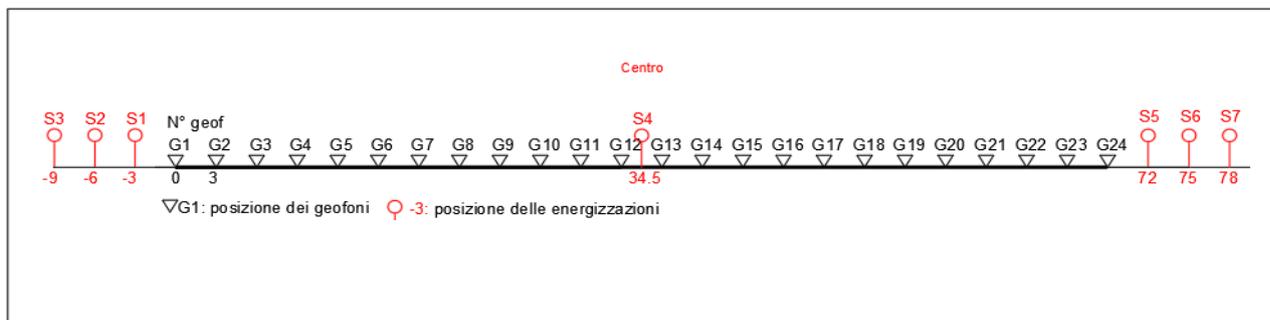
L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0m e 2,5 in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da 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 “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.

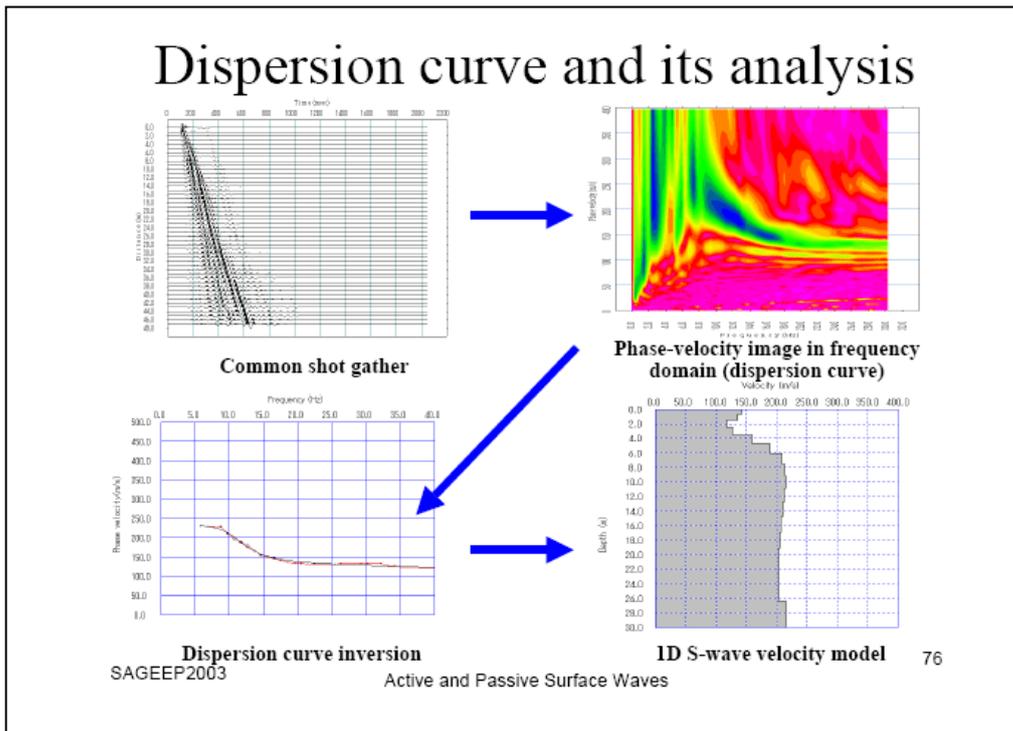
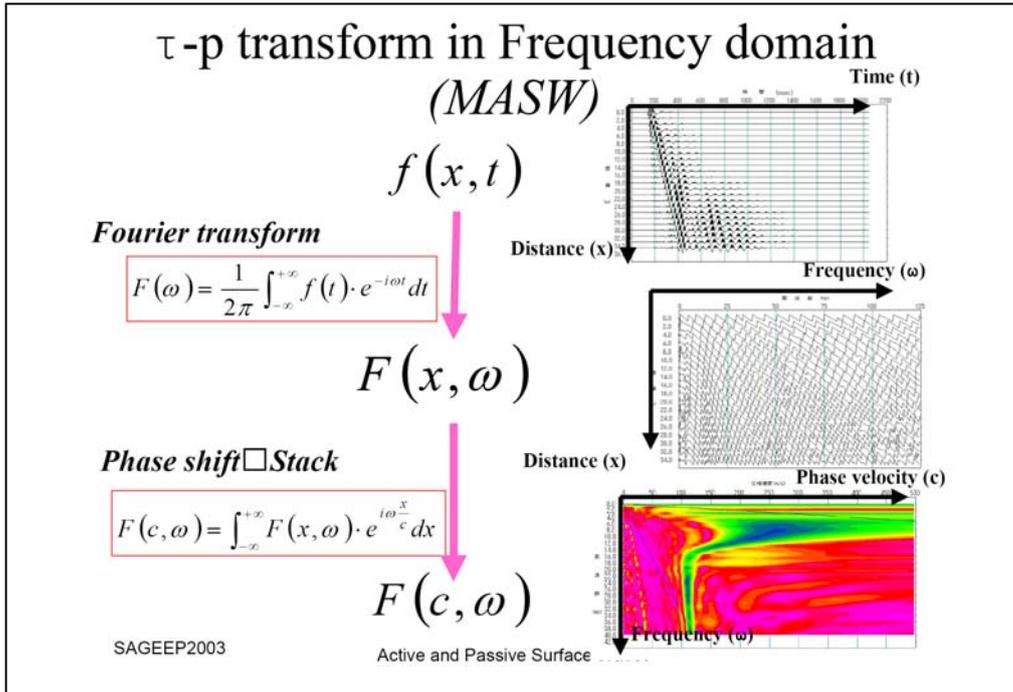
#### 4.3 Elaborazione dei dati

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.



#### 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;

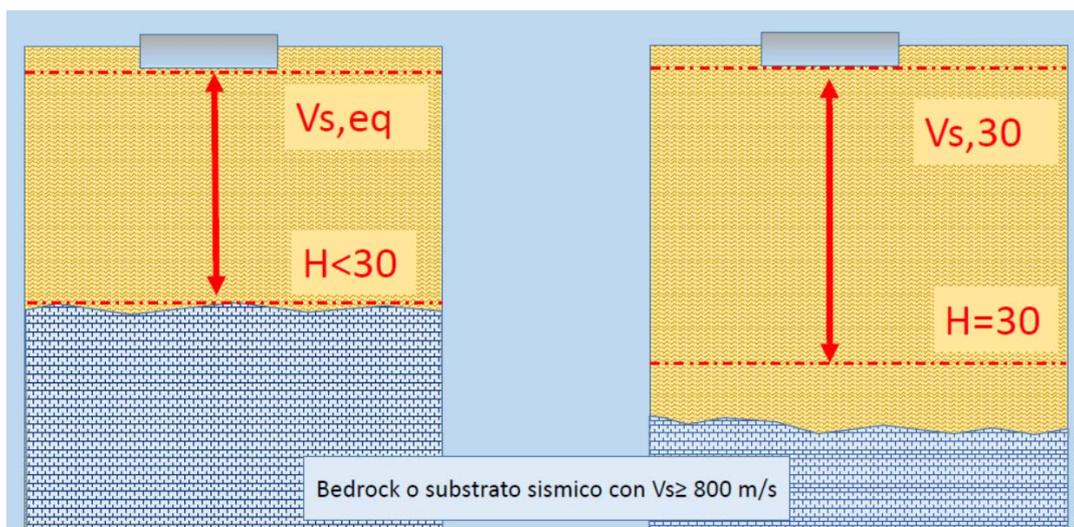
$N$  numero di strati;

$H$  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>Depositati 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>Depositati 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
Calcarea	2000 - 7000	1000 - 3300
Calcarea 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 rigidità 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 sismostrato 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  $E_{din}$  si può applicare la nota relazione proposta da Rzhovsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm<sup>2</sup>:

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

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.

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

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 da luogo a elevate deformazioni (superiori al limite di elasticità) poiché in quei casi la componente plastica è predominante su quella elastica.

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

Nella letteratura specializzata sono ormai reperibili moltissime correlazioni tra il numero di colpi ( $N_{spt}$ ) del Penetrometro Standard e la velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ). Le principali correlazioni sono di tipo esponenziale, con  $N_{spt} = (V_s / \alpha)^\beta$  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.

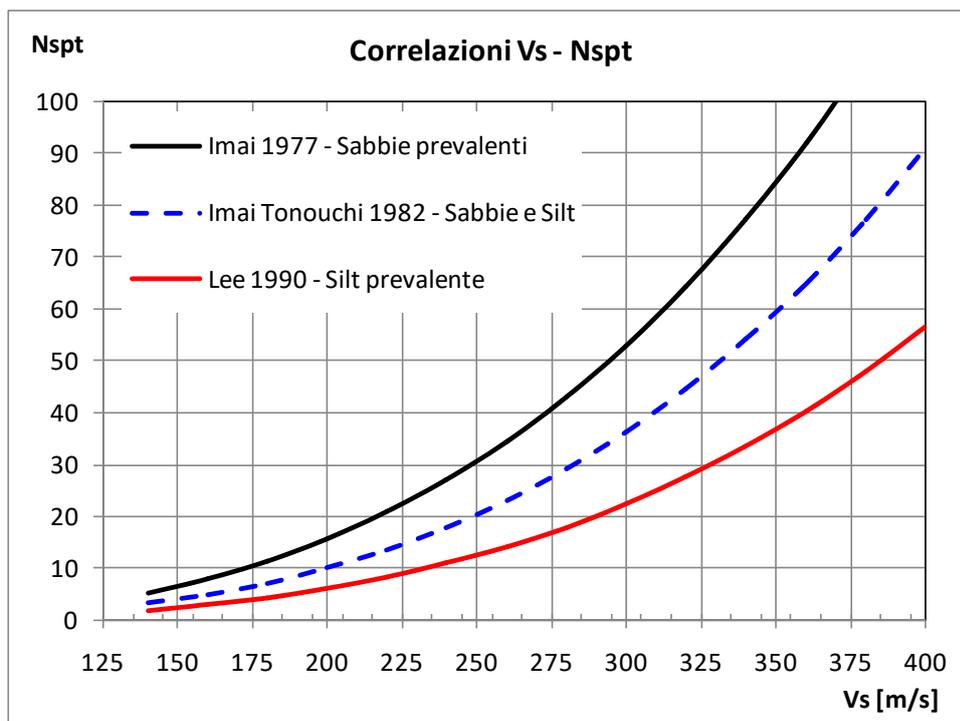
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

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

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

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

Dove:  $N_{spt}$  = 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 Nspt + 27,2</math> Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, <math>\phi = 0,30 Nspt + 27</math></p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u> <math>\phi = \sqrt{15Nspt} + 15</math></p>
Modulo di deformazione $E$ (o di Young)	<p><b>Schmertmann</b> (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi) <math>E(Kg/cm^2) = 2B Nspt</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 (Kg/cm2) = 7,71 Nspt + 191</math> (ghiaia + sabbia)</p> <p><b>Tornaghi</b> (valido per sabbia + ghiaia) <math>E (MPa) = B SNspt</math> (<math>B=7</math> MPa)</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.

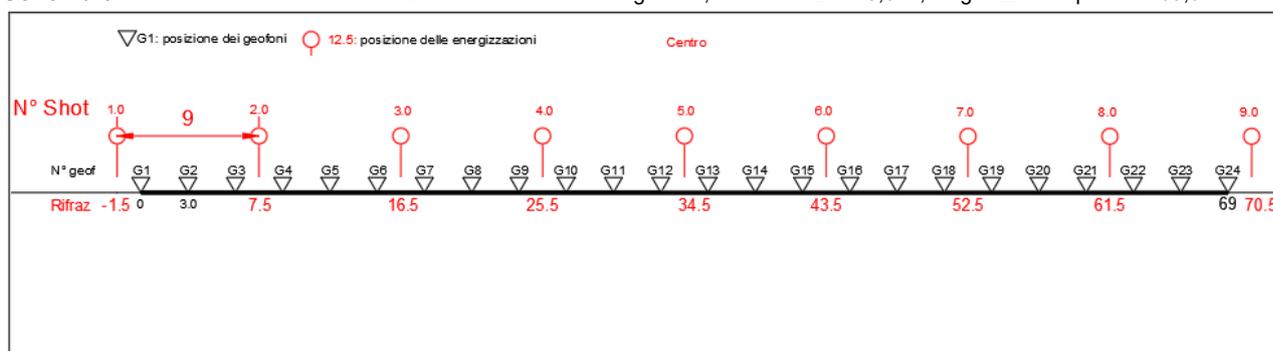
Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati.

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 3:** 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 electronics instruments, 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).

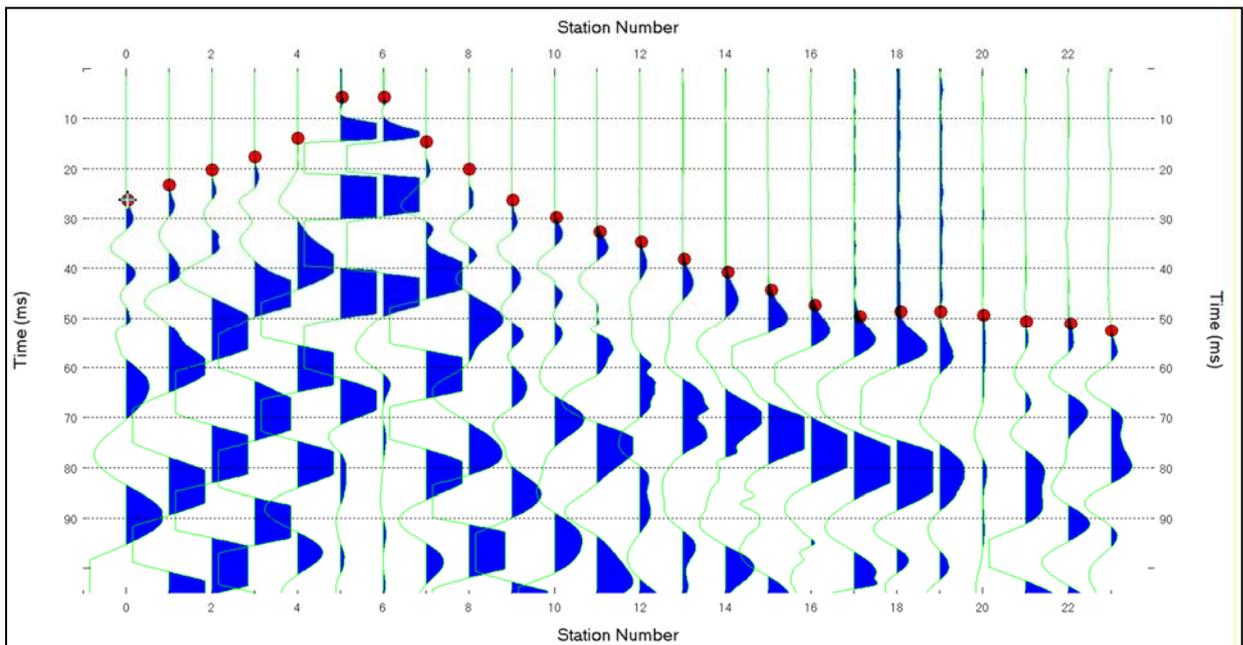
La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

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%.

