

PARCO EOLICO "ALIENTU"

COMUNE DI SEUI

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

ELABORAZIONI SIA

Relazione indagini geofisiche

Codice elaborato:

SE_SIA_AII.01

Data: Febbraio 2024

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.

Dott. Geol. Andrea Carcangiu

rev.	data	descrizione revisione	rev.	data	descrizione revisione
00	07/02/2024	Emesso per procedura di VIA			

COMUNE DI SEUI
PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA

RELAZIONE TECNICA SULLE
INDAGINI GEOFISICHE
(M.A.S.W - Sismica a Rifrazione)

*Realizzazione di un Parco Eolico sito in agro
del comune di Seui (SU)*

N° Tavola	Scala Disegno	Data	Data Aggiornamento	Redatto:
R1	varie	18/10/2023	--	A.Carcangiu M. Usai

Oggetto:	Scala Plottaggio	CTB
RELAZIONE TECNICA	1.1	--

Committente:

FAD SYSTEM S.r.l.- Società di Ingegneria
Via Argiolas n.134, 09124, Cagliari (CA)
P.I. 03167950926

Cantiere: Comune di Seui (SU)



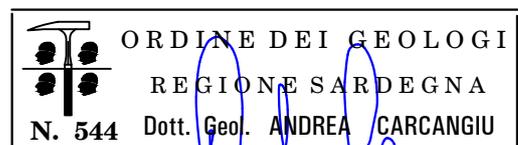
GEOSERVICE

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;
PEC: geoservice.sas@pec.it
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.....	3
3	RILIEVO TOPOGRAFICO	3
4	INDAGINI SISMICHE: MASW.....	9
4.1	Tecnica e parametri utilizzati	9
4.2	Strumentazione utilizzata.....	10
4.3	Elaborazione dei dati.....	10
4.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018).....	12
4.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI.....	14
4.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE.....	15
5	SISMICA A RIFRAZIONE.....	17
5.1	Strumentazione utilizzata.....	17
5.2	Elaborazione dei dati.....	18
5.3	Valutazione della escavabilità delle rocce.....	21
6	RISULTATI INDAGINI MASW	23
6.1	MASW M1 (SE-SM01).....	23
6.2	MASW M4 (SE_SM04).....	25
7	RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE	27
7.1.1	Sismica a Rifrazione R1 (SE_SM01)	27
7.1.2	Sismica a Rifrazione R2 (SE_SM02)	29
7.1.3	Sismica a Rifrazione R3 (SE_SM03)	31
7.1.4	Sismica a Rifrazione R4 (SE_SM04)	33
8	INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI.....	35
9	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	36

1 PREMESSA

La presente relazione redatta su incarico della "FAD SYSTEM S.r.l. – Società di Ingegneria" per conto di Sarda Eolica Srl, descrive le attività di indagini geofisiche per il progetto di realizzazione di un Parco Eolico sito in agro del Comune di Seui (SU).

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica; 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.

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.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini – scala 1:40.000
- 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 10 e 11 ottobre 2023:

1. Esecuzione di n°4 stendimenti complessivi, lungo i quali sono state realizzare le seguenti acquisizioni:
 - n°2 stendimenti costituiti da sismica con tecnica MASW
 - n°4 stendimenti costituiti da sismica con tecnica a rifrazione in onde P
 - le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni
2. Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot) 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 (tra parentesi la denominazione indicata nel Piano Indagini Geognostiche) la direzione di esecuzione (da geofono iniziale a finale) e la loro lunghezza complessiva.

Tabella 1. Quadro riassuntivo delle indagini svolte

Stendimento	Metodologie	Orientamento	Geofoni	Interdistanza (m)	Lunghezza (m)
R1 (SE_SM01)	Rifrazione	NNO-SSE	24	3,0	72,0
R2 (SE_SM02)	Rifrazione	SO-NE	24	3,0	72,0
R3 (SE_SM03)	Rifrazione	NO-SE	24	3,0	72,0
R4 (SE_SM04)	Rifrazione	ONO-ESE	24	3,0	72,0
M1 (SE_SM01)	MASW	NNO-SSE	24	3,0	69,0
M4 (SE_SM04)	MASW	ONO-ESE	24	3,0	69,0

3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Di seguito si riportano i dati del rilievo topografico in termini di coordinate Gauss Boaga e quote assolute in m s.l.m. e relative in m da p.c. eseguito tramite GPS differenziale Stonex S70G di ciascun geofono e shot/energizzazione degli stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e MASW.

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 (SE_SM01)

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	QA: Quota Assoluta (m.s.l.m)	QR: Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1531478,03	4401728,94	821,40	0,46
G1	0,00	1531476,26	4401729,29	821,53	0,59
G2	3,00	1531473,43	4401729,72	821,67	0,73
G3	6,00	1531470,65	4401730,13	821,79	0,85
S2	7,50	1531469,23	4401730,31	821,82	0,88
G4	9,00	1531467,82	4401730,50	821,86	0,92
G5	12,00	1531464,75	4401731,36	822,02	1,08
G6	15,00	1531461,70	4401732,00	822,12	1,18
S3	16,50	1531460,29	4401732,24	822,12	1,18
G7	18,00	1531458,87	4401732,48	822,11	1,17
G8	21,00	1531456,01	4401733,05	822,02	1,08
G9	24,00	1531453,04	4401733,70	821,97	1,03
S4	25,50	1531451,49	4401734,03	821,96	1,02
G10	27,00	1531449,94	4401734,36	821,95	1,01
G11	30,00	1531447,17	4401734,87	821,91	0,96
G12	33,00	1531444,11	4401735,47	821,76	0,81
S5	34,50	1531442,64	4401735,81	821,68	0,74
G13	36,00	1531441,18	4401736,15	821,60	0,66
G14	39,00	1531438,30	4401736,62	821,43	0,49
G15	42,00	1531435,30	4401737,31	821,40	0,46
S6	43,50	1531433,86	4401737,59	821,41	0,47
G16	45,00	1531432,41	4401737,86	821,42	0,48
G17	48,00	1531429,33	4401738,32	821,36	0,42
G18	51,00	1531426,55	4401739,13	821,30	0,36
S7	52,50	1531425,05	4401739,46	821,32	0,38
G19	54,00	1531423,55	4401739,78	821,34	0,40
G20	57,00	1531420,61	4401740,10	821,38	0,43
G21	60,00	1531417,66	4401740,88	821,34	0,39
S8	61,50	1531416,23	4401741,14	821,32	0,38
G22	63,00	1531414,81	4401741,40	821,30	0,36
G23	66,00	1531411,83	4401741,96	821,17	0,22
G24	69,00	1531409,09	4401742,64	821,03	0,09
S9	70,50	1531407,46	4401742,97	820,94	0,00

Profilo topografico R/1

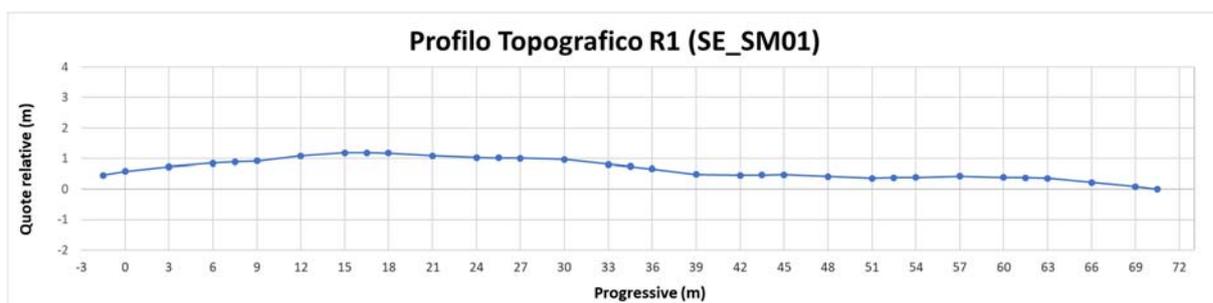


Tabella 3. Dati topografici sismica a rifrazione R2 (SE_SM02)

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1532040,817	4400850,151	775,12	0,24
G1	0,00	1532041,69	4400851,49	775,14	0,26
G2	3,00	1532043,17	4400854,04	775,10	0,22
G3	6,00	1532044,73	4400856,57	775,03	0,14
S2	7,50	1532045,63	4400857,82	775,00	0,12
G4	9,00	1532046,53	4400859,07	774,98	0,10
G5	12,00	1532048,17	4400861,52	774,90	0,02
G6	15,00	1532049,74	4400864,13	774,96	0,08
S3	16,50	1532050,54	4400865,39	774,96	0,08
G7	18,00	1532051,34	4400866,65	774,96	0,08
G8	21,00	1532052,96	4400869,07	774,90	0,02
G9	24,00	1532054,65	4400871,71	774,89	0,01
S4	25,50	1532055,45	4400872,91	774,88	0,00
G10	27,00	1532056,25	4400874,11	774,88	0,00
G11	30,00	1532058,03	4400876,64	774,98	0,10
G12	33,00	1532059,54	4400878,91	774,98	0,10
S5	34,50	1532060,46	4400880,25	775,01	0,13
G13	36,00	1532061,38	4400881,60	775,04	0,16
G14	39,00	1532062,77	4400884,15	775,08	0,20
G15	42,00	1532064,40	4400886,55	775,12	0,24
S6	43,50	1532065,25	4400887,77	775,18	0,30
G16	45,00	1532066,10	4400888,99	775,23	0,35
G17	48,00	1532067,83	4400891,55	775,36	0,48
G18	51,00	1532069,62	4400893,89	775,44	0,56
S7	52,50	1532070,41	4400895,18	775,48	0,60
G19	54,00	1532071,21	4400896,48	775,51	0,63
G20	57,00	1532072,86	4400898,94	775,61	0,73
G21	60,00	1532074,53	4400901,42	775,66	0,78
S8	61,50	1532075,41	4400902,66	775,70	0,82
G22	63,00	1532076,28	4400903,90	775,73	0,85
G23	66,00	1532077,92	4400906,39	775,77	0,89
G24	69,00	1532079,64	4400908,75	775,87	0,99
S9	70,50	1532080,451	4400910,097	775,91	1,03

Profilo topografico R/2

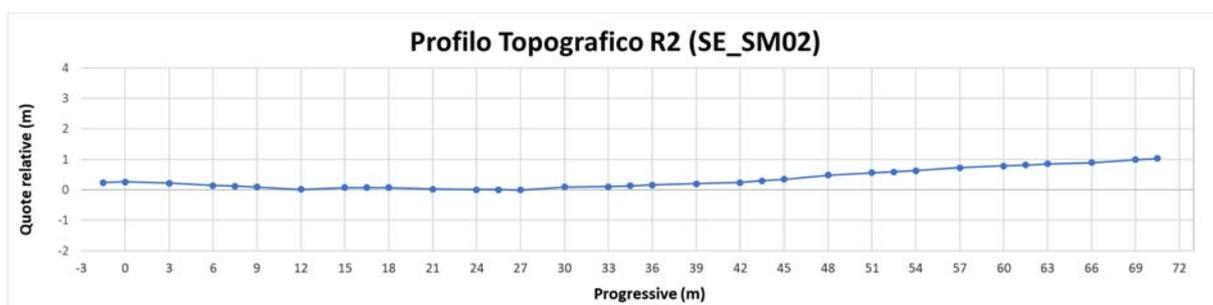


Tabella 4. Dati topografici sismica a rifrazione R3 (SE_SM03)

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1531840,60	4403030,12	822,41	0,00
G1	0,00	1531842,51	4403026,60	822,64	0,23
G2	3,00	1531844,24	4403023,92	822,85	0,44
G3	6,00	1531845,83	4403021,57	823,08	0,67
S2	7,50	1531846,78	4403020,41	823,20	0,79
G4	9,00	1531847,74	4403019,24	823,32	0,91
G5	12,00	1531849,45	4403016,64	823,60	1,20
G6	15,00	1531851,13	4403014,15	823,83	1,43
S3	16,50	1531852,02	4403012,92	823,95	1,54
G7	18,00	1531852,91	4403011,69	824,06	1,66
G8	21,00	1531854,47	4403009,26	824,25	1,84
G9	24,00	1531856,39	4403006,82	824,38	1,98
S4	25,50	1531857,24	4403005,59	824,49	2,08
G10	27,00	1531858,10	4403004,36	824,60	2,19
G11	30,00	1531859,67	4403001,96	824,81	2,40
G12	33,00	1531861,29	4402999,59	825,04	2,64
S5	34,50	1531862,14	4402998,38	825,14	2,73
G13	36,00	1531862,99	4402997,17	825,24	2,83
G14	39,00	1531864,78	4402994,60	825,45	3,05
G15	42,00	1531866,52	4402992,24	825,72	3,32
S6	43,50	1531867,37	4402990,99	825,83	3,42
G16	45,00	1531868,21	4402989,74	825,94	3,53
G17	48,00	1531869,96	4402987,28	826,20	3,79
G18	51,00	1531871,70	4402984,84	826,41	4,01
S7	52,50	1531872,52	4402983,66	826,52	4,12
G19	54,00	1531873,34	4402982,49	826,63	4,23
G20	57,00	1531875,01	4402980,09	826,81	4,40
G21	60,00	1531876,70	4402977,59	826,99	4,58
S8	61,50	1531877,55	4402976,33	827,07	4,67
G22	63,00	1531878,40	4402975,08	827,16	4,75
G23	66,00	1531880,12	4402972,63	827,35	4,94
G24	69,00	1531881,80	4402970,16	827,56	5,15
S9	70,50	1531882,623	4402968,982	827,69	5,29

Profilo topografico R/3

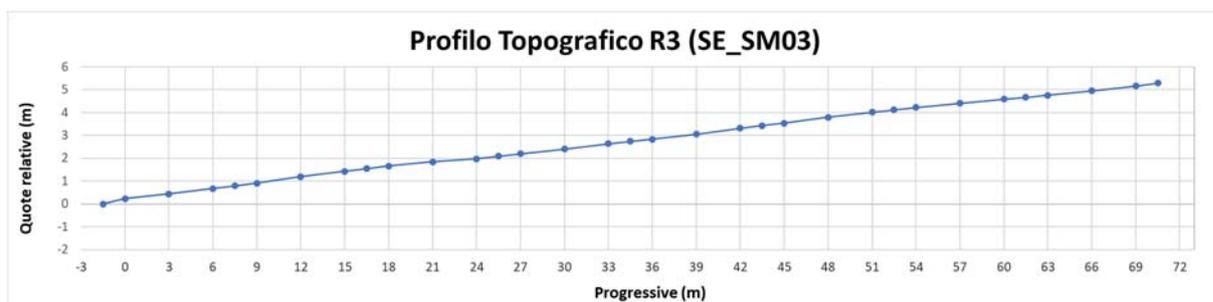
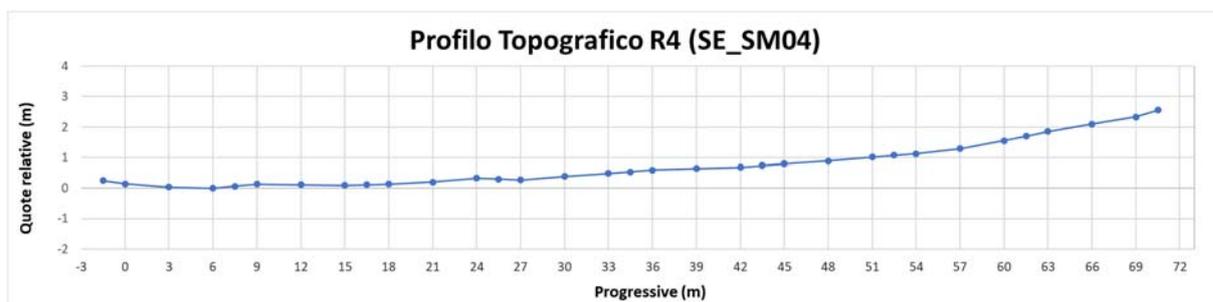


