

COMUNE DI SIURGUS DONIGALA

PROVINCIA SUD SARDEGNA (SU)

*“Realizzazione di un impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Siurgus Donigala (SU) in località Pranu Nieddu”.*

## PROSPEZIONE SISMICA MASW E RIFRAZIONE IN ONDE P

N° Tavola	Scala Disegno	Data	Data Aggiornamento	Redatto:
<b>R1</b>	varie	27/11/2020	--	AC-DS

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

**Committente:**

Queequeg Renewables Ltd.  
Unit 3.21  
1110 Great West Road  
TW80G - LONDON

**Cantiere:**

Località Pranu Nieddu  
Comune di Siurgus Donigala (SU);



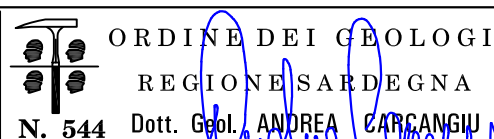
**GEOSERVICE**

**GEOSERVICE s.a.s.**

Indagini e prospezioni geoelettriche e sismiche  
Sede: Casa Spadaccino - Loc. Su Ioi, km 13+400, SS 195  
Sulcitana, 09012 Torre degli Ulivi Capoterra (CA)  
Sede legale: Via E. D'Arborea, 16 - 09010 Villa San Pietro (CA)  
Tel. 070907429 - 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



Collaboratori

Dott. Geol. Daniele Succu

Dott. Mario Calzoni

## Sommario

1	PREMESSA .....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE .....	3
3	RILIEVO TOPOGRAFICO.....	3
4	INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	7
5	SONDAGGI GEOGNOSTICI.....	8
6	INDAGINI SISMICHE: MASW .....	9
6.1	Tecnica e parametri utilizzati.....	9
6.2	Strumentazione utilizzata.....	10
6.3	Elaborazione dei dati .....	10
6.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018).....	12
6.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI.....	14
6.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE .....	15
6.7	MASW: RISULTATI.....	17
6.7.1	MASW M1.....	17
6.7.2	MASW M2.....	19
6.7.3	MASW M3.....	21
7	SISMICA A RIFRAZIONE .....	23
7.1	Strumentazione utilizzata.....	24
7.2	Elaborazione dei dati .....	24
7.3	Valutazione della escavabilità delle rocce.....	26
7.4	Elaborazione dei dati .....	27
7.4.1	Rifrazione R1.....	28
7.4.2	Rifrazione R2.....	29
7.4.3	Rifrazione R3.....	30
7.5	INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI.....	31
8	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	32

## 1 PREMESSA

La presente Relazione descrive le attività di indagine geofisiche realizzate nell'ambito del progetto "Realizzazione di un impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Siurgus Donigala (SU) in località Pranu Nieddu".

Le prospezioni geofisiche sono state realizzate impiegando la metodologia sismica con le tecniche MASW e Rifrazione in onde P.

Si riportano nello specifico le caratteristiche delle due metodologie impiegate:

1. L'indagine sismica con tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che attraverso la definizione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del DM 17/01/2018.
2. L'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, andando a stimare lo stato di addensamento e/o fratturazione del terreno investigato. E' molto utile anche per classificare la cosiddetta "rippabilità" degli ammassi rocciosi e per ottenere per via indiretta una classificazione dell'ammasso roccioso.

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 richiesto dalla committenza sono stati realizzati in totale n° 3 stendimenti di MASW e n°3 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale di inquadramento– scala 1:15.000
- Tavola2.Planimetria ubicazione indagini geofisichePN\_SISM01– scala 1:2000
- Tavola 3. Planimetria ubicazione indagini geofisichePN\_SISM02– scala 1:1000
- Tavola 4. Planimetria ubicazione indagini geofisichePN\_SISM03– scala 1:2000
- Allegato A: MASW - Sismogrammi acquisiti, spettri velocità di fase-frequenza, Curve di dispersione sperimentali e calcolate con profilo Vs.
- Allegato B: Sismica a rifrazione - dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici
- Allegato C. Documentazione fotografica, MASW e Sismica a rifrazione in onde P

## 2 PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma, realizzato in data 12 Novembre 2020:

1. Esecuzione di n°3 stendimenti di sismica con tecnica MASW (PN-SISM-01-M1, PN-SISM-02-M2, PN-SISM-03-M3) e n° 3 RIFRAZIONI (PN-SISM-01-R1, PN-SISM-02-R2, PN-SISM-03R3). Le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle Rifrazioni in onde P.
2. Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni sismiche
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 di dettaglio degli stendimenti sono indicate nelle **Tavole 2-3-4**.

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

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

<b>Stendimento</b>	<b>Orientamento</b>	<b>Lunghezza(m)</b>
PN-SISM01-M1	SE- NW	69,0
PN-SISM02-M2	SE- NW	69,0
PN-SISM03-M3	SE- NW	69,0
PN-SISM01-R1	SE- NW	69,0
PN-SISM02-R2	SE- NW	69,0
PN-SISM03-R3	SE- NW	69,0

## 3 RILIEVO TOPOGRAFICO

Di seguito si riportano i dati del rilievo topografico in termini di coordinate UTM WGS84 e quote assolute in m slm 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.

Legenda:

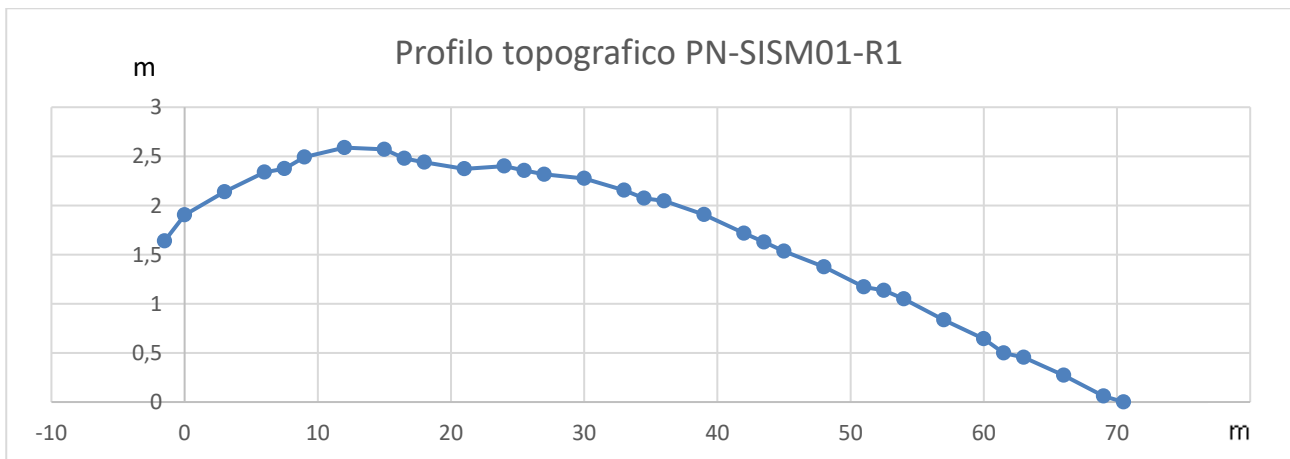
G1: Nome Geofono; S1: Shot/energizzazione

Est/Nord: Longitudine e Latitudine, Coordinate UTM WGS84

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

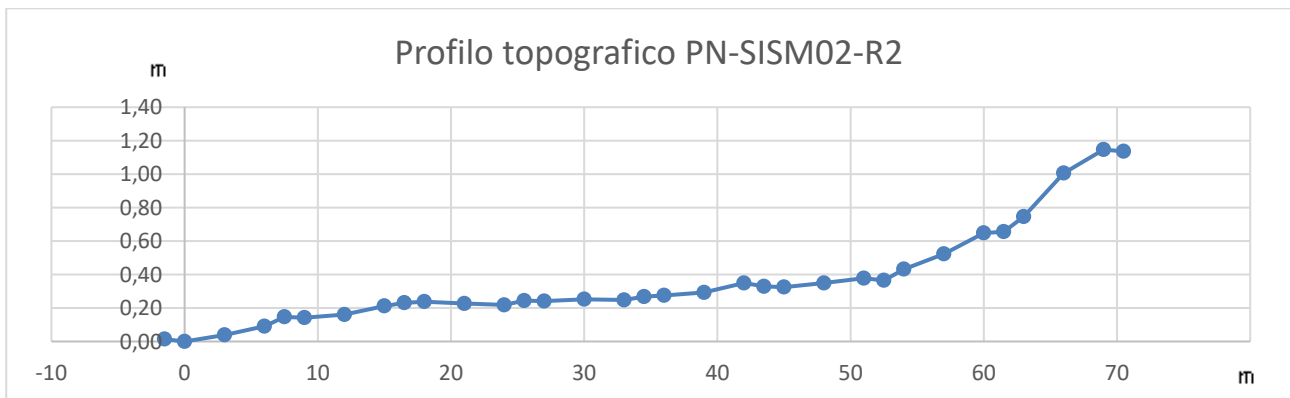
Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,5	516825,6	4379726	506,4	1,639
G1	0	516825	4379728	506,665	1,904
G2	3	516823,9	4379730	506,9	2,139
G3	6	516822,4	4379733	507,1	2,339
S2	7,5	516821,7	4379734	507,136	2,375
G4	9	516820,9	4379735	507,254	2,493
G5	12	516819,6	4379738	507,35	2,589
G6	15	516818,4	4379741	507,332	2,571
S3	16,5	516817,7	4379742	507,24	2,479
G7	18	516817,1	4379743	507,201	2,44
G8	21	516815,9	4379746	507,134	2,373
G9	24	516814,8	4379749	507,162	2,401
S4	25,5	516814,1	4379750	507,117	2,356
G10	27	516813,4	4379752	507,078	2,317
G11	30	516812,2	4379754	507,036	2,275
G12	33	516810,9	4379757	506,916	2,155
S5	34,5	516810,3	4379758	506,834	2,073
G13	36	516809,7	4379760	506,807	2,046
G14	39	516808,5	4379763	506,668	1,907
G15	42	516807,3	4379765	506,478	1,717
S6	43,5	516806,7	4379767	506,389	1,628
G16	45	516806,1	4379768	506,295	1,534
G17	48	516804,9	4379771	506,136	1,375
G18	51	516803,7	4379773	505,932	1,171
S7	52,5	516803,2	4379775	505,897	1,136
G19	54	516802,7	4379776	505,81	1,049
G20	57	516801,6	4379779	505,596	0,835
G21	60	516800,4	4379782	505,404	0,643
S8	61,5	516799,9	4379783	505,259	0,498
G22	63	516799,3	4379784	505,215	0,454
G23	66	516798,1	4379787	505,033	0,272
G24	69	516796,9	4379790	504,821	0,06
S9	70,5	516796,4	4379791	504,761	0

Profilo topografico PN-Sism01-R1



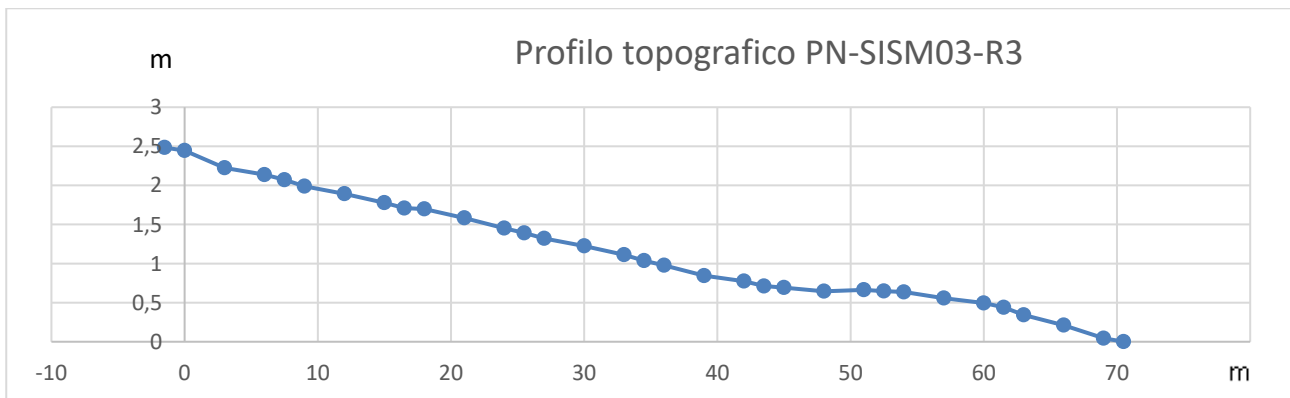
Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,5	519933,5	4380719	477,869	0,01
G1	0	519932,9	4380721	477,855	0,00
G2	3	519931,8	4380723	477,894	0,04
G3	6	519930,8	4380726	477,946	0,09
S2	7,5	519930,1	4380728	478,002	0,15
G4	9	519929,6	4380729	477,997	0,14
G5	12	519928,4	4380732	478,016	0,16
G6	15	519927,2	4380734	478,067	0,21
S3	16,5	519926,4	4380736	478,086	0,23
G7	18	519925,9	4380737	478,093	0,24
G8	21	519924,7	4380740	478,082	0,23
G9	24	519923,5	4380743	478,073	0,22
S4	25,5	519922,9	4380744	478,099	0,24
G10	27	519922,4	4380745	478,096	0,24
G11	30	519921,2	4380748	478,107	0,25
G12	33	519920	4380751	478,103	0,25
S5	34,5	519919,4	4380752	478,123	0,27
G13	36	519918,9	4380754	478,13	0,27
G14	39	519917,7	4380756	478,148	0,29
G15	42	519916,5	4380759	478,204	0,35
S6	43,5	519915,8	4380760	478,184	0,33
G16	45	519915,2	4380762	478,18	0,32
G17	48	519914,1	4380765	478,204	0,35
G18	51	519912,9	4380767	478,233	0,38
S7	52,5	519912,2	4380769	478,22	0,37
G19	54	519911,6	4380770	478,287	0,43
G20	57	519910,5	4380773	478,378	0,52
G21	60	519909,3	4380775	478,503	0,65
S8	61,5	519908,6	4380777	478,511	0,66
G22	63	519908,1	4380778	478,601	0,75
G23	66	519907,1	4380781	478,861	1,01
G24	69	519906	4380784	479,002	1,15
S9	70,5	519905,3	4380785	478,991	1,14

