



# Comuni di Ozieri e Chiaramonti

Provincia di Sassari

Regione Sardegna



## PARCO EOLICO "ISCHINDITTA"

### PROGETTO DEFINITIVO

PROPONENTE

**GRVDEP Energia S.r.l.**

Via Nazario Sauro 9 - 09123 Cagliari  
PEC: grvdepenegiasrl@legalmail.it  
C.F. e P.IVA 03857060929



OGGETTO

### 2 - STUDI GEOLOGICI E GEOTECNICI

#### RELZIONE GEOLOGICA, IDROGEOLOGICA E SISMICA

TIMBRI E FIRME



**STUDIO ROSSO**  
INGEGNERI ASSOCIATI

VIA ROSOLINO PILO N. 11 - 10143 - TORINO  
VIA IS MAGLIAS N. 178 - 09122 - CAGLIARI  
TEL. +39 011 43 77 242

[studiorosso@legalmail.it](mailto:studiorosso@legalmail.it)  
[info@sria.it](mailto:info@sria.it)  
[www.sria.it](http://www.sria.it)

dott. geol. Francesca DEMURTAS  
Ordine dei Geologi Regione Sardegna  
Posizione n.644  
Cod. Fisc. DMR FNC 79S55 E441X



CONSULENZA

Coordinatore e responsabile delle attività: Dott. ing. Giorgio DEMURTAS

CONTROLLO QUALITA'

DESCRIZIONE	EMISSIONE
DATA	MAG/2020
COD. LAVORO	409/SR20
TIPOL. LAVORO	D
SETTORE	S
N. ATTIVITA'	02
TIPOL. ELAB.	RS
TIPOL. DOC.	E
ID ELABORATO	01
VERSIONE	0

REDATTO

geol. Francesca DEMURTAS

CONTROLLATO

ing. Luca DEMURTAS

APPROVATO

ing. Roberto SESENNA

ELABORATO

# 2.1

## INDICE

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>2</b>
<b>2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE</b> .....	<b>3</b>
<b>3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA</b> .....	<b>4</b>
3.1 CARATTERI GEOLOGICI DEI TERRENI AFFIORANTI.....	5
3.1.1 <i>Successione metamorfica (PALEOZOICO)</i> .....	5
3.1.2 <i>Ciclo vulcanico Calco - alcalino (OLIGO -MIOCENE)</i> .....	5
3.1.3 <i>Depositi di versante legati a gravità (OLOCENE)</i> .....	6
<b>4. CARATTERI STRUTTURALI</b> .....	<b>7</b>
<b>5. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO</b> .....	<b>9</b>
<b>6. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO</b> .....	<b>11</b>
6.1 CENNI METEO - CLIMATICI.....	11
6.2 CARATTERI IDROGEOLOGICI DEI TERRENI.....	11
<b>7. CARTA GEOTECNICA</b> .....	<b>13</b>
7.1 RILIEVO GEOMECCANICO.....	13
7.2 MANUAL INDEX TEST.....	14
7.3 PROVE SCLEROMETRICHE.....	15
7.4 ACCLIVITÀ.....	15
7.5 CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI LITOTIPI AFFIORANTI.....	15
<b>8. INDAGINI GEOGNOSTICHE E QUADRO DEI RISULTATI OTTENUTI NELLE INDAGINI IN SITU</b> .....	<b>17</b>
8.1 SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO.....	18
8.1.1 <i>Sondaggio geognostico WG 5</i> .....	18
8.1.2 <i>Sondaggio geognostico WG 7</i> .....	21
8.2 INDAGINE GEOFISICA.....	24
8.2.1 <i>Indagine sismica mediante metodologia MASW</i> .....	25
8.2.2 <i>Indagine sismica a Rifrazione</i> .....	28
8.3 QUADRO DELLE ANALISI DI LABORATORIO.....	32
8.4 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLA ROCCIA.....	33
<b>9. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO</b> .....	<b>35</b>
9.1 TIPOLOGIA MODELLO GEOLOGICO N. 1.....	36
9.2 TIPOLOGIA MODELLO GEOLOGICO N.2.....	37
<b>10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</b> .....	<b>39</b>

### ALLEGATI - RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOGNOSTICHE

- ALLEGATO 1 – Planimetrie ubicazione indagini
- ALLEGATO 2 – Stratigrafie sondaggi
- ALLEGATO 3 – Report fotografico
- ALLEGATO 4 – Determinazione del peso di volume
- ALLEGATO 5 - Indagine geofisica

## 1. PREMESSA

Il presente studio supporta il progetto per la realizzazione di un parco eolico in prossimità del limite amministrativo tra i comuni di Ozieri e Erula, in provincia di Sassari, lungo il Monte Sassu. L'area è già sede di un distinto parco eolico, presente nel settore più a nord, tra i comuni di Tula e Erula. In tale contesto, lo studio che segue si propone di valutare l'idoneità dei terreni presenti nell'area dal punto di vista geologico, morfologico e stratigrafico del nuovo parco in progetto.