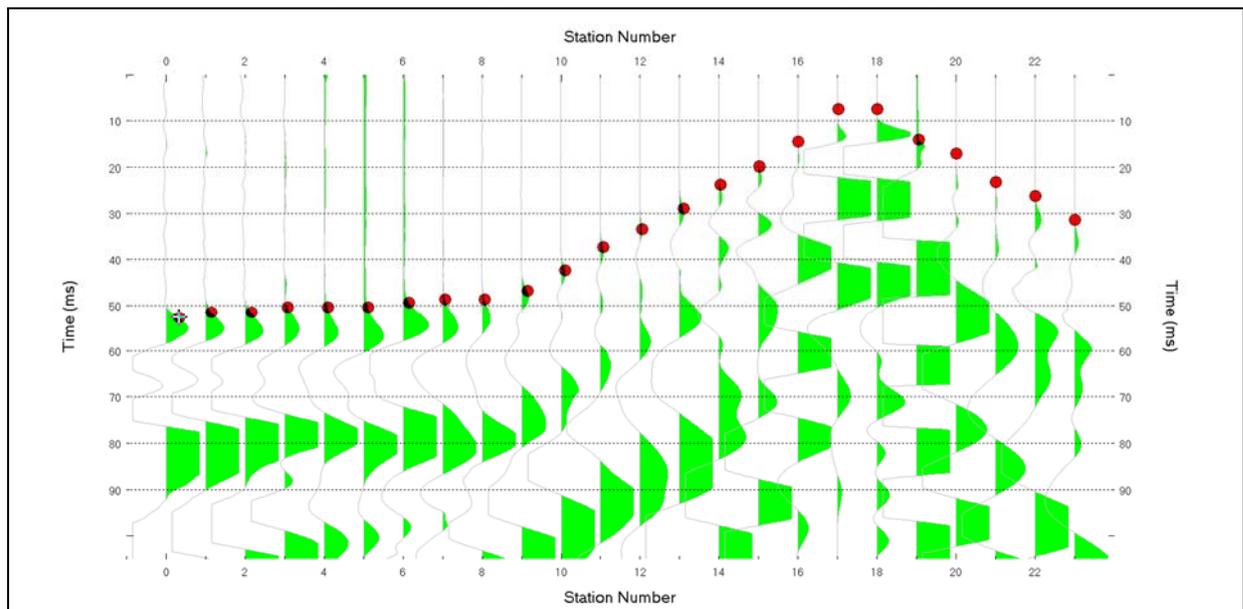
In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography 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

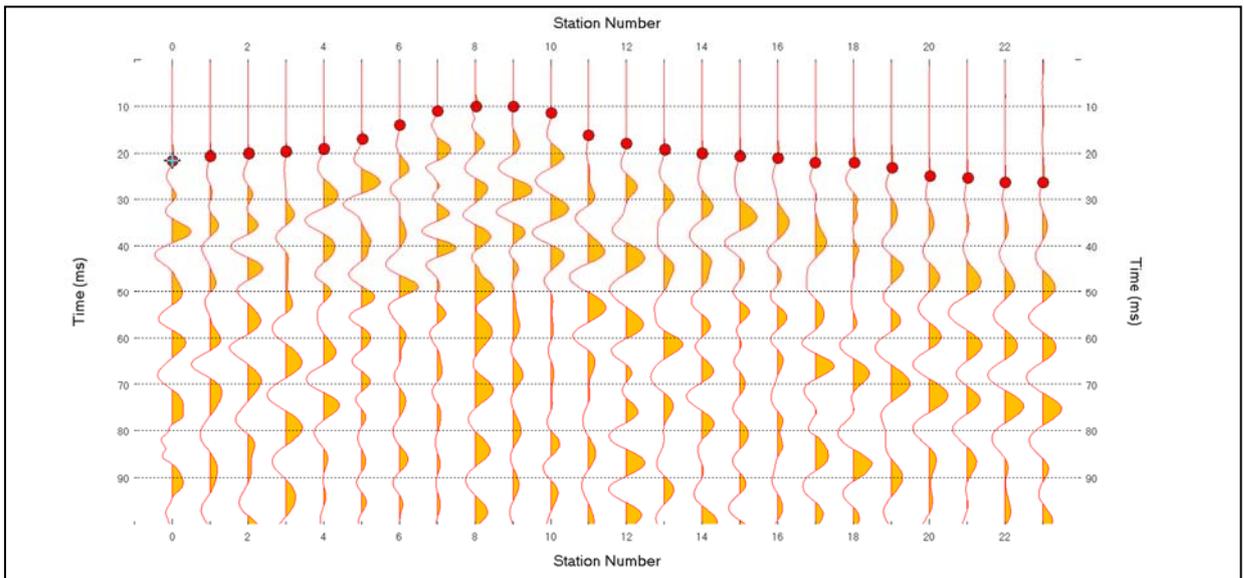
**Figura 1:** Sismogramma shot a 16,5 m di R1 (SMT01)



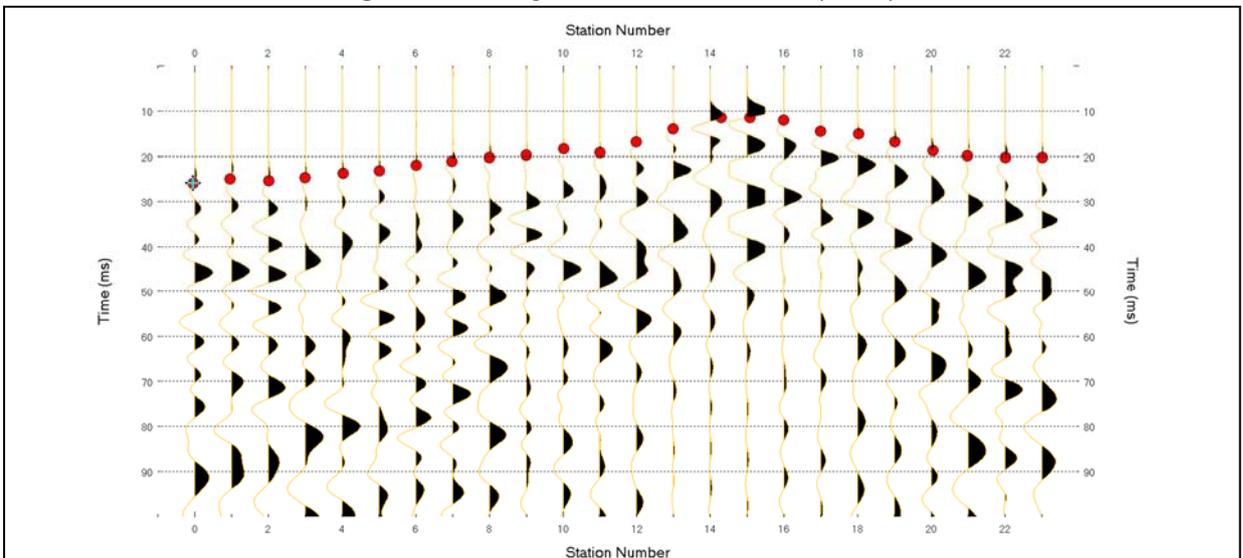
**Figura 2:** Sismogramma shot a 61,5 m di R1 (SMT01)



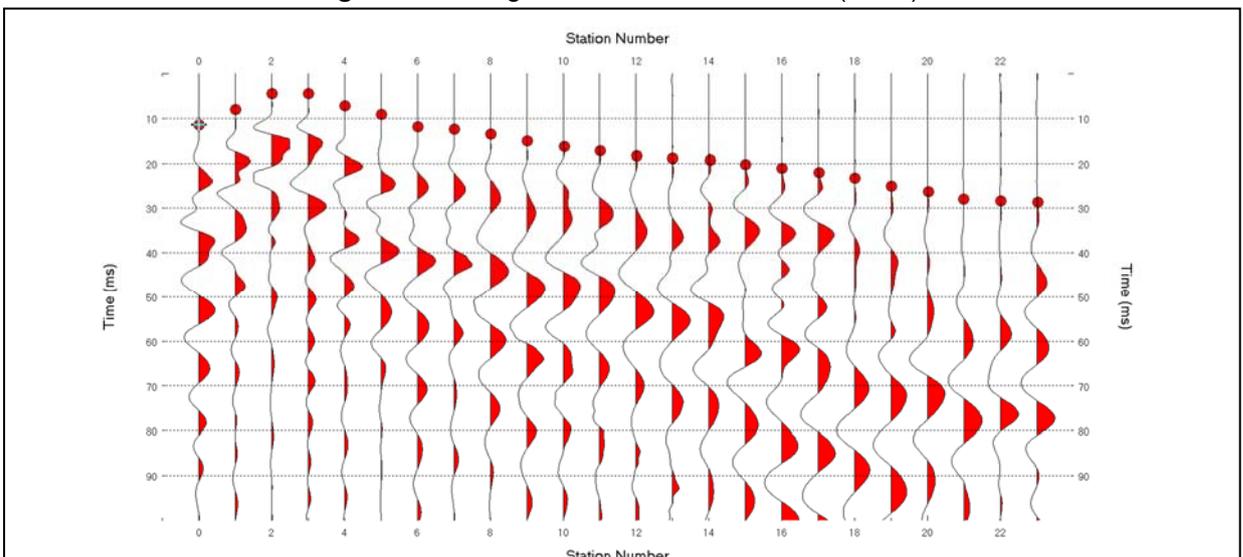
**Figura 3:** Sismogramma shot a 25,5 m di R2 (ST02)



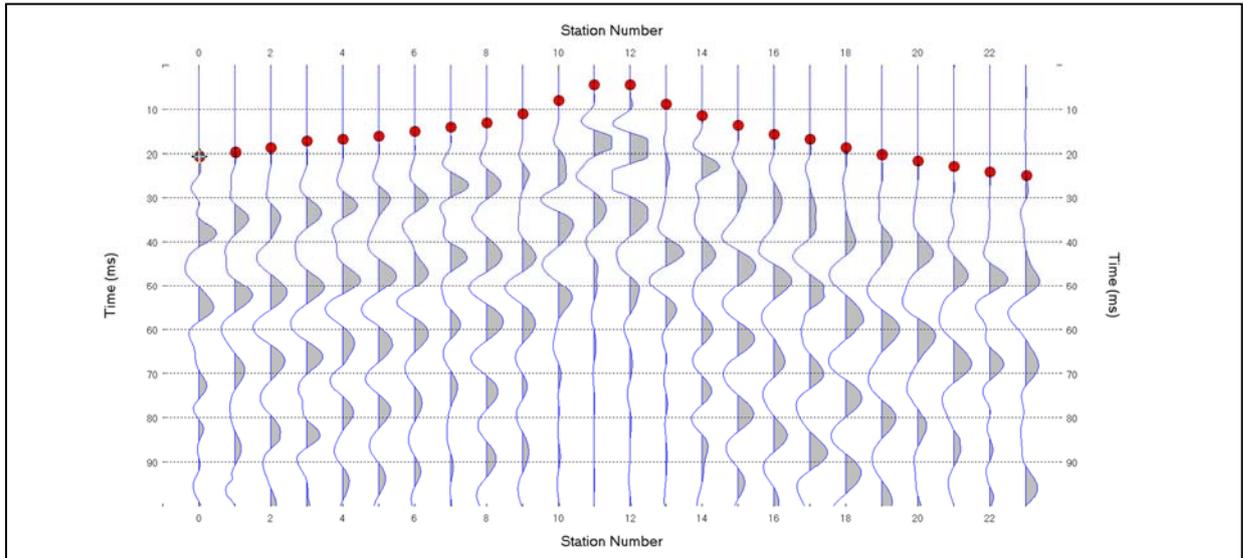
**Figura 4:** Sismogramma shot a m di R2 (ST02)



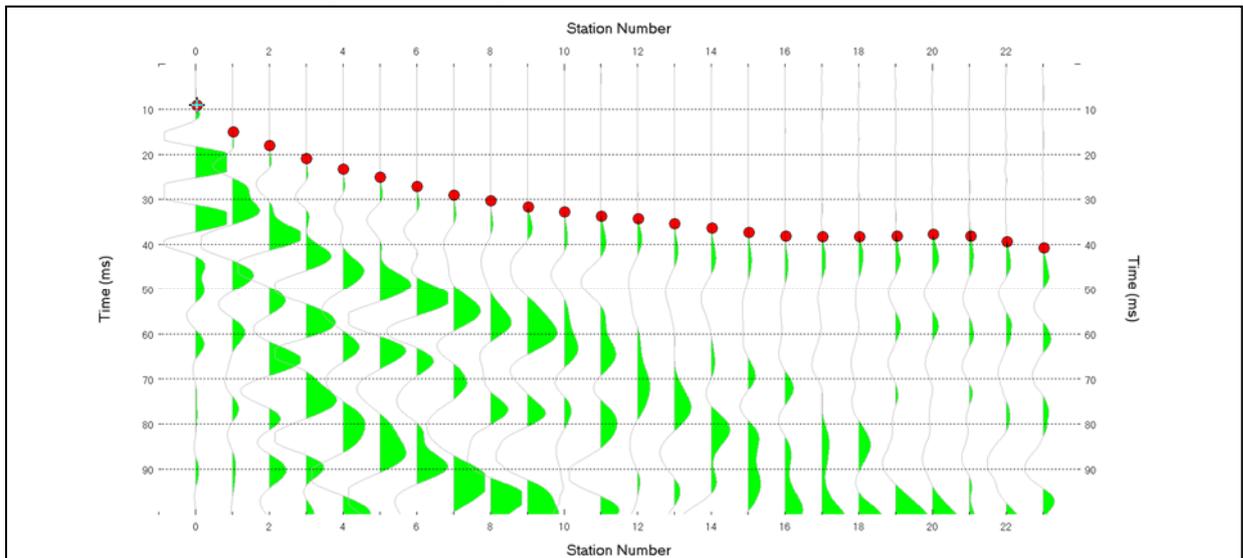
**Figura 5:** Sismogramma shot a 7,5 m di R3 (ST03)



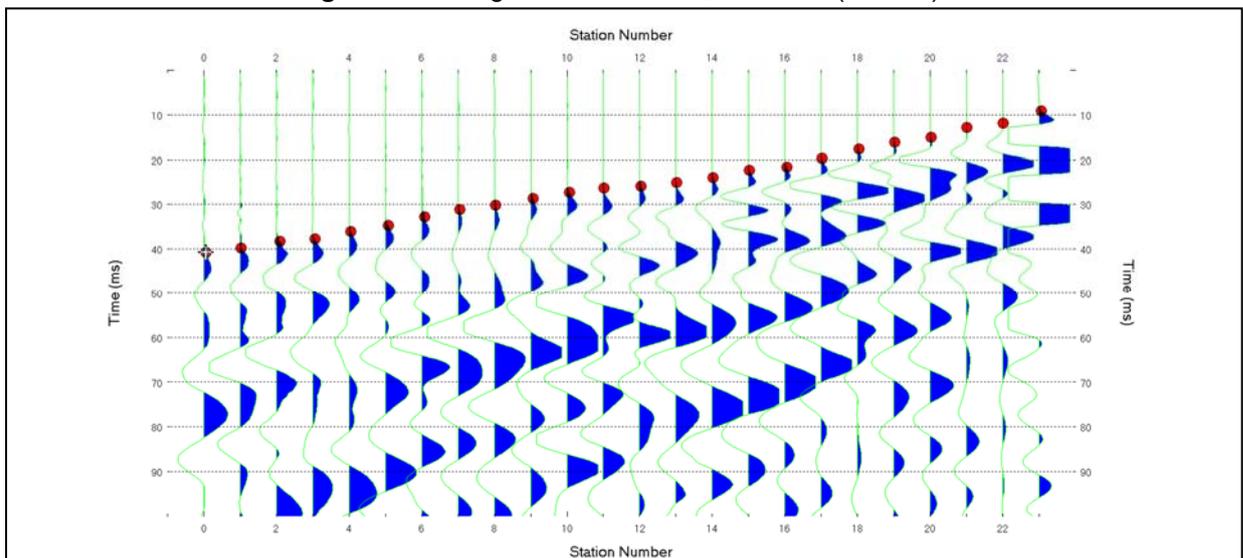
**Figura 6:** Sismogramma shot a 34,5 m di R3 (ST03)



**Figura 7:** Sismogramma shot a -1,5 m di R4 (SMT04)



**Figura 8:** Sismogramma shot a 70,5 m di R4 (SMT04)



### 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 Transportation**, che risulta *leggermente più ottimista in termini di scavabilità*:

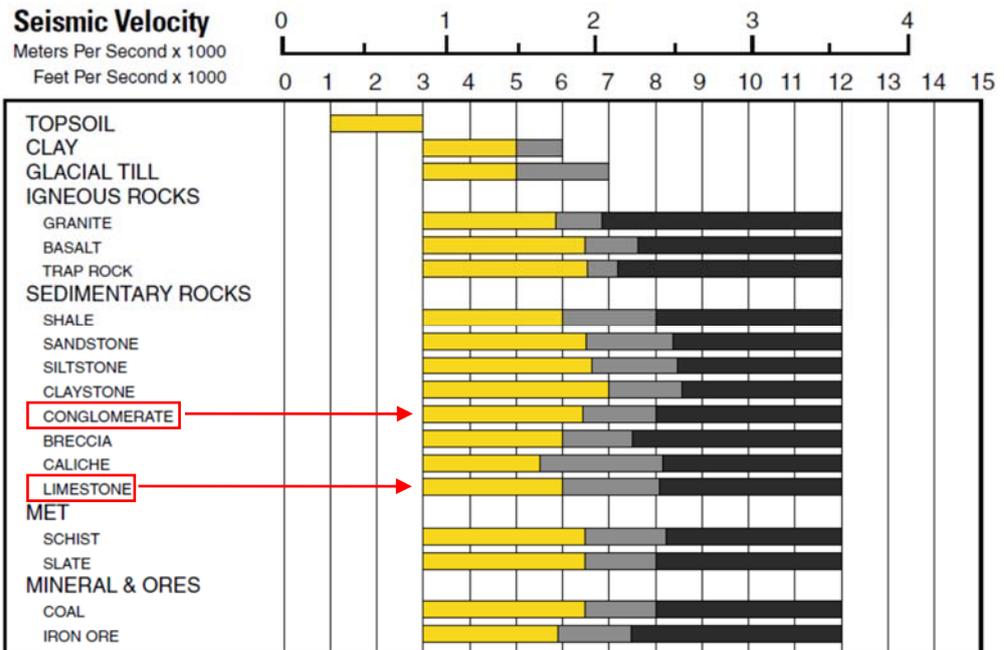
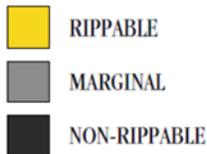
Velocity (m/s)	Rippability
< 1050	Easily Ripped
1050 – 1500	Moderately Difficult
1500 – 2000	Difficult Ripping / Light Blasting
> 2000	Blasting Required

<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. Trap Rock e Limestone**) per velocità oltre 2200m/s nel primo caso e 2400m/s nel secondo, 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



## 6 TOMOGRAFIA ELETTRICA

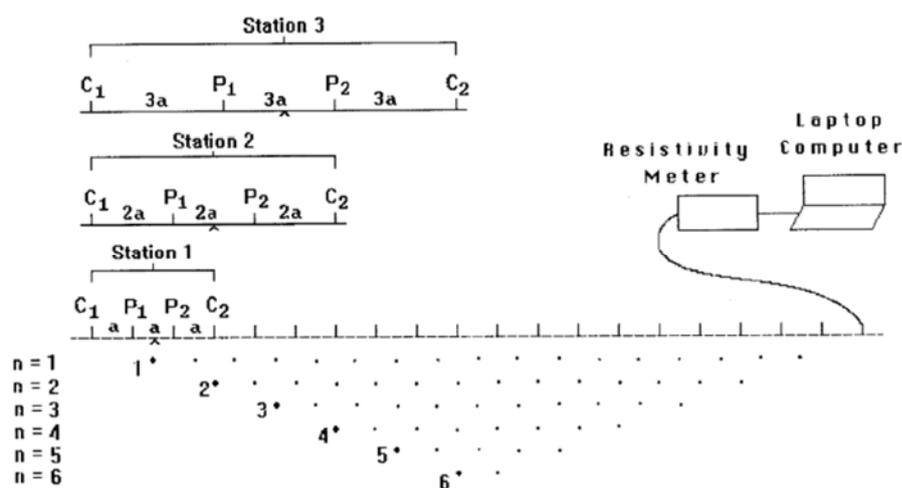
### 6.1 Metodologia impiegata, strumentazione e software