Profilo topografico PN-Sism02-R2



Nome punto	Progressive (m)	Est (Longitudine)	Nord (Latitudine)	Quota assoluta (m.s.l.m)	Quota Relativa (m.p.c)
S1	-1,5	519933,5	4380719	410,659	2,484
G1	0	519932,9	4380721	410,62	2,445
G2	3	519931,8	4380723	410,399	2,224
G3	6	519930,8	4380726	410,312	2,137
S2	7,5	519930,1	4380728	410,247	2,072
G4	9	519929,6	4380729	410,164	1,989
G5	12	519928,4	4380732	410,067	1,892
G6	15	519927,2	4380734	409,953	1,778
S3	16,5	519926,4	4380736	409,884	1,709
G7	18	519925,9	4380737	409,873	1,698
G8	21	519924,7	4380740	409,758	1,583
G9	24	519923,5	4380743	409,627	1,452
S4	25,5	519922,9	4380744	409,5663	1,3913
G10	27	519922,4	4380745	409,496	1,321
G11	30	519921,2	4380748	409,4	1,225
G12	33	519920	4380751	409,287	1,112
S5	34,5	519919,4	4380752	409,212	1,037
G13	36	519918,9	4380754	409,152	0,977
G14	39	519917,7	4380756	409,02	0,845
G15	42	519916,5	4380759	408,949	0,774
S6	43,5	519915,8	4380760	408,887	0,712
G16	45	519915,2	4380762	408,868	0,693
G17	48	519914,1	4380765	408,82	0,645
G18	51	519912,9	4380767	408,839	0,664
S7	52,5	519912,2	4380769	408,822	0,647
G19	54	519911,6	4380770	408,811	0,636
G20	57	519910,5	4380773	408,732	0,557
G21	60	519909,3	4380775	408,67	0,495
S8	61,5	519908,6	4380777	408,615	0,44
G22	63	519908,1	4380778	408,517	0,342
G23	66	519907,1	4380781	408,386	0,211
G24	69	519906	4380784	408,219	0,044
S9	70,5	519905,3	4380785	408,175	0

Profilo topografico PN-Sism03-R3

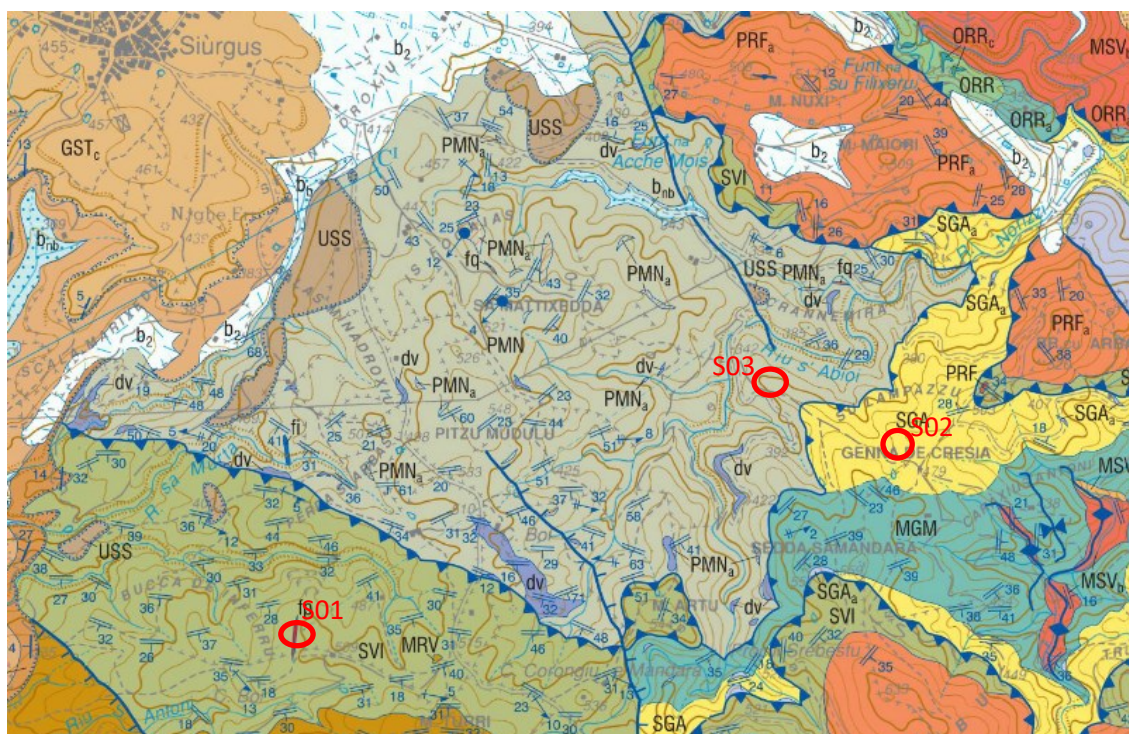


#### 4 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

I tre stendimenti sono stati fatti su tre diversi tipi di litologie. Lo stendimento Sism01 si trova in un'area dove la litologia prevalente sono le *Arenarie di San Vito*, ovvero alternanze irregolari, da decimetriche a metriche, di metarenarie e quarziti la cui scistosità immerge prevalentemente a Sud, mentre a est dello stendimento si trova un filone di porfidi granitici. Lo stendimento Sism02 si trova sulla formazione degli *Scisti a graptoliti auct*, quindi principalmente metasiltiti e metapilite carboniose, con giacitura immergente a NNO. Infine, lo stendimento Sism03 si trova sulla *Formazione di Palamanna*, la quale è costituita da metarenarie, metaconglomerati, metabrecce con clasti di dimensioni anche decimetriche, arenarie e calcari.

Dal punto di vista delle strutture tettoniche si può constatare dalla carta che l'area ha subito importanti eventi tettonici. Sono presenti infatti alcuni sovrascorrimenti nei pressi dello stendimento 02, che rappresentano anche dei contatti con le formazioni circostanti. Inoltre una faglia orientata NNO-SSE sembra terminare quasi nei pressi dello stendimento S03.

*Stralcio del foglio 548 Senorbì del progetto Carg (1:10.000) con in evidenza le aree dei tre stendimenti*





## 5 SONDAGGI GEOGNOSTICI

Nei pressi delle aree oggetto di indagini sono stati eseguiti dei sondaggi geognostici a carotaggio continuo, di cui si riportano le stratigrafie “semplificate” di quelli più prossimi agli stendimenti di sismica a rifrazione e MASW. Per semplificate si intende che sono stati “accorpati” i livelli stratigrafici caratterizzato da una risposta sismica in termini di velocità simile tra di loro.

Sondaggio **PN\_S01**– eseguito a 550 m da sismica **PN\_SISM01**

Profondità da (m p.c.)		a (m p.c.)	Descrizione
0.00	0.40		Terre
0.40	1.50		Sabbie ghiaiose addensate a grana medio-grossa
1.50	9.30		Arenarie fini da fratturate a poco fratturate
9.30	10.40		Arenarie fini da intensamente fratturate a disgregate
10.40	12.00		Arenarie fini da fratturate a poco fratturate

Sondaggio **PN\_S02**– eseguito nei pressi di sismica **PN\_SISM02**

Profondità da (m p.c.)		a (m p.c.)	Descrizione
0.00	0.30		Terre
0.30	2.20		Sabbie addensate e ghiaie a grana medio grossa
2.20	3.50		Roccia metamorfica intensamente fratturata
3.50	6.40		Sabbie argillose e sabbie ghiaiose con ciottoli
6.40	12.00		Roccia metamorfica da fratturata a intensamente fratturata e disgregata

Sondaggio **PN\_S03**– eseguito a 250 m da sismica **PN\_SISM03**

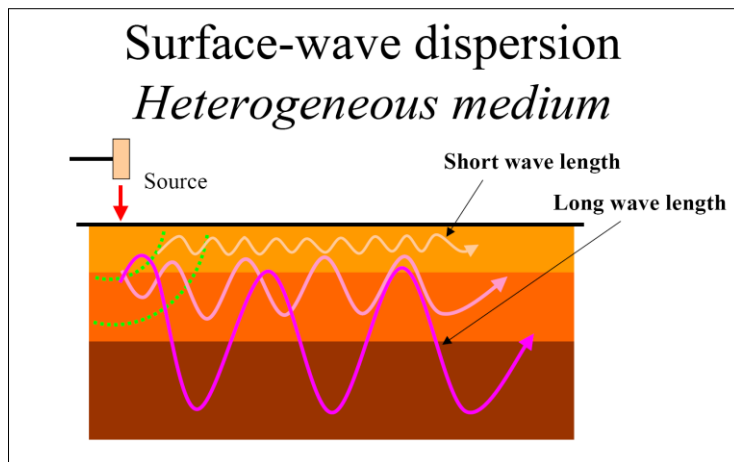
Profondità da (m p.c.)		a (m p.c.)	Descrizione
0.00	0.50		Terre
0.50	10.40		Rocce intensamente fratturate
10.40	11.00		Roccia metamorfica da fratturata a molto fratturata

## 6 INDAGINI SISMICHE: MASW

### 6.1 Tecnica e parametri utilizzati

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



da SAGEEP2003

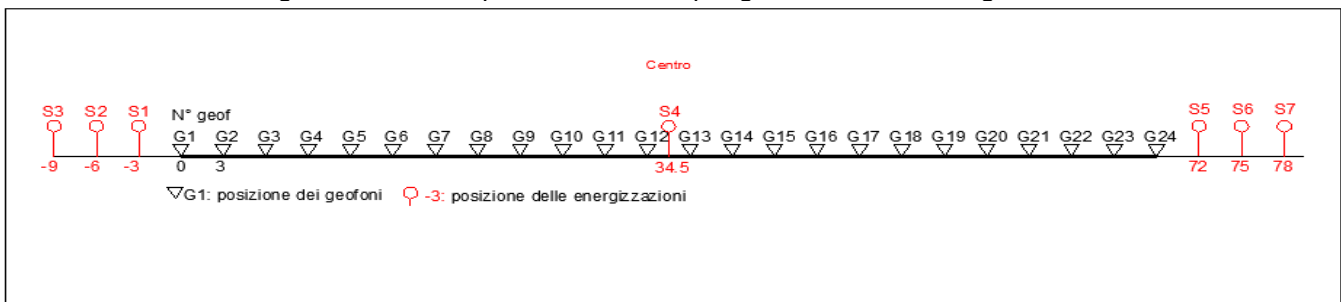
L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base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

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

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

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

**Schema 1.** Schema geometrico di acquisizione dei dati per gli stendimenti di lunghezza L=72,0 m



## 6.2 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.

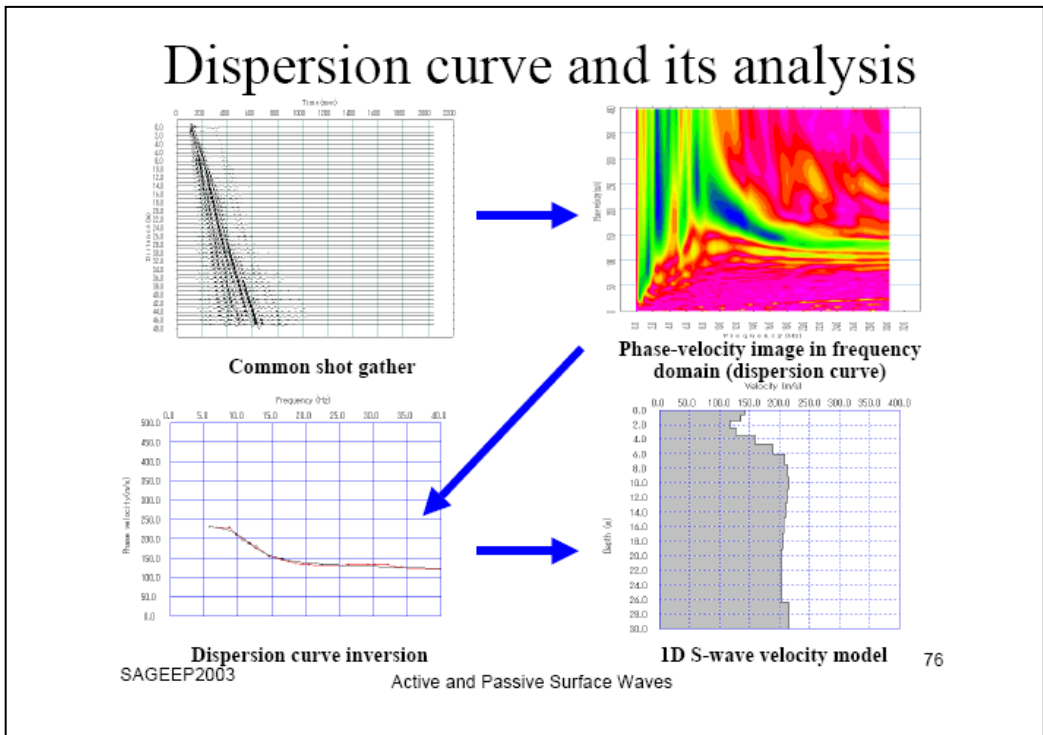
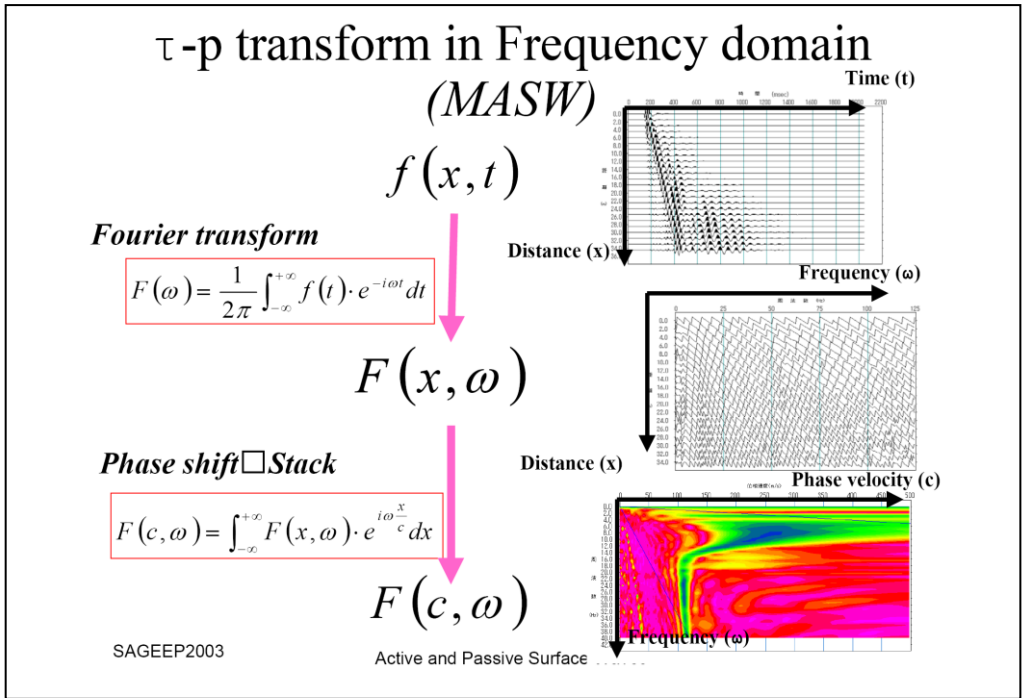
## 6.3 Elaborazione dei dati

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.