Tabella 5. Dati topografici sismica a rifrazione R4 (SE_SM04)

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,50	1532287,909	4402498,201	868,94	0,25
G1	0,00	1532289,47	4402497,62	868,83	0,15
G2	3,00	1532292,24	4402496,57	868,73	0,04
G3	6,00	1532294,98	4402495,44	868,68	0,00
S2	7,50	1532296,36	4402494,87	868,75	0,07
G4	9,00	1532297,74	4402494,30	868,82	0,14
G5	12,00	1532300,48	4402493,23	868,80	0,12
G6	15,00	1532303,26	4402491,99	868,78	0,10
S3	16,50	1532304,67	4402491,39	868,80	0,12
G7	18,00	1532306,08	4402490,79	868,82	0,13
G8	21,00	1532308,91	4402489,71	868,89	0,20
G9	24,00	1532311,59	4402488,57	869,01	0,33
S4	25,50	1532313,00	4402487,99	868,98	0,30
G10	27,00	1532314,41	4402487,41	868,96	0,27
G11	30,00	1532317,07	4402486,25	869,07	0,39
G12	33,00	1532319,77	4402485,09	869,17	0,49
S5	34,50	1532321,22	4402484,49	869,22	0,54
G13	36,00	1532322,66	4402483,90	869,27	0,59
G14	39,00	1532325,44	4402482,89	869,33	0,64
G15	42,00	1532328,13	4402481,78	869,37	0,69
S6	43,50	1532329,49	4402481,20	869,42	0,74
G16	45,00	1532330,86	4402480,63	869,48	0,80
G17	48,00	1532333,68	4402479,34	869,57	0,89
G18	51,00	1532336,39	4402478,36	869,70	1,02
S7	52,50	1532337,72	4402477,77	869,75	1,07
G19	54,00	1532339,06	4402477,17	869,81	1,12
G20	57,00	1532341,87	4402476,03	869,97	1,29
G21	60,00	1532344,77	4402474,75	870,23	1,55
S8	61,50	1532346,04	4402474,12	870,38	1,70
G22	63,00	1532347,32	4402473,49	870,53	1,85
G23	66,00	1532350,17	4402472,47	870,78	2,10
G24	69,00	1532352,94	4402471,55	871,01	2,33
S9	70,50	1532355,23	4402470,376	871,24	2,56

Profilo topografico R/4



STENDIMENTO M1 (SE_SM01)

Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1531478,03	4401728,94	821,40
G24	69,00	1531409,09	4401742,64	821,03

STENDIMENTO M4 (SE_SM04)

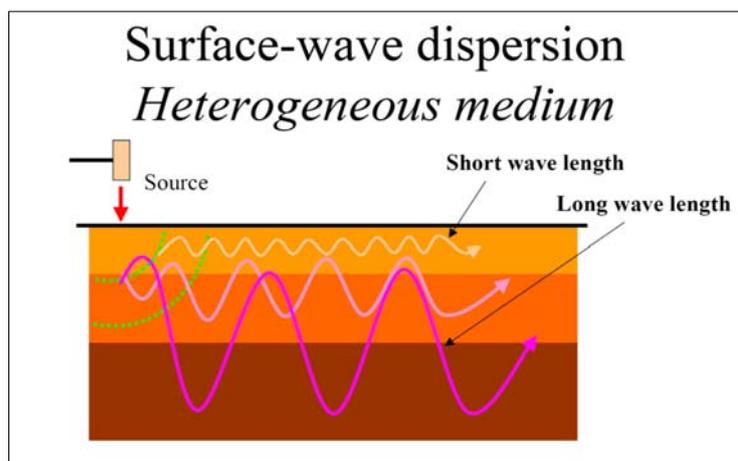
Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota Assoluta (m.s.l.m)
G1	0,00	1532289,47	4402497,62	868,83
G24	69,00	1532352,94	4402471,55	871,01

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 della tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un'energizzazione.



da SAGEEP2003

L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0 m 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 electronic instruments" 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.

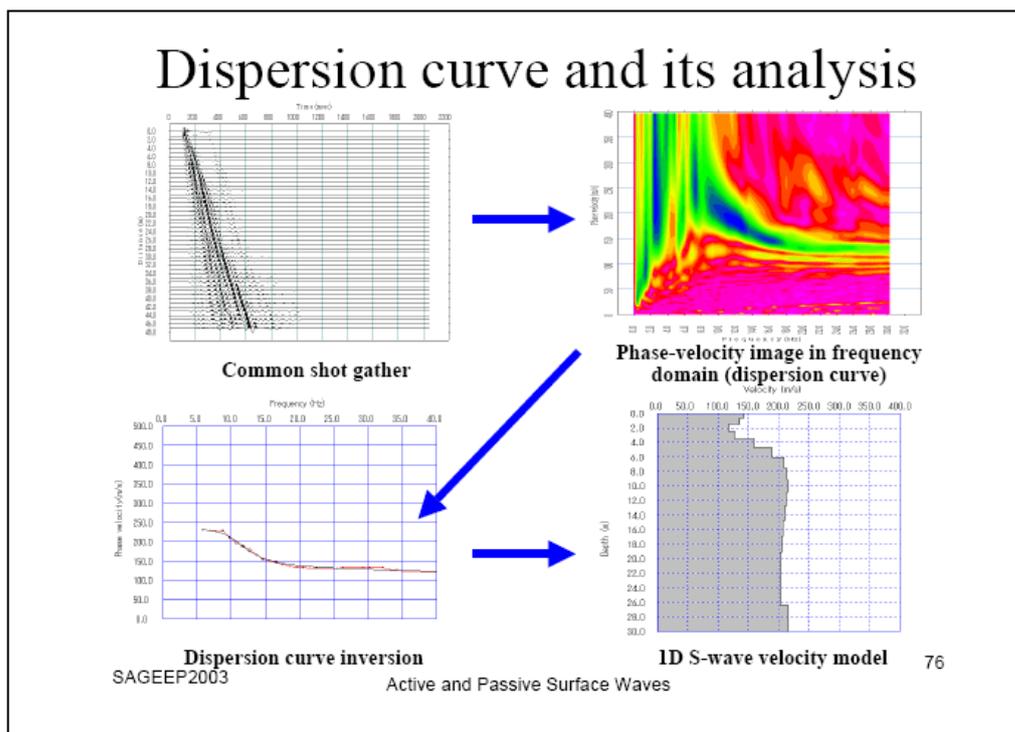
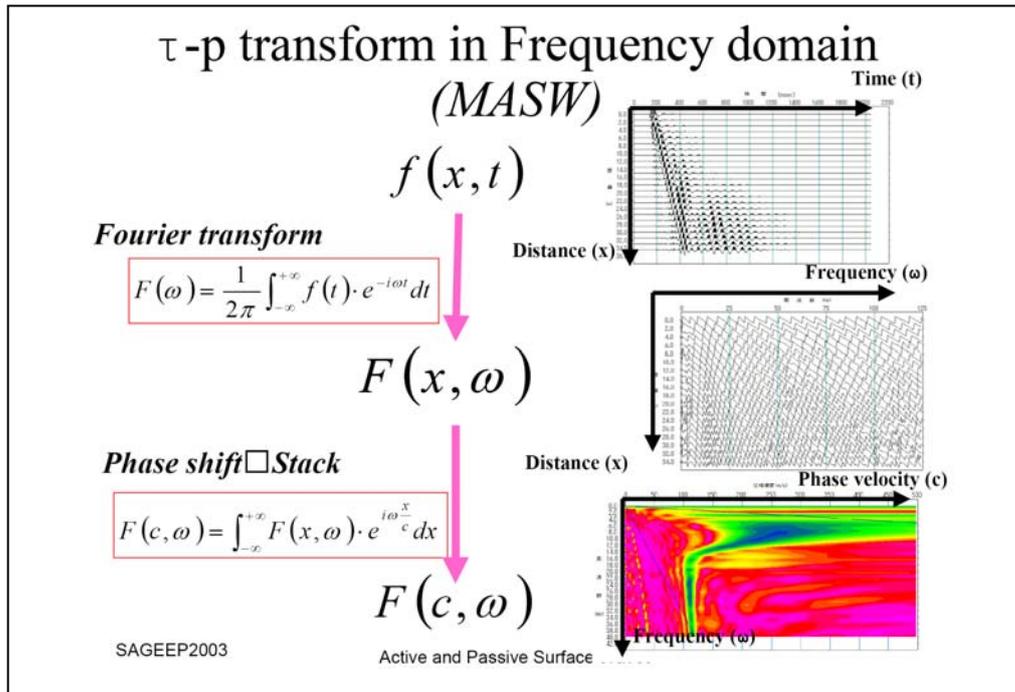
4.3 Elaborazione dei dati

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;

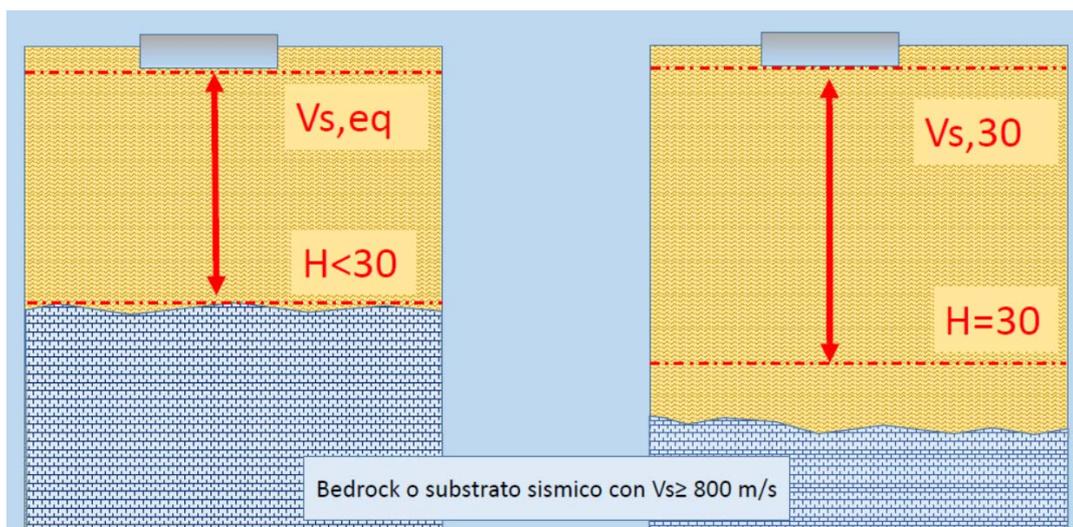
N numero di strati;

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
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.</i>
B	<i>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.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>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.</i>

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
TERRENI E ACQUA		
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
ROCCE SEDIMENTARIE		
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 - 1500
ROCCE IGNEE		
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/cm²:

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

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

Correlazioni con N_{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 α e β 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.

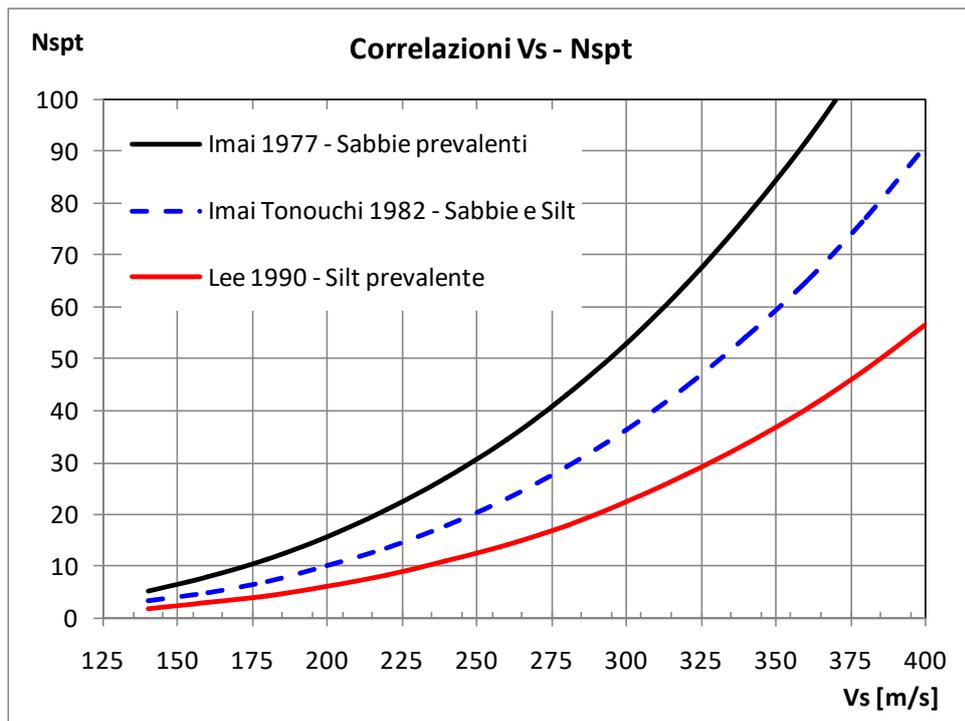
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

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

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

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

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 ϕ	<p><u>Terreni sabbiosi</u> Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&Thornburn, $\phi = 0,28 Nspt + 27,2$ Oltre i 6 m di profondità- Japanese National Railway, $\phi = 0,30 Nspt + 27$</p> <p><u>Terreni: sabbie fini o limose</u> $\phi = \sqrt{15Nspt} + 15$</p>
Modulo di deformazione E (o di Young)	<p>Schmertmann (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi) $E(Kg/cm^2) = 2B Nspt$ dove $B=4$ (sabbia fine), $B=6$ (sabbia media), $B=10$ (sabbia grossolana)</p> <p>D'Appolonia et Alii. (valido per sabbia+ghiaia e sabbie sovraconsolidate) $E (Kg/cm2) = 7,71 Nspt + 191$ (ghiaia + sabbia)</p> <p>Tornaghi (valido per sabbia + ghiaia) $E (MPa) = B SNspt$ ($B=7$ 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.

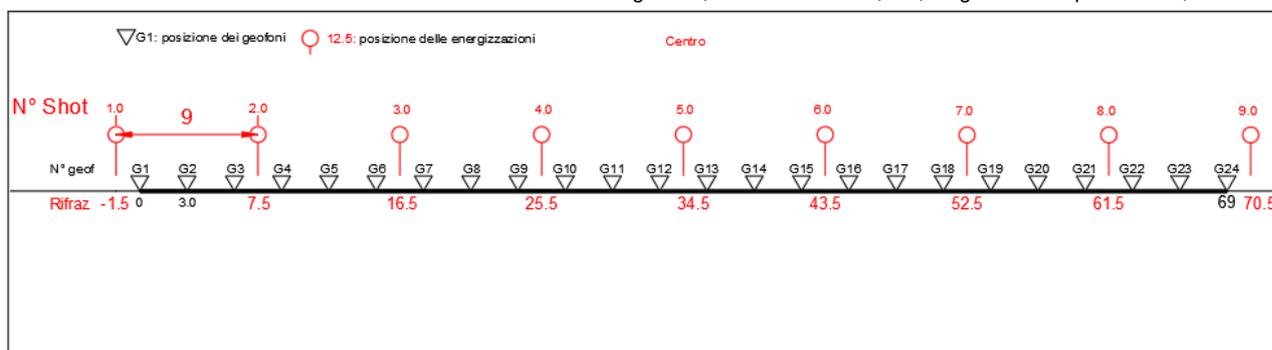
Lo studio della propagazione delle onde sismiche consente di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni e il grado di addensamento e/o la compattezza dei materiali da queste attraversati.