#### 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 48 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 verticale (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 *cable 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 soddisfa 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

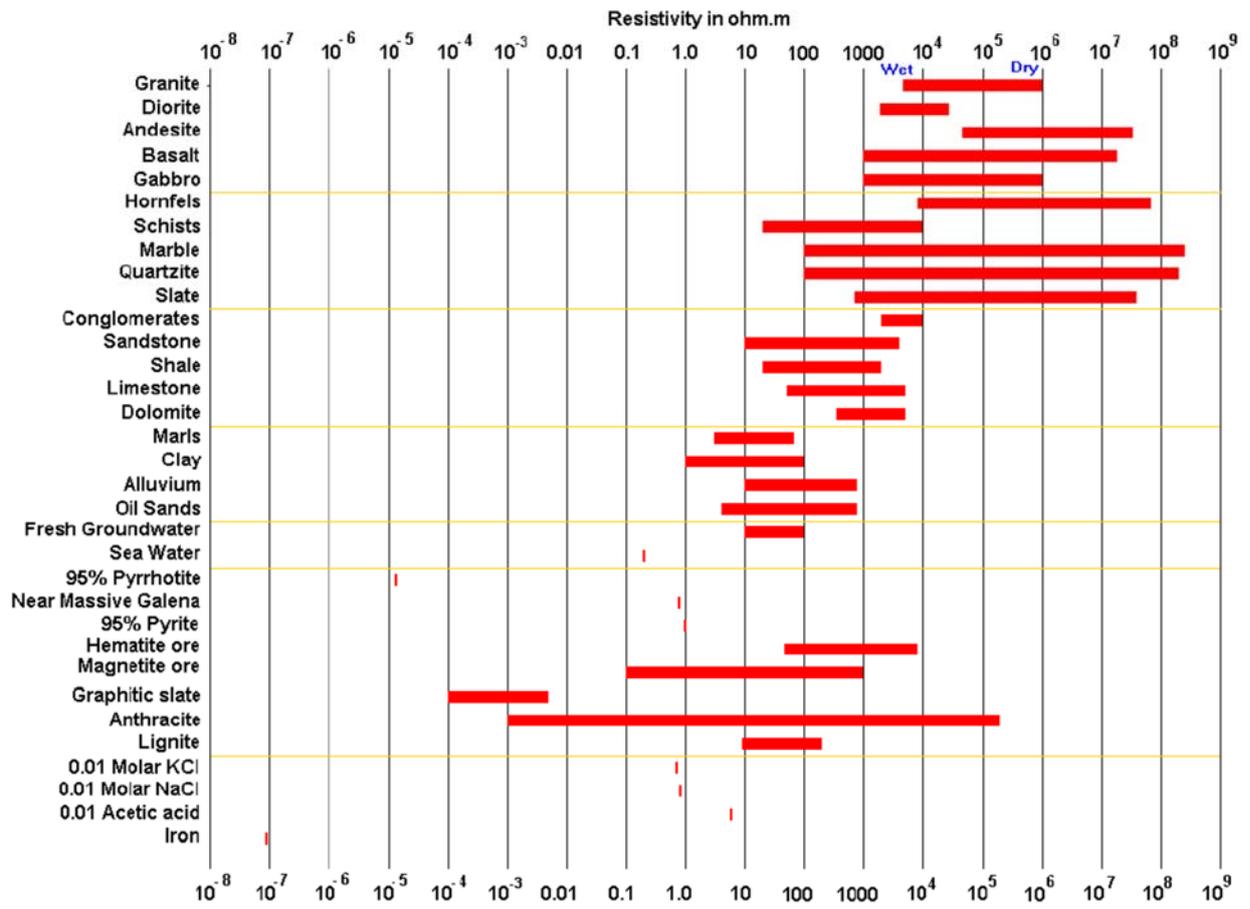
La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti etc. Nella **Tabella 13** e nella **Figura 1** si riporta il range di resistività dei materiali geologici tratta rispettivamente da Telfordet *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 10.** Valori di resistività di rocce, terreni e acqua

Litotipi - terreni	Resistività elettrica (Ohm·m)	
	Valore minimo	Valore massimo
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
Calcere poroso	50	$5 \cdot 10^3$
Calcere 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>Litotipi – rocce metamorfiche</b>		
	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Anfibolite	50	$10^4$
Argilloscisto (Ardesia)	600	$4 \cdot 10^7$
Gneiss	$7 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^6$
Marmo	100	$2 \cdot 10^8$
Quarzite	10	$2 \cdot 10^8$
Scisto	20	$10^4$
Scisto grafítico	10	100
Skarn	250	$2 \cdot 10^8$
<b>Resistività elettrica (Ohm·m)</b>		
<b>Acqua</b>	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Dolce	7	30-50
Salmastra	0,2	0,5
Di mare	-	< 0,2
Salamoia	1.	0,04

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



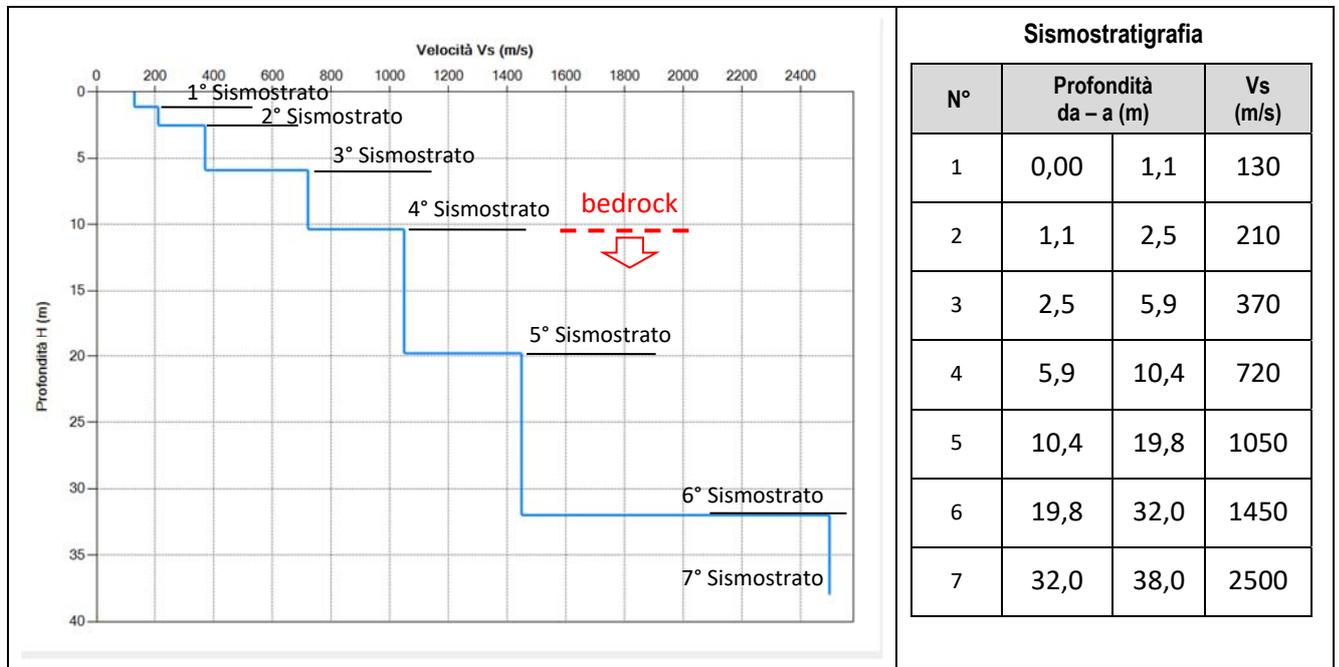
### 6.3 RISULTATI INDAGINI DEL SITO SMT01

#### 6.3.1 MASW M1 (SMT01)

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.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0-1,1	1° sismostrato con Vs di <b>130 m/s</b> , Terre poco addensate
1,1-2,5	2° sismostrato con Vs di <b>210 m/s</b> , Terre mediamente addensate
2,5-5,9	3° sismostrato con Vs di <b>370 m/s</b> , Terre addensate
5,9-10,4	4° sismostrato con Vs di <b>720 m/s</b> , Substrato roccioso intensamente fratturato
10,4-19,8	5° sismostrato con Vs di <b>1050 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
19,8-32,0	6° sismostrato con Vs di <b>1450 m/s</b> , Substrato roccioso da fratturato a sano
32,0-38,0	7° sismostrato con Vs di <b>2500 m/s</b> , Substrato roccioso sano

MASW M1 - PROFILO Vs



Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,10	1,10	130	1,10	1,10	0,00846
2	2,50	1,40	210	2,50	1,40	0,00667
3	5,90	3,40	370	5,90	3,40	0,00919
4	10,40	4,50	720	10,40	4,50	0,00625
5	19,80	9,40	1050	19,80	9,40	
6	32,00	12,20	1450	30,00	10,20	
7	38,00	6,00	2500	0,00	0,00	

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.

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **10,4 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **10,4 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 10,4/0,0305 = 340,23$  m/s** che dà luogo ad una categoria E, ossia:

**Categoria E:** terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

### 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  $V_s$ , e  $V_p$  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 $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,1	terre	1.800	260	130	0,33	78	10	29	78
2	1,1-2,5	terre	2.000	420	210	0,33	235	28	88	235
3	2,5-5,9	terre	2.100	740	370	0,33	765	92	284	765
4	5,9-10,4	12%	2.200	1.440	720	0,33	3.040	365	1.138	3.040
5	10,4-19,8	15%	2.350	2.100	1050	0,33	6.914	1.037	2.589	6.914
6	19,8-32,0	22%	2.400	2.900	1450	0,33	13.455	2.960	5.051	13.455
7	>32,0	25%	2.450	5.000	2500	0,33	40.836	10.209	15.308	40.836

### Indicazioni per la determinazione di $N_{spt}$ e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra  $V_s$  e  $N_{spt}$ , 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	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 2,5/8,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,5/8,0 a 13,0/17,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 13,0/17,5 a 18,0/20,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 18,0/20,0 a 30,0-35,0	2400-4800

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 4800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 2,5 e 8,0 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 13,0 e 17,5 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 18,0 e 20,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 30,0/35,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp 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 13,0 e 17,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 18,0 e 20,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

La sezione di tomografia elettrica **T1**, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività basse<sup>2</sup>; nello specifico si rileva un primo elettrostrato (ES1) con spessori pari a circa 4,0/7,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali, caratterizzati da resistività bassa con range di valori compreso tra 4,5 e 40  $\Omega \cdot m$  con i valori più bassi rilevati tra le progressive 78-80 m; segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da uno spessore maggiore rispetto agli elettrostrati adiacenti e valori bassi di resistività (tra 6 e 30  $\Omega \cdot m$ ) rilevabili soprattutto nella zona centrale della sezione, tra le progressive 40-60 m, situazione dovuta probabilmente alla presenza di una falda idrica; il terzo elettrostrato (Es3) mostra dei valori di resistività leggermente maggiori, compresi tra 25 e 70  $\Omega \cdot m$ .

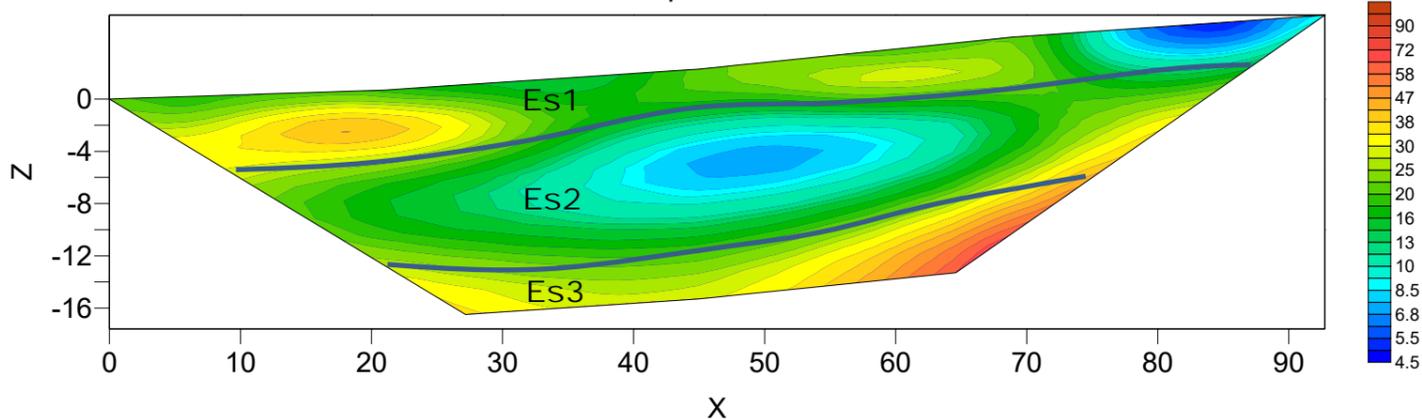
Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).

<sup>2</sup> I termini di resistività "bassa" e "media" utilizzati nel seguito delle descrizioni si riferiscono al confronto tra i differenti stendimenti e al contesto litologico che vede la presenza di rocce (conglomerati, calcari dalla SMT1 a SMT4)

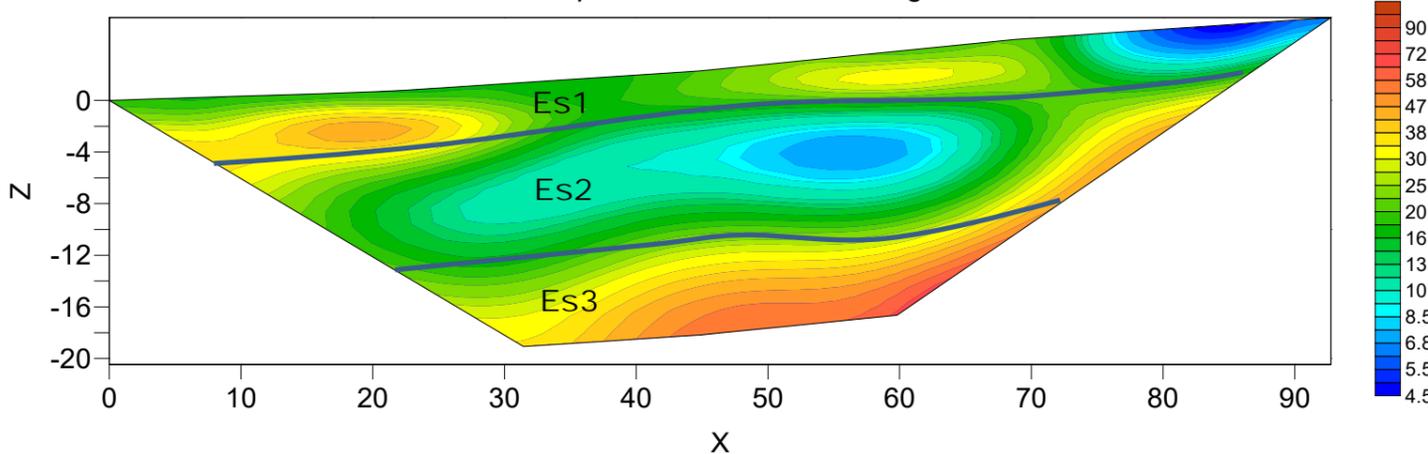
**Stendimento di tomografia elettrica: T1-Lungh: 93,0 m - Orientazione: SO-NE**

Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 532,49 m slm

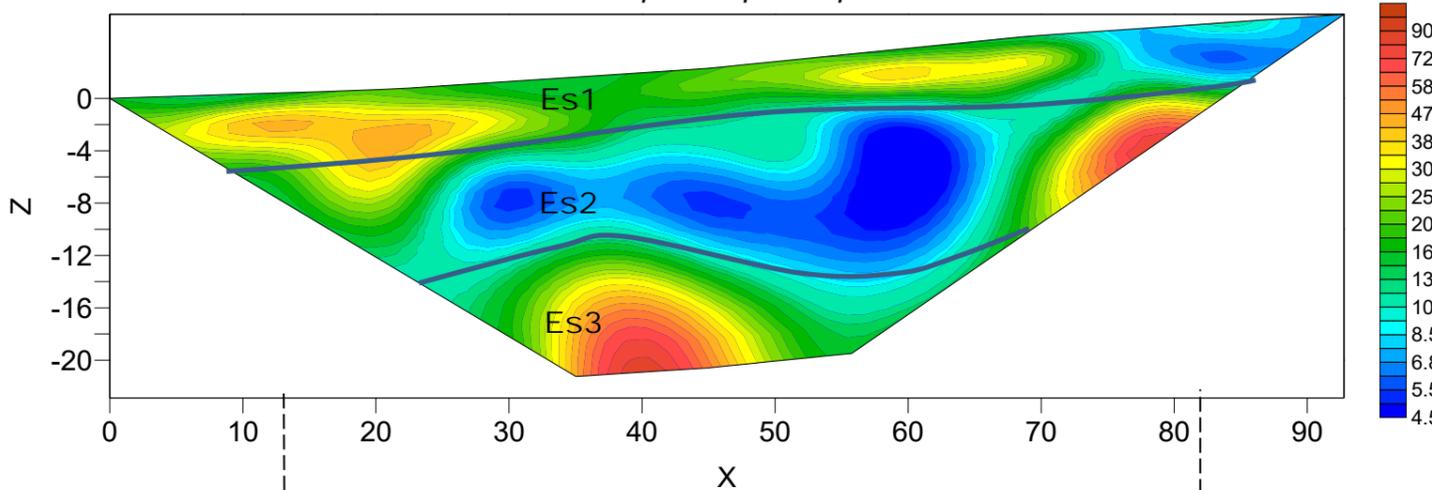
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger



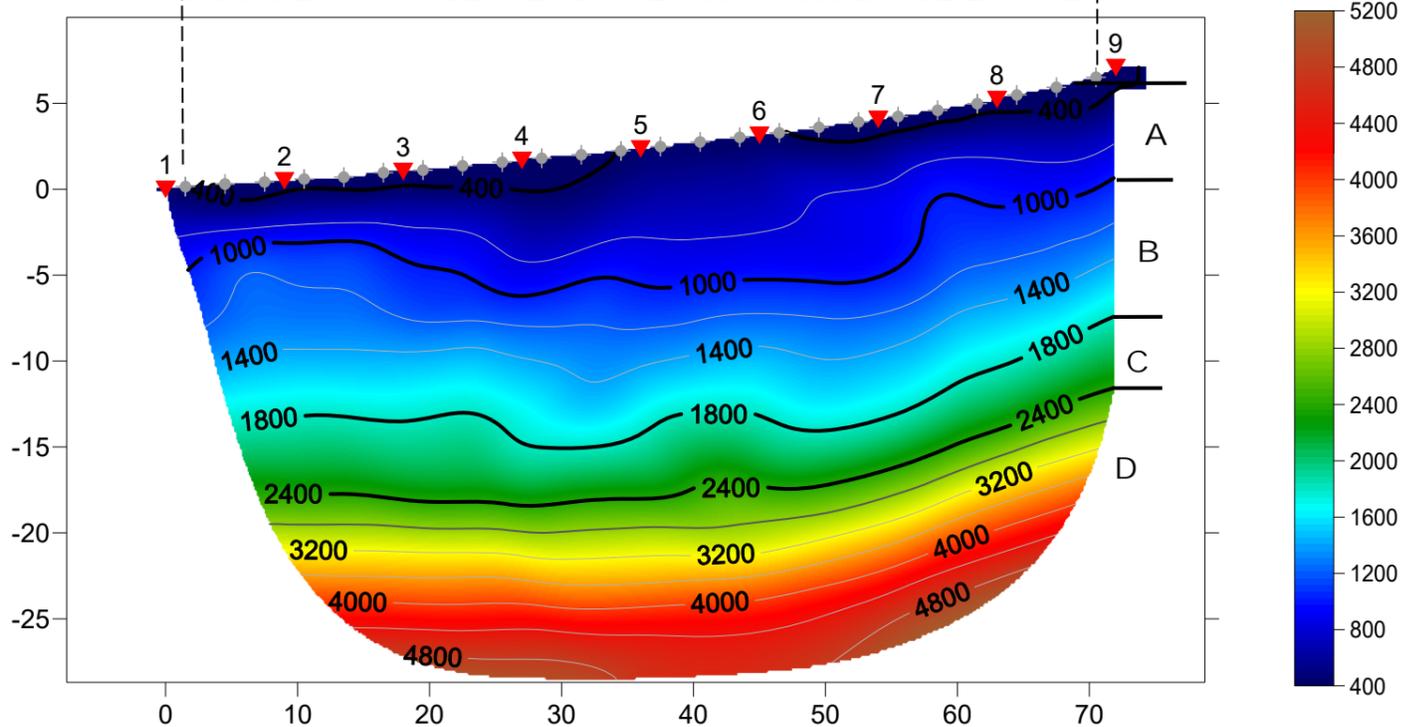
Quadripolo: Dipolo-Dipolo



**Base Sismica R1 - Rifrazione in onde P - Lunghezza: 69,0 m Orientazione: SO-NE**

Quota relativa 0,00= 532,54 m slm

R1-P RMS error 2.3%=0.81ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.5% initial GRADIENT.GRD γ. 4.01



Vp [m/s]

## 6.4 RISULTATI INDAGINI DEL SITO ST02

### 6.4.1 Rifrazione R2 e Tomografia elettrica T2

Nella sezione di sismica a rifrazione **R2** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,5/2,5	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,5/2,5 a 3,0/4,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,5 a 5,0/7,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/7,0 a 16,0/18,0	2400-4800

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 4800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato da terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori molto ridotti compresi tra 1,5 e 2,5 metri da p.c e un andamento pressoché parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggerissime variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 4,5 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e/o sane (rippabili con difficoltà) si osserva fino a profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m di rispetto al p.c. Il sismostrato D rappresenta il substrato lapideo non rippabile, caratterizzato da velocità di propagazione delle onde elastiche alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale investigato.

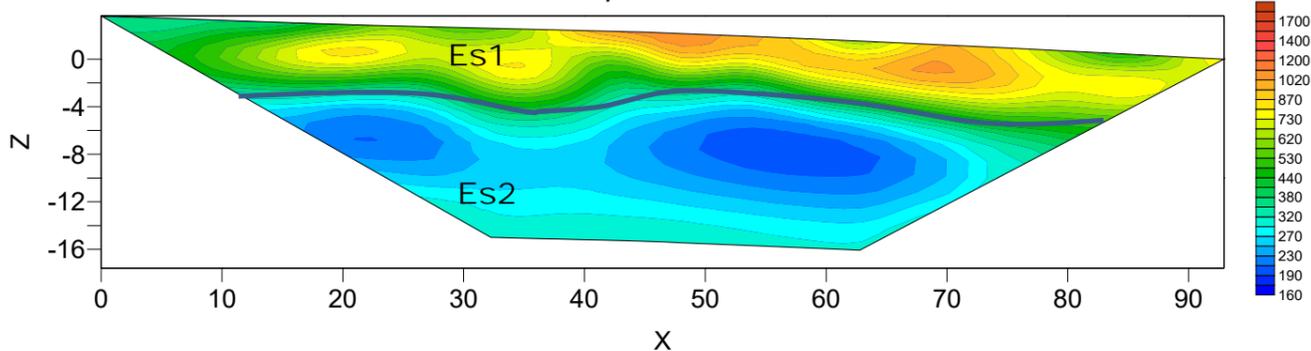
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

La sezione di tomografia elettrica **T2**, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medio-alte rispetto alle sezioni precedenti; nello specifico si rileva la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 4,0/6,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali e facies sedimentarie, con valori compresi nel range da 400 a 1200  $\Omega \cdot m$ ; segue un secondo elettrostrato (Es2) sino alla massima profondità rappresentata in sezione, caratterizzato da valori inferiori di resistività (valori compresi tra 160 e 530  $\Omega \cdot m$ ) riconducibile alla presenza di rocce tenere/fratturate e/o la probabile presenza di una o più falde idriche lungo tutta la sezione investigate.

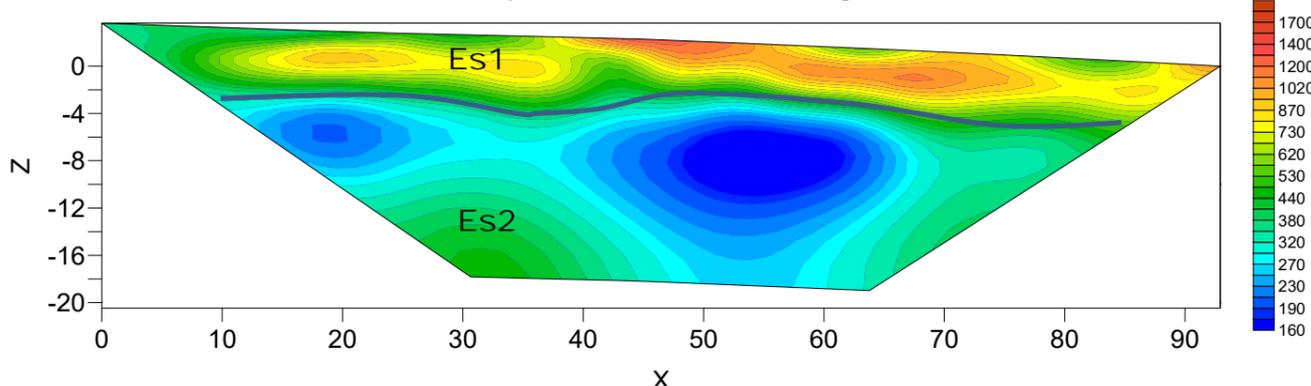
Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).

**Stendimento di tomografia elettrica: T2-Lungh: 93,0 m - Orientazione: SSE-NNO**  
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 562,86 m slm

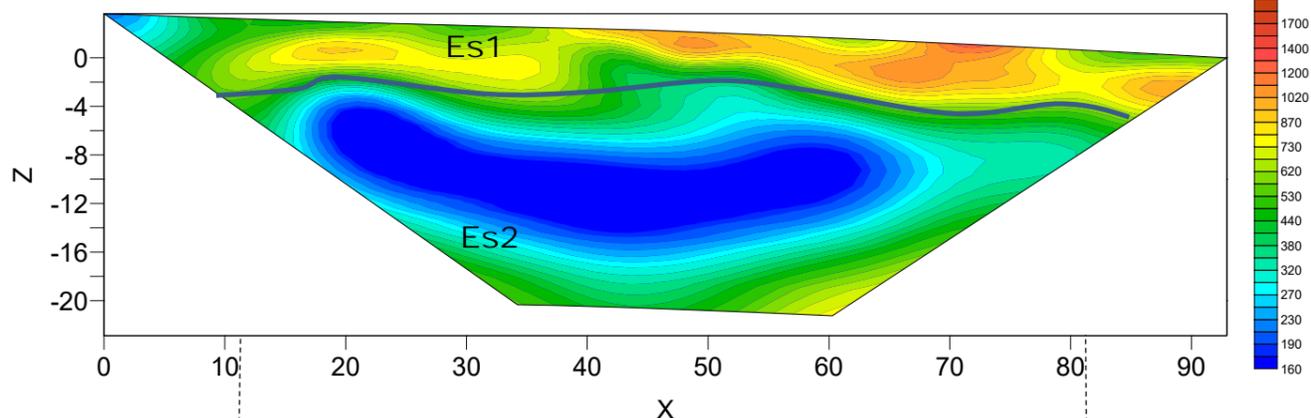
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger

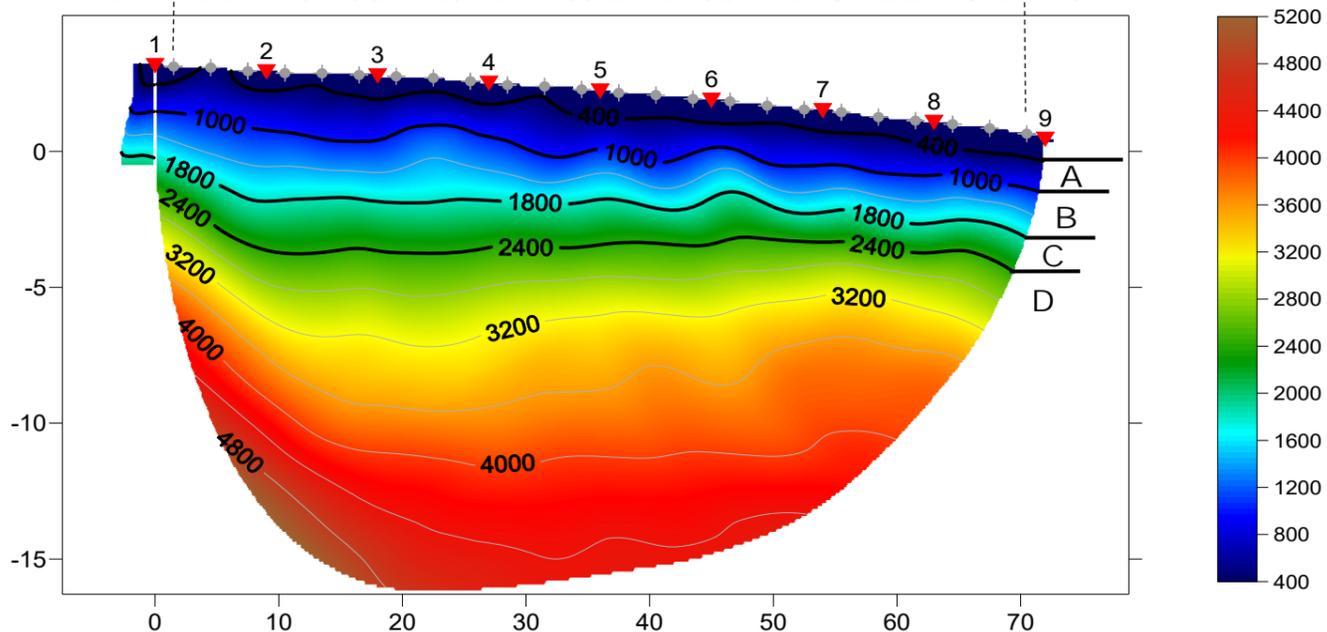


Quadripolo: Dipolo-Dipolo



**Base Sismica R2 - Rifrazione in onde P - Lunghezza: 57,50 m Orientazione: N-S**  
 Quota relativa 0,00= 430,00 m slm

R2-P RMS error 4.0%=0.84ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



## 6.5 RISULTATI INDAGINI DEL SITO ST03

### 6.5.1 Rifrazione R3 e Tomografia elettrica T3

Nella sezione di sismica a rifrazione **R3** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R3	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 2,5/5,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,5/5,5 a 4,0/10,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 4,0/10,0 a 20,0/24,0	2400-4800

Dall'esame della sezione sismica 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 4800 m/s; nello specifico il settore laterale sinistro della sezione (progressive da 10 a 30 m) presenta valori di velocità maggiori a parità di profondità, fatto correlabile alla presenza di un substrato litoide poco fratturato. Il sismostrato A caratterizzato da terre di copertura (facilmente rippabile) presenta un esiguo spessore compreso tra 1,0 e 2,0 metri da p.c. e un andamento sub-parallelo rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna con piccole variazioni di spessore, esso si rileva fino a profondità comprese tra 2,5 e 5,5 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si riscontra fino a profondità comprese tra 3,5 e 10,0 m rispetto al piano campagna, presentando un aumento laterale di spessore. Infine il sismostrato D, costituito da rocce sane (non rippabili) lo si riscontra a partire da 3,5 e 10,0 m rispetto al p.c. sino alle massime profondità rilevabili in sezione. Dalla sezione sismica si osservano nel complesso valori di Vp medio-alti, in particolare si riscontra una riduzione laterale delle velocità dalla progressiva 40 alla progressiva 65 m verosimilmente dovuto a una minore densità del materiale investigato a causa di una maggiore grado di fratturazione/alterazione rispetto al materiale circostante.

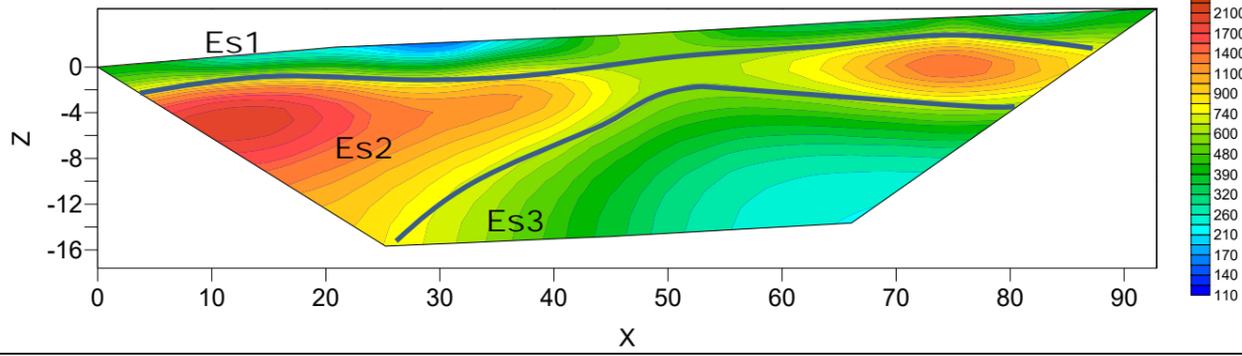
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 2,5 e 5,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 3,5 e 10,0 si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

La sezione di tomografia elettrica T3, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medio-alta; nello specifico si distingue un primo elettrostrato (ES1) di esiguo spessore pari a circa 1,0 a 2,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali con valori di resistività compresi tra 180 e 550  $\Omega \cdot m$ , segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori di resistività tra 550 e 2100  $\Omega \cdot m$  riconducibile alla presenza di un substrato roccioso maggiormente resistivo; chiude la sequenza un terzo elettrostrato (ES3) ben individuabile nella configurazione Dipolo-Dipolo caratterizzato da valori decrescenti di resistività riconducibile a materiale alterato/fratturato.

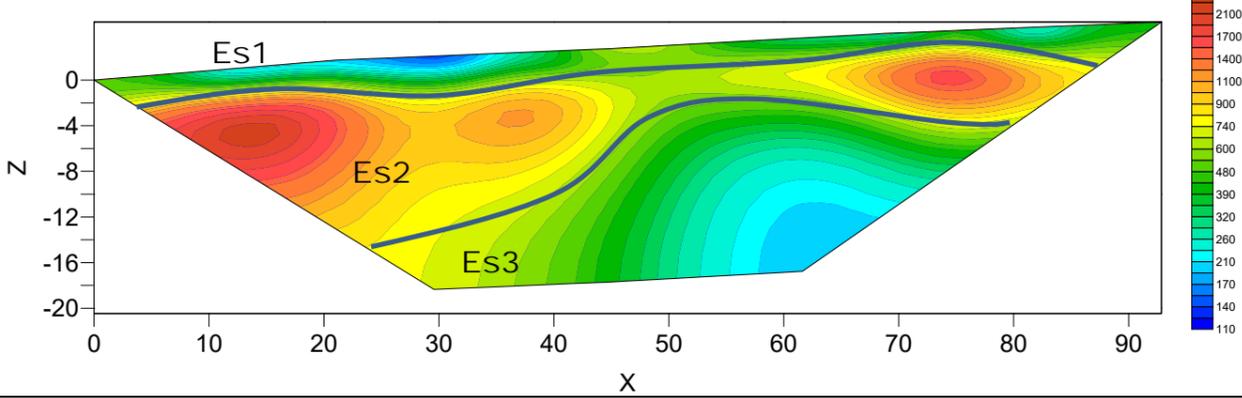
Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).