#### 6.4 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. 3.2.11 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;

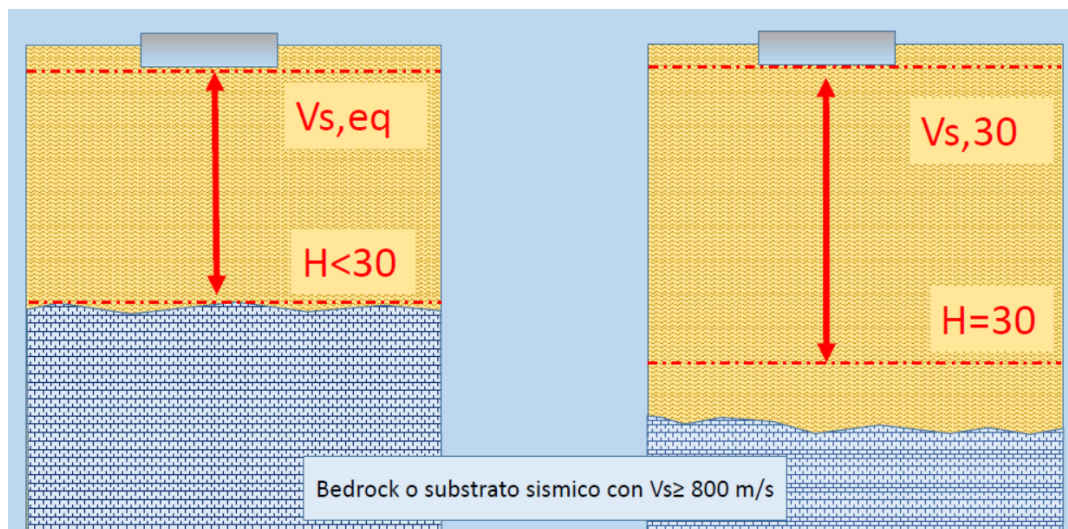
$N$  numero di strati;

$H$  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.

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

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

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

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

## 6.6 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  $E_d$  si può applicare la nota relazione proposta da Rzhevsky e Novik (1971) valida per i moduli misurati in MPa o Kg/cm<sup>2</sup>:

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

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

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

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

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

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

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

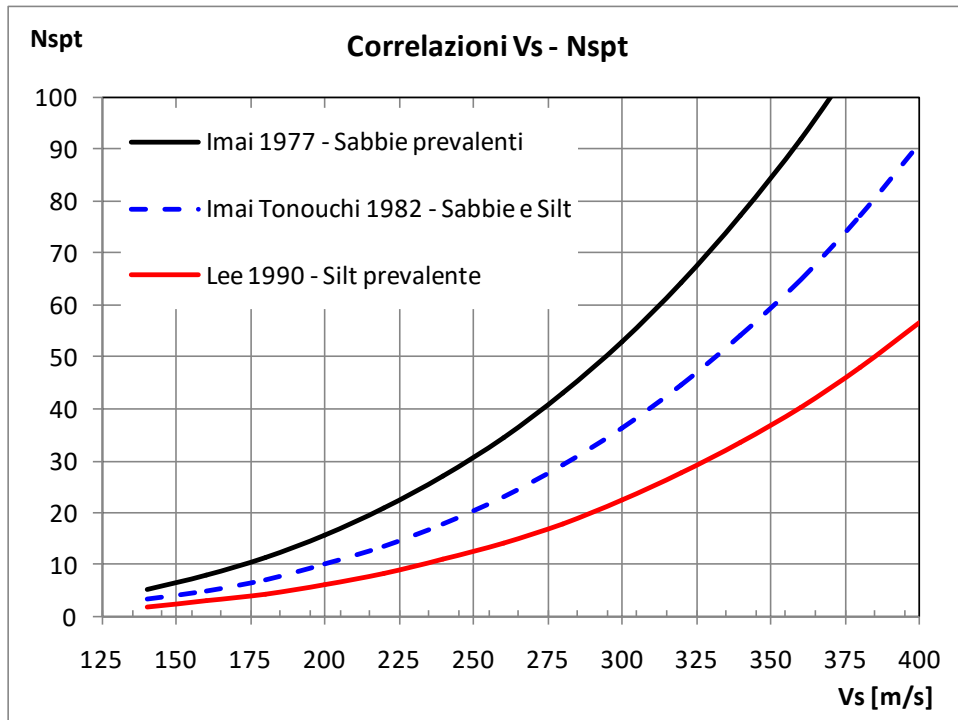
$$N_{\text{SPT}} = \left(\frac{V_s}{80,6}\right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

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

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

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





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

Parametri geotecnici	Metodologie – Relazioni
Resistenza al taglio $\phi$	<p><u>Terreni sabbiosi</u>                      Entro i 6 m di profondità- Peck-Hanson&amp;Thornburn, <math>\phi = 0,28 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 <b>E</b> (o di Young)	<p><b>Schmertmann</b> (valido per sabbie e terreni prevalentemente sabbiosi)  <math>E(Kg/cm^2) = 2B Nspt</math> dove                      B=4 (sabbia fine), B=6 (sabbia media), B=10 (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> (B=7 MPa)</p>

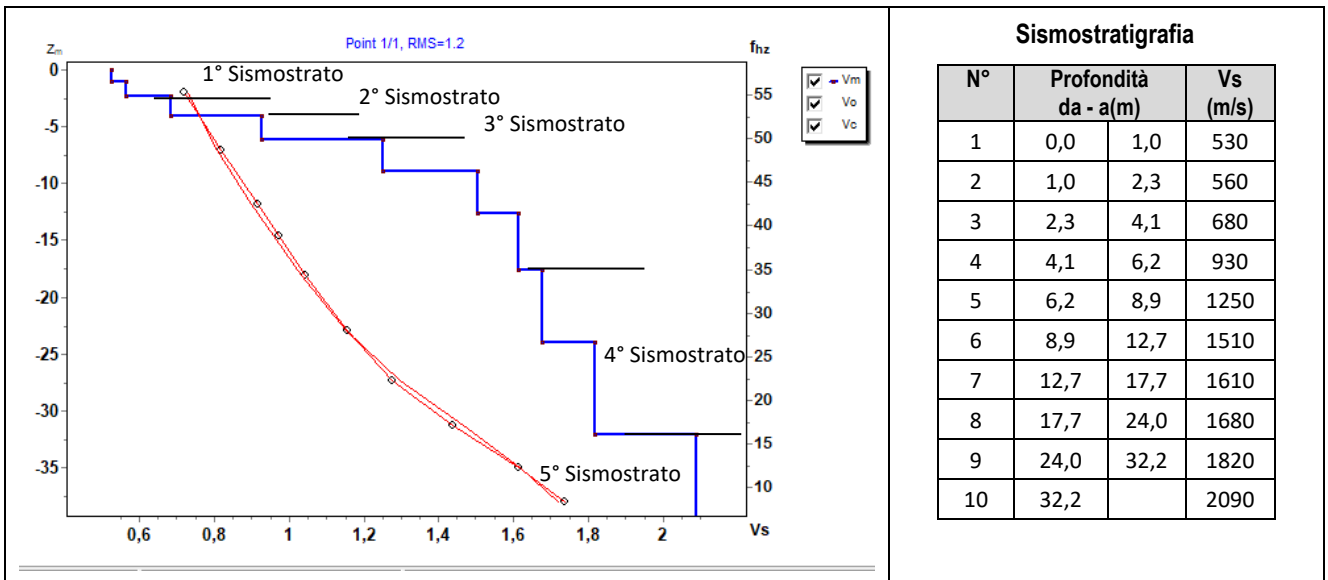
## 6.7 MASW: RISULTATI

### 6.7.1 MASW M1

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

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 2,3	1° sismostrato con Vs tra <b>530 e 560 m/s</b> , Terre molto addensate e rocce intensamente fratturate
2,3 – 4,1	2° sismostrato con Vs di <b>680 m/s</b> , Substrato roccioso molto fratturato
4,1 - 6,2	3° sismostrato con Vs di <b>930 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
6,2 – 17,7	4° sismostrato con Vs tra <b>1250 e 1680m/s</b> Substrato roccioso debolmente fratturato
17,7– 32,2	5° sismostrato con Vs tra <b>1820 e 2090m/s</b> , Substrato roccioso sano
>32,2	6° sismostrato con Vs > di <b>2090 m/s</b> , Substrato roccioso sano

**MASW M1 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c= 604 m/s)**



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

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

con:

*hi* spessore dell'*i*-esimo strato;

*Vs,i* velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

*N* numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **4,1 m** (Vs > 800 m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **4,1 m** di profondità dal p.c. è pari a: **Vs eq = 4,1/0,006787 = 604 m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**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.

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 1,1 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G <sub>0</sub>	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-2,3	10%	1.800	1.090	545	0,33	1.422	142	539	1.422
2	2,3-4,1	10%	1.800	1.360	680	0,33	2.216	222	834	2.216
3	4,1-6,2	10%	1.900	1.860	930	0,33	4.384	438	1.648	4.384
4	6,2-17,7	20%	2.000	2.930	1.465	0,33	11.445	2.289	4.295	11.445
5	17,7-32,2	40%	2.100	3.910	1.955	0,33	21.408	8.563	8.022	21.408
6	>32,2	50%	2.200	4.180	2.090	0,33	25.625	12.813	9.611	25.625

### Indicazioni per la determinazione di N<sub>spt</sub> e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N<sub>spt</sub>, 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.

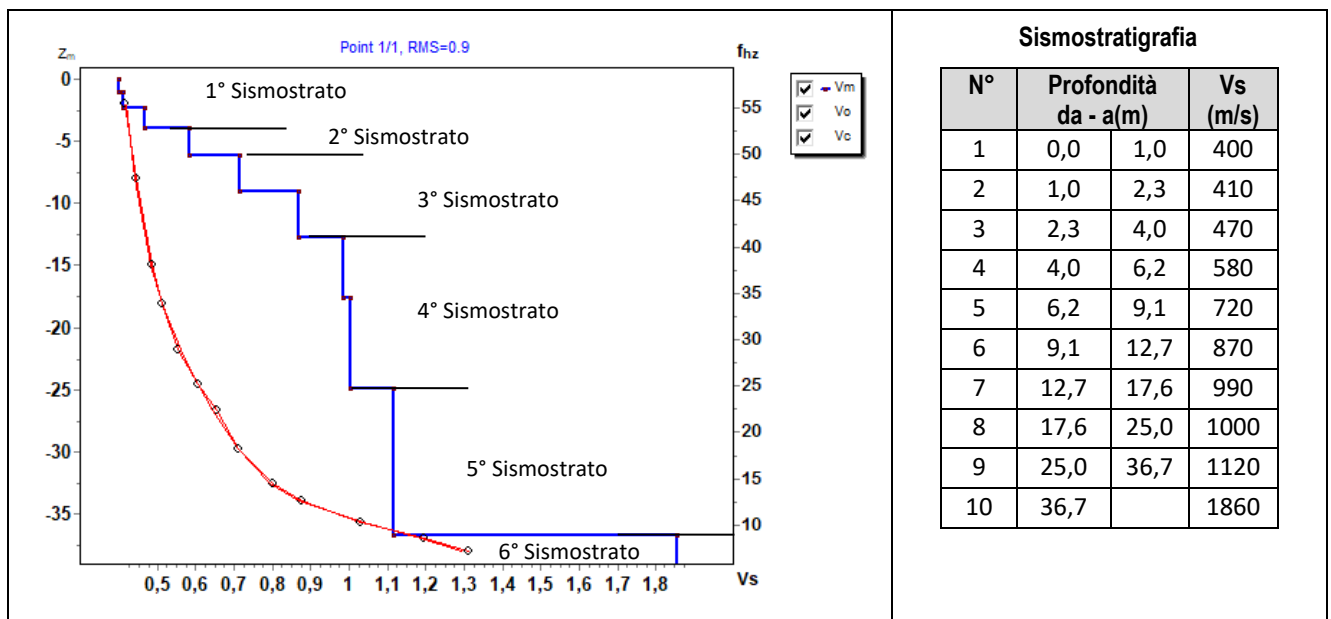
$$N_{SPT} = \left( \frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

### 6.7.2 MASW M2

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M2, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 4,0	1° sismostrato con Vs tra <b>400 e 470 m/s</b> , Terre molto addensate e rocce intensamente fratturate
4,0 – 6,2	2° sismostrato con Vs di <b>580 m/s</b> , Roccia intensamente fratturata
6,2 – 12,7	3° sismostrato con Vs tra <b>720 e 870 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
12,7– 25,0	4° sismostrato con Vs tra <b>990 e 1000 m/s</b> , Substrato debolmente fratturato
25,0- 36,7	5° sismostrato con Vs tra <b>1120 e 1860m/s</b> , Substrato roccioso sano
>36,7	6° sismostrato con Vs > di <b>1860m/s</b> , Substrato roccioso sano

**MASW M2 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c= 532 m/s)**



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

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

con:

*hi* spessore dell'*i*-esimo strato;

*Vs,i* velocità delle onde di taglio nell'*i*-esimo strato;

*N* numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **9,1 m** (Vs>800 m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,1 m** di profondità dal p.c. è pari a: **Vs eq= 9,1/0,017094= 532 m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**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.

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 6,1 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

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

**Tabella 5.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-4,0	10%	1.800	870	435	0,33	912	91	343	912
2	4,0-6,2	10%	1.800	1.160	580	0,33	1.618	162	608	1.618
3	6,2-12,7	20%	1.900	1.590	795	0,33	3.207	641	1.196	3.207
4	12,7-25,0	30%	2.000	1.990	995	0,33	5.276	1.583	1.981	5.276
5	25,0-36,7	40%	2.000	2.980	1.490	0,33	11.837	4.735	4.442	11.837
6	>36,7	50%	2.100	3.720	1.860	0,33	19.378	9.689	7.267	19.378

### Indicazioni per la determinazione di N<sub>spt</sub> e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N<sub>spt</sub>, 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.