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 10,0 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2,0 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 (SE_SM01)

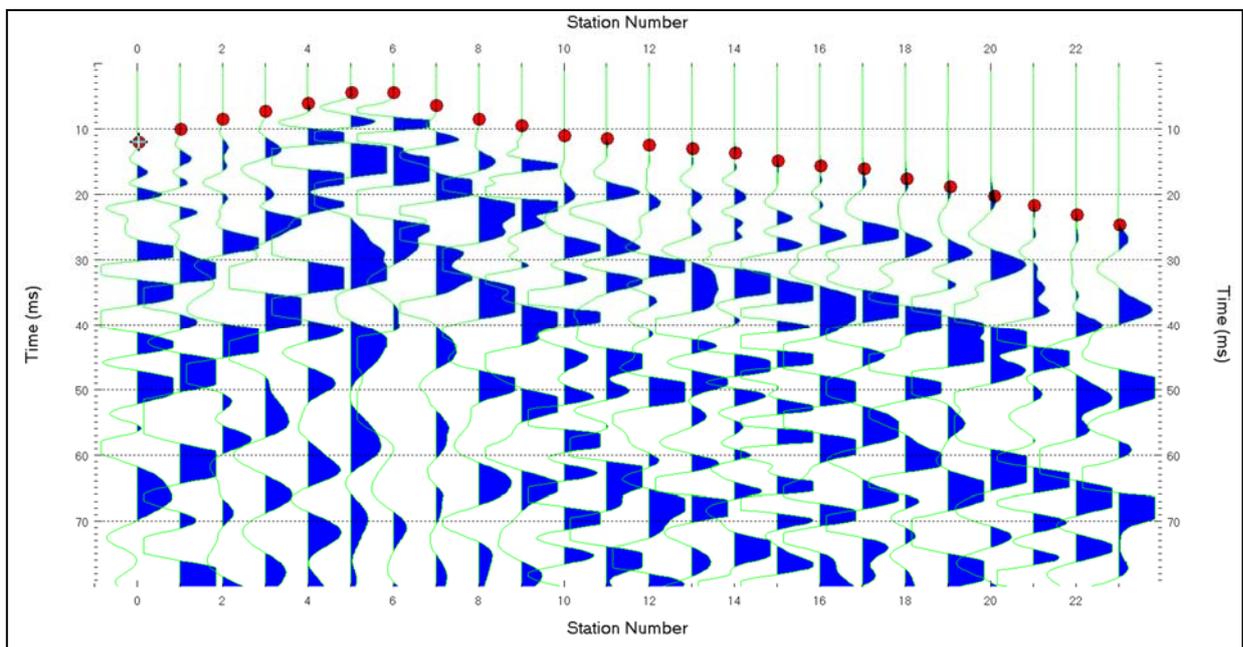


Figura 2: Sismogramma shot a 43,5 m di R1 (SE_SM01)

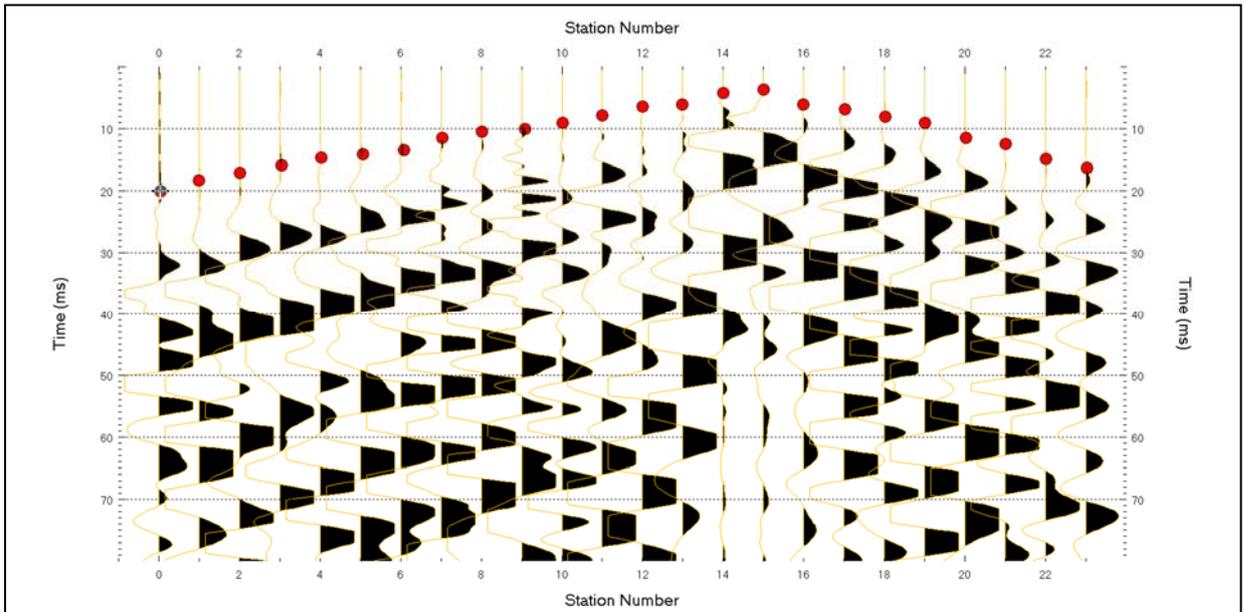


Figura 3: Sismogramma shot a 07,5 m di R2 (SE_SM02)

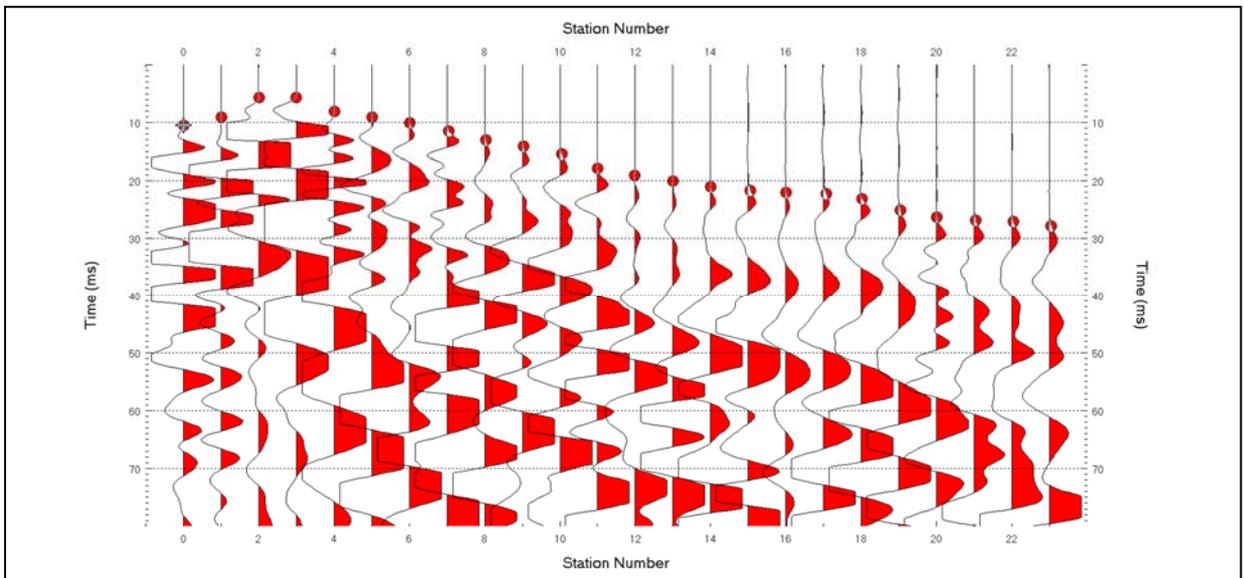


Figura 4: Sismogramma shot a 70,5 m di R2 (SE_SM02)

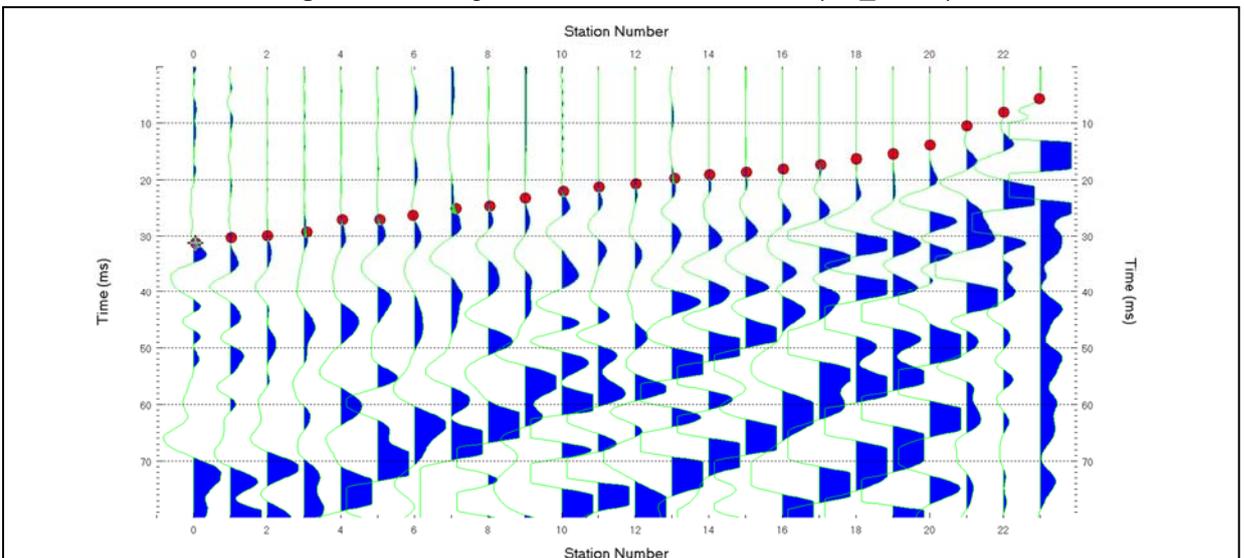


Figura 5: Sismogramma shot a -1,5 m di R3 (SE_SM03)

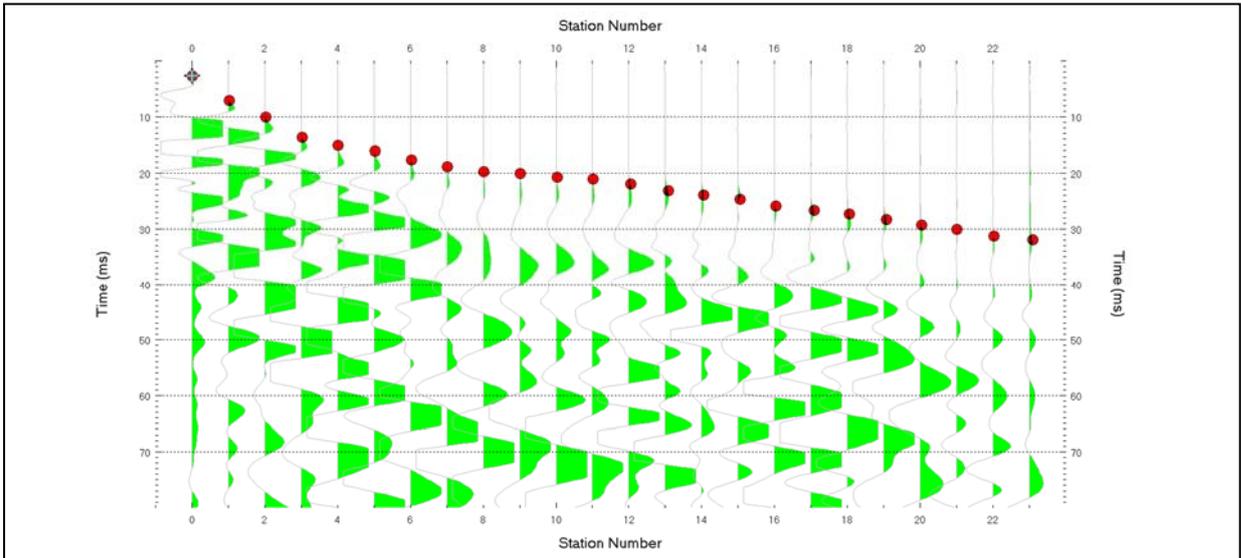


Figura 6: Sismogramma shot a 25,5 m di R4 (SE_SM04)

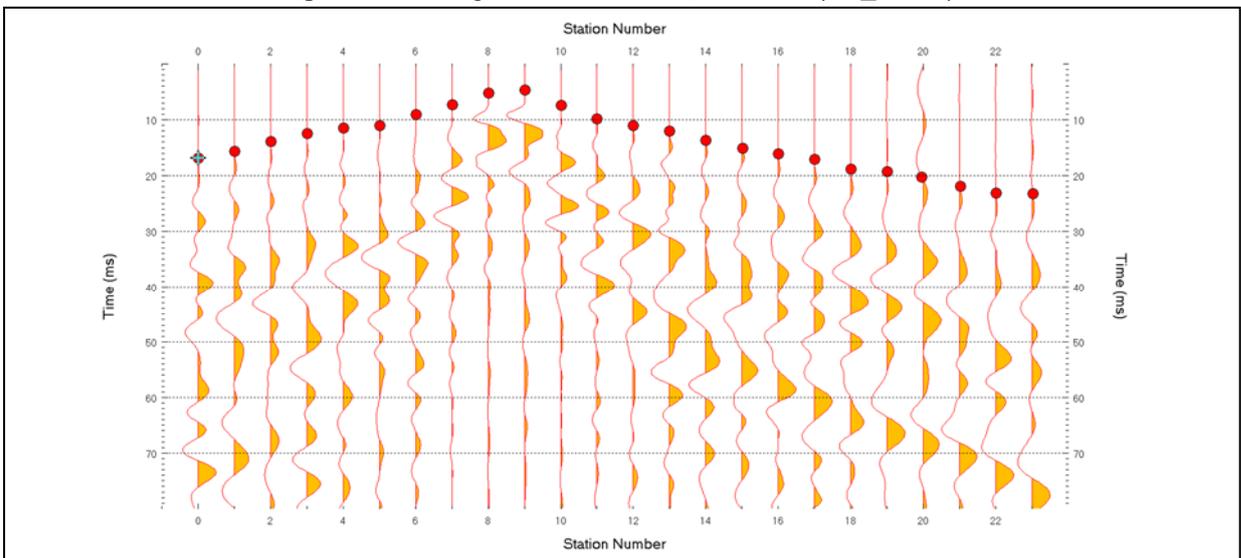
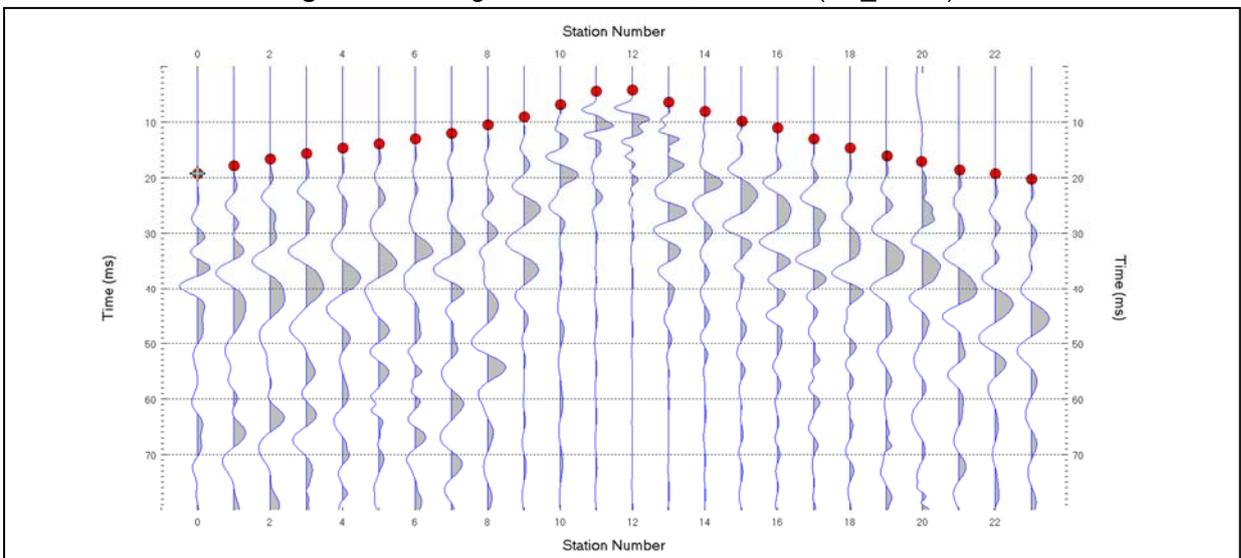


Figura 6: Sismogramma shot a 34,5 m di R4 (SE_SM04)



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*"¹ 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).