**Stendimento di tomografia elettrica: T3-Lungh: 93,0 m - Orientazione: ONO-ESE**  
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 612,57 m slm

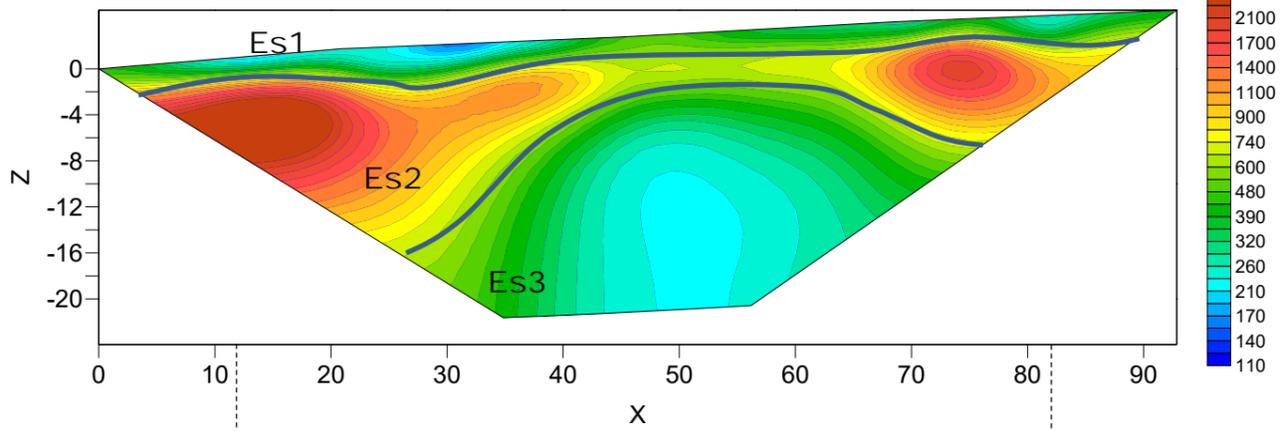
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger

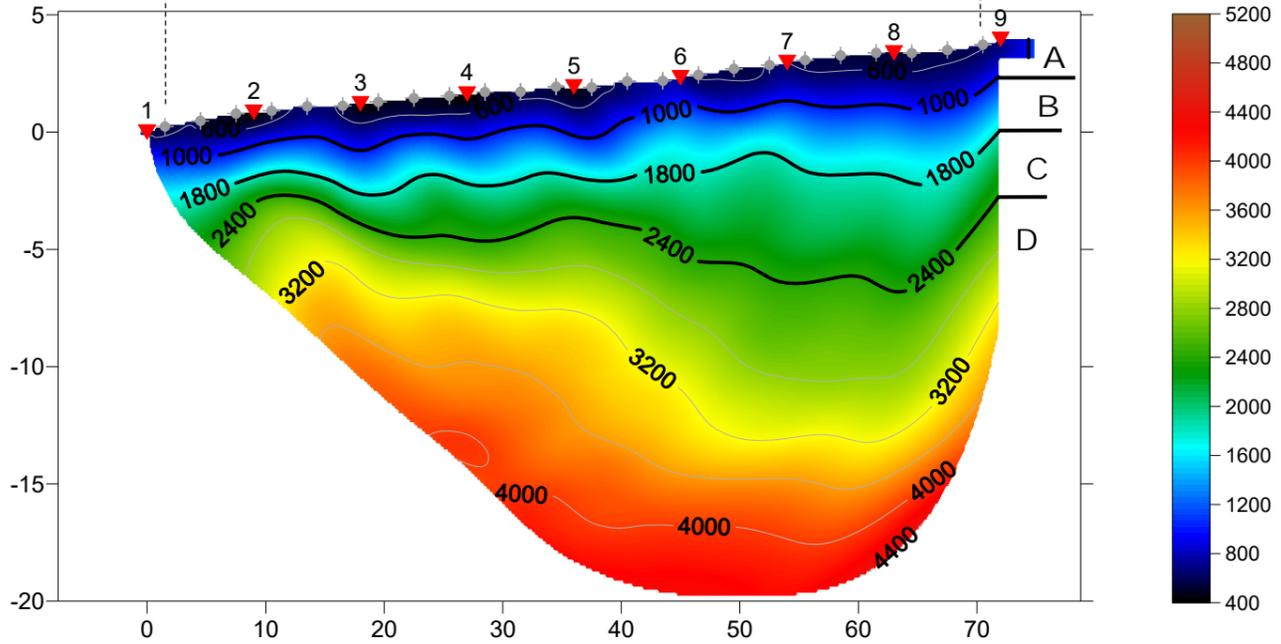


Quadripolo: Dipolo-Dipolo



**Base Sismica R3 - Rifrazione in onde P – Lunghezza: 69,0 m - Orientazione: ONO-ESE**  
 Quota relativa 0,00= 613,40 m slm

R3-P RMS error 4.7%=0.82ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



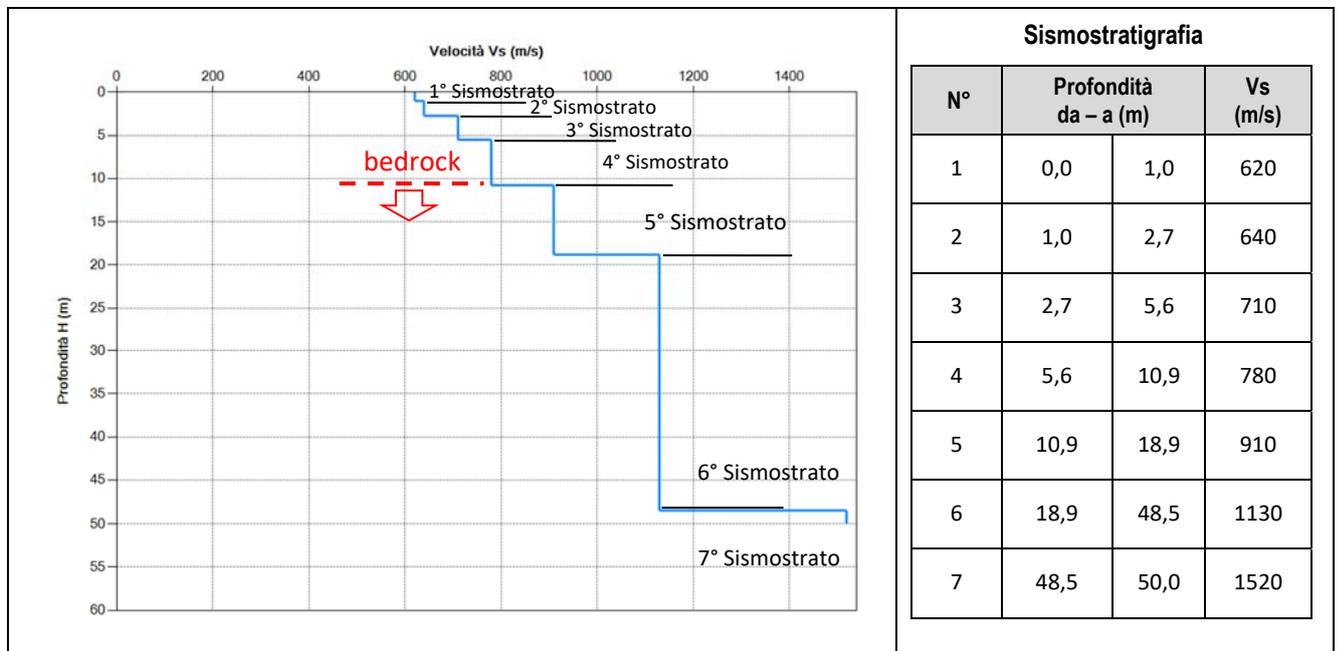
## 6.6 RISULTATI INDAGINI DEL SITO SMT04

### 6.6.1 MASW M4 (SMT04)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M4, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0-1,0	1° sismostrato con Vs di <b>620 m/s</b> , Terre addensate
1,0-2,7	2° sismostrato con Vs di <b>640 m/s</b> , Terre mediamente addensate
2,7-5,6	3° sismostrato con Vs di <b>710 m/s</b> , Terre molto addensate
5,6-10,9	4° sismostrato con Vs di <b>780 m/s</b> , Substrato roccioso intensamente fratturato
10,9-18,9	5° sismostrato con Vs di <b>910 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
18,9-48,5	6° sismostrato con Vs di <b>1130 m/s</b> , Substrato roccioso da fratturato a sano
48,5-50,0	7° sismostrato con Vs di <b>1520 m/s</b> , Substrato roccioso sano

#### MASW M4 - PROFILO Vs



#### Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	Hi/Vs (s)
1	1,00	1,00	620,00	1,00	1,00	0,00161
2	2,70	1,70	640,00	2,70	1,70	0,00266
3	5,50	2,80	710,00	5,50	2,80	0,00394
4	10,80	5,30	780,00	10,80	5,30	0,00679
5	18,80	8,00	910,00	18,80	8,00	
6	48,50	29,70	1130,00	30,00	11,20	
7	50,00	1,50	1520,00	0,00	0,00	

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.

Esaminato il profilo delle  $V_s$  si pone come profondità del substrato **10,8 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **10,8 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_{s,eq} = 10,8/0,01501 = 719,63$  m/s** che dà luogo ad una categoria B, ovvero:

**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  $V_s$ , e  $V_p$  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 $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,0	terre	1.800	1.240	620	0,33	1.844	222	696	696
2	1,0-2,7	terre	2.000	1.280	640	0,33	2.187	264	824	824
3	2,7-5,6	terre	2.100	1.420	710	0,33	2.824	340	1.059	1.059
4	5,6-10,9	12%	2.200	1.560	780	0,33	3.570	428	1.334	1.334
5	10,9-18,9	15%	2.350	1.820	910	0,33	5.188	778	1.942	1.942
6	18,9-48,5	22%	2.400	2.260	1130	0,33	8.169	1.797	3.060	3.060
7	>48,5	25%	2.450	3.040	1520	0,33	15.093	3.773	5.659	5.659

### Indicazioni per la determinazione di $N_{spt}$ e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra  $V_s$  e  $N_{spt}$ , 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.

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

## 6.6.2 Rifrazione R4 e Tomografia elettrica T4

Nella sezione di sismica a rifrazione **R4** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R4	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
<b>Sismostrati</b>		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/3,5	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/3,5 a 2,5/9,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,5/9,0 a 5,0/14,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/14,0 a 25,0/26,0	2400-4800

Dall'esame della sezione sismica 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 4800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori ridotti compresi tra 1,0 e 3,5 metri da p.c e un andamento subparallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta spessori compresi tra 2,5 e 9,0 m da piano campagna con un andamento irregolare rispetto al p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 5,0 e 14,0 m di profondità dal p.c. con un andamento simile al sismostrato soprastante. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte, riscontrabile fino alla massima profondità di indagine dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle Vp con valori alti già nei primi metri di profondità e leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso, in particolare dalle progressive 55 e 60 m della sezione si nota un aumento delle velocità nel materiale investigato probabilmente poiché in questo specifico tratto esso presenta una maggiore competenza o migliori qualità elasto-meccaniche.

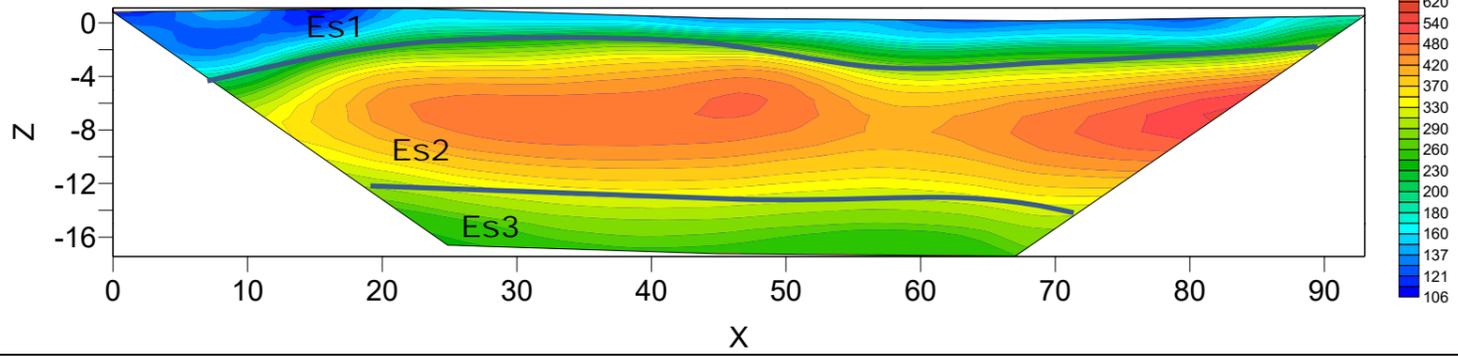
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 2,5 e 9,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 14,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

La sezione di tomografia elettrica T4, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività media; nello specifico si rileva un primo elettrostrato (ES1) di spessore variabile e compreso tra 2,0 e 4,0 m riconducibile sia alla coltre di terreni superficiali con valori di resistività compresi tra 100 e 250  $\Omega \cdot m$ , segue un secondo elettrostrato (Es2) con variazioni di resistività nella zona centrale della sezione presumibilmente legate alla presenza di zone più competenti dunque maggiormente resistive, con valori compresi tra 250 e 600  $\Omega \cdot m$ ; il terzo elettrostrato (Es3) presenta resistività inferiori rispetto al soprastante, con valori compresi tra 150 e 250  $\Omega \cdot m$ , dovuto verosimilmente ad una alterazione spinta dei materiali presenti.

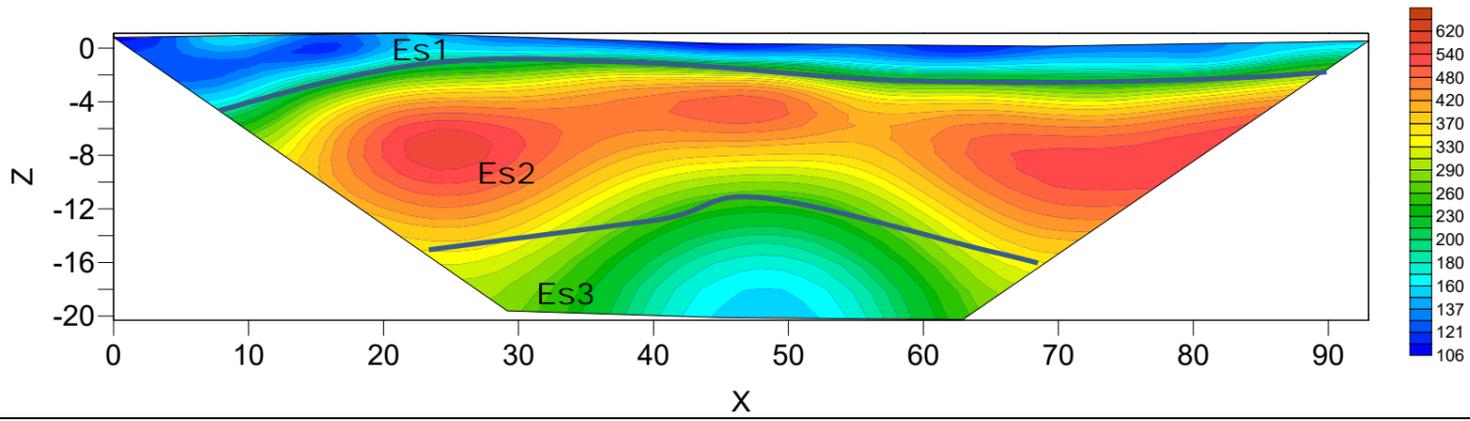
Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).

**Stendimento di tomografia elettrica: T4-Lungh: 93,0 m - Orientazione: NNO-SSE**  
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 586,16 m slm

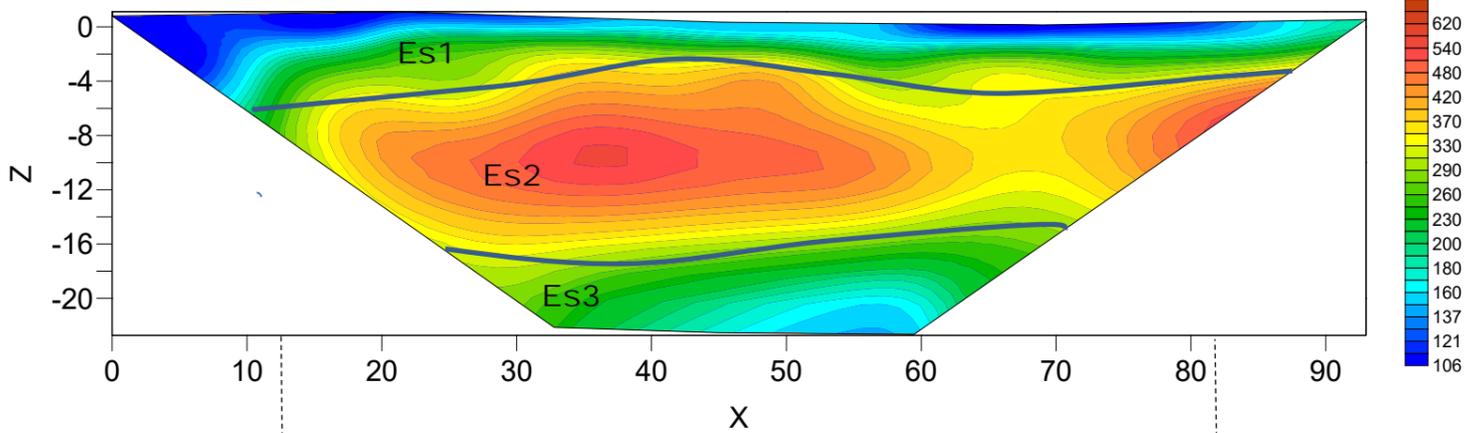
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulmberger