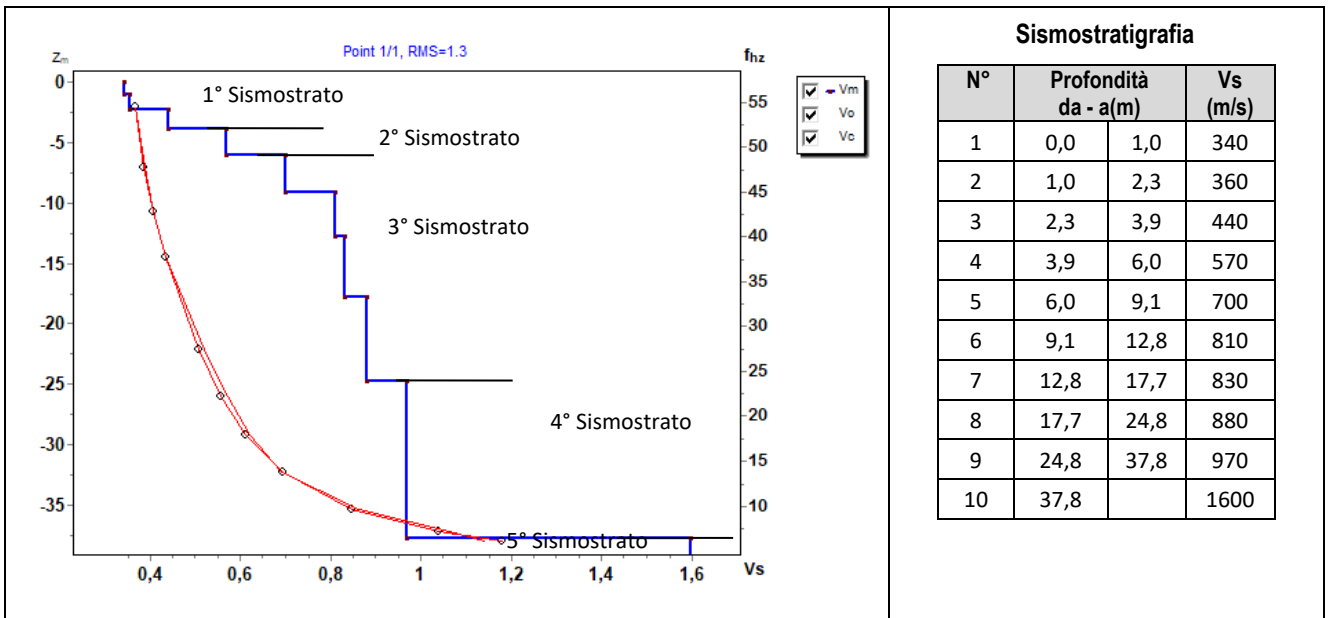
$$N_{SPT} = \left( \frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

### 6.7.3 MASW M3

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M3, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 3,9	1° sismostrato con Vs tra <b>340 e 440 m/s</b> , Terre molto addensate o rocce tenere intensamente fratturate
3,9 – 6,0	2° sismostrato con Vs di <b>570 m/s</b> , Roccia intensamente fratturata
6,0 – 24,8	3° sismostrato con Vs tra <b>700 e 880 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
24,8 – 37,8	4° sismostrato con Vs tra <b>970 e 1600 m/s</b> , Substrato roccioso sano
>37,8	5° sismostrato con Vs >di <b>1600 m/s</b> , Substrato roccioso sano

**MASW M3 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c= 498 m/s)**



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

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

con:

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

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

$N$  numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **9,1 m** ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,1 m** di profondità dal p.c. è pari a:  **$V_s eq = 9,1/0,018269 = 498$  m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

**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.

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a profondità maggiori di 6,1 m sotto il p.c. il substrato si troverà a quote < 3 metri per cui la categoria diventa una A.

**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 Vs, e Vp 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 $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G <sub>0</sub>	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-3,9	10%	1.800	780	390	0,33	726	73	275	726
2	3,9-6,0	10%	1.800	1.140	570	0,33	1.559	156	588	1.559
3	6,0-24,8	20%	1.900	1.580	790	0,33	3.158	632	1.187	3.158
4	248-37,8	30%	2.000	2.570	1.285	0,33	8.807	2.642	3.305	8.807
5	>37,8	40%	2.000	3.200	1.600	0,33	13.651	5.460	5.119	13.651

#### Indicazioni per la determinazione di N<sub>spt</sub> e parametri geotecnici

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e N<sub>spt</sub>, 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.

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

## 7 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.

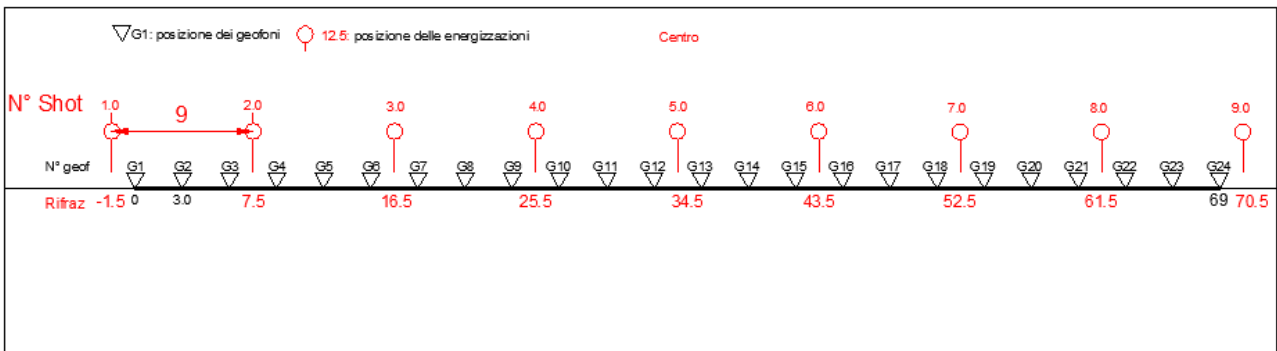
Varie metodologie di interpretazione si sono susseguite nel tempo, passando dalle valutazioni di spessori e velocità in funzione del tempo all'intercetta fino a giungere alle più classiche interpretazioni mediante il General Reciprocal Method di Palmer '72.

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 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



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



## **7.1 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 gli stendimenti PN-SISM01-R1, PN-SISM02-R2 e PN-SISM03-R3.

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 una livella digitale in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

## **7.2 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.

In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (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 70,5 m di R1

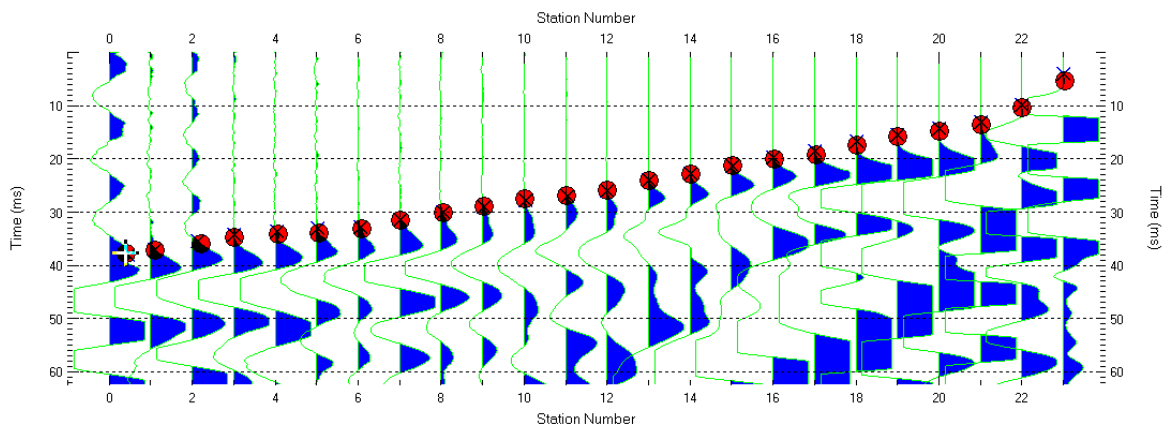


Figura 2: Sismogramma shot a 7,5 m di PN-SISM02-R2

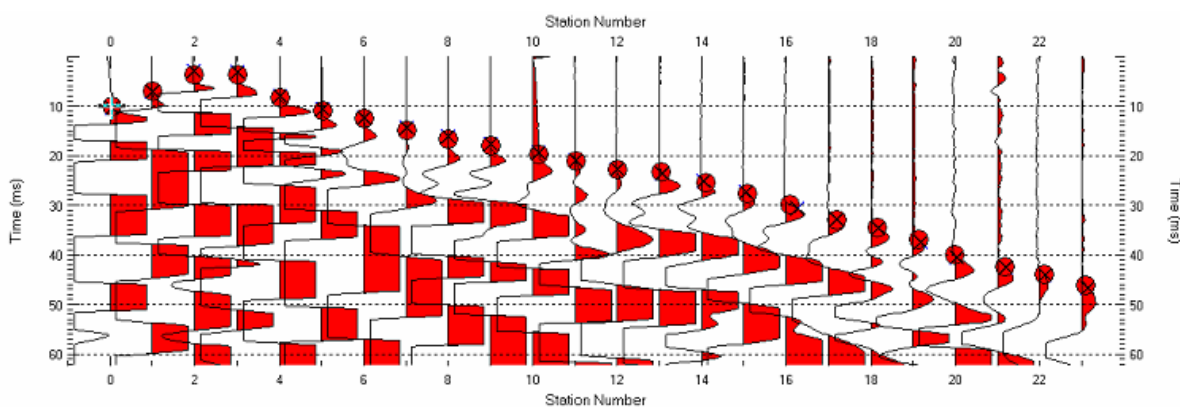
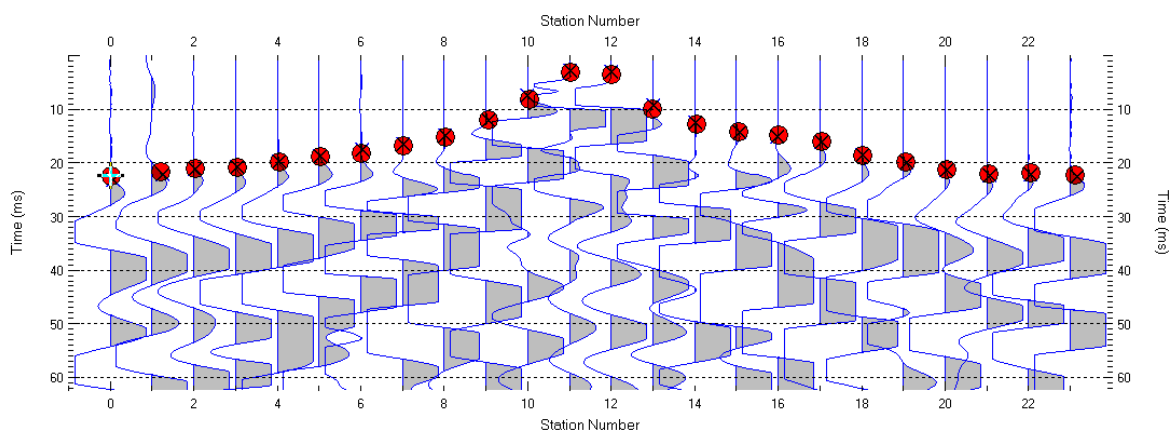


Figura 3: Sismogramma shot a 34,5 m di R3



### 7.3 Valutazione della escavabilità delle rocce

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

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

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

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

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

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

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

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

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. "sandstone" e "schist") per velocità oltre i 1800-2000 m/s il mezzo meccanico D8 non è più sufficiente e sarà necessario, un mezzo meccanico più grande (D9 o D10) o l'utilizzo di altri metodi di abbattimento quali la demolizione meccanica, l'uso di micro-cariche o in estrema ipotesi, se le strutture esistenti lo permettono, l'uso dell'esplosivo.

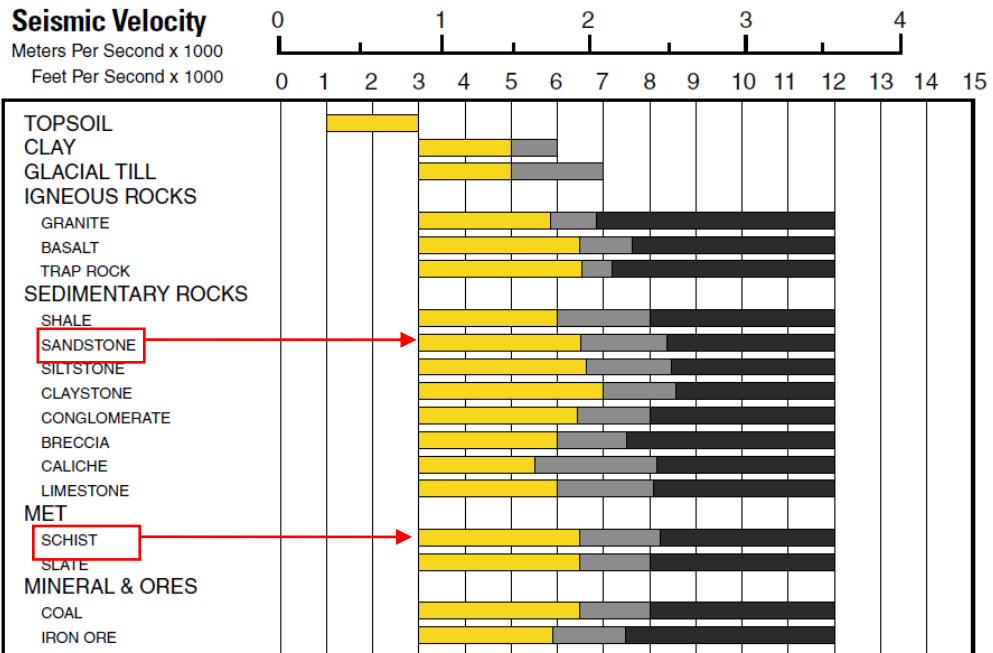
---

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

**D8R Ripper Performance**

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

- RIPPABLE
- MARGINAL
- NON-RIPPABLE



**7.4 Elaborazione dei dati**

Di seguito si riportano i risultati dell'elaborazione tomografica delle 3 acquisizioni di sismica a rifrazione. Una prima osservazione evidenzia come il profilo R1 presenti delle velocità Vp con valori più elevati e a profondità minori rispetto ai profili R2 e R3, dove le velocità sono molto più basse a parità di profondità. Tutto ciò è in accordo con i sondaggi geognostici, che mostrano una qualità più alta nel sondaggio S01 dove si rileva una roccia poco o mediamente fratturata già alla profondità di 1,5-2,00 m, e una qualità più scarsa nell'S02 e S03 dove il grado di fratturazione e alterazione è molto più alto.