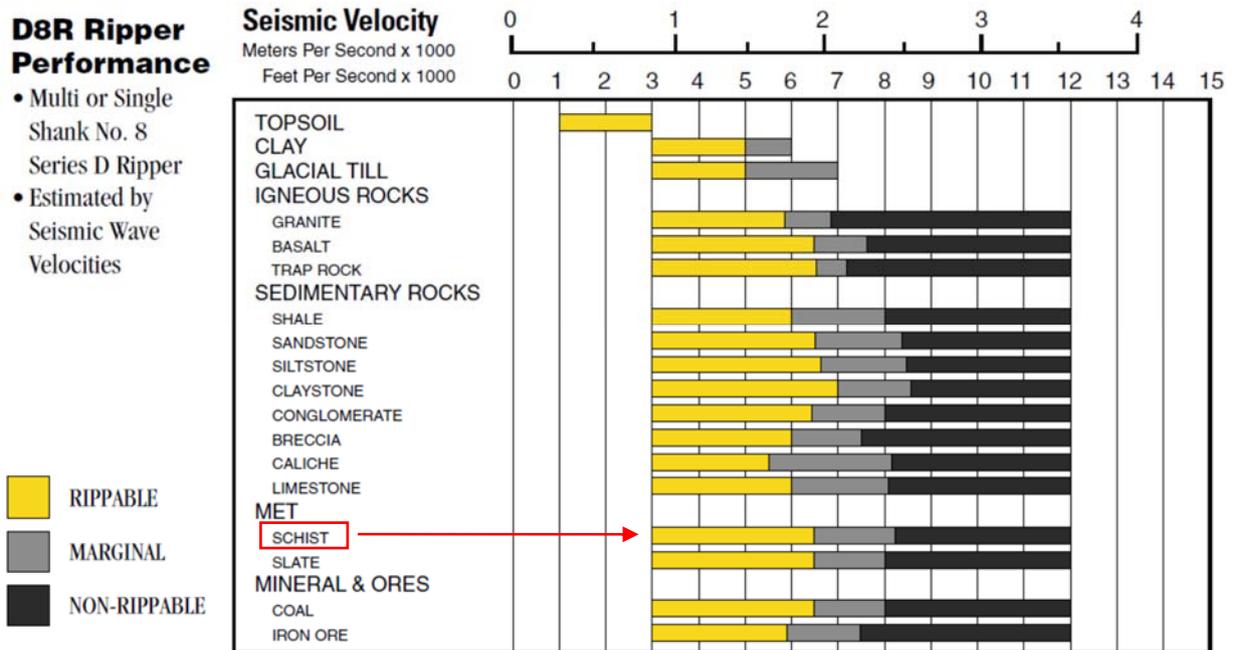
A titolo esaustivo si riportano anche la correlazione utilizzata dal **California Department of Transportation**, che risulta *leggermente più ottimista in termini di scavabilità*:

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

¹twelfth 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.

Sulla base dei dati bibliografici emerge che le aree in esame sono caratterizzate dalla presenza di rocce di origine metamorfica, da protolite sedimentario, sottostanti a modesti spessori di coltri eluvio-colluviali; dall'esame della tabella sotto riportata e relativamente a **scisti (filladi)** per velocità di **1900 m/s** corrispondono materiali già difficilmente rippabili, mentre per velocità oltre **2400 m/s** il mezzo meccanico D8 non è più sufficiente, per cui sarà necessario l'utilizzo di 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



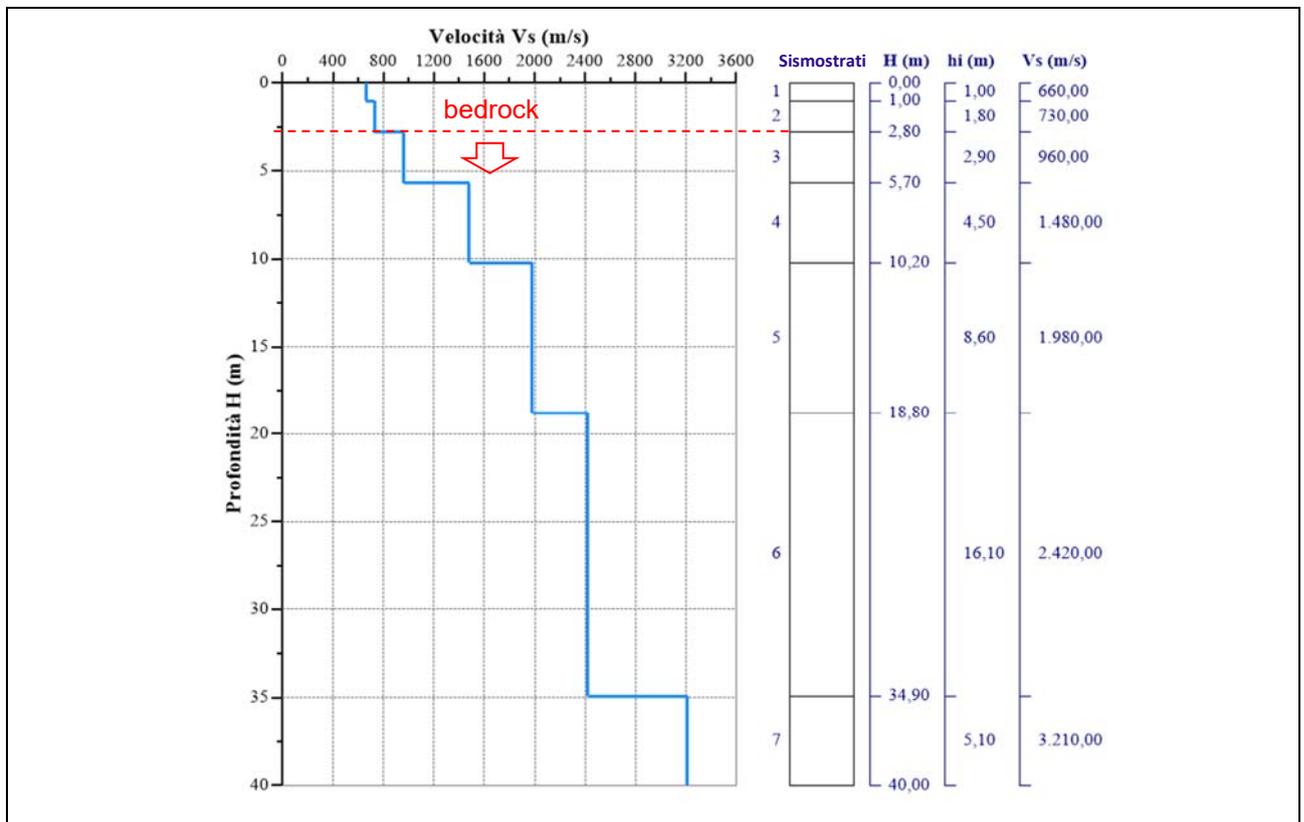
6 RISULTATI INDAGINI MASW

6.1 MASW M1 (SE-SM01)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione M1, 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 660 m/s Terre estremamente addensate
1,0 - 2,8	2° sismostrato con Vs di 730 m/s Terre estremamente addensate
2,8 - 5,7	3° sismostrato con Vs di 960 m/s Substrato roccioso fratturato
5,7 - 10,2	4° sismostrato con Vs di 1480 m/s Substrato roccioso fratturato
10,2 - 18,8	5° sismostrato con Vs di 1980 m/s Substrato roccioso da fratturato a sano
18,8 - 34,9	6° sismostrato con Vs di 2420 m/s Substrato roccioso sano
34,9 - 40,0	7° sismostrato con Vs di 3210 m/s 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	1,00	1,00	660,00	1,00	1,00	0,00152
2	2,80	1,80	730,00	2,80	1,80	0,00247
3	5,70	2,90	960,00	5,70	2,90	
4	10,20	4,50	1480,00	10,20	4,50	
5	18,80	8,60	1980,00	18,80	8,60	
6	34,90	16,10	2420,00	30,00	11,20	
7	40,00	5,10	3210,00	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 evince come profondità del substrato **2,80 m** ($V_s > 800$ m/s); la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 2,80 m di profondità dal p.c. è pari a $V_{s,eq} > 800$ m/s che dà luogo ad una categoria A, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.

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

Nella **tabella 6** 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 6. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	V_p	V_s	Coefficiente di Poisson ν	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 ³]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	1.320	660	0,33	2.089	252	785	2.089
2	1,0 - 2,8	terre	2.000	1.460	730	0,33	2.844	342	1.069	2.844
3	2,8 - 5,7	12%	2.100	1.920	960	0,33	5.158	619	1.932	5.158
4	5,7 - 10,2	12%	2.200	2.960	1480	0,33	12.847	1.542	4.815	12.847
5	10,2 - 18,8	15%	2.350	3.960	1980	0,33	24.566	3.685	9.209	24.566
6	18,8 - 34,9	22%	2.400	4.840	2420	0,33	37.482	8.246	14.053	37.482
7	34,9 - 40,0	25%	2.450	6.420	3210	0,33	67.324	16.831	25.243	67.324

*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

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 si consiglia di impiegare la correlazione *Imai (1977)* di seguito indicata.

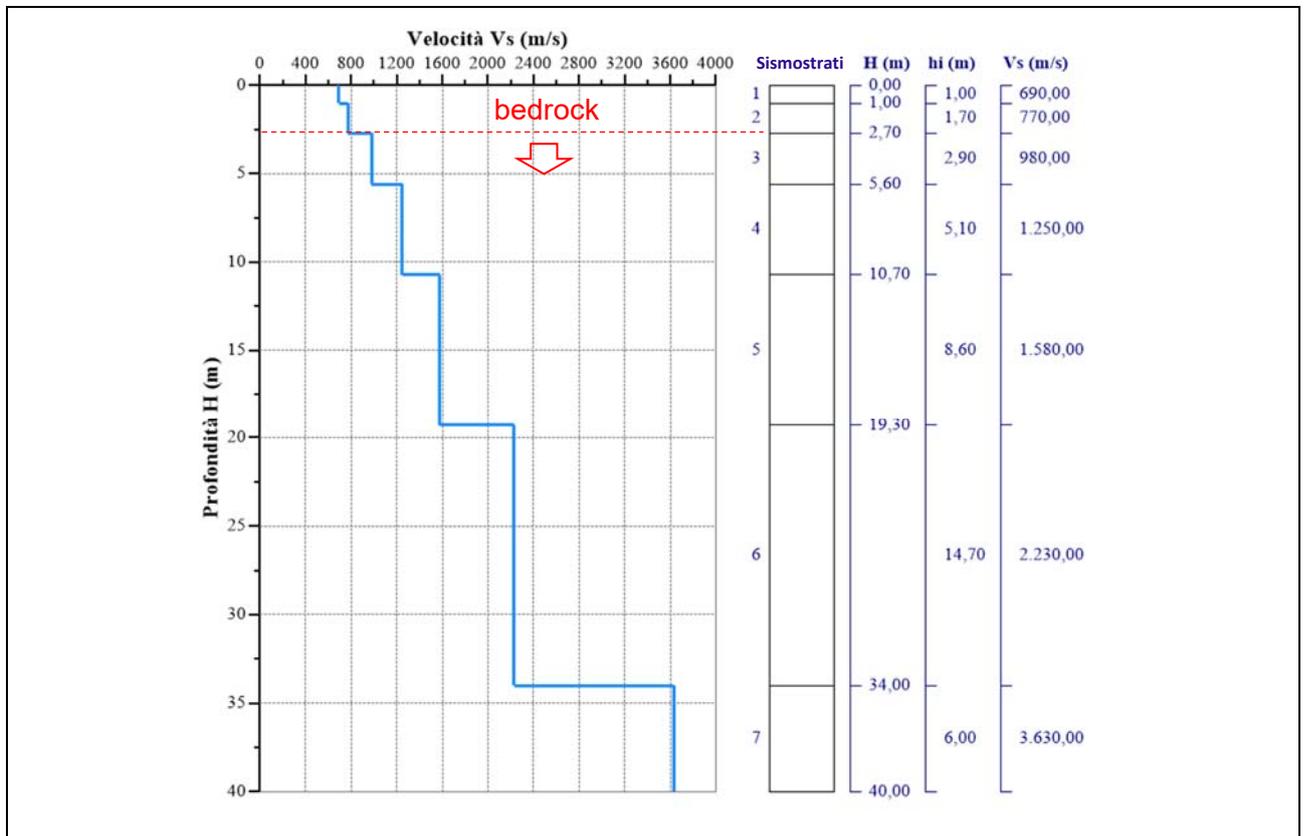
$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

6.2 MASW M4 (SE_SM04)

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione 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 690 m/s Terre estremamente addensate
1,0 - 2,7	2° sismostrato con Vs di 770 m/s Terre estremamente addensate
2,7 - 5,6	3° sismostrato con Vs di 980 m/s Substrato roccioso fratturato
5,6 - 10,7	4° sismostrato con Vs di 1250 m/s Substrato roccioso da fratturato a sano
10,7 - 19,3	5° sismostrato con Vs di 1580 m/s Substrato roccioso da fratturato a sano
19,3 - 34,0	6° sismostrato con Vs di 2230 m/s Substrato roccioso sano
34,0 - 40,0	7° sismostrato con Vs di 3630 m/s Substrato roccioso sano

MASW M2-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	690,00	1,00	1,00	0,00145
2	2,70	1,70	770,00	2,70	1,70	0,00221
3	5,60	2,90	980,00	5,60	2,90	
4	10,70	5,10	1250,00	10,70	5,10	
5	19,30	8,60	1580,00	19,30	8,60	
6	34,00	14,70	2230,00	30,00	10,70	
7	40,00	6,00	3630,00	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 evince come profondità del substrato **2,70 m** ($V_s > 800$ m/s); la velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 2,70 m di profondità dal p.c. è pari a $V_{s,eq} > 800$ m/s che dà luogo ad una categoria A, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.