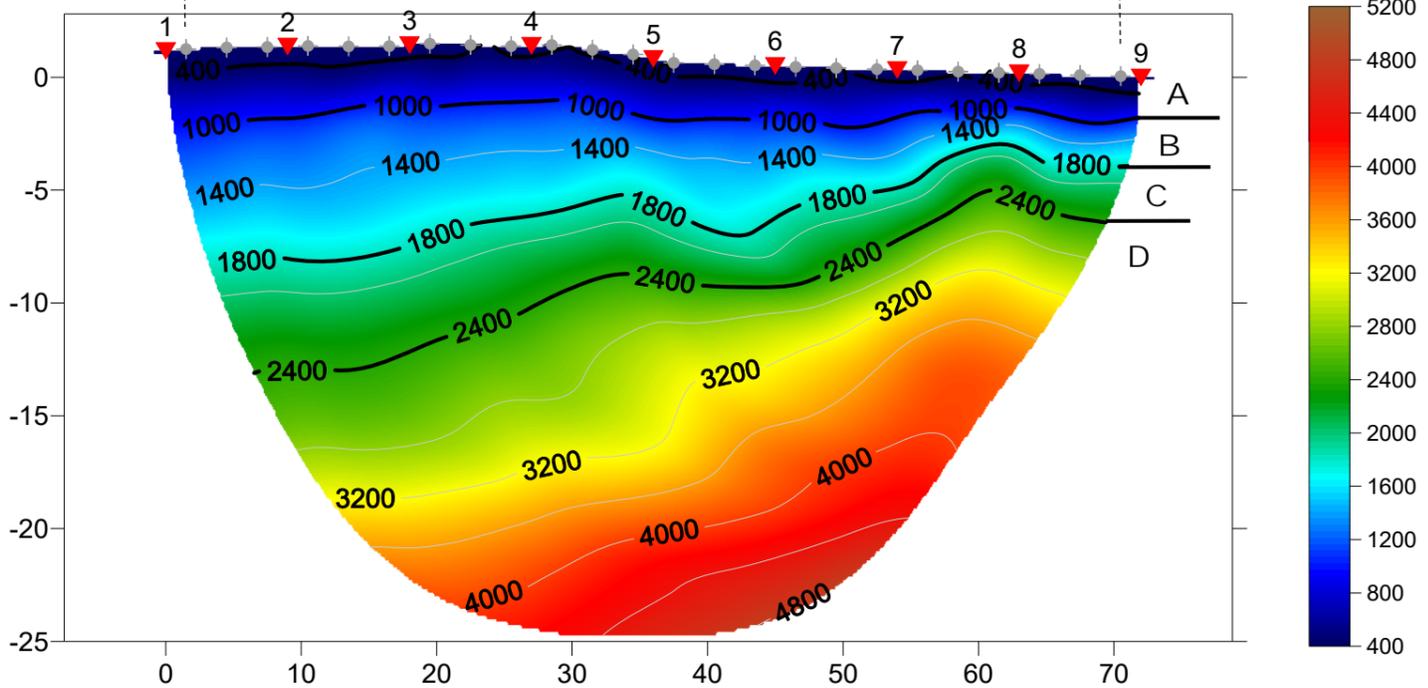


Quadripolo: Dipolo-Dipolo



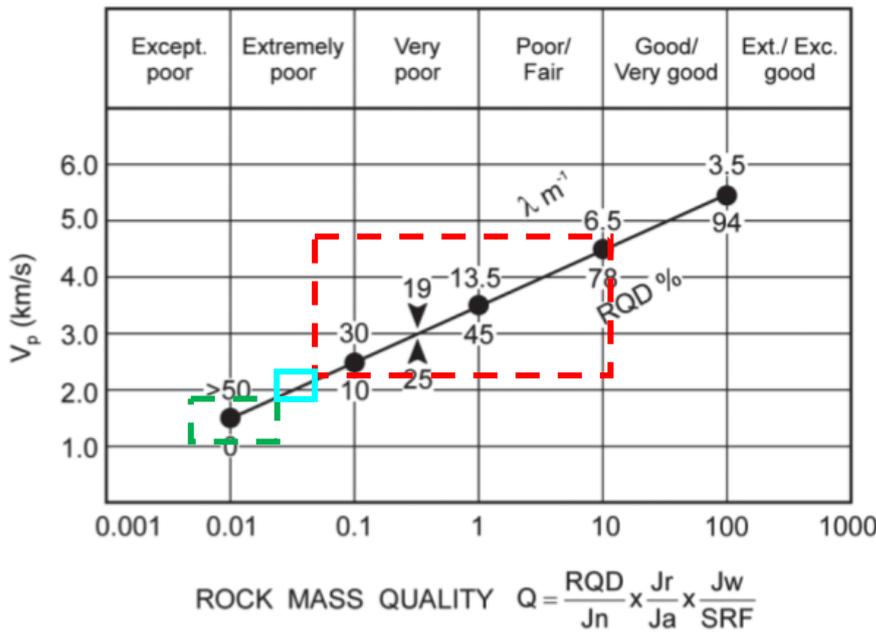
**Base Sismica R4 - Rifrazione in onde P - Lunghezza: 69,0 m - Orientazione: NNO-SSE**  
 Quota relativa 0,00= 385,34 m slm

R4-P RMS error 2.9%=0.67ms 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 Vp con RQD e λ (fratture per metro) e il relativo indici di qualità dell’ammasso roccioso di Barton (Q).



Sulla base dei litotipi individuati dalla sismica in via preliminare e previa successiva conferma tramite esecuzione di sondaggi geognostici si può applicare la correlazione ai sismostrati B, C e D. Il rettangolo verde indica il settore del sismostrato B, con un RQD compreso tra 0 e 3, un numero di fratture per metro che varia tra 50 e 45 e un indice di qualità Q medio di 0,01 (ammasso roccioso estremamente scadente); il rettangolo celeste rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 3 e 8, un numero di fratture per metro compreso tra 40 e 35 e un valore dell'indice Q medio di 0,04 (ammasso roccioso da estremamente scadente a scadente/discreto); infine il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato D che ha valori di RQD compresi tra 8 e 80, un numero di fratture per metro compreso tra 35 e 6,5 e un valore dell'indice Q tra min 0,035 e max 10. Da quanto sopra le 3 unità sismostratigrafiche possono essere classificate come segue:

Sismostrati	Vp (m/s)	RQD (%)	λ (1/m)	Q*
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	1000-1800	0-3	50-40	0.01-0.04
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	1800-2400	3-8	40-35	0.04-0.08
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	2400-4800	8-80	35-6.5	0.08-10

\*L'indice Q può essere correlato all'indice RMR della classificazione di Bieniawski con la relazione:  $RMR = 9 \ln Q + 44$ ;

## 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 ed elettriche. Lungo la verticale indagata si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_p$  e  $V_s$  in genere crescente con la profondità con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi, mentre tutti i terreni e rocce incontrati sono caratterizzati da valori di resistività da medio bassa a bassa.

Per quanto riguarda le MASW, lungo gli stendimenti 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 i differenti siti 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 (SMT01)	10,40	340,23	E
M4 (SMT04)	10,80	719,63	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'assetto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che in R2 e R4 a partire da pochi metri dal p.c. si incontrano terreni non rippabili (v. anche Masw) mentre per R3 e R5 i terreni risultano rippabili sino a circa 15-18 m e infine in R1 sino a 13,0 m.

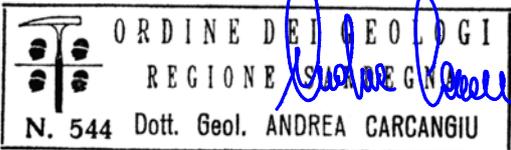
L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di escludere la presenza di anomali riconducibili a zone di maggiore fratturazione e/o presenza di cavità di origine carsica.

Le prospezioni geofisiche in rifrazione sono state utilizzate anche per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc) e per la definizione per l'indice di qualità di Barton Q: si tratta chiaramente di correlazioni da impiegare con le dovute approssimazioni ma comunque utili in determinate situazioni nelle quali dai sondaggi è difficile ottenere dei parametri di caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

Cagliari, li 26/06/2023

**Collaboratori**  
**Dott. Marco Usai**

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



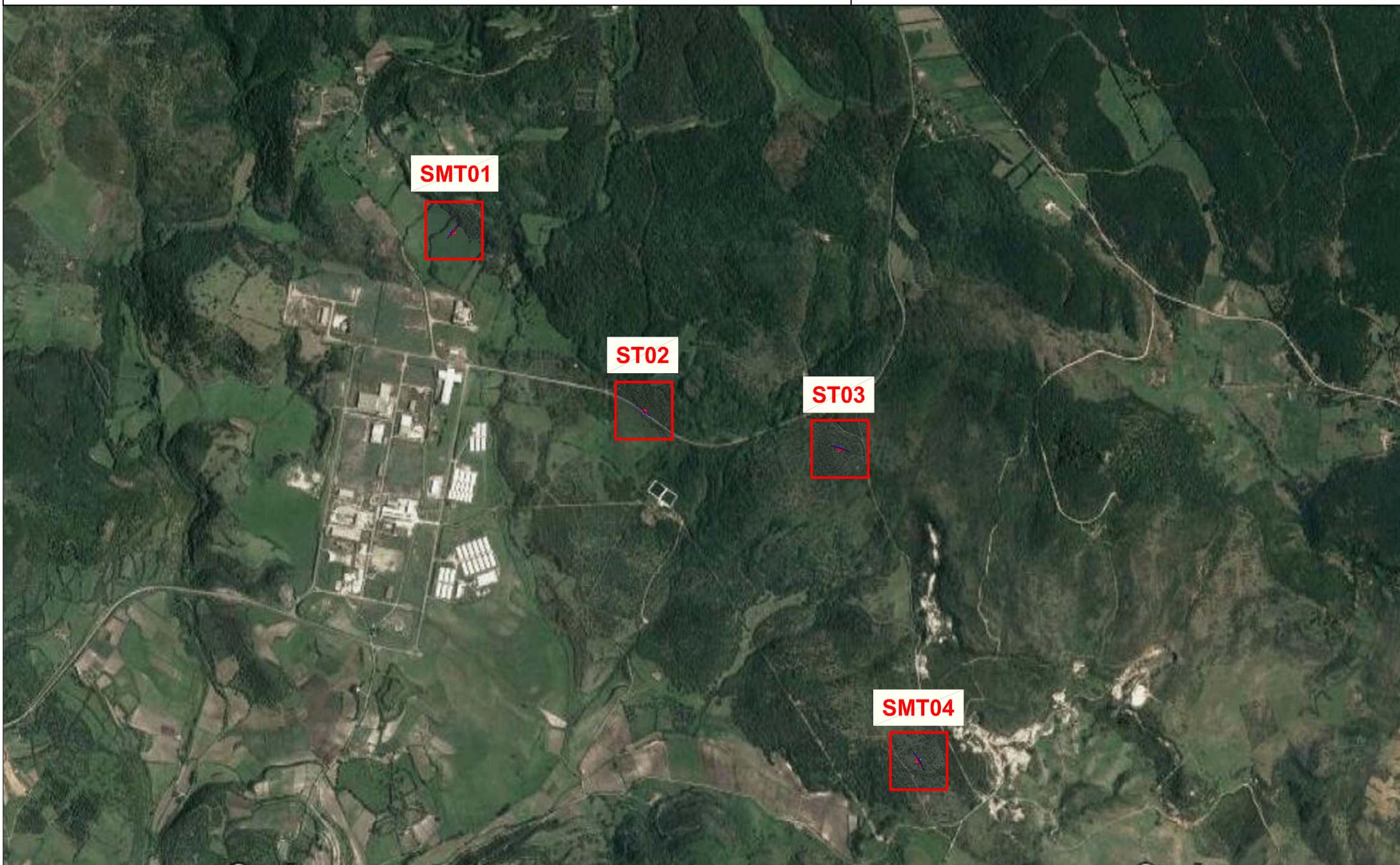
# Tavola 1: INQUADRAMENTO GENERALE DELLE AREE DI INDAGINE

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Isili (SU)

Scala 1:25.000

## Legenda

 AREE DI INDAGINE



## Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SMT01)

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Isili (SU)

Scala 1:1000

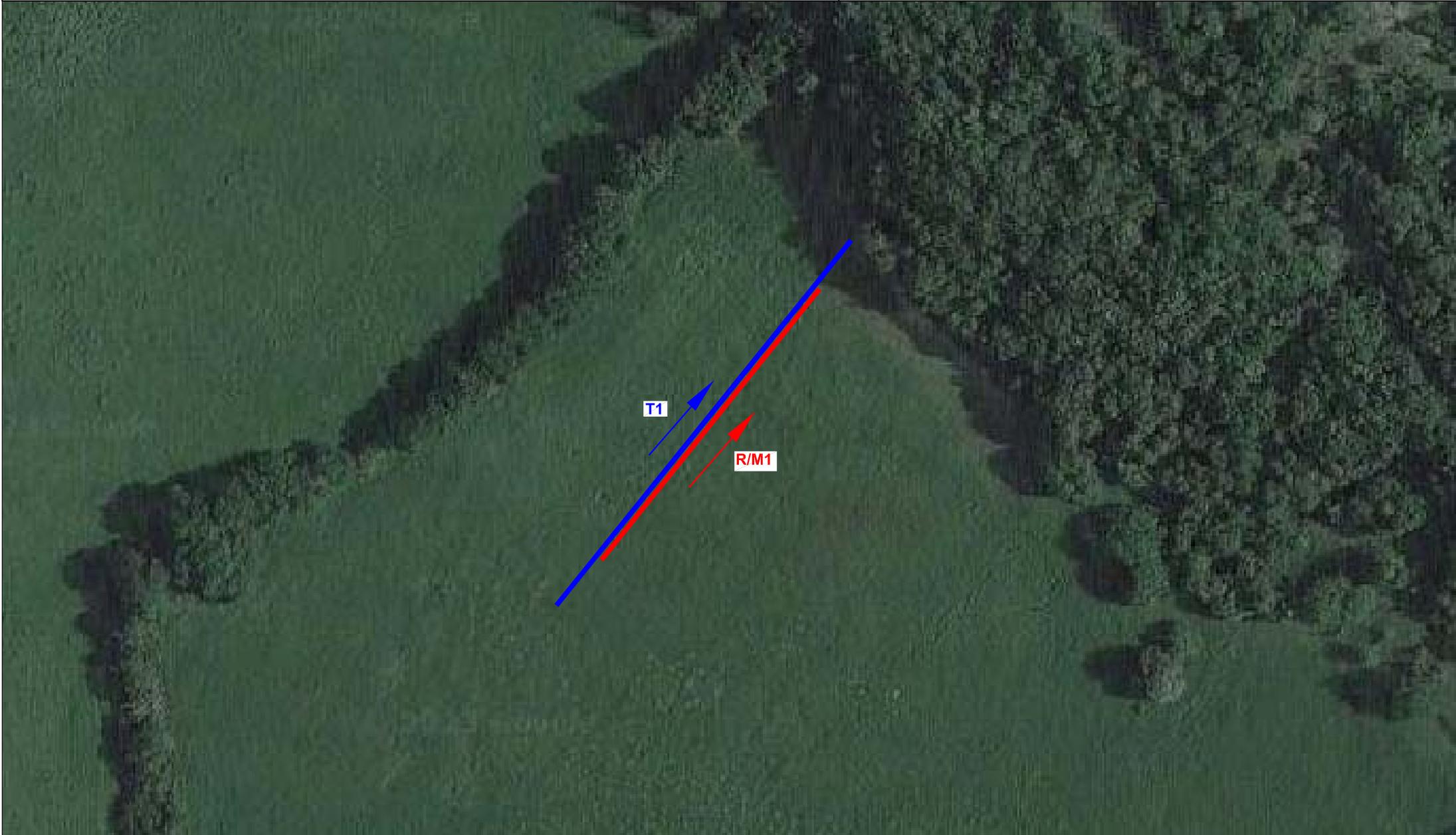
### Legenda

Stendimento T1 (Tomografia Elettrica) - Lunghezza = 93,0 m

→ Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

Stendimento R/M1 (Rifrazione-Masw) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



### Tavola 3 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (ST02)

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Isili (SU)

Scala 1:1000

#### Legenda

Stendimento T2 (Tomografia Elettrica) - Lunghezza = 93,0 m

→ Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

Stendimento R2 (Rifrazione) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



## Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (ST03)

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Isili (SU)

Scala 1:1000

### Legenda

**Stendimento T3 (Tomografia Elettrica) - Lunghezza = 93,0 m**

 Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

**Stendimento R3 (Rifrazione) - Lunghezza = 69,0 m**

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



## Tavola 5 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SMT04)

Progetto: Realizzazione di un parco eolico in agro Isili (SU)

Scala 1:1000

### Legenda

Stendimento T4 (Tomografia Elettrica) - Lunghezza = 93,0 m

→ Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

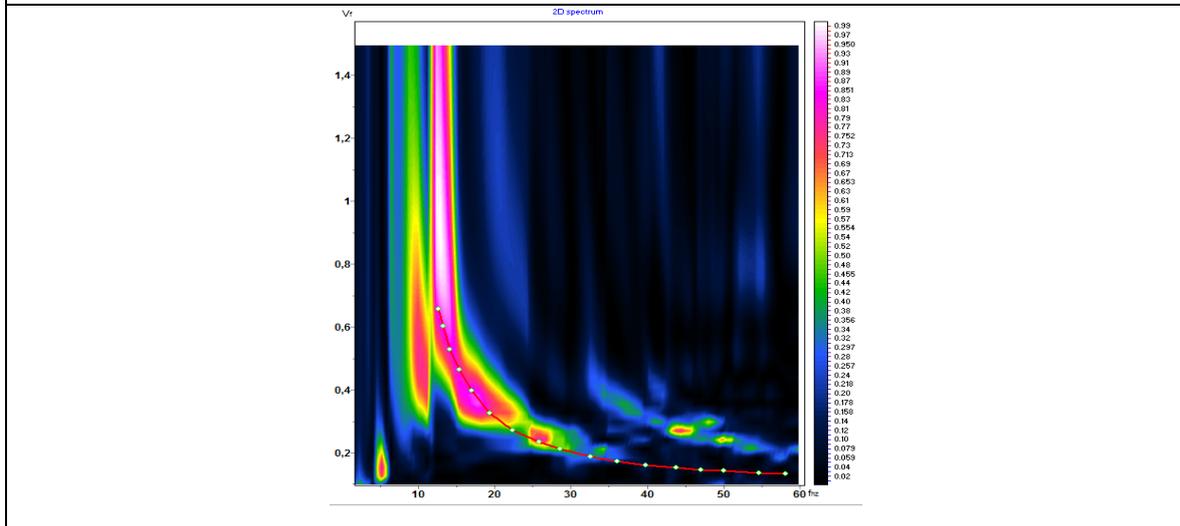
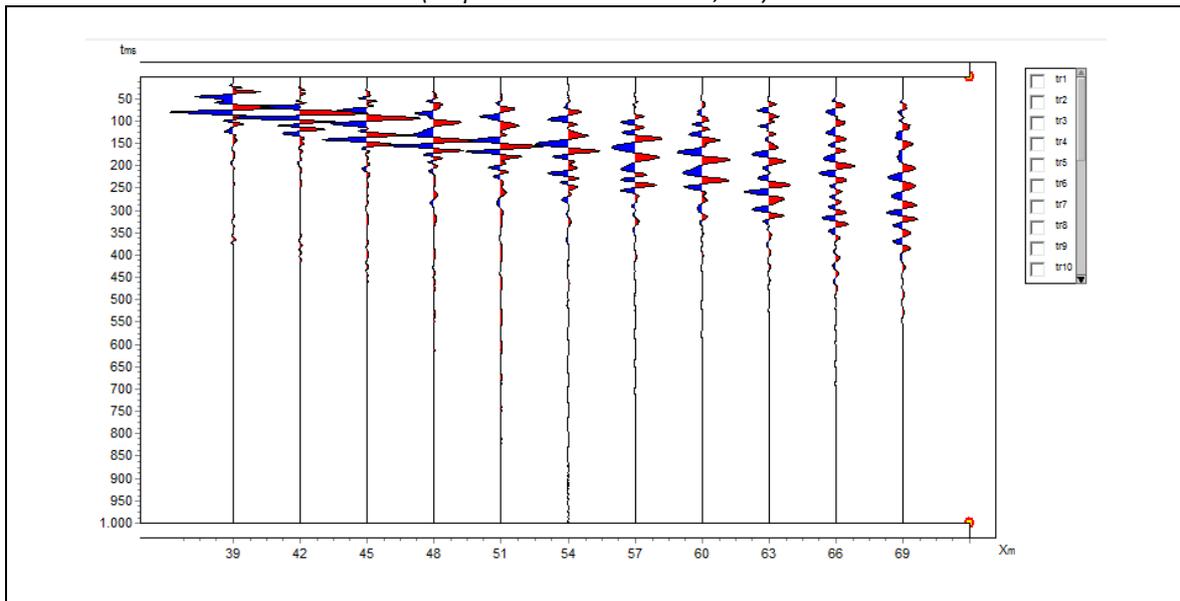
Stendimento R/M4 (Rifrazione-Masw) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