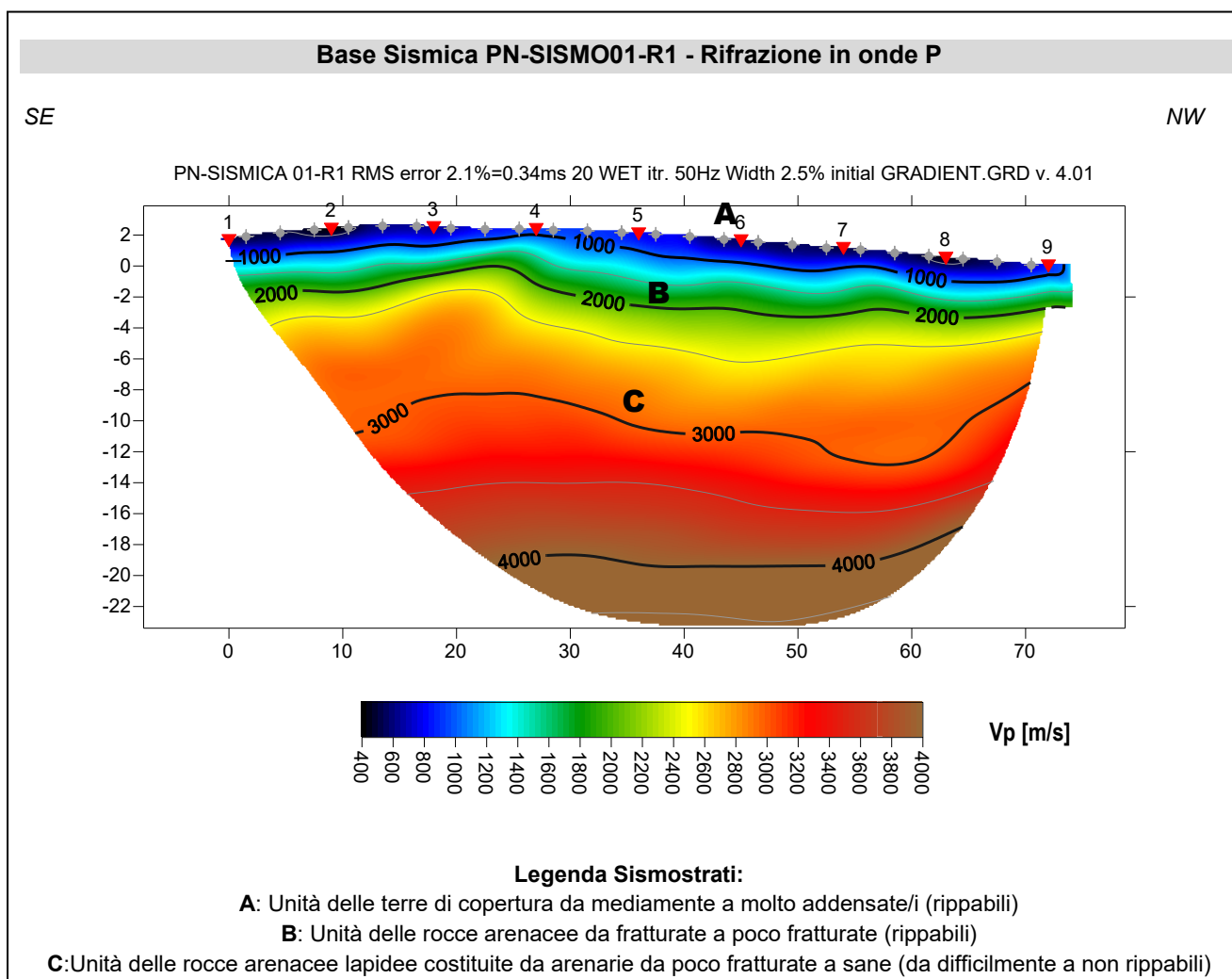
### 7.4.1 Rifrazione R1

Nella **sezione R1** anche sulla base della correlazione stratigrafica con il sondaggio S01 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 da mediamente a molto addensate/i (rippabili)	da 0,00 a 0,50/1,50	400-1000
B: Unità delle rocce arenacee da fratturate a poco fratturate (rippabili)	da 0,50/1,50 a 2,00/4,50	1000-2000
C: Unità delle rocce arenacee lapidee costituite da arenarie da poco fratturate a sane (da difficilmente a non rippabili)	da 2,00/4,50 a 22,0	2000-4500

Dall'esame della sezione tomografica R1 si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A presenta un andamento quasi parallelo al piano campagna e profondità molto ridotte arrivando quasi a 1,50 m mentre il sismostrato B si rileva sino alla massima profondità di 4,50 m da p.c. e rappresenta il limite entro il quale le arenarie sono rippabili. Il sismostrato C individuato a partire da 2,00/4,50 m sino ad almeno 22 m di profondità rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità da medie ad elevate. Dall'osservazione della sezione tomografica si può notare un aumento abbastanza repentino delle Vp e l'assenza di particolari variazioni laterali correlabili con modificazioni delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,00 e 4,50 m dal pc i terreni risultano difficilmente rippabili.



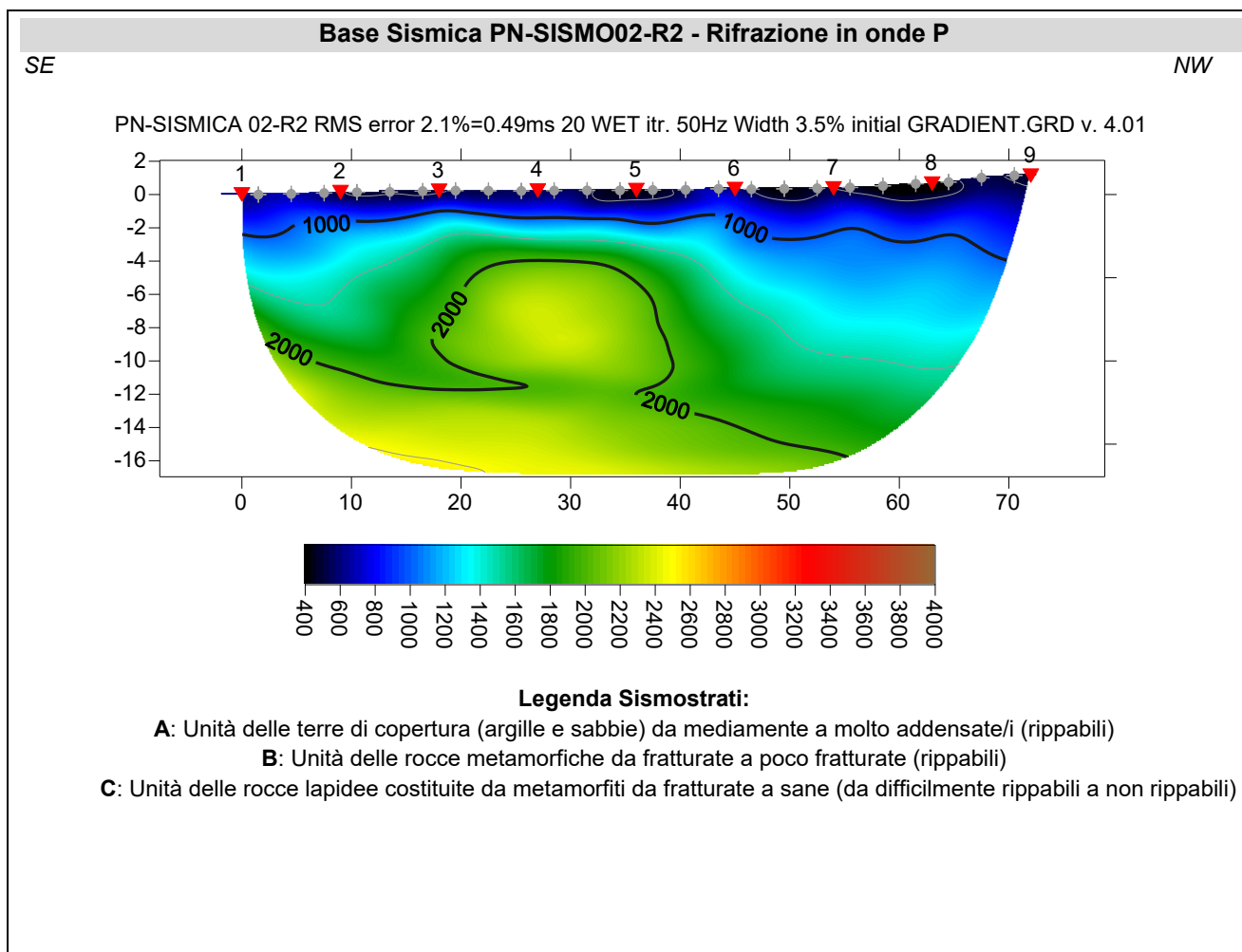
### 7.4.2 Rifrazione R2

Nella **sezione R2** anche sulla base delle correlazioni con le altre due basi sismiche è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (argille e sabbie) da mediamente a molto addensate/i (rippabili)	da 0,00 a 1,0/4,50	400-1000
B: Unità delle rocce metamorfiche da fratturate a poco fratturate (rippabili)	da 1,0/4,50 a 4,50/16,0	1000-2000
C: Unità delle rocce lapidee costituite da metamorfiti da fratturate a sane (da difficilmente rippabili a non rippabili)	da 4,50/16,0 a 17,0	2000-2500

Dall'esame della sezione tomografica R2 si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4000 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile al miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo con la profondità. La prima unità sismostratigrafica presenta un andamento parallelo al p.c., mentre nella seconda e terza unità, tra le progressive 17 e 40 m si distingue una zona caratterizzata da una minore fratturazione perché si registrano valori superiori di Vp.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 4,50 e i 16,0 m dal pc i terreni risultano difficilmente rippabili.



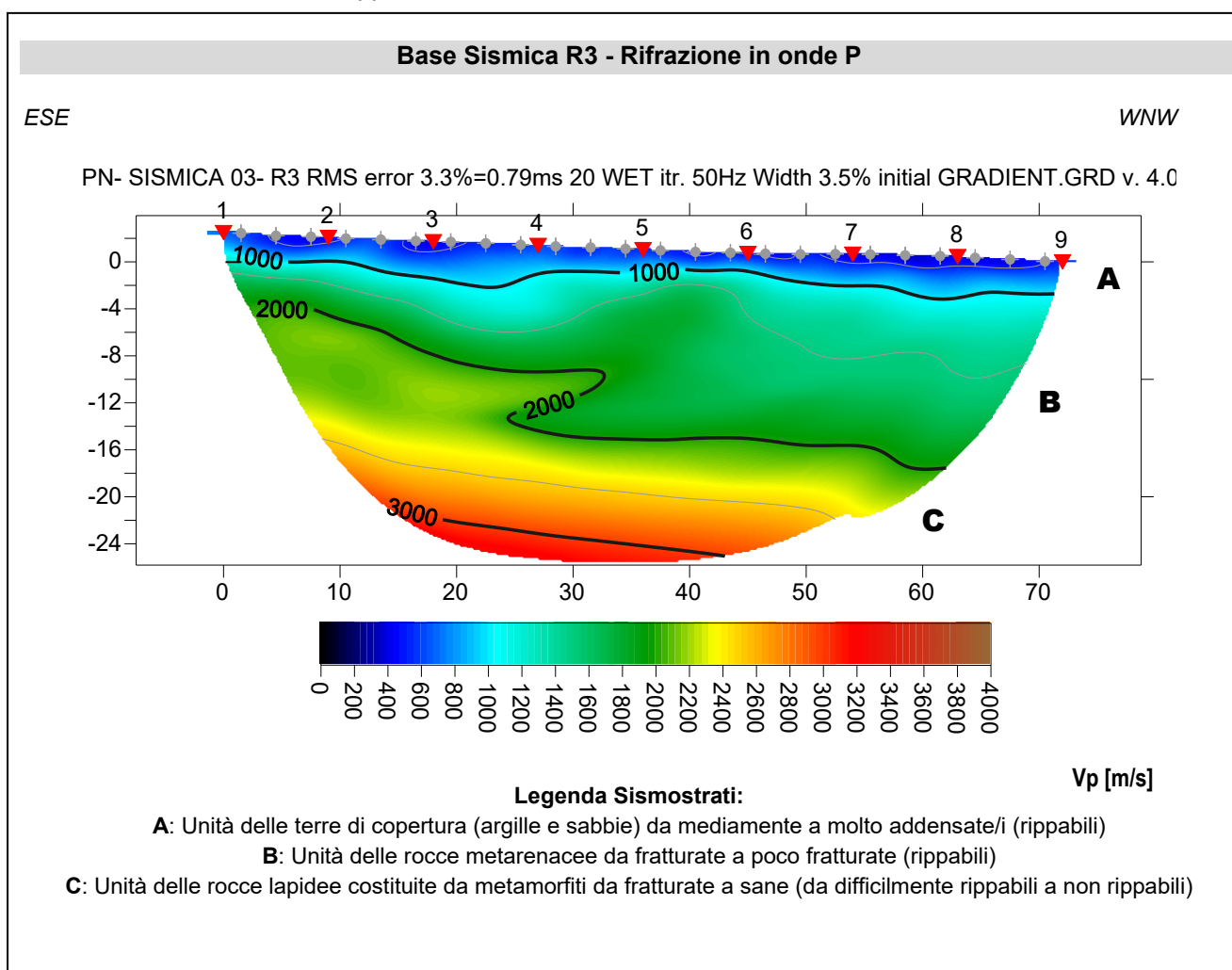
### 7.4.3 Rifrazione R3

Nella **sezione R3**, anche sulla base della correlazione stratigrafica con il sondaggio S03 è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R3 Sismostrati	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (argille e sabbie) da mediamente a molto addensate/i (rippabili)	da 0,00 a 1,0/4,0	400-1000
B: Unità delle rocce metarenacee da fratturate a poco fratturate (rippabili)	da 1,0/4,0 a 6,0/19,0	1000-2000
C: Unità delle rocce lapidee costituite da metamorfiti da fratturate a sane (da difficilmente rippabili a non rippabili)	da 6,0/19,0 a 25,0	2000-3200

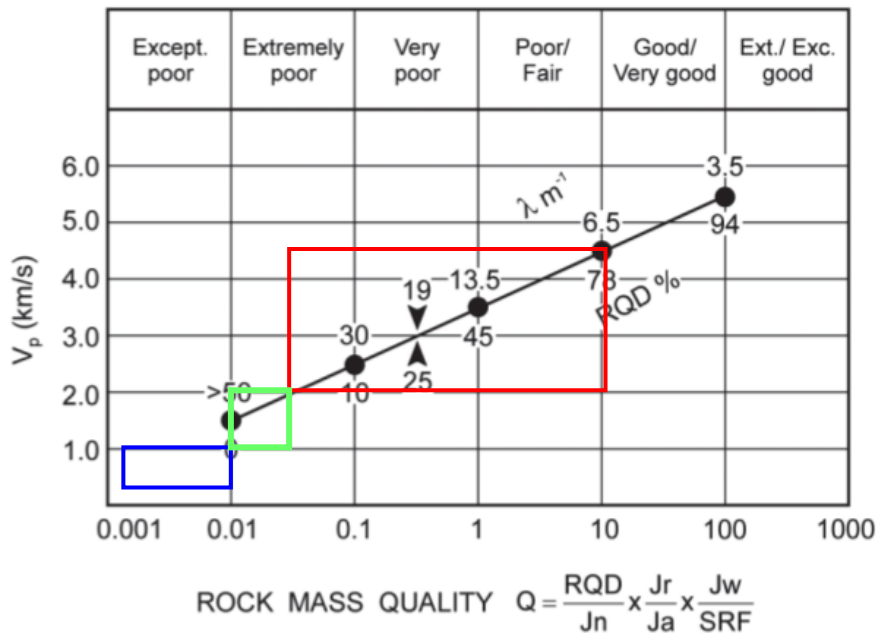
Dall'esame della sezione tomografica R3 si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3200 m/s. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile al miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nel sottosuolo con la profondità. Mentre la prima unità sismostratigrafica ha un andamento parallelo al piano campagna, il sismostrato B e parte del sismostrato C presentano, tra la progressiva 25 e 40 una diminuzione improvvisa del valore delle Vp. Questa variazione può essere associata a una discontinuità presente nel sottosuolo come ad esempio una faglia o una frattura.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 6 e 19 m dal pc i terreni risultano difficilmente rippabili.