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

Nella **tabella 7** 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 7. Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	V_p	V_s	Coefficiente di Poisson ν	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 ³]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0 - 1,0	terre	1.800	1.380	690	0,33	2.285	276	853	2.285
2	1,0 - 2,7	terre	2.000	1.540	770	0,33	3.158	381	1.187	3.158
3	2,7 - 5,6	12%	2.100	1.960	980	0,33	5.374	645	2.020	5.374
4	5,6 - 10,7	12%	2.200	2.500	1250	0,33	9.169	1.100	3.442	9.169
5	10,7 - 19,3	15%	2.350	3.160	1580	0,33	15.642	2.346	5.864	15.642
6	19,3 - 34,0	22%	2.400	4.460	2230	0,33	31.823	7.001	11.935	31.823
7	34,0 - 40,0	25%	2.450	7.260	3630	0,33	86.094	21.523	32.284	86.094

*CT: coefficiente di trasformazione (per la roccia)

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 si consiglia di impiegare la correlazione *Imai (1977)* di seguito indicata.

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

7 RISULTATI DELLA SISMICA A RIFRAZIONE

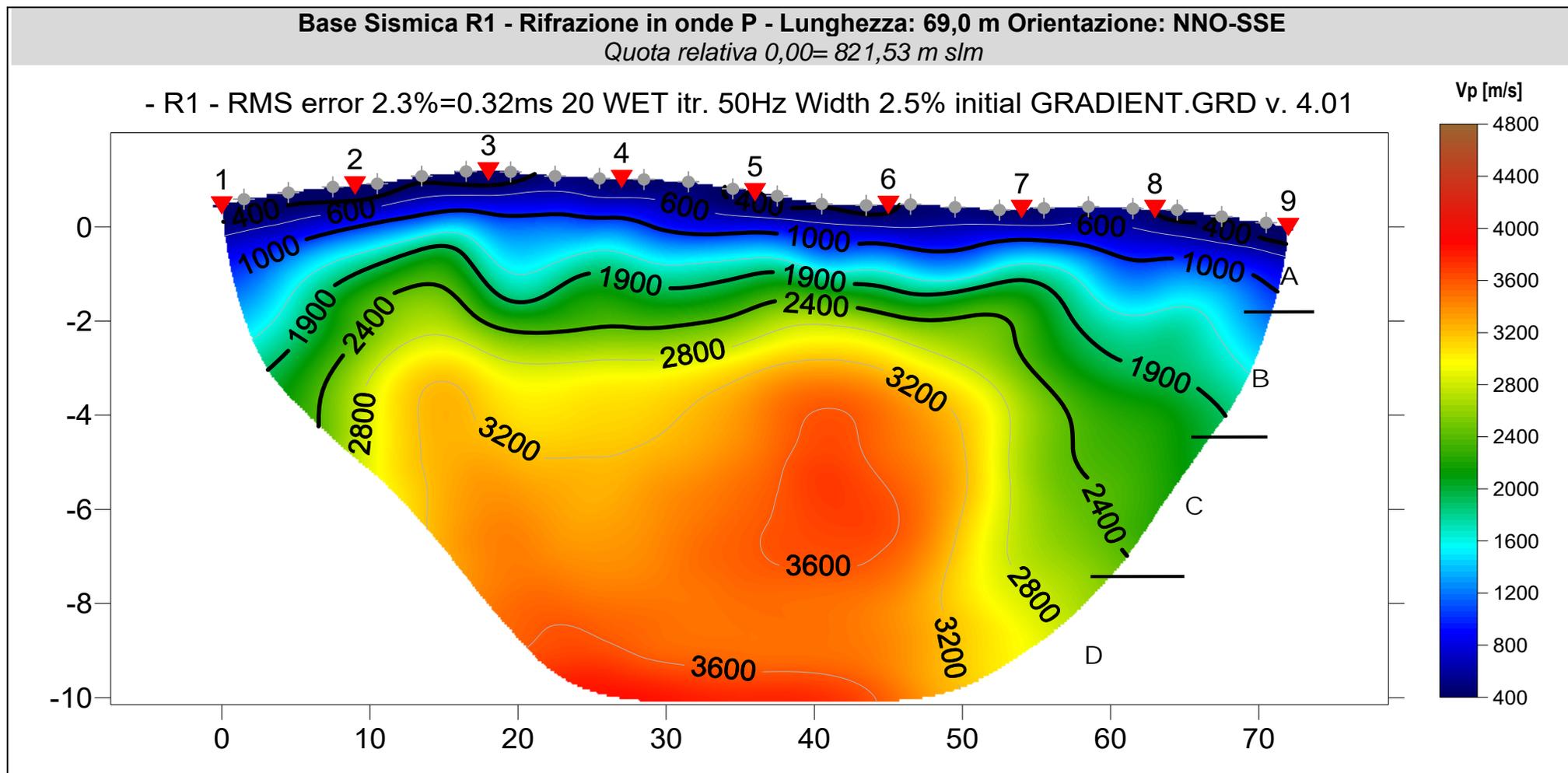
7.1.1 Sismica a Rifrazione R1 (SE_SM01)

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

Stendimento R1	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 0,8/1,2	400-1000
B: Unità delle terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 0,8/1,2 a 1,5/4,0	1000-1900
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 1,5/4,0 a 2,2/7,0	1900-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 2,2/7,0 a 10,1-11,0	2400-3600

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 3600 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 0,8 e 1,2 metri da p.c e un andamento analogo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta un andamento irregolare rispetto al sismostrato precedente e si rileva fino a profondità comprese tra 1,5 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 2,2 e 7,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità Vp medie e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 10,0/11,0 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 1,5 e 4,4 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 2,2 e 7,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



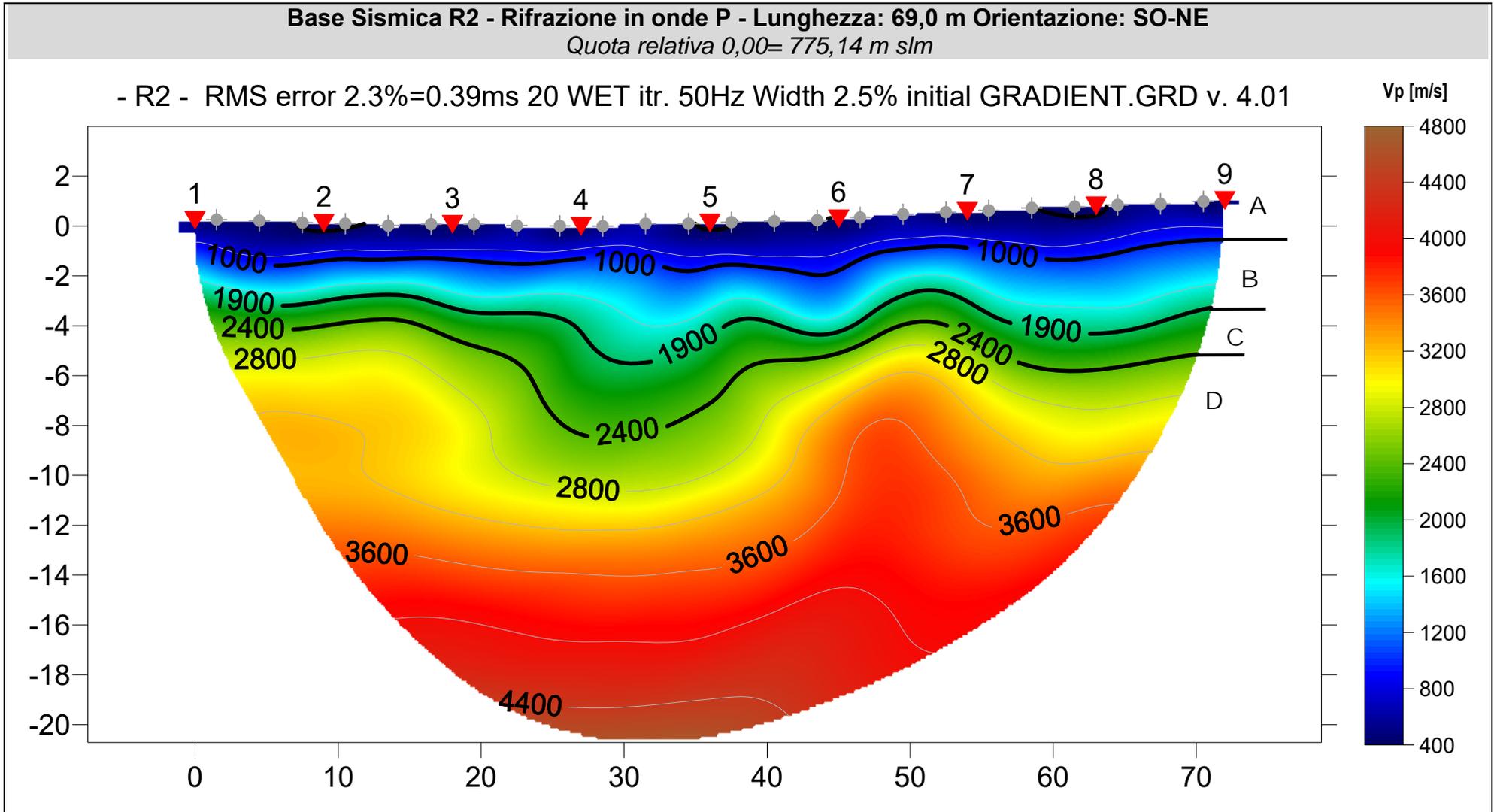
7.1.2 Sismica a Rifrazione R2 (SE_SM02)

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 1,0/2,1	400-1000
B: Unità delle terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,1 a 3,0/5,4	1000-1900
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/5,4 a 4,0/8,2	1900-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 4,0/8,2 a 20,5-23,5	2400-4400

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4400 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 1,0 e 2,1 metri da p.c e un andamento simile al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 5,4 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 4,0 e 8,2 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 20,5/23,5 m dal p.c. 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 roccioso: nello specifico è possibile distinguere una fascia compresa tra le progressive 20 e 40 m caratterizzata da un maggiore grado di fratturazione che determina una minore velocità a parità di profondità.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 5,4 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 4,0 e 8,2 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



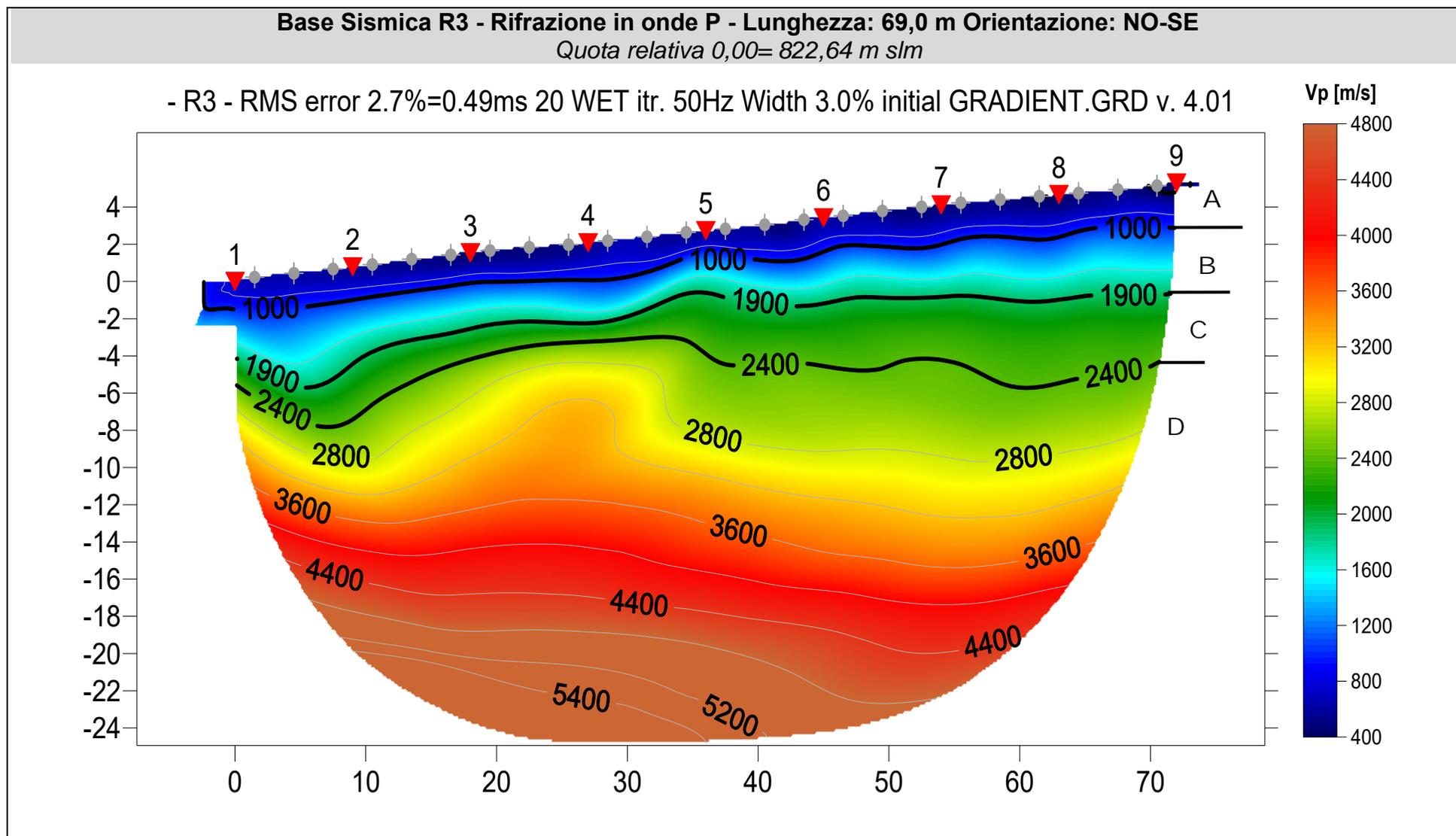
7.1.3 Sismica a Rifrazione R3 (SE_SM03)

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 1,2/2,0	400-1000
B: Unità delle terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,2/2,0 a 3,0/6,0	1000-1900
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/6,0 a 5,2/10,0	1900-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,2/10,0 a 24,5-30,0	2400-5400

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 5400 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 1,2 e 2,0 metri da p.c e un andamento simile al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 6,0 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 5,2 e 10,0 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 24,5/30,0 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 3,0 e 6,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,2 e 10,5 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