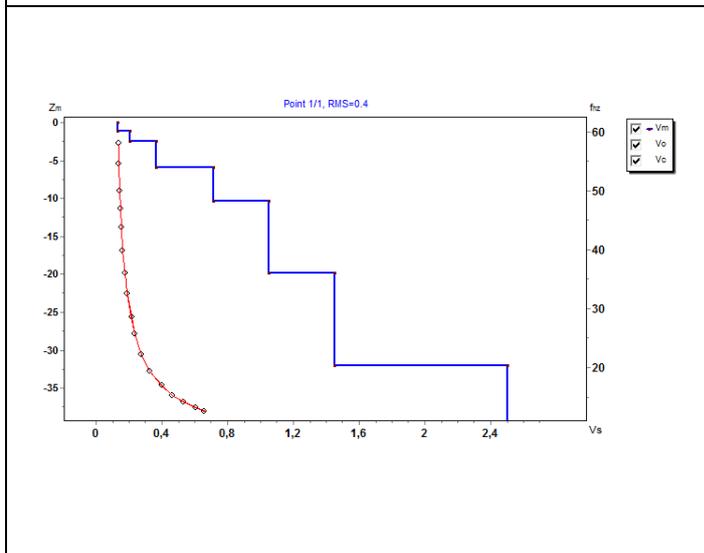


# ALLEGATO 1 SMT01-MASW 1

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



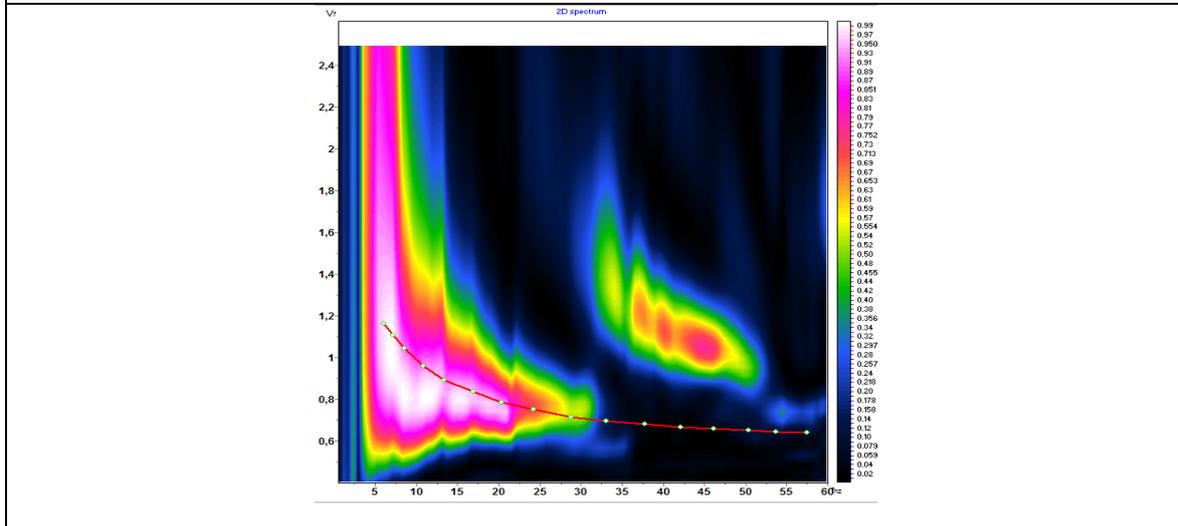
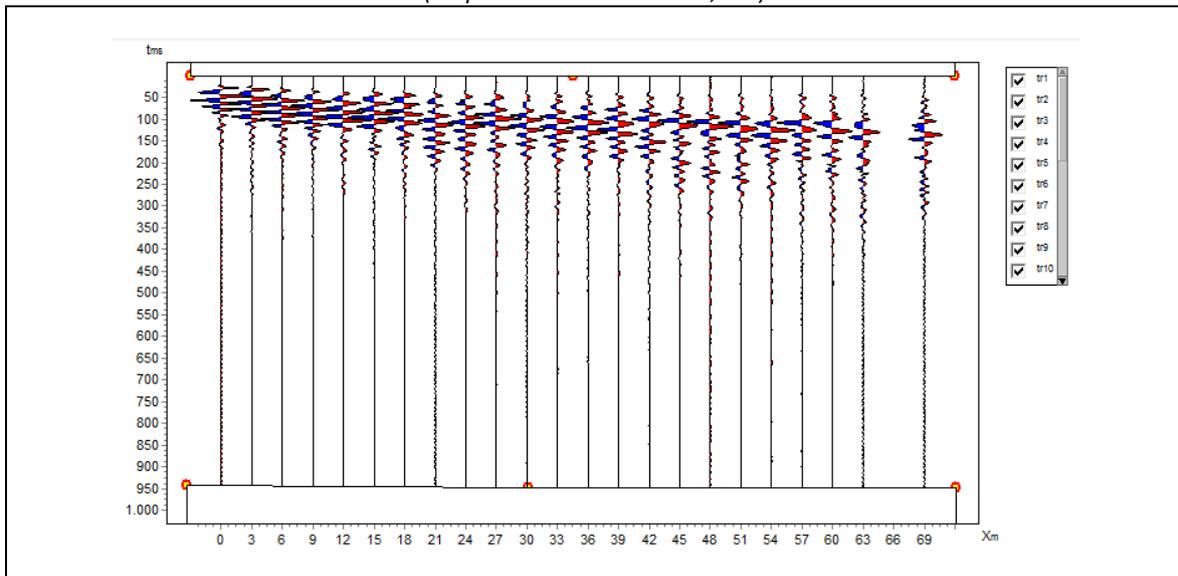
**Profilo Vs – Bedrock a 10,4 metri da p.c. (Vseq=340,23 m/s) - Categoria E**



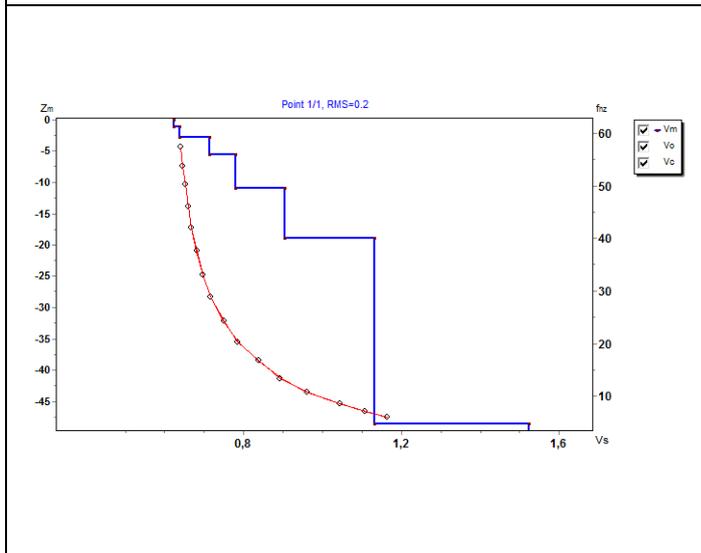
N	Vs	PR	p	Z	H
1	0.13	0.22	2	0	1.1
2	0.21	0.22	2	1.1	1.4
3	0.37	0.22	2	2.5	3.4
4	0.72	0.22	2	5.9	4.5
5	1.05	0.22	2	10.4	9.4
6	1.45	0.22	2	19.8	12.2
7	2.50	0.22	2	32.0	*

# ALLEGATO 1 SMT04-MASW 4

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a -9,0 m)



**Profilo Vs – Bedrock a 10,8 metri da p.c. (Vseq=320,38 m/s) - Categoria E**

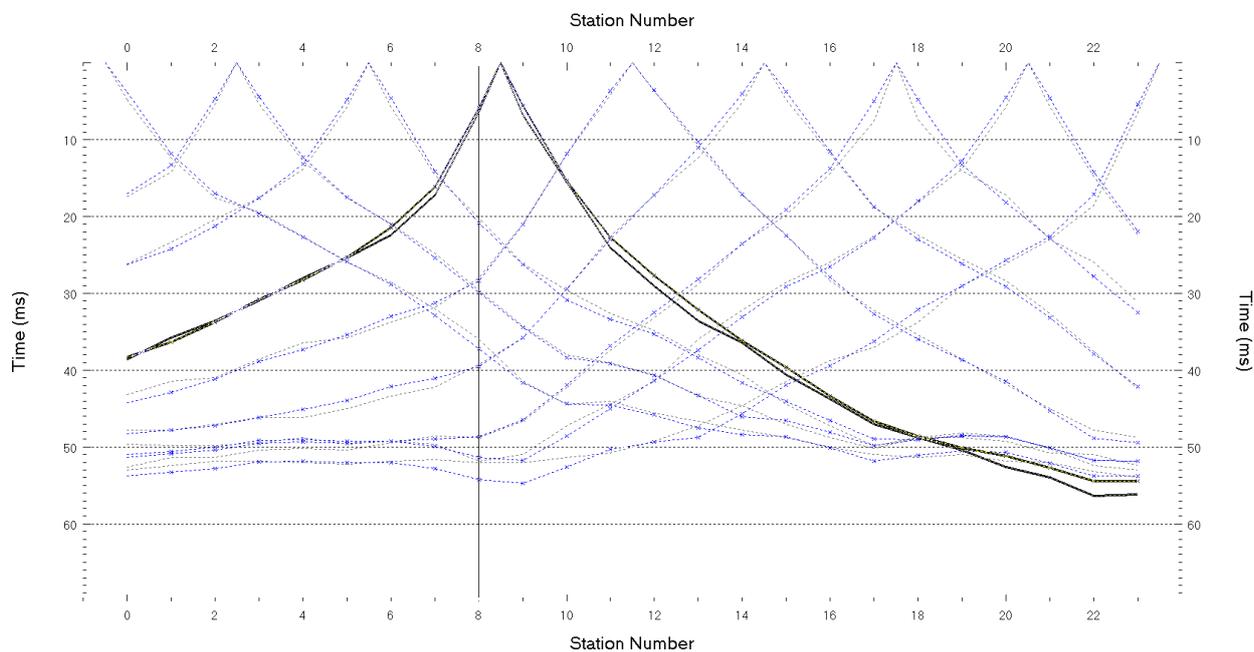


N	Vs	PR	p	Z	H
1	0.62	0.22	2	0	1.0
2	0.64	0.22	2	1.0	1.7
3	0.71	0.22	2	2.7	2.8
4	0.78	0.22	2	5.6	5.3
5	0.91	0.22	2	10.9	8.0
6	1.13	0.22	2	18.9	29.7
7	1.52	0.22	2	48.5	*

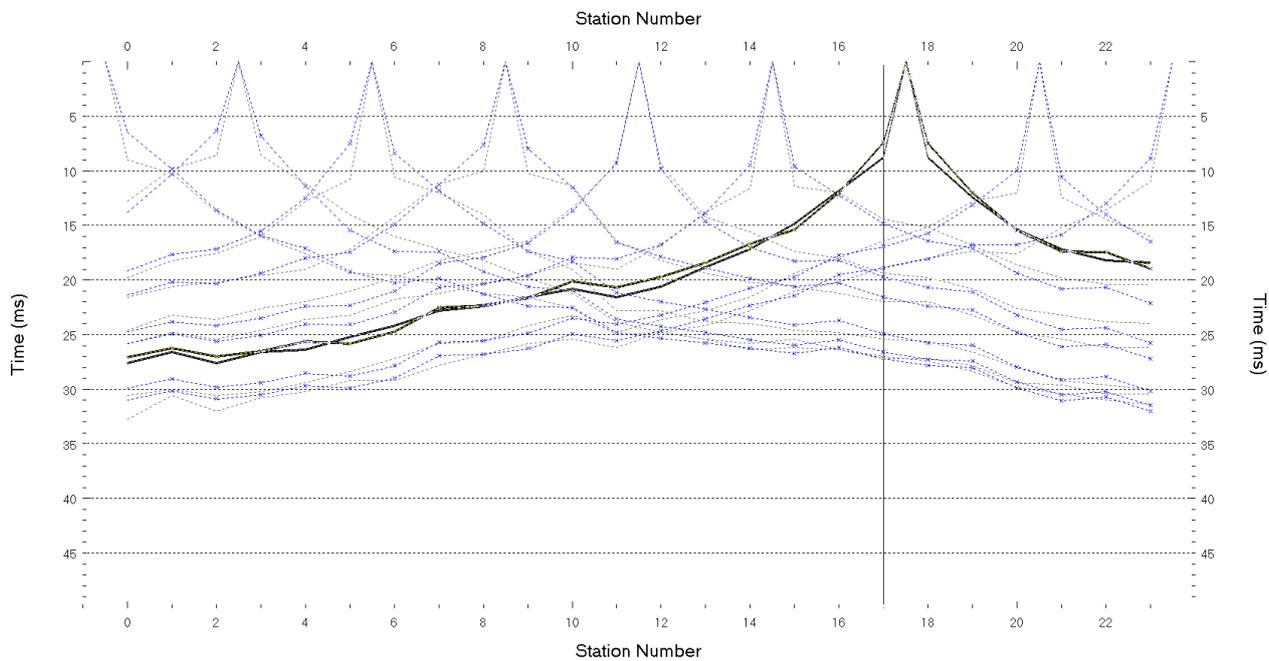
## ALLEGATO 2

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

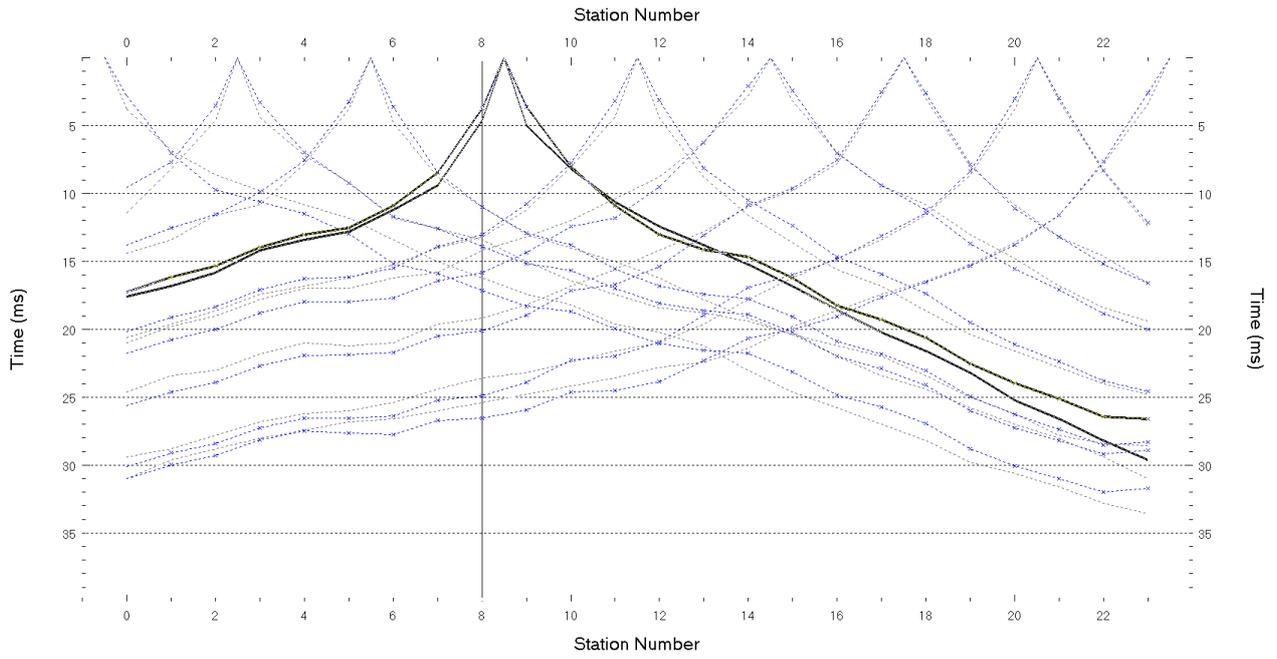
#### SMT01 - Sismica a rifrazione R1 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