## 7.5 INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

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



Il rettangolo blu indica il settore in cui ricade il sismostrato A che secondo tale correlazione risulta caratterizzato da valori RQD uguali a 0, da un numero di fratture per metro  $>50$  e un indice Q tra 0,001 e 0,1 (ammasso roccioso eccezionalmente scadente); il rettangolo verde indica il settore del sismostrato B, con un RQD compreso tra 0 e 5, un numero di fratture per metro che varia tra 50 e 40 e un indice di qualità Q tra 0,01 e 0,04 (ammasso roccioso estremamente scadente); il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 5 e 78, un numero di fratture per metro compreso tra 40 e 6,5 e un valore dell'indice Q tra 0,04 e 10 (ammasso roccioso da estremamente scadente a scadente/discreto).

Da quanto sopra le 3 unità sismostratigrafiche possono essere classificate come segue:

Sismostrati	$V_p$ (m/s)	RQD (%)	$\lambda$ (1/m)	Q
A: Unità delle terre di copertura e rocce totalmente fratturate o brecciate, facilmente scavabili (rippabili)	400-1000	0	$>50$	0.001-0.01
B: Unità delle rocce da molto fratturate a fratturate scavabili (rippabili)	1000-2000	0-5	50-40	0.01-0.04
C: Unità delle rocce da fratturate a mediamente fratturate (da difficilmente rippabili a non rippabili)	2000-4500	5-78	40-6,5	0.04-10

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 della tecnica della sismica MASW e 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 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	4,1	604	B
M2	9,1	532	B
M3	9,1	498	B

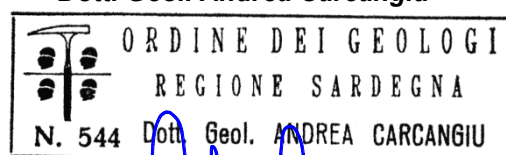
I dati derivati dalla MASW messi in correlazione con le bibliografiche indicate nei precedenti paragrafi hanno permesso di determinare i parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni e per correlazione ottenere una preliminare definizione dei parametri di resistenza al taglio.

L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione ha permesso di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dei terreni e ottenere una buona correlazione con i dati puntuali dei sondaggi geognostici. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato arenaceo e metamorfico caratterizzato da un grado di fratturazione variabile tra i differenti siti e litologie. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che in funzione delle litologie investigate nelle arenarie a partire da profondità comprese tra 2,0 e 5,0 m dal pc i terreni risultano difficilmente rippabili, mentre nelle metamorfiti si può arrivare sino a 20,0 m. 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 situazioni molto complesse, quali gli scisti metamorfici, per i quali dai sondaggi è difficile ottenere dei parametri di caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

Villa San Pietro, li 27 Novembre 2020

**Collaboratori**  
**Dott. Geol. Daniele Succu**  
**Dott. Mario Calzoni**

**Geoservice sas**  
**Il Direttore Tecnico**  
**Dott. Geol. Andrea Carcangiu**



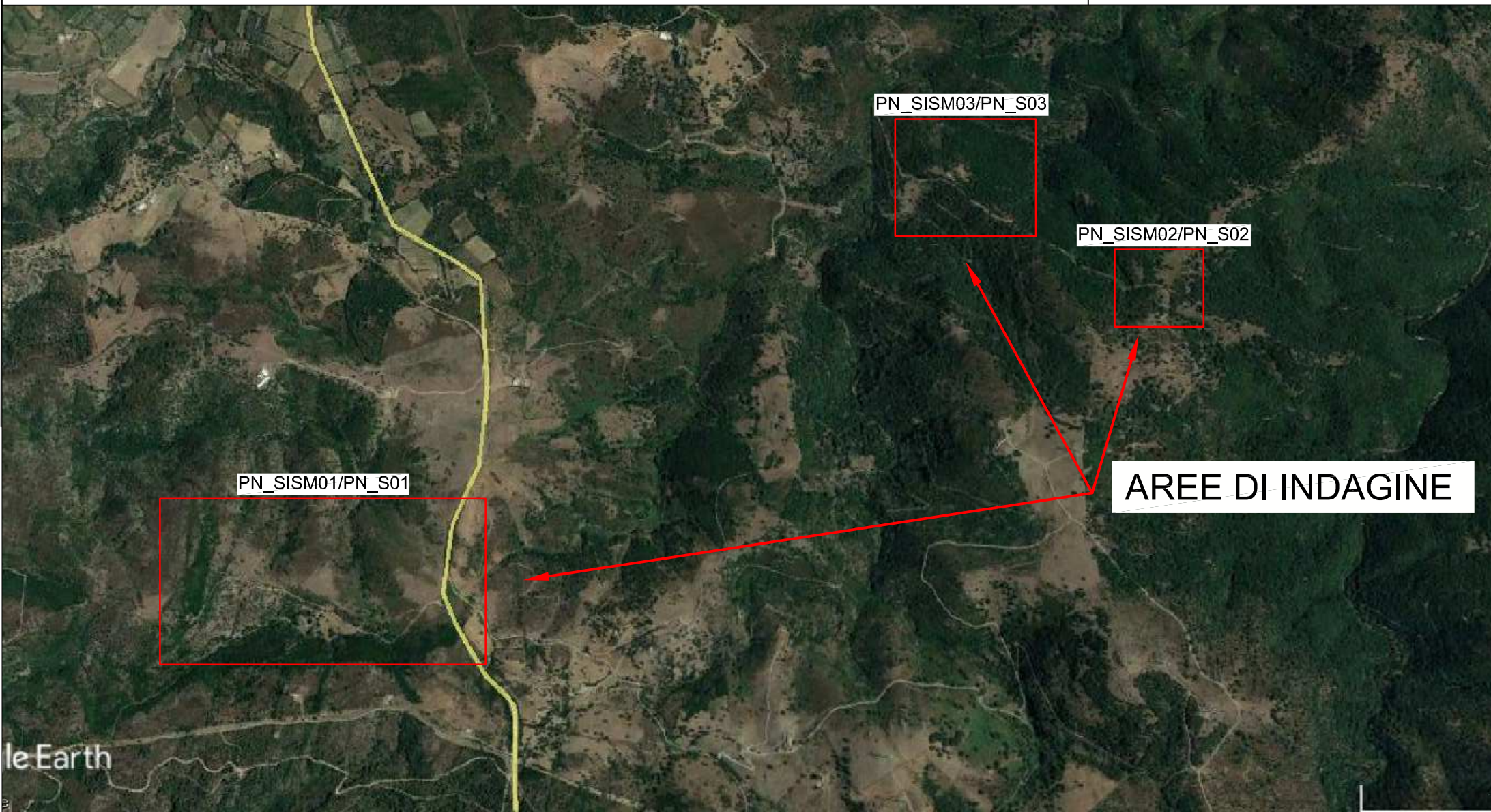
# TAVOLA 1 PLANIMETRIA GENERALE DI INQUADRAMENTO

**Progetto:** Realizzazione di un impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Siurgus Donigala (SU)

Scala:1:15.000

## Legenda

□ Aree di indagine





## TAVOLA 2 PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE PN\_SISM01

**Progetto:** Realizzazione di un impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Siurgus Donigala (SU)

Scala:1:1000

## Legenda



Stendimento PN\_SISM01 - Lunghezza = 69,0 m

→ Direzione stendimento dal primo all'ultimo geofono

● Sondaggio stratigrafico



### TAVOLA 3 PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE PN\_SISM02

**Progetto:** Realizzazione di un impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Siurgus Donigala (SU)

Scala:1:1000

### Legenda



Stendimento PN\_SISM02 - Lunghezza = 69,0 m

 Direzione stendimento dal primo all'ultimo geofono

 Sondaggio stratigrafico





## TAVOLA 4 PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE PN\_SISM03

**Progetto:** Realizzazione di un impianto per la produzione di energia da fonte eolica nel comune di Siurgus Donigala (SU)

Scala:1:1000

## Legenda



Stendimento PN\_SISM03 - Lunghezza = 69,0 m

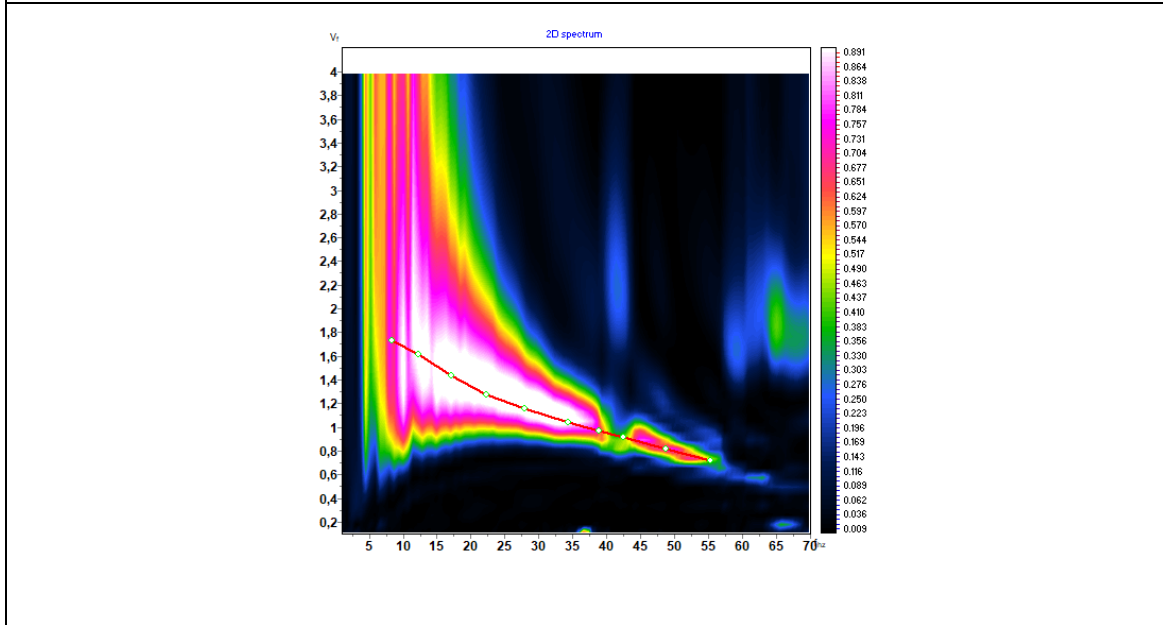
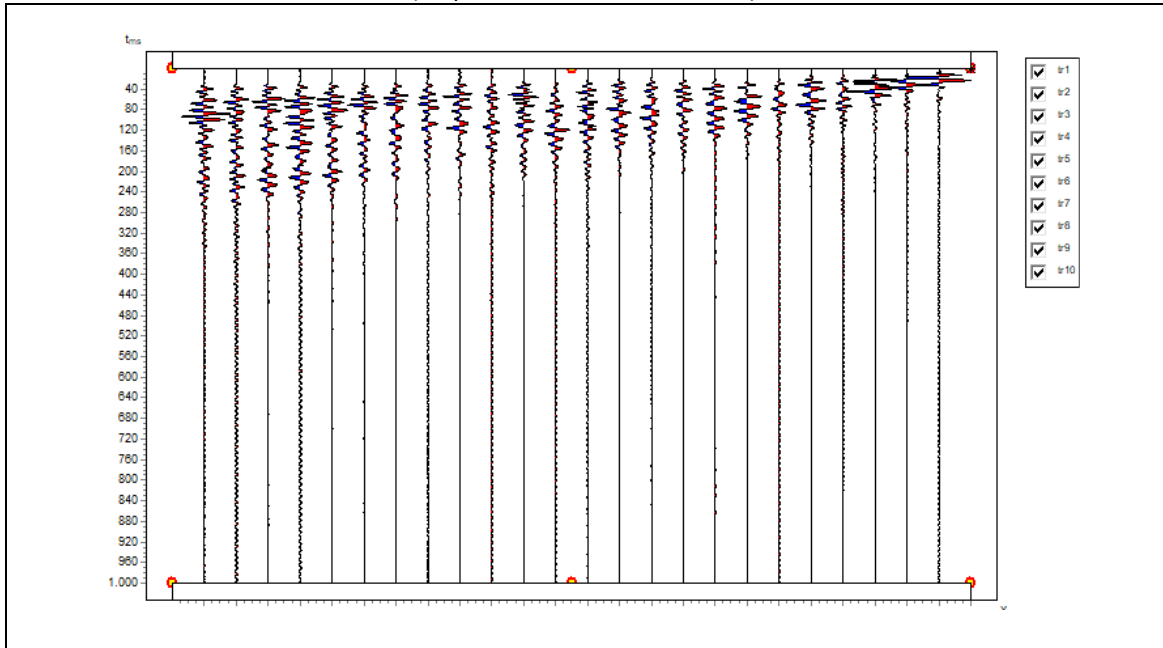
→ Direzione stendimento dal primo all'ultimo geofono

● Sondaggio stratigrafico

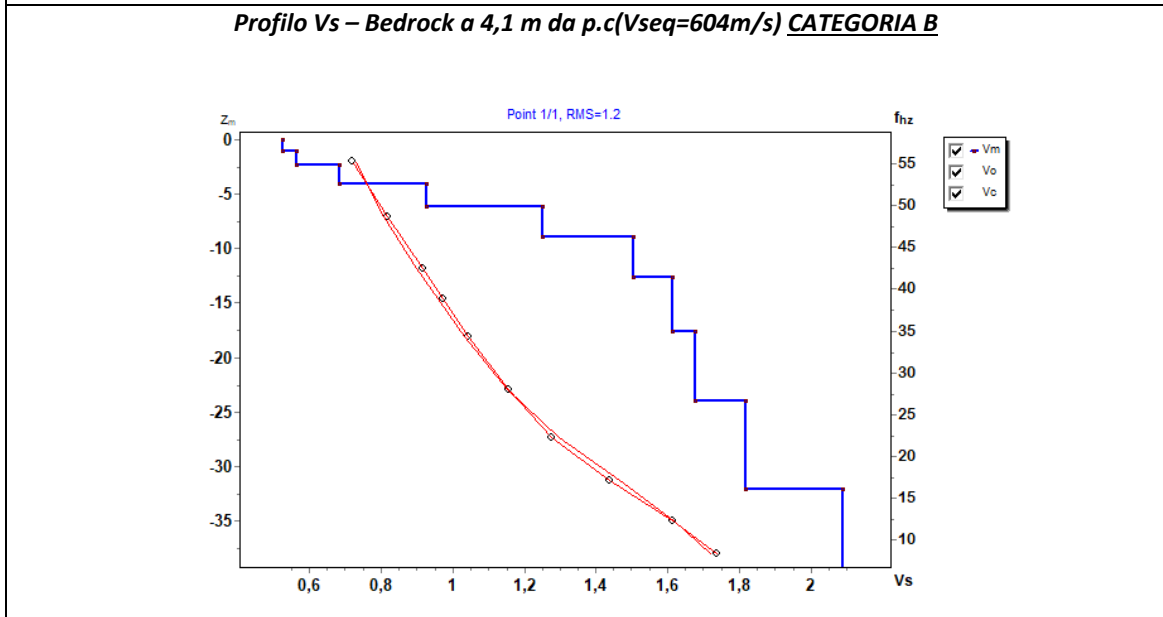


# ALLEGATO A – MASW 1

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a 72,0 m)