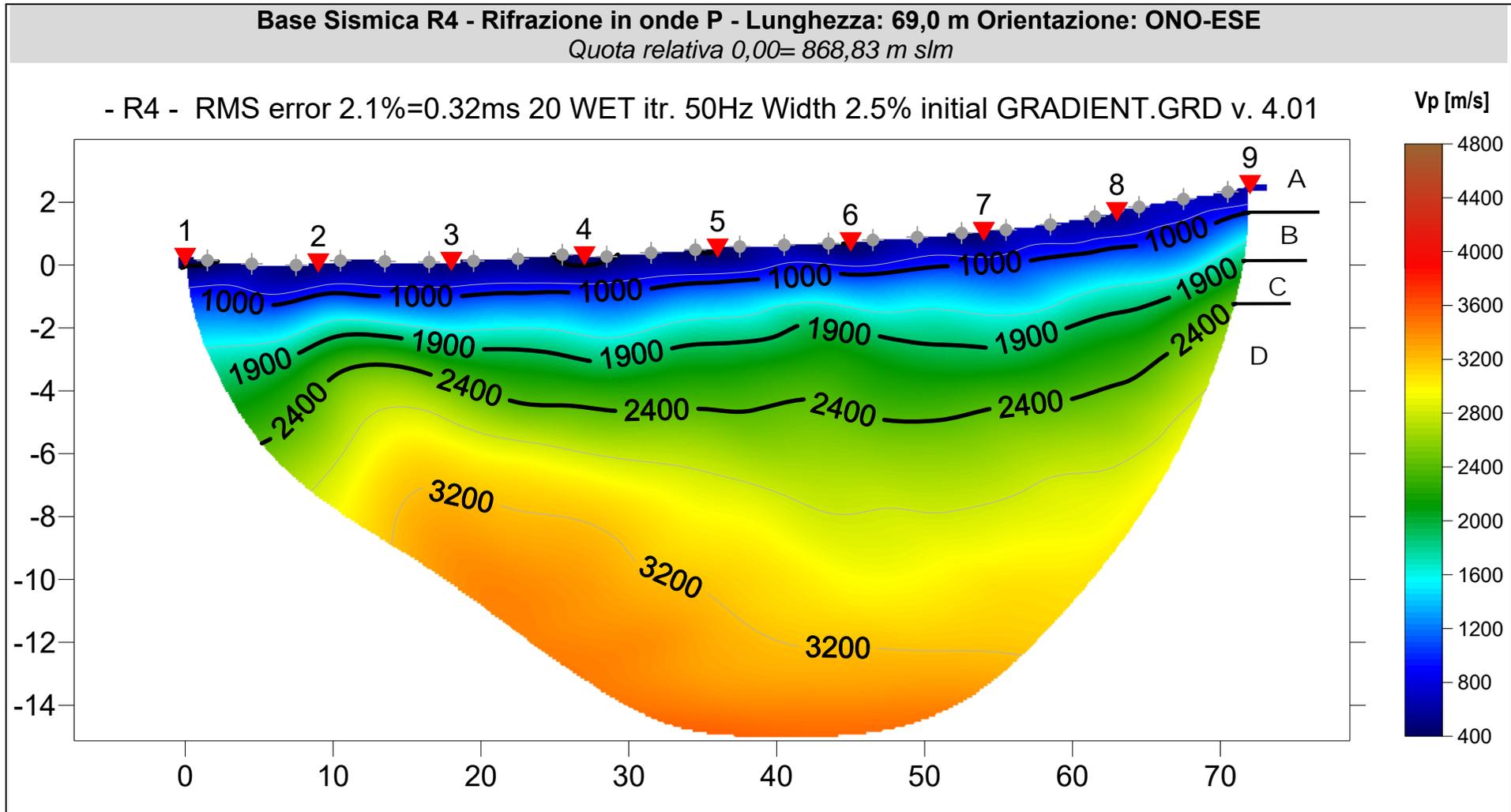
7.1.4 Sismica a Rifrazione R4 (SE_SM04)

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

Stendimento R4	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 0,8/1,2	400-1000
B: Unità delle terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 0,8/1,2 a 2,2/3,8	1000-1900
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,2/3,8 a 3,0/5,5	1900-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 3,0/5,5 a 15,0-17,5	2400-3200

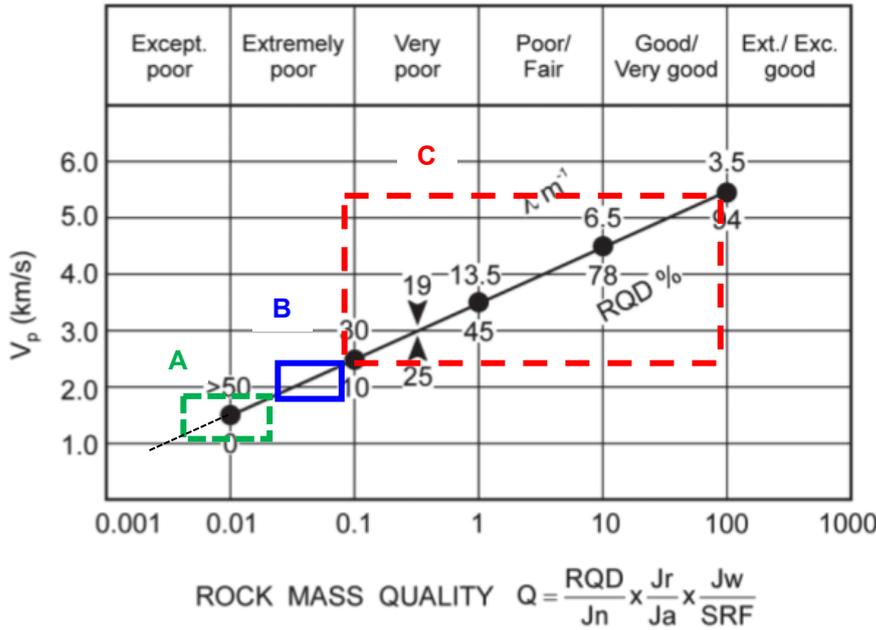
Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3200 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 0,8 e 1,2 metri da p.c e un andamento analogo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da terre molto addensate e/o rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta un andamento leggermente irregolare rispetto al precedente, con leggere variazioni rispetto ai sismostrati adiacenti, riscontrabile fino a profondità comprese tra 2,2 e 3,8 m dal p.c. Il sismostrato C costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 3,0 e 5,5 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile, si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 15,0/17,5 m dal p.c. 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 roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,2 e 3,8 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 3,0 e 5,5 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



8 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 60 e 45 e un indice di qualità Q medio di 0,015 (ammasso roccioso eccezionalmente scadente); il rettangolo blu rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 3 e 8, un numero di fratture per metro compreso tra 45 e 30 e un valore dell'indice Q medio di 0,07 (ammasso roccioso estremamente scadente); infine il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato D che ha valori di RQD compresi tra 8 e 95, un numero di fratture per metro compreso tra 30 e 3,5 e un valore dell'indice Q tra min 0,09 e max 100. 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)	1000-1900	0-3	60-45	0.008-0.04
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	1900-2400	3-8	45-30	0.04-0.09
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	2400-5400	8-95	30-3,5	0.09-100

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

9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

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

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 bedrock 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 (SE_SM01)	2,80	>800	A
M4 (SE_SM02)	2,70	>800	A

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 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 nelle sezioni i terreni risultano rippabili sino a pochi metri di profondità rispetto al piano campagna, specificamente profondità medie comprese tra 2,4 e 4,8 m da piano campagna.

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 18/10/2023

Collaboratori
Dott. Marco Usai

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

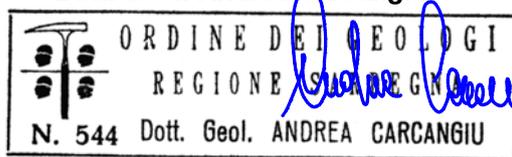


Tavola 1. INQUADRAMENTO GENERALE AREE DI INDAGINE

Progetto: Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Seui (SU)

Scala: 1:40.000

Legenda

 AREE DI INDAGINE

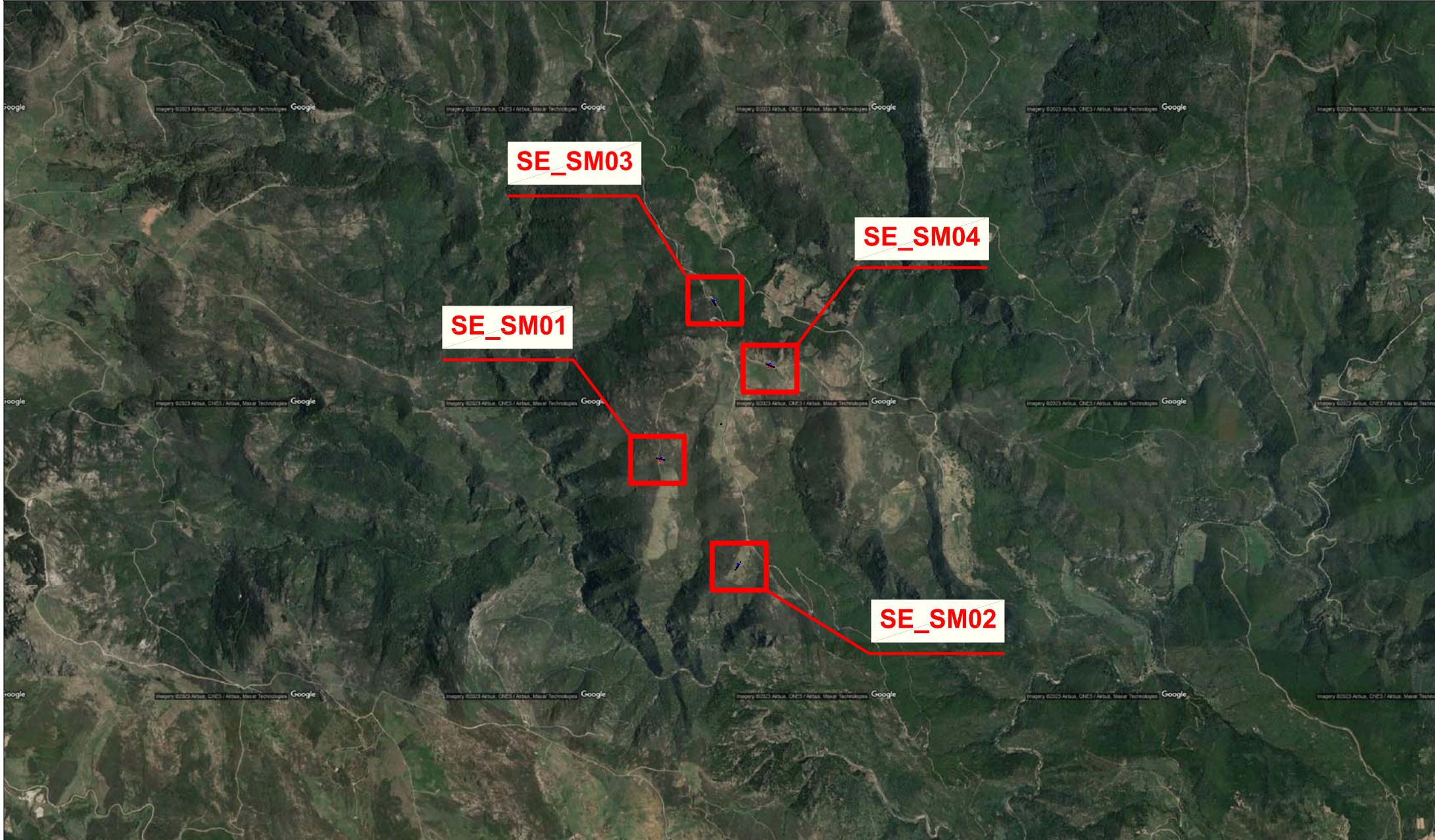


Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SE_SM01)

Progetto: Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Seui (SU)

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento sismica a Rifrazione (R1) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

Stendimento sismico MASW (M1) - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

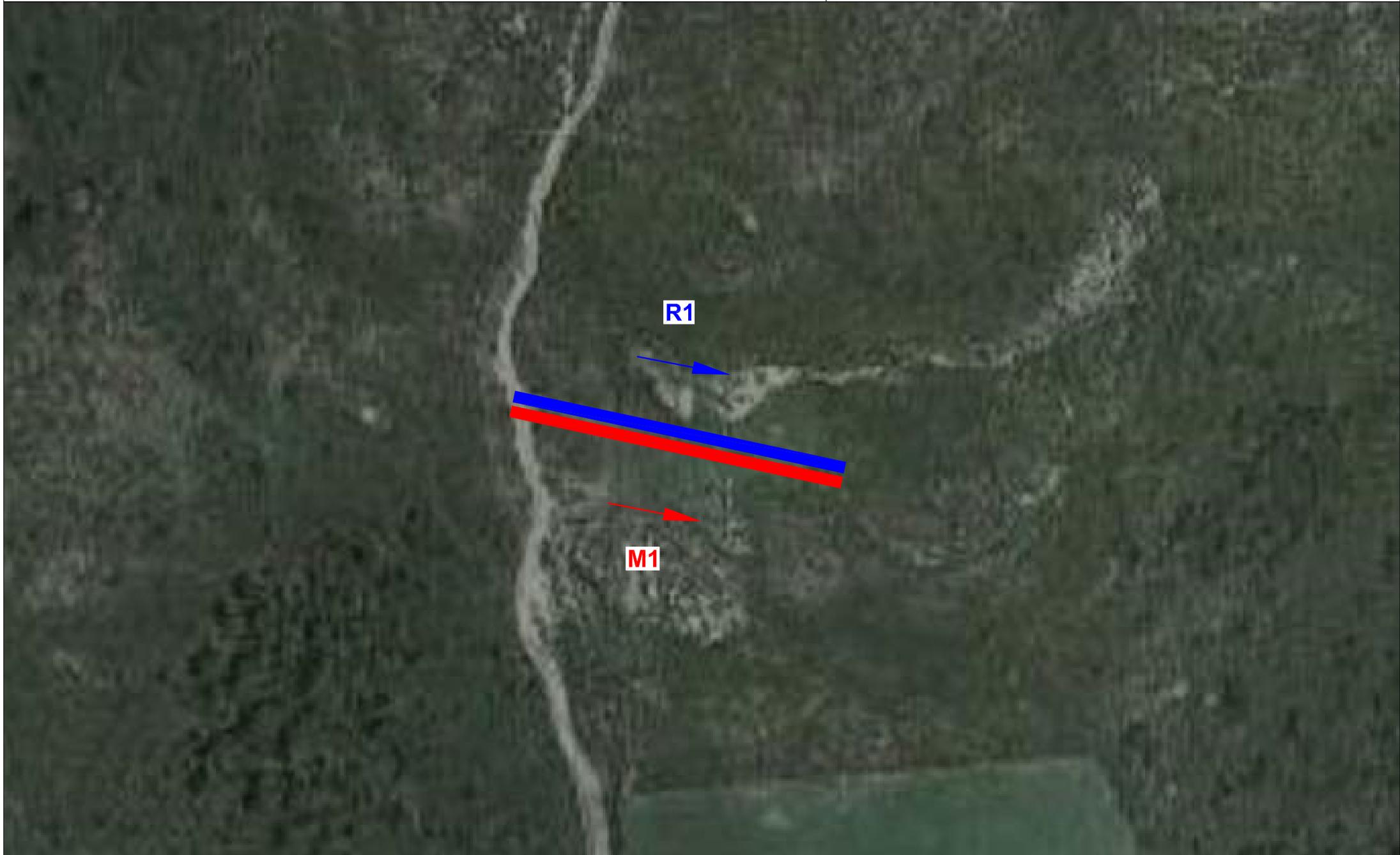


Tavola 3 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SE_SM02)

Progetto: Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Seui (SU)

Scala 1:1000

Legenda

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

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SE_SM03)

Progetto: Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Seui (SU)