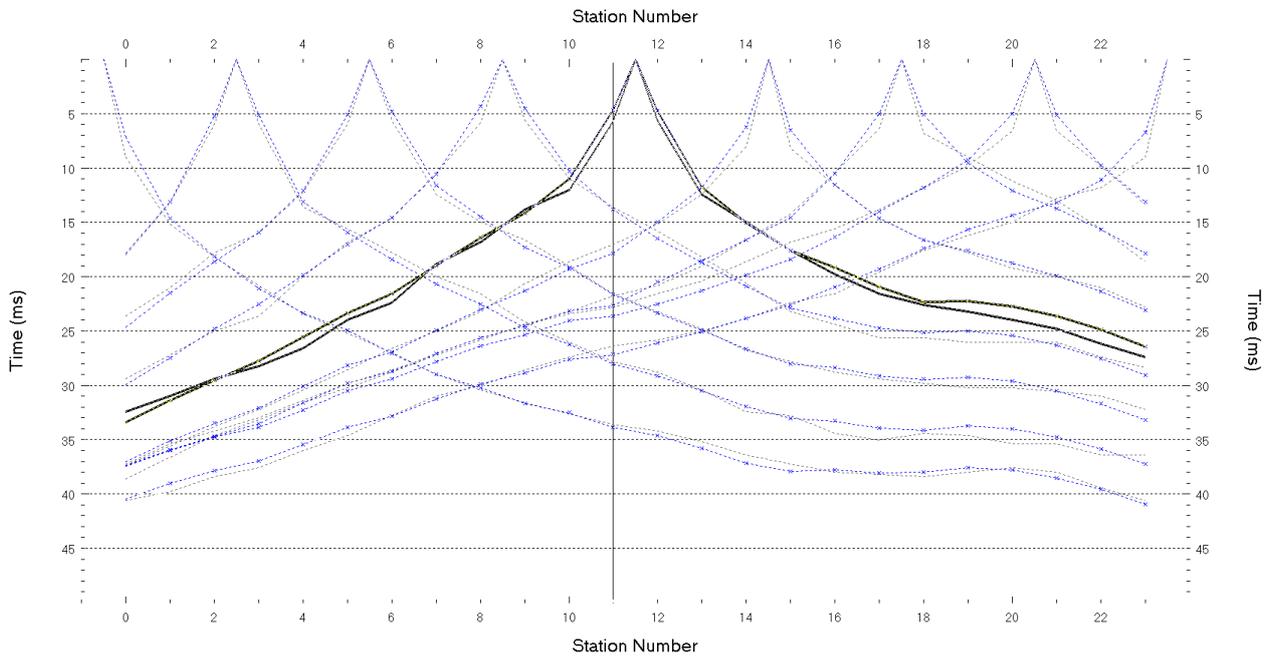
#### ST02 - Sismica a rifrazione R2 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



### ST03 - Sismica a rifrazione R3 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



### SMT04 - Sismica a rifrazione R4 in onde P - dromocrone osservate e calcolate



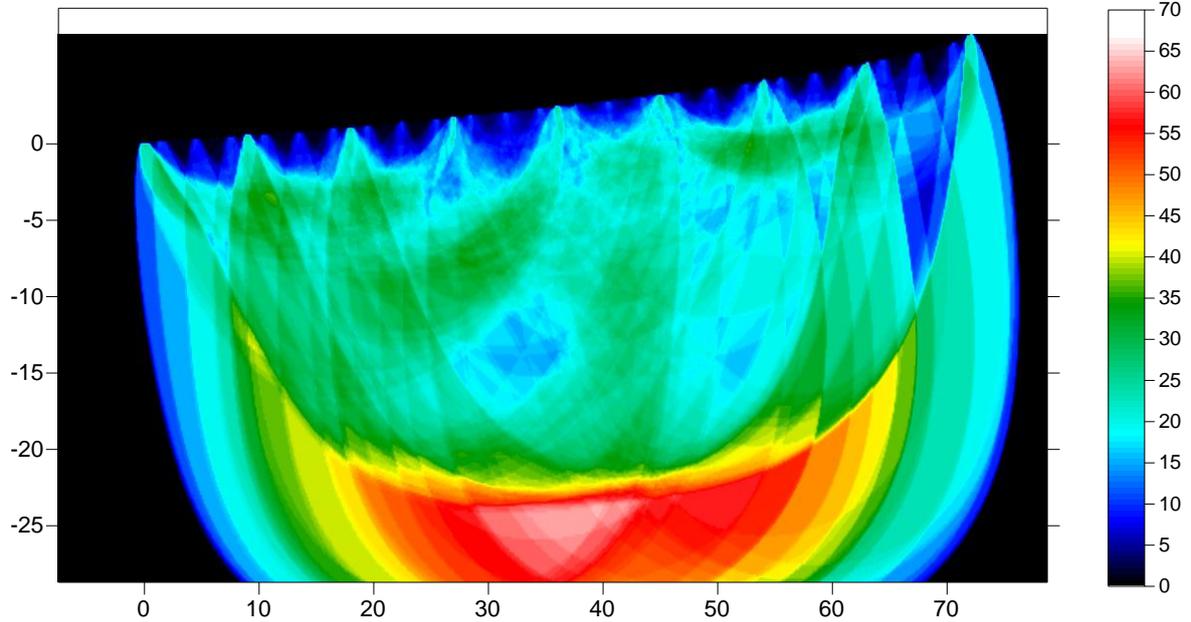
## ALLEGATO 2

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

#### SMT01 - Sismica a rifrazione R1 in onde P

##### Copertura raggi sismici

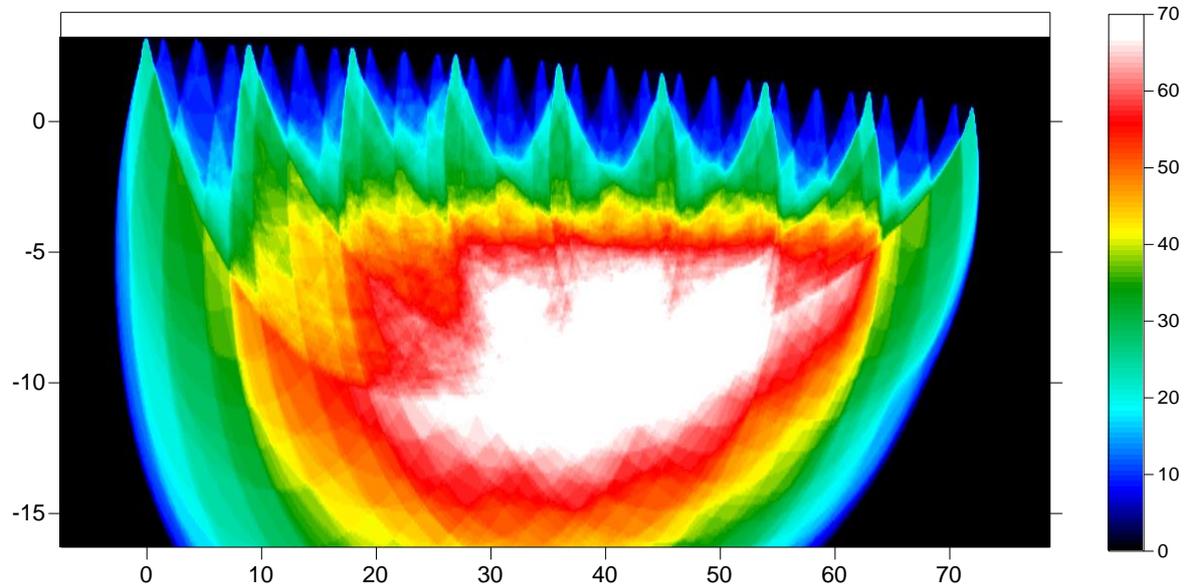
R2-P RMS error 2.3%=0.81ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



#### ST02 - Sismica a rifrazione R2 in onde P

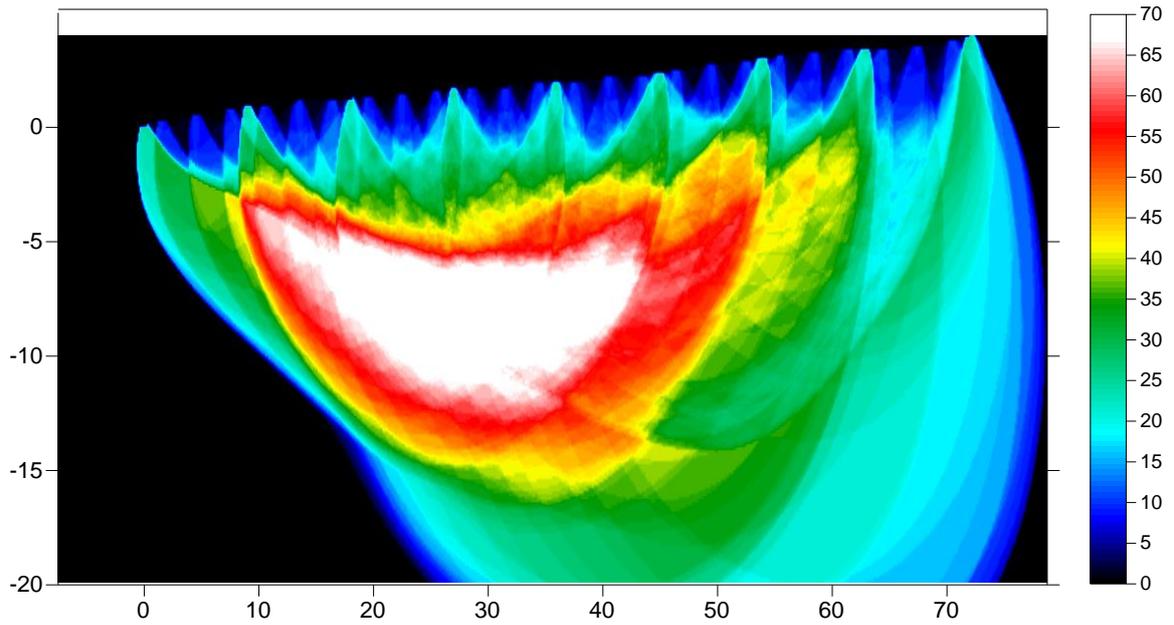
##### Copertura raggi sismici

ST02-P RMS error 4.0%=0.84ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



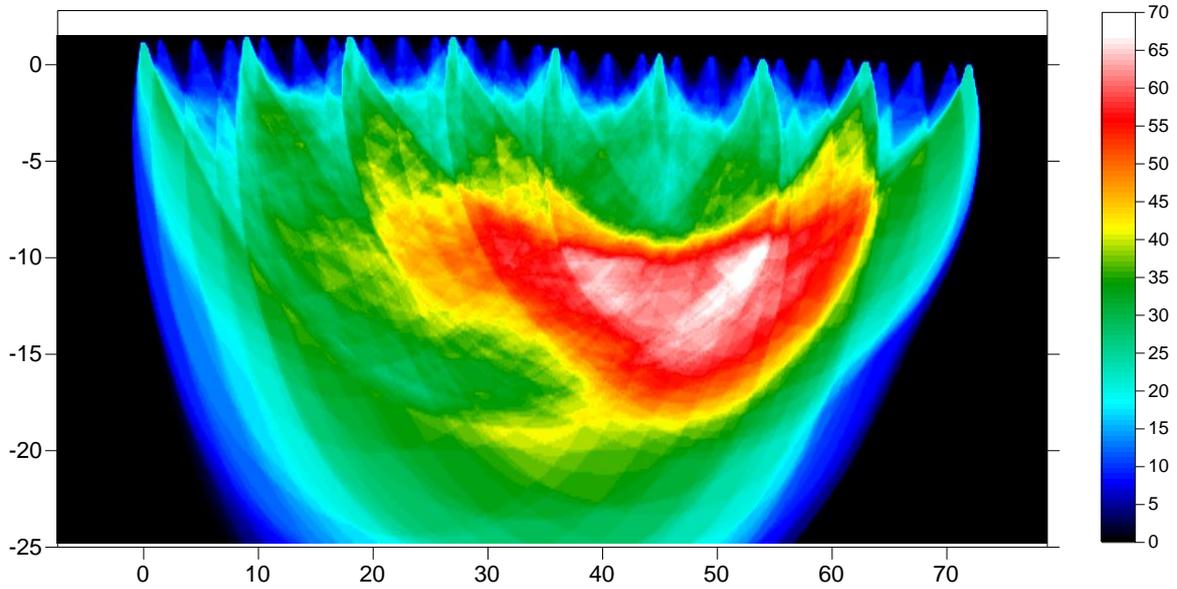
**ST03 - Sismica a rifrazione R3 in onde P**  
**Copertura raggi sismici**

R3-P RMS error 4.7%=0.82ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



**SMT04 - Sismica a rifrazione R4 in onde P**  
**Copertura raggi sismici**

R4-P RMS error 2.9%=0.67ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



# Allegato 3: Documentazione fotografica indagini geofisiche

## STENDIMENTO SMT01

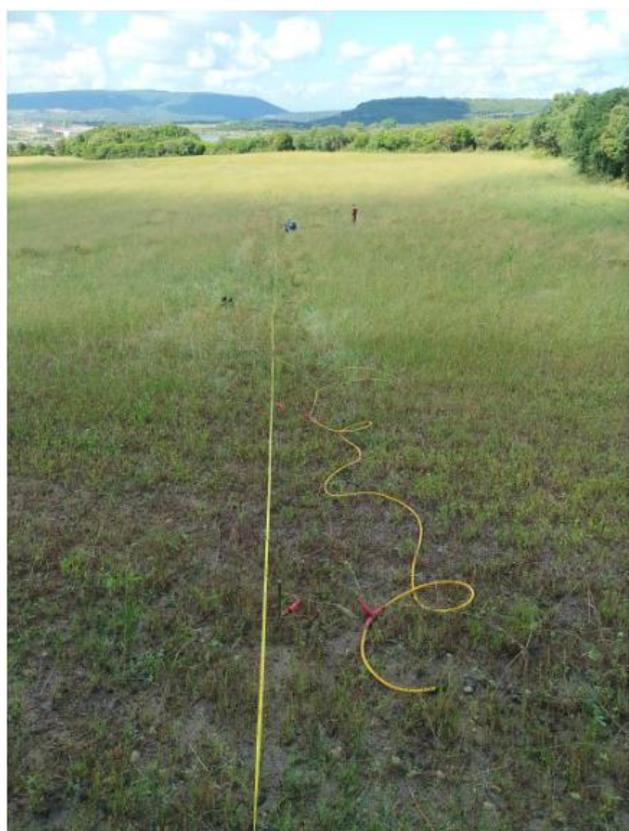
**Tomografia Elettrica SMT01  
dall'elettrodo 1 all'elettrodo 32**



**Tomografia Elettrica SMT01  
dal centro all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica SMT01  
dall'elettrodo 32 all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica SMT01  
dal centro all'elettrodo 32**



## STENDIMENTO SMT01

**Sismica a Rifrazione/Masw SMT01  
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica a Rifrazione/Masw SMT01  
dal centro al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione/Masw SMT01  
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione/Masw SMT01  
dal centro al Geofono 24**



## STENDIMENTO ST02

**Tomografia Elettrica ST02  
dall'elettrodo 1 all'elettrodo 32**



**Tomografia Elettrica ST02  
dal centro all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica ST02  
dall'elettrodo 32 all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica ST02  
dal centro all'elettrodo 32**



## STENDIMENTO ST02

**Sismica a Rifrazione ST02  
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica a Rifrazione ST02  
dal centro al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione ST02  
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione ST02  
dal centro al Geofono 24**



## STENDIMENTO ST03

**Tomografia Elettrica ST03  
dall'elettrodo 1 all'elettrodo 32**



**Tomografia Elettrica ST03  
dal centro all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica ST03  
dall'elettrodo 32 all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica ST03  
dal centro all'elettrodo 32**



## STENDIMENTO ST03

**Sismica a Rifrazione ST03  
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica a Rifrazione ST03  
dal centro al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione ST03  
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione ST03  
dal centro al Geofono 24**

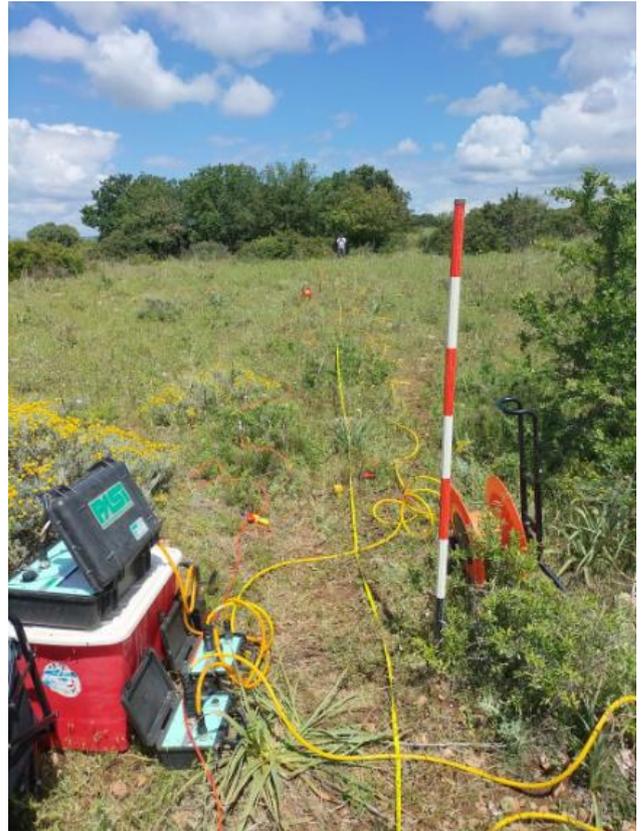


## STENDIMENTO SMT04

**Tomografia Elettrica SMT04  
dall'elettrodo 1 all'elettrodo 32**



**Tomografia Elettrica SMT04  
dal centro all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica SMT04  
dall'elettrodo 32 all'elettrodo 1**



**Tomografia Elettrica SMT04  
dal centro all'elettrodo 32**



**STENDIMENTO SMT04**

**Sismica a Rifrazione/Masw SMT04  
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica a Rifrazione/Masw SMT04  
dal centro al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione/Masw SMT04  
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica a Rifrazione/Masw SMT04  
dal centro al Geofono 24**