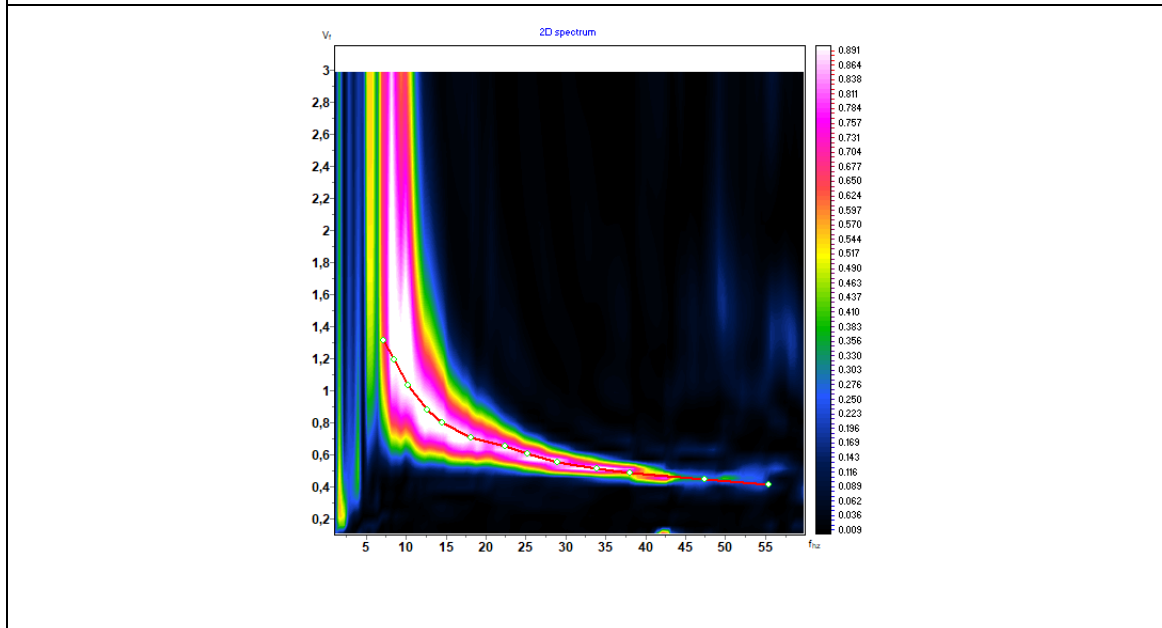
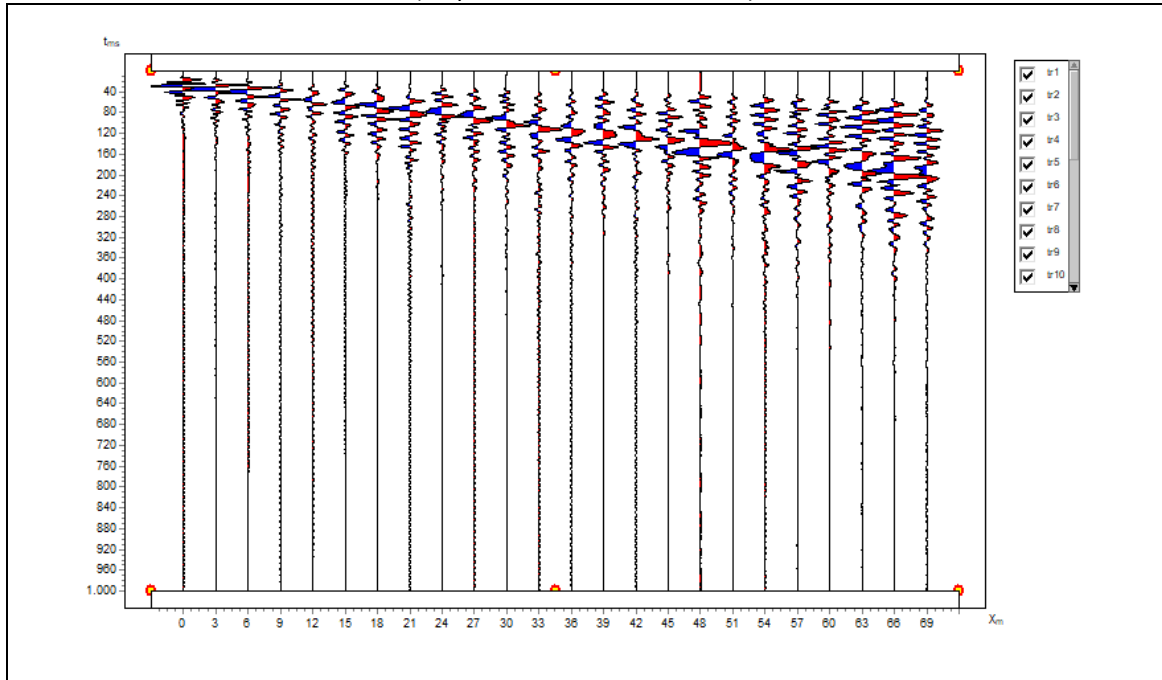


## Profilo Vs – Bedrock a 4,1 m da p.c.(Vseq=604m/s) CATEGORIA B

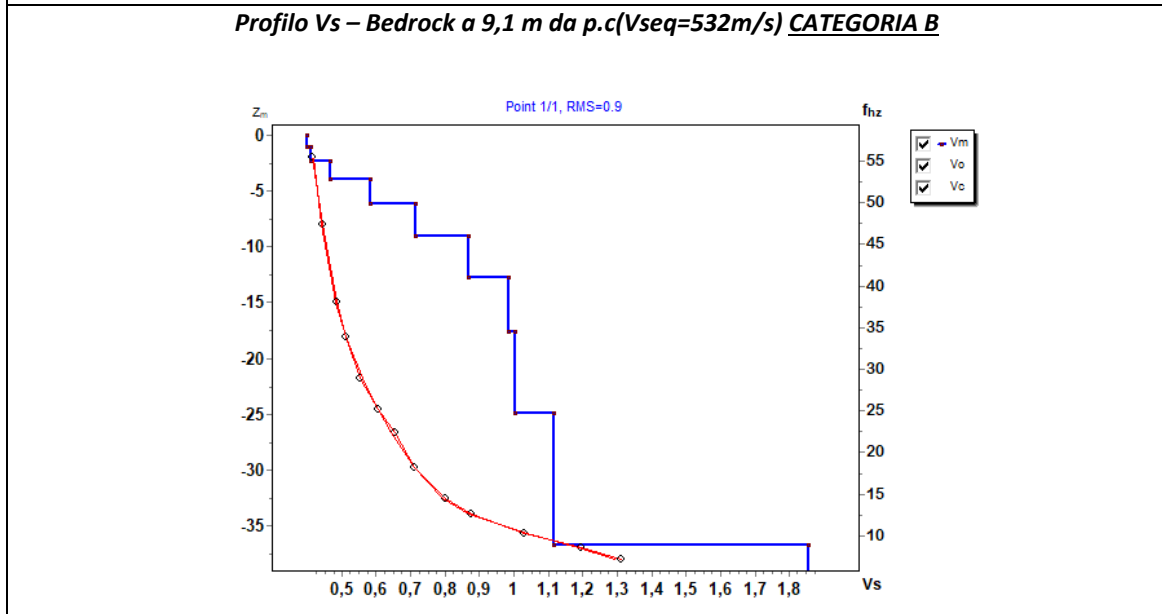


## ALLEGATO A – MASW 2

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
(Acquisizione con shot a -6,0 m)

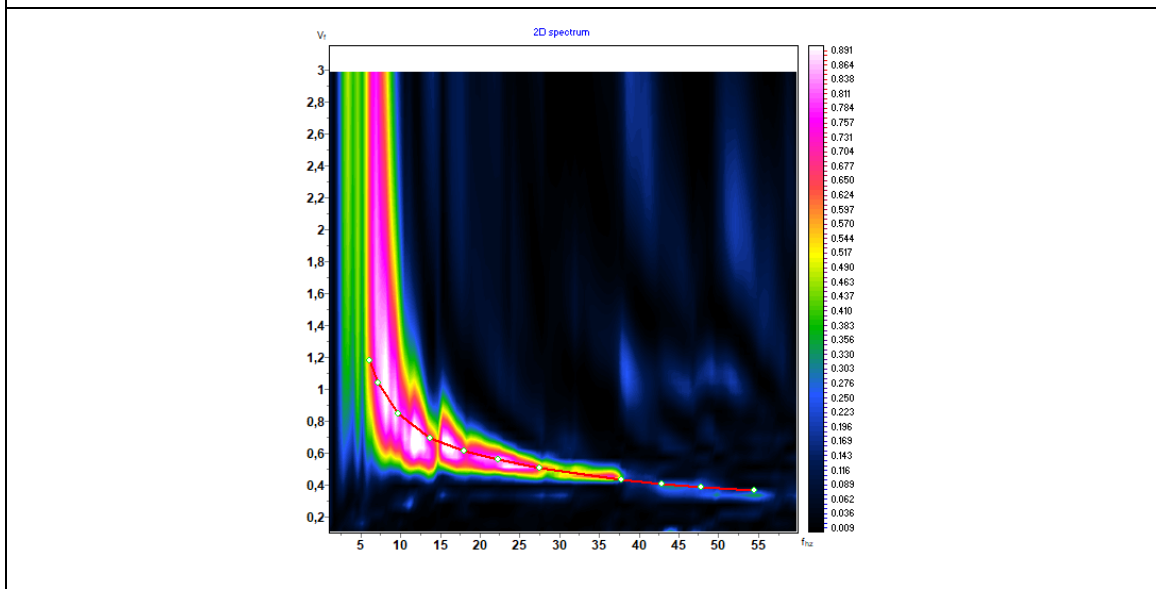
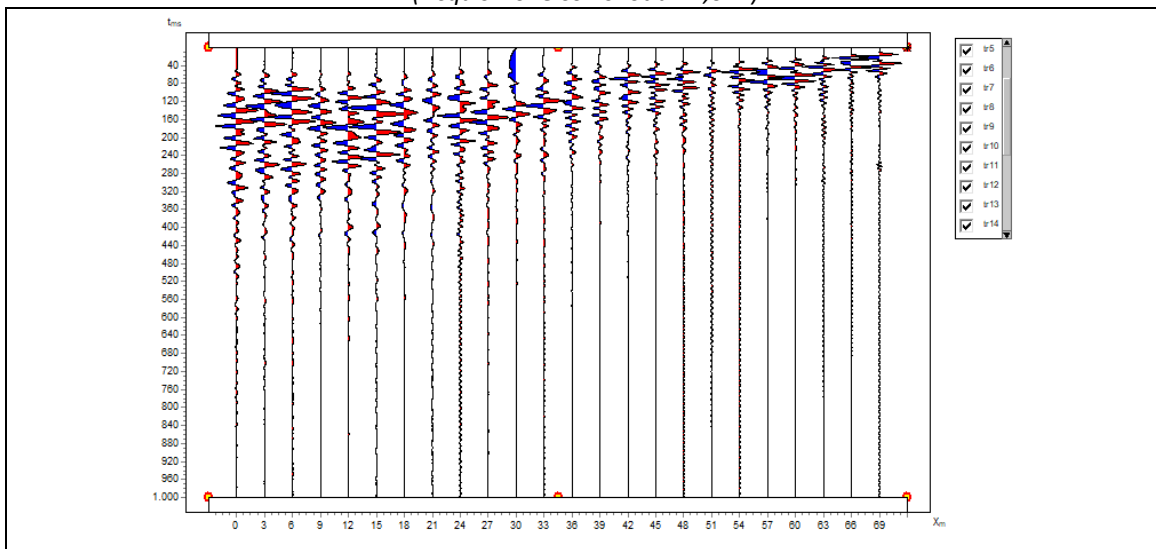


**Profilo Vs – Bedrock a 9,1 m da p.c.(Vseq=532m/s) CATEGORIA B**

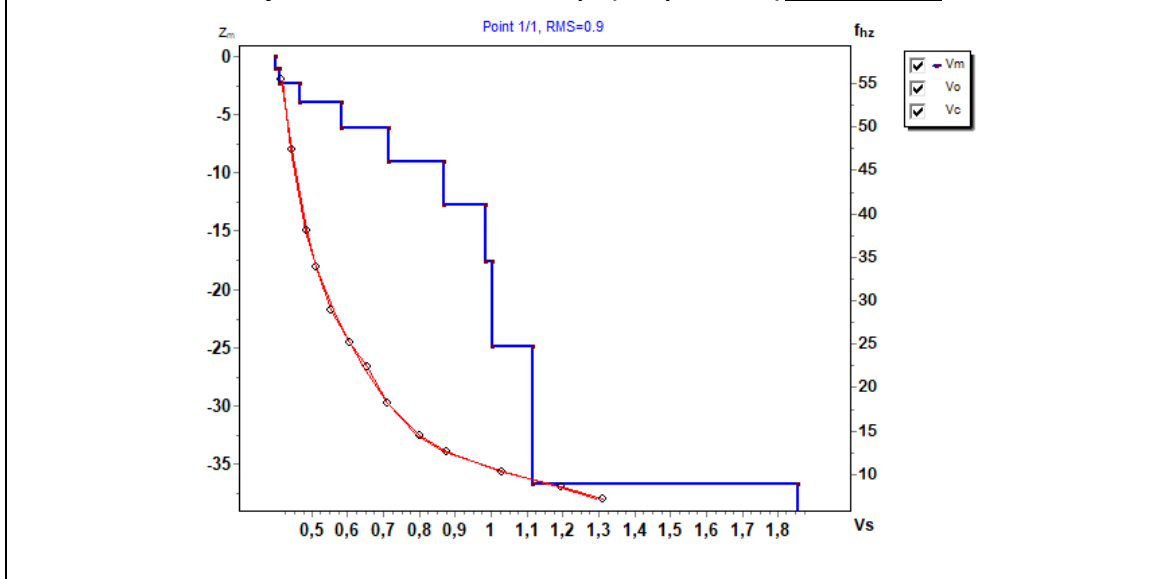


### ALLEGATO A – MASW 3

Sismogramma acquisito- Spettro velocità di fase/frequenza  
 Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo Vs  
 (Acquisizione con shot a 72,0 m)