Scala 1:1000

Legenda

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

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

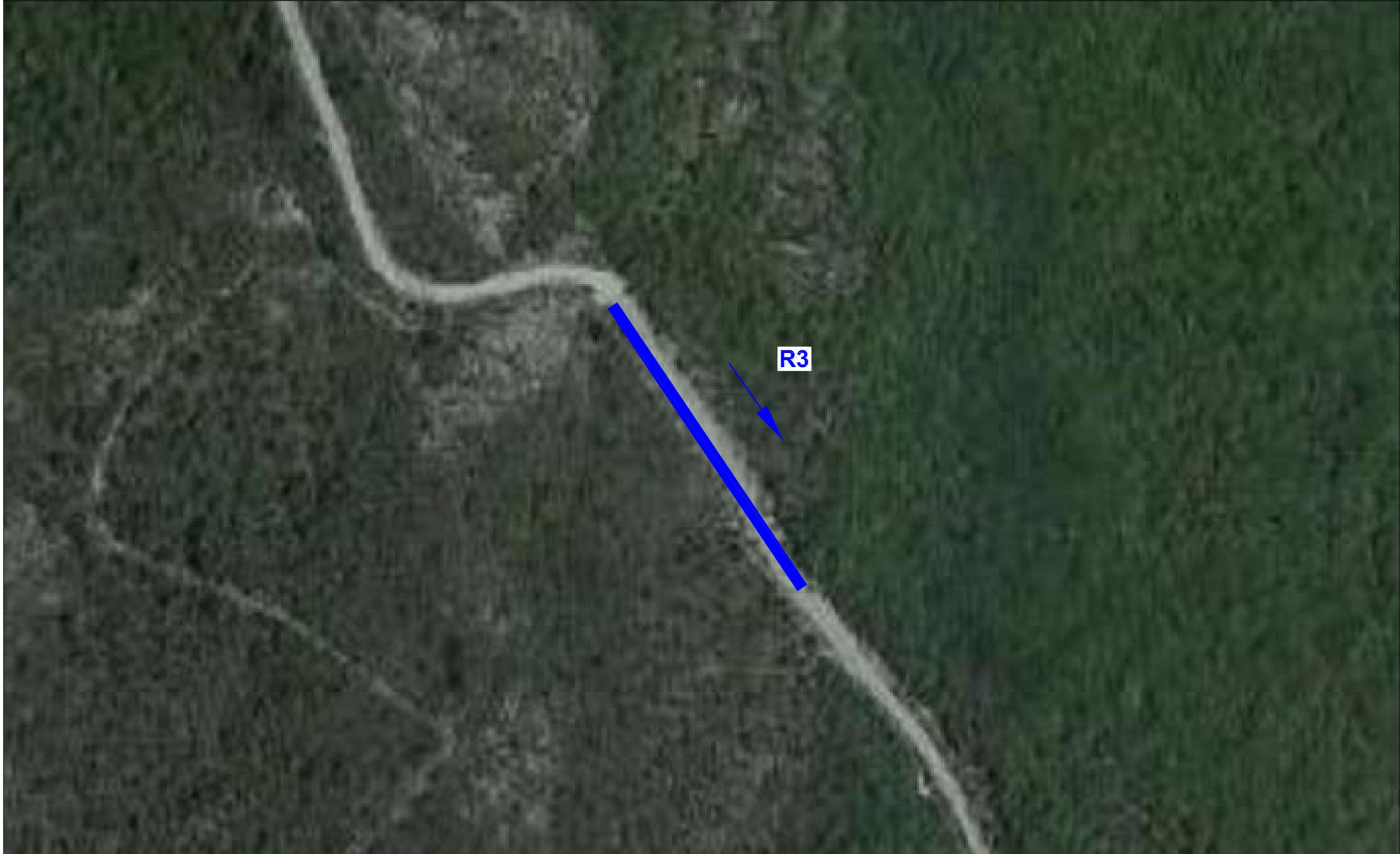


Tavola 5 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SE_SM04)

Progetto: Realizzazione di un Parco Eolico in agro di Seui (SU)

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento sismica a Rifrazione (R4) - Lunghezza = 69,0 m

➡ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

Stendimento sismico MASW (M4) - Lunghezza = 69,0 m

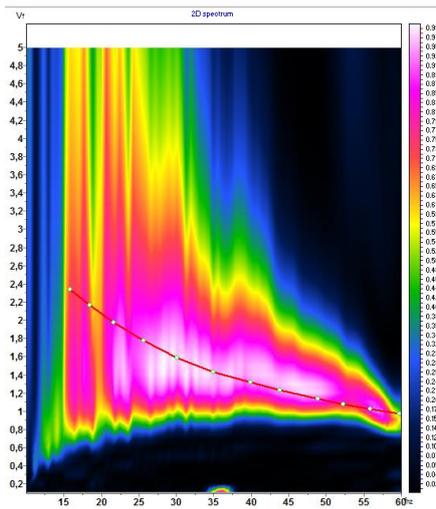
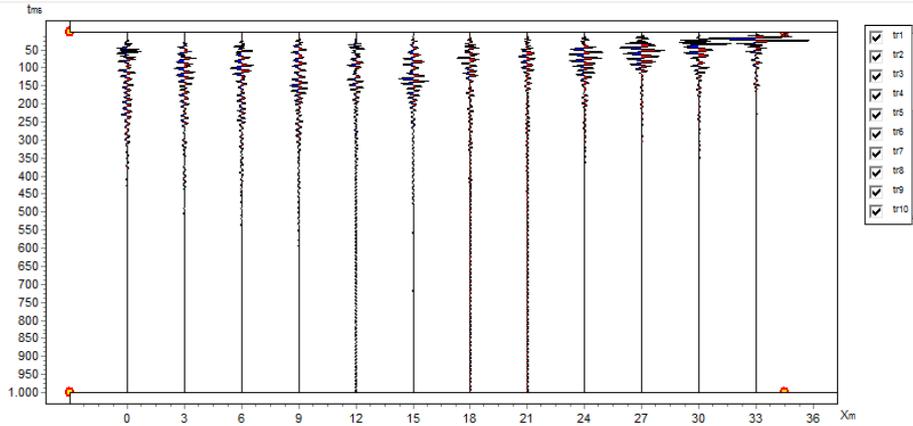
➡ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono



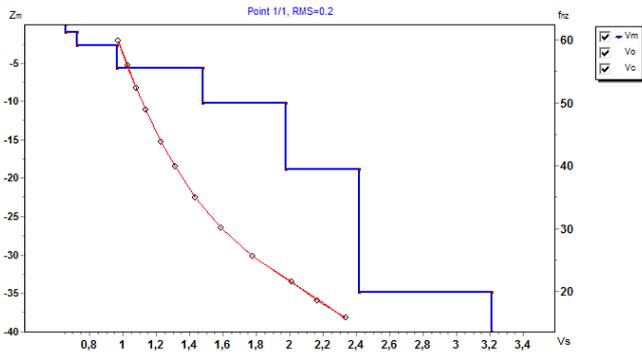
ALLEGATO 1

MASW 1 (SE_SM01)

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 2,80 metri da p.c. (Vseq= >800 m/s) - Categoria A

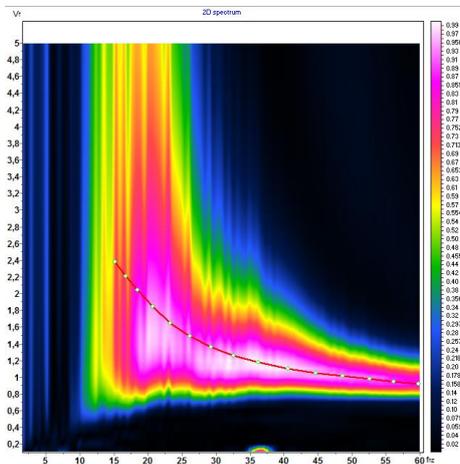
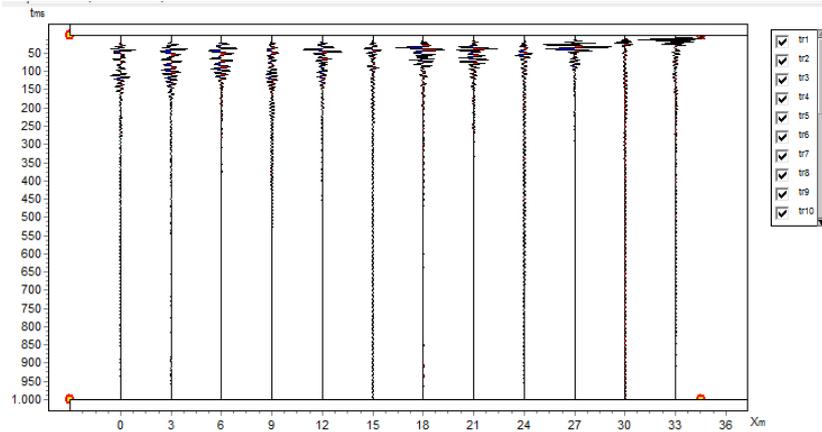


N	Vs	PR	p	Z	H
1	0.66	0.22	2	0	1.0
2	0.73	0.22	2	1.0	1.8
3	0.96	0.22	2	2.8	2.9
4	1.48	0.22	2	5.7	4.5
5	1.98	0.22	2	10.2	8.7
6	2.42	0.22	2	18.8	16.0
7	3.21	0.22	2	34.9	*

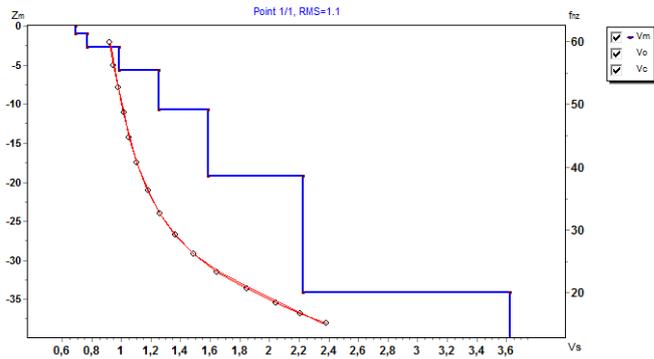
*Allegato 1: Sismogramma acquisito - Spettro velocità di fase/frequenza
 Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs*

MASW 4 (SE_SM04)

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 2,70 metri da p.c. (Vseq= >800 m/s) - Categoria A



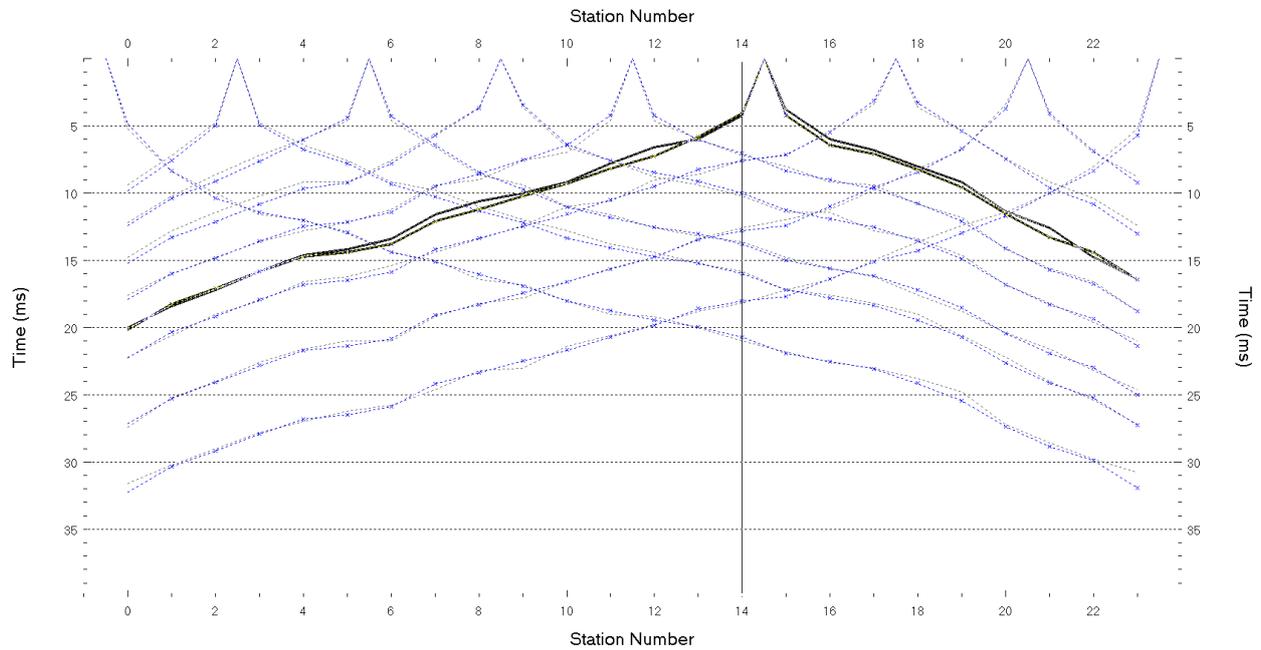
N	Vs	PR	ρ	Z	H
1	0.69	0.22	2	0	1.0
2	0.77	0.22	2	1.0	1.7
3	0.98	0.22	2	2.7	2.9
4	1.25	0.22	2	5.6	5.0
5	1.58	0.22	2	10.7	8.6
6	2.23	0.22	2	19.3	14.8
7	3.63	0.22	2	34.0	*

*Allegato 1: Sismogramma acquisito - Spettro velocità di fase/frequenza
 Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs*