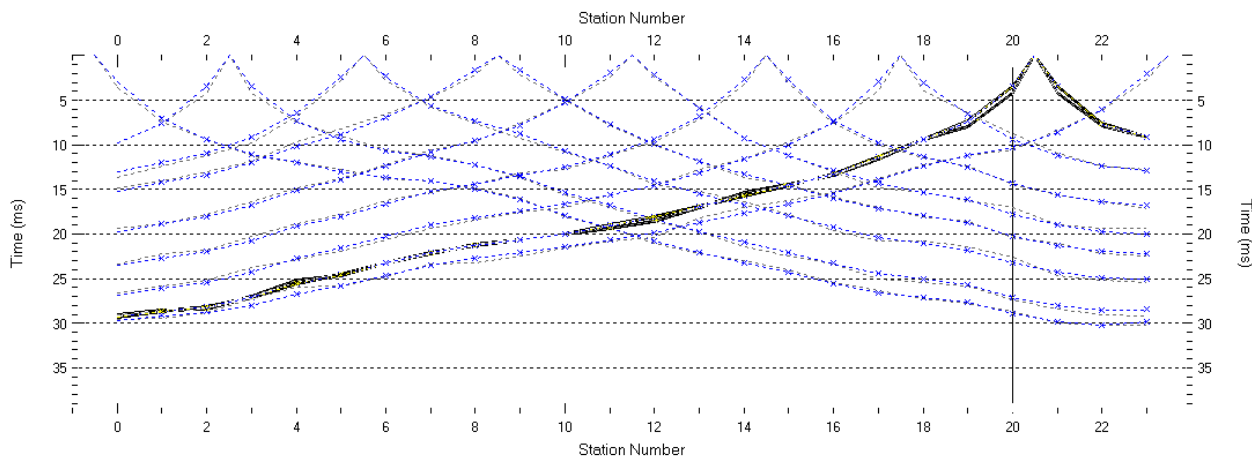
#### Profilo Vs – Bedrock a 9,1 m da p.c.(Vseq=498 m/s) CATEGORIA B



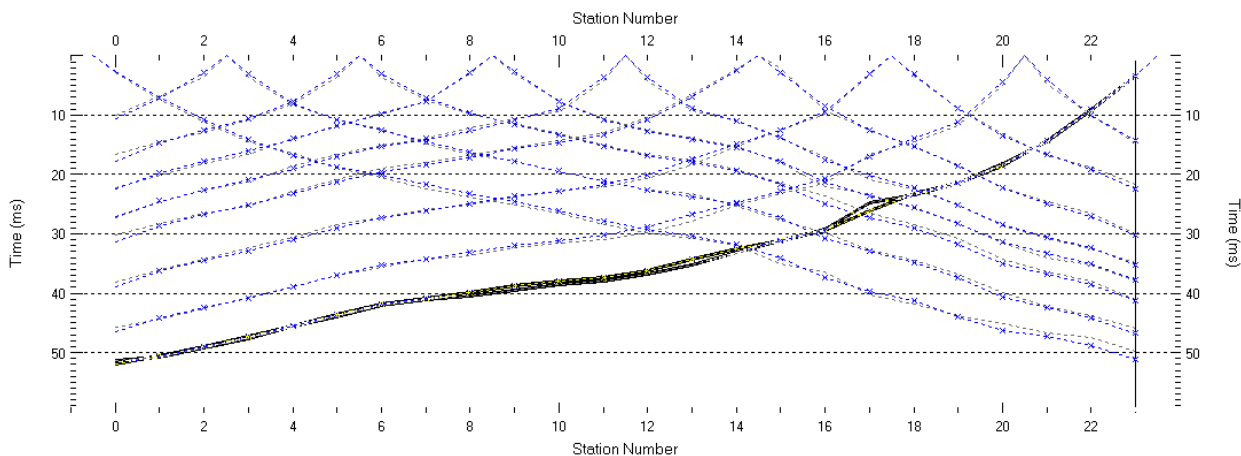


ALLEGATO B – RIFRAZIONE PN\_SISM01/PN\_SISM02/PN\_SISM03

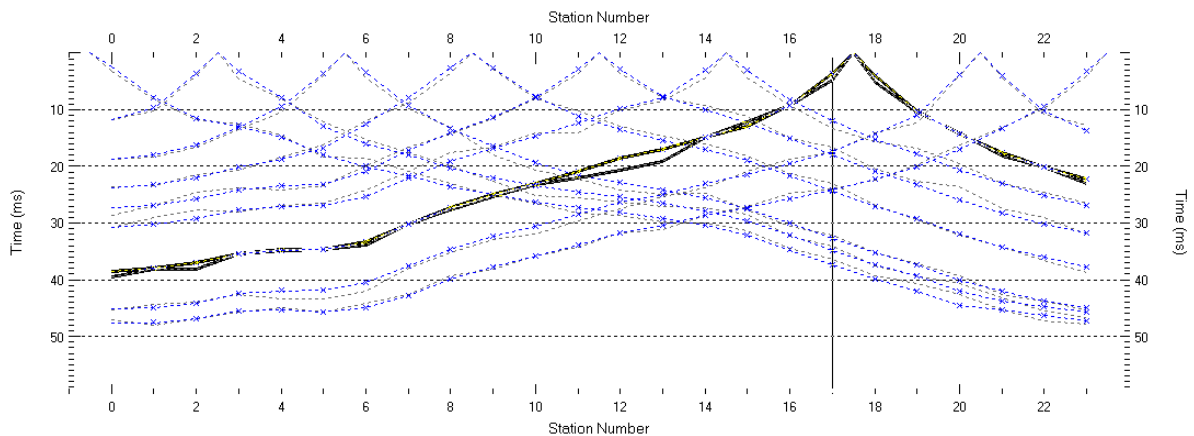
Sismica a rifrazione PN\_SISM01 in onde P  
dromocrone osservate e calcolate



Sismica a rifrazione PN\_SISM02 in onde P  
dromocrone osservate e calcolate



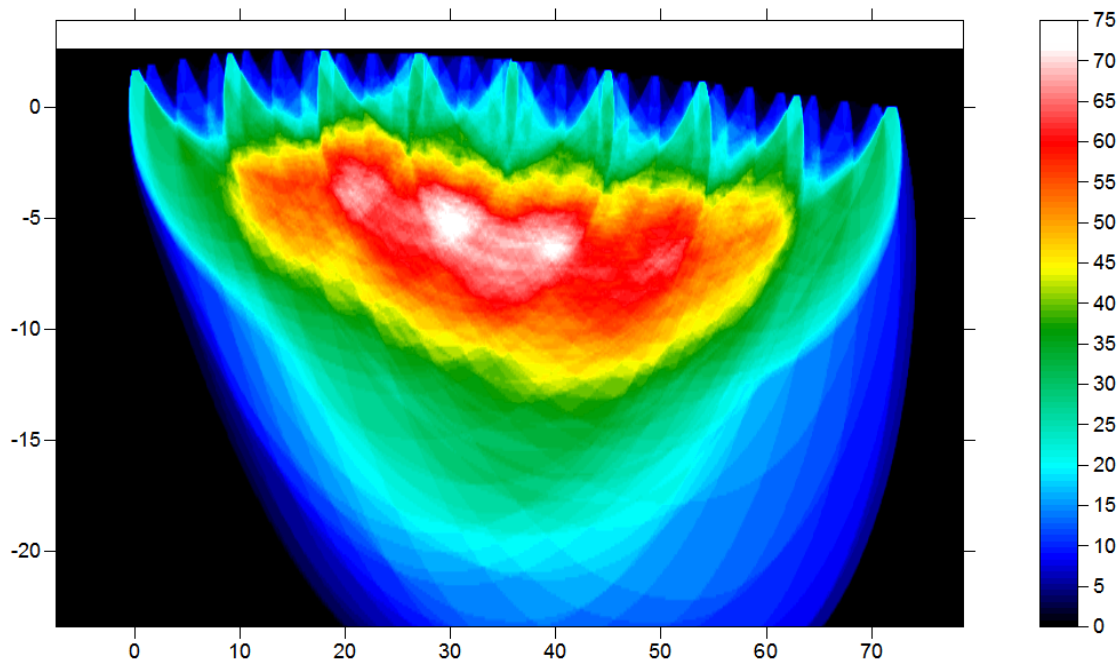
Sismica a rifrazione PN\_SISM03 in onde P  
dromocrone osservate e calcolate



ALLEGATO B – RIFRAZIONE PN\_SISM01/PN\_SISM02/PN\_SISM03

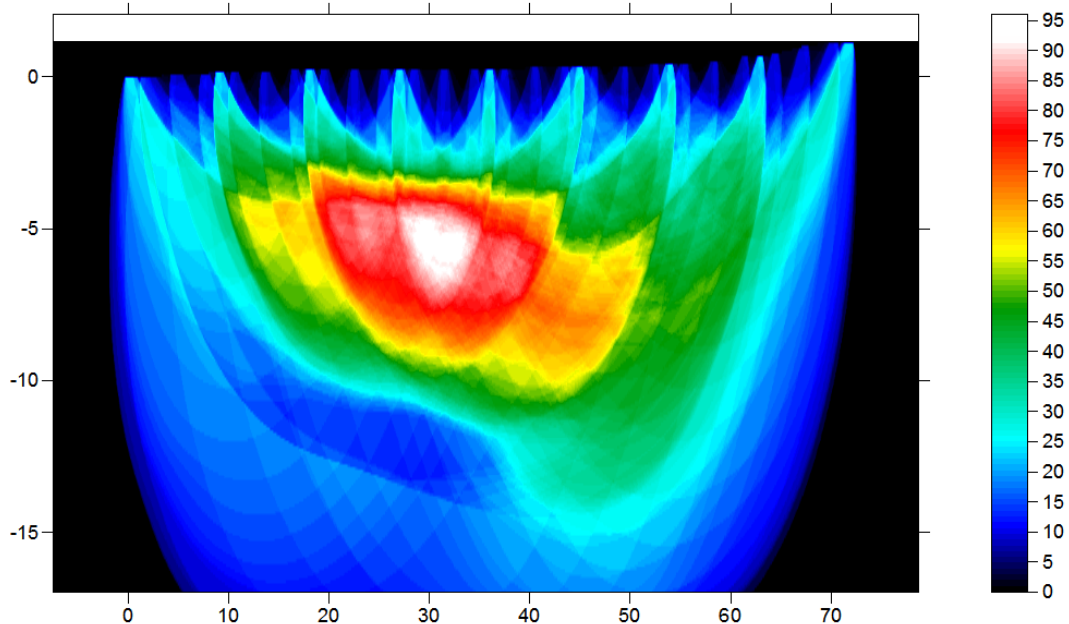
**Sismica a rifrazione PN\_SISM01 in onde P**  
**Copertura raggi sismici**

PN-SISMICA 01-R1 RMS error 2.1%=0.34ms 20 WET itr. 50Hz Width 2.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



**Sismica a rifrazione PN\_SISM02 in onde P**  
**Copertura raggi sismici**

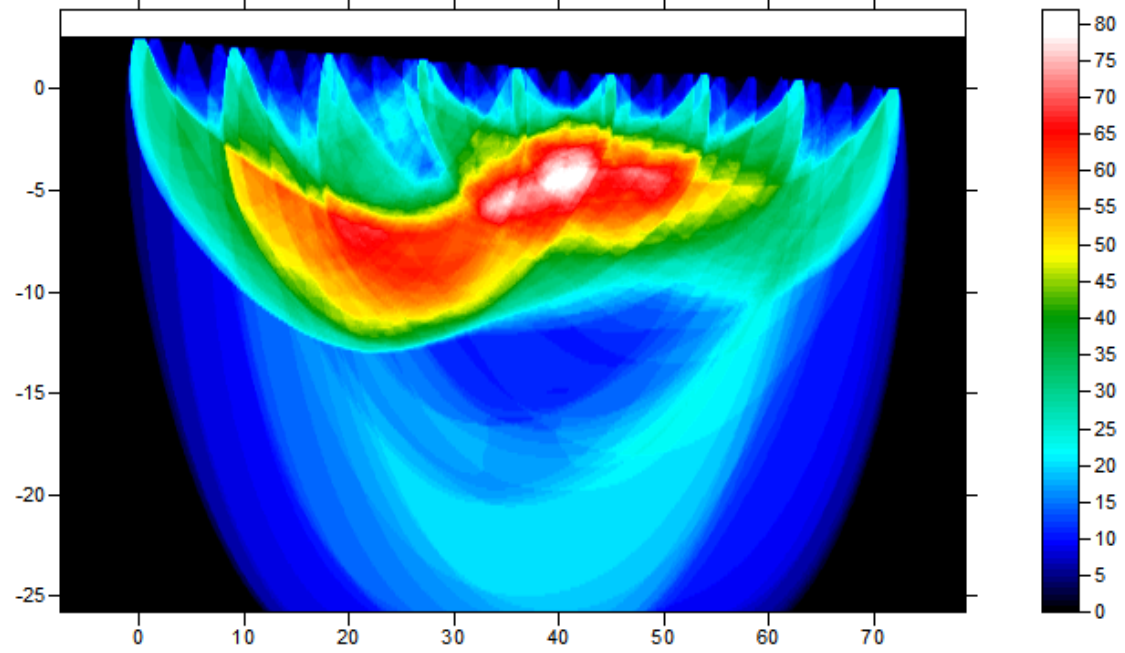
PN-SISMICA 02-R2 RMS error 2.1%=0.49ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01



# Sismica a rifrazione PN\_SISM03 in onde P

## Copertura raggi sismici

PN - SISMICA 03- R3 RMS error 3.3%=0.79ms 20 WET itr. 50Hz Width 3.5% initial GRADIENT.GRD v. 4.01





## All.C: Documentazione fotografica MASW-Rifrazione in onde P

PN-SISMO01- M1/R1 dal Geofono 1 al Geofono 24



PN-SISMO01-M1/R1 dal Geofono 24 al Geofono 1



PN-SISMO02- M2/R2 dal Geofono 1 al Geofono 24



PN-SISMO02- M2/R2 dal Geofono 24 al Geofono 1





**PN-SISMO03- M3/R3 dal Geofono 1 al Geofono 24**



**PN-SISMO03- M3/R3 dal Geofono 24 al Geofono 1**