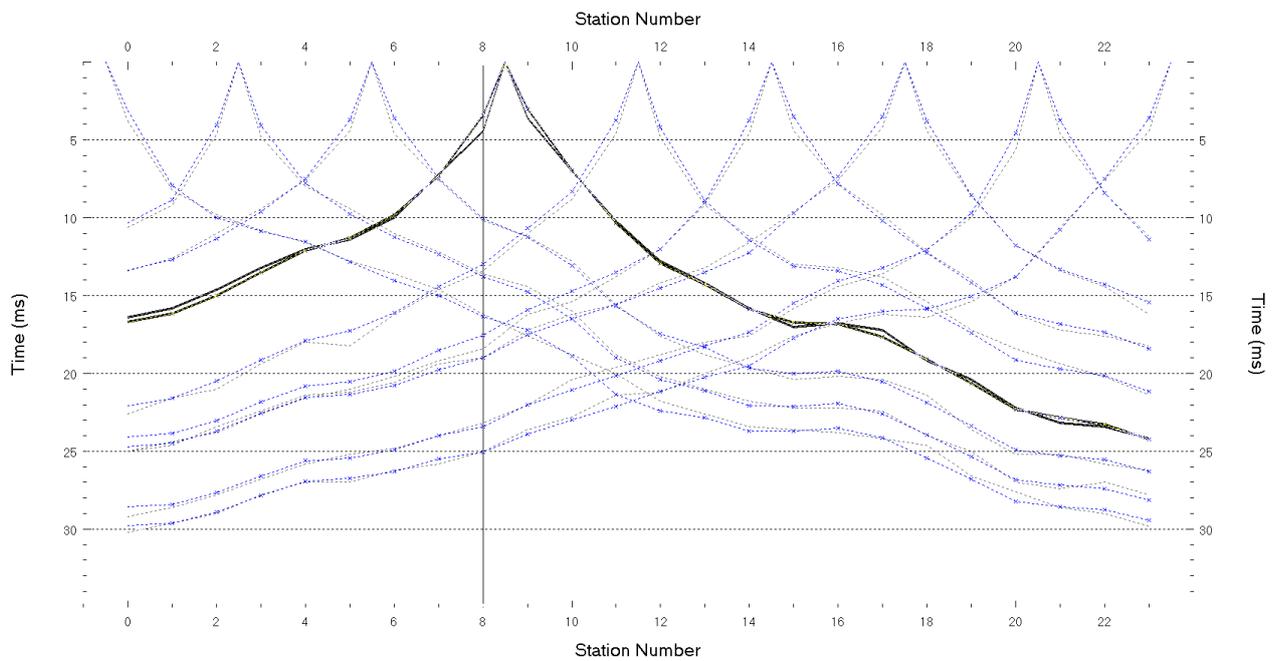
ALLEGATO 2

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

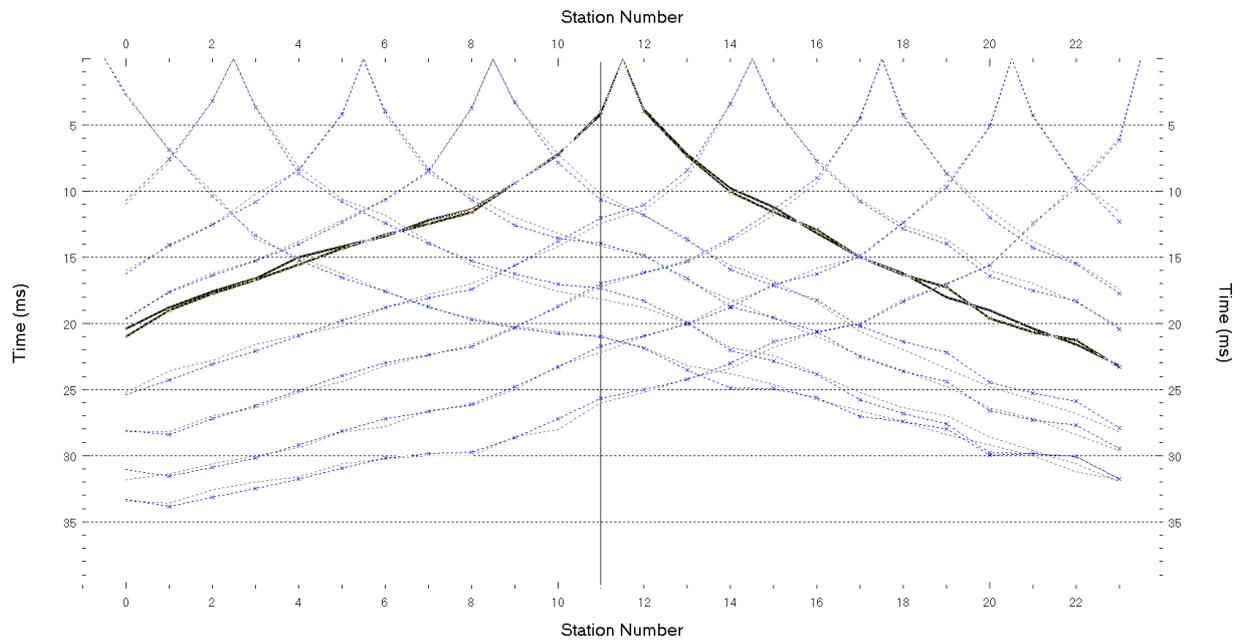
Sismica a rifrazione R1 in onde P (SE_SM01) dromocrone osservate e calcolate



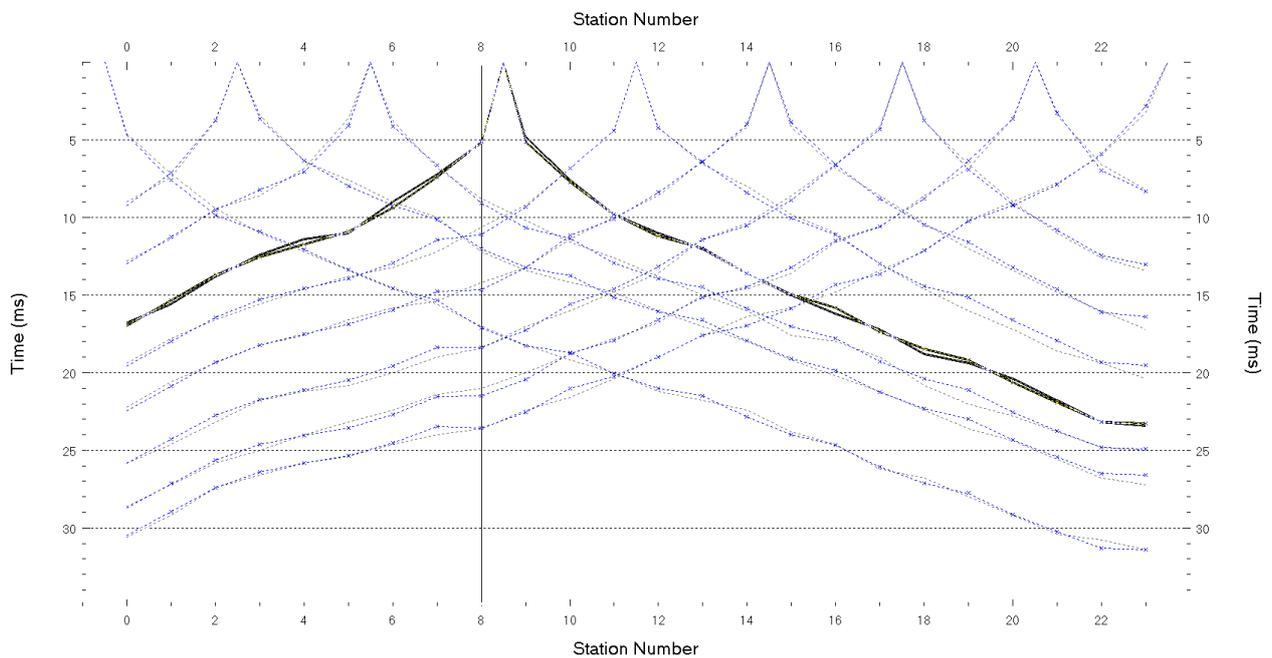
Sismica a rifrazione R2 in onde P (SE_SM02) dromocrone osservate e calcolate



Sismica a rifrazione R3 in onde P (SE_SM03)
dromocrone osservate e calcolate



Sismica a rifrazione R4 in onde P (SE_SM04)
dromocrone osservate e calcolate

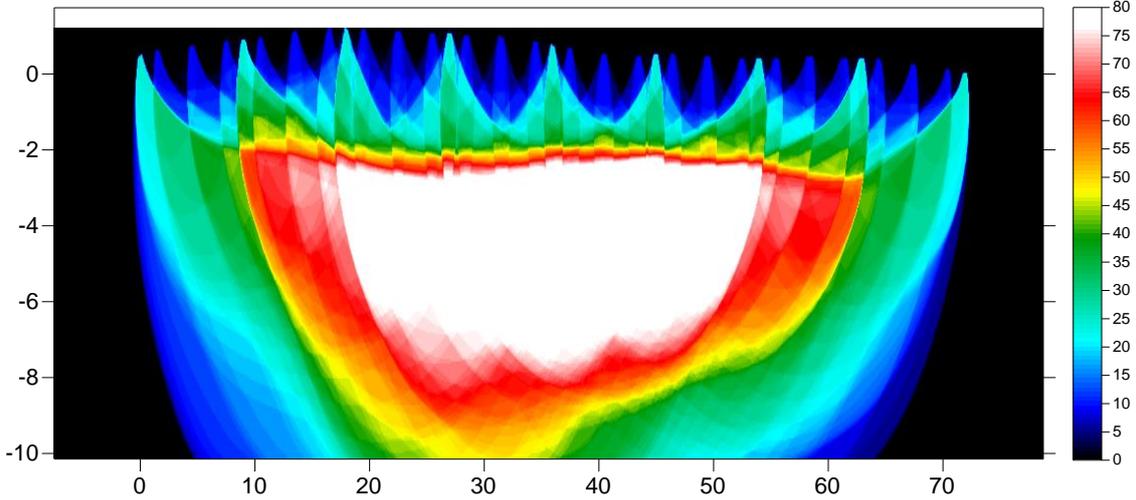


ALLEGATO 2

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

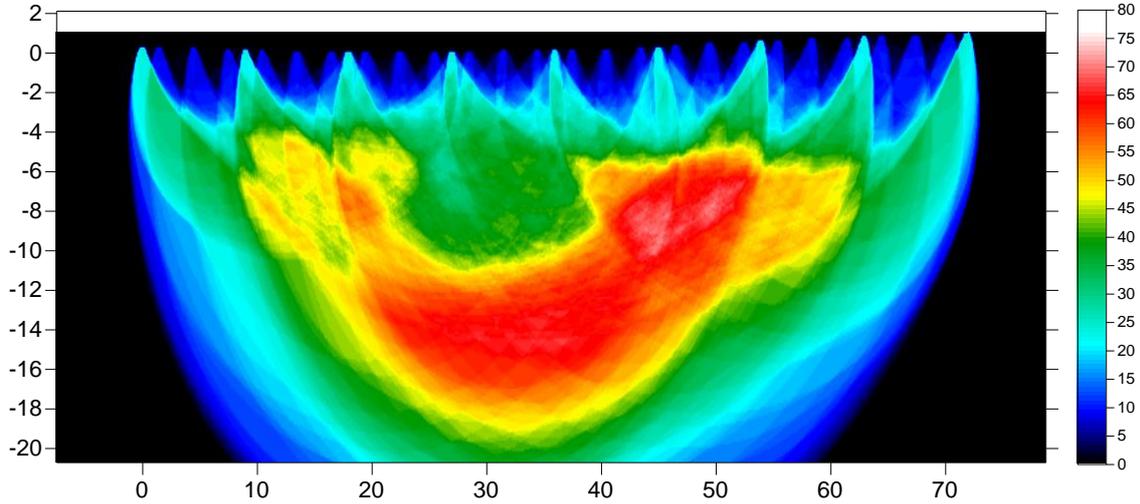
**Sismica a rifrazione R1 in onde P (SE_SM01)
Copertura raggi sismici**

- R1 - RMS error 2.3%=0.32ms 20 WET itr. 50Hz Width 2.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



**Sismica a rifrazione R2 in onde P (SE_SM02)
Copertura raggi sismici**

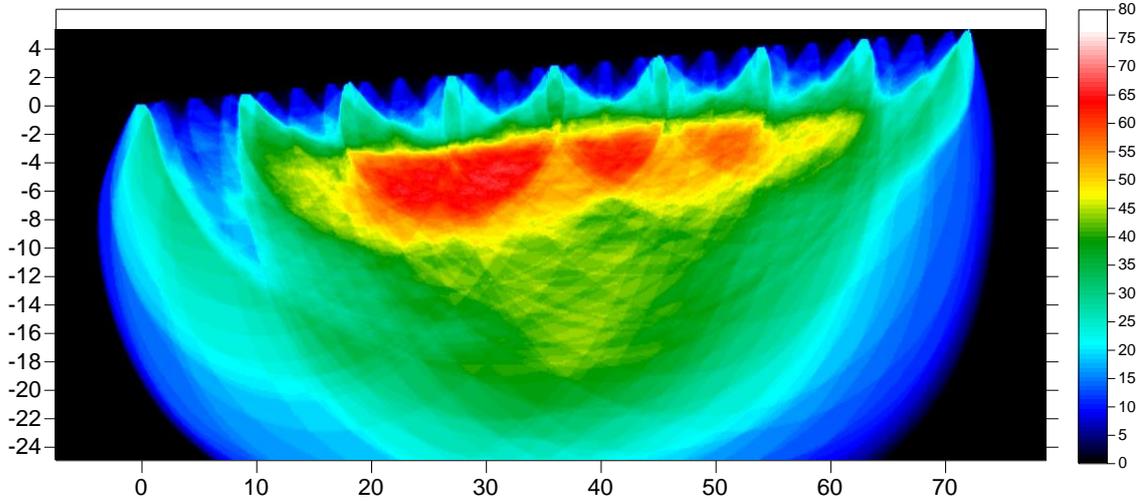
- R2 - RMS error 2.3%=0.39ms 20 WET itr. 50Hz Width 2.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



Sismica a rifrazione R3 in onde P (SE_SM03)

Copertura raggi sismici

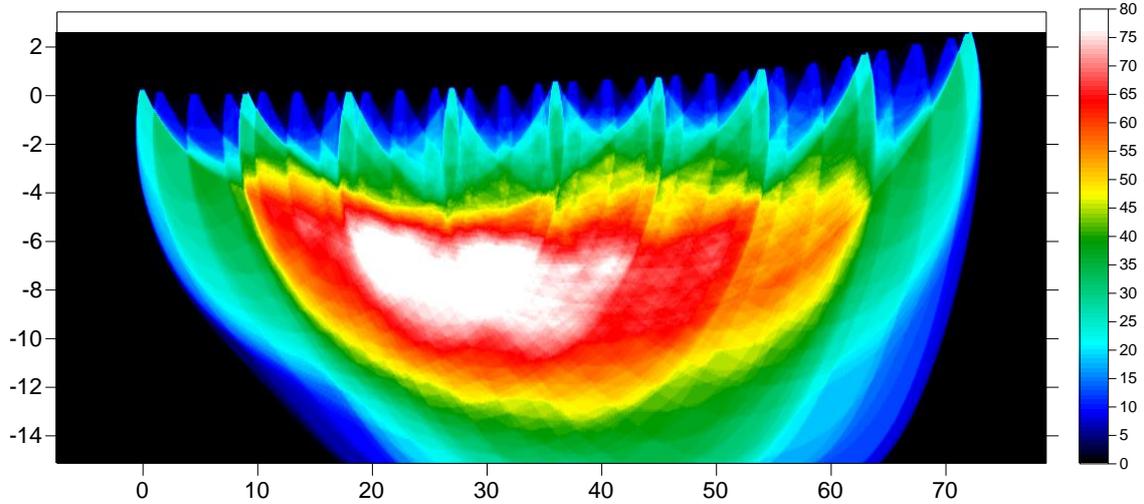
- R3 - RMS error 2.7%=0.49ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.0% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



Sismica a rifrazione R4 in onde P (SE_SM04)

Copertura raggi sismici

- R4 - RMS error 2.1%=0.32ms 20 WET itr. 50Hz Width 2.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



Allegato 3: Documentazione fotografica indagini geofisiche

STENDIMENTO R1-M1 (SE_SM01)

Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R1-M1
dal Geofono 1 al Geofono 24



Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R1-M1
dal centro al Geofono 1



Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R1-M1
dal Geofono 24 al Geofono 1

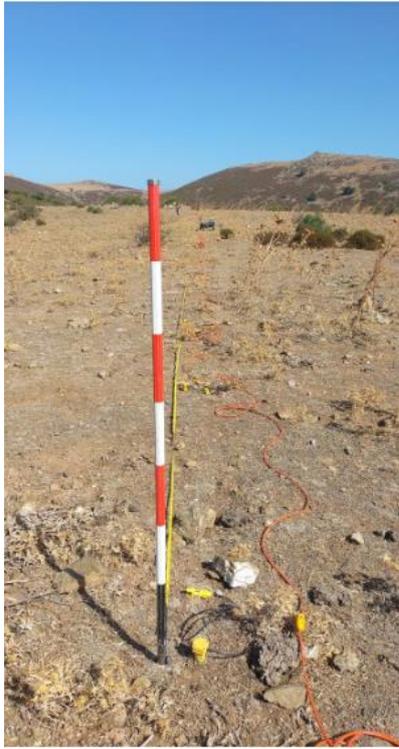


Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R1-M1
dal centro al Geofono 24



STENDIMENTO R2 (SE_SM02)

**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R2
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R2
dal centro al Geofono 1**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R2
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R2
dal centro al Geofono 24**



STENDIMENTO R3 (SE_SM03)

**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R3
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R3
dal centro al Geofono 1**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R3
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione R3
dal centro al Geofono 24**



STENDIMENTO R4-M4 (SE_SM04)

**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R4-M4
dal Geofono 1 al Geofono 24**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R4-M4
dal centro al Geofono 1**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R4-M4
dal Geofono 24 al Geofono 1**



**Sismica con metodo di sismica a Rifrazione e Masw
R4-M4
dal centro al Geofono 24**