Il parco eolico proposto, composto da 10 aerogeneratori, si sviluppa sulla sommità di un rilievo asimmetrico allungato secondo direzione NE-SW dall'andamento sub pianeggiante con morfologia ad altopiano che degrada dolcemente verso il settore NW, mentre il versante SE è fortemente acclive con ripide pendenze. Il settore interessa un areale di circa 8 km<sup>2</sup>, che si estende nella parte meridionale del territorio comunale di Erula, e della parte settentrionale del comune di Ozieri.

Lo studio si pone come obiettivo definire la geologia, la successione stratigrafica, le caratteristiche morfologiche, idrogeologiche e sismiche dei terreni interessati dallo sviluppo del progetto e di un loro intorno significativo.

L'analisi è stata sviluppata a partire da una verifica dei dati disponibili: Cartografia geologica ufficiale in scala 1:100.000, unitamente alla visione delle carte aerofotogrammetriche del 2016, a cui ha fatto seguito un accurato rilevamento di campagna che ha consentito la ricostruzione dettagliata della stratigrafia del terreno. I rilievi e le osservazioni dirette sul terreno, unitamente alle informazioni acquisite di carattere bibliografico di studi precedenti effettuati nella zona, hanno permesso di chiarire la situazione geologica di superficie e di definire i caratteri geomorfologici dell'area. I dati raccolti sono stati restituiti in forma cartografica, utilizzando come base la cartografia tecnica della Regione Sardegna alla scala 1:10.000.

Lo studio dell'area è stato eseguito a norma di quanto richiesto dal Testo Unico *"Norme tecniche per le costruzioni"* NTC 2018, al paragrafo 6.2.1. che individua le fasi riguardanti la caratterizzazione e modellazione geologica del sito, nonché dalla Circolare esplicativa del Consiglio Sup. dei LL PP del 21 gennaio 2019 *"Istruzioni per l'Applicazione delle NTC 2018"*.

La caratterizzazione e la modellazione geologica del sito consiste nella ricostruzione dei caratteri litologici, stratigrafici, strutturali, idrogeologici, geomorfologici e, più in generale, di pericolosità geologica del territorio, descritti e sintetizzati dal modello geologico di riferimento, il quale costituirà un elemento di riferimento per la progettazione delle opere.

## 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area in esame è individuata cartograficamente nel foglio 460 sezione I-Chiaramonti, dell'I.G.M.I. in scala 1:25.000, nelle sezioni 460 070 "Chiaramonti" e 460 080 "Tula" della cartografia tecnica della Regione Sardegna in scala 1:10.000, nei Fogli 180 - "Sassari" e 181 "Tempio Pausania" della cartografia geologica ufficiale in scala 1:100.000.

Il territorio si estende prevalentemente in un altipiano vulcanico allungato secondo una direzione NE-SW, rappresentante lo spartiacque idrografico delle acque superficiali che, nella parte settentrionale, confluiscono ai corsi d'acqua che poi si immettono sul Fiume Coghinas, nella piana alluvionale di Erula, e nella parte meridionale, verso il Rio Su Rizzolu, affluente del Lago Coghinas sul lato sud est dell'area indagata.

Il sistema collinare è inciso da un drenaggio idrico superficiale, che riprende le lineazioni principali della zona, secondo una direttrice primaria NW-SE, e secondaria ortogonale ad essa.

Il territorio su cui andrà a svilupparsi il parco eolico è rappresentato da un alto morfologico, costituente il bordo sud orientale dell'esteso apparato vulcanico miocenico, afferente al Distretto vulcanico di Osilo-Castelsardo.

Il rilievo in esame, denominato Monte Sassu, si erge a quota media 600-620 m s.l.m., il cui limite orientale segue il confine amministrativo tra i comuni di Tula e Erula; a sud degrada con ripide pendenze verso la valle del rio Rizzolu, valle tettonica impostata parallelamente allo sviluppo del rilievo NE-SW; nel settore occidentale il versante prosegue invece secondo la medesima direzione, allungato dalla linea di cresta delle colline di Monte Carralzu e Elighia, attraversate dalla S.S n.132 "di Ozieri". Nel lato settentrionale il rilievo degrada dolcemente, con minime pendenze, verso la valle alluvionale del Rio 'Anzos, in comune di Perfugas, facente parte dei bacini montani del sistema fluviale del Fiume Coghinas.



Figura 1 – Inquadramento areale su foto aerea dell'area di progetto (Fonte Google Maps 2020).

### 3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO DELL'AREA

L'area investigata è individuata al confine tra le regioni storiche del Logudoro, a sud, e dell'Anglona a nord, nella Sardegna settentrionale. Il rilievo indagato costituisce l'alto strutturale della larga depressione che si identifica più ad ovest, con il semi-graben miocenico del Bacino di Porto Torres-Sassarese, e si raccorda ai rilievi granitici paleozoici della Gallura più ad est.

Il territorio è caratterizzato dalla presenza di rocce vulcaniche, afferenti al Ciclo vulcanico calcalalino oligo-miocenico (Aquitaniense-Burdigaliano), che interessa in modo esteso tutta la Sardegna centro occidentale, e si presenta con cospicui spessori che raggiungono parecchie centinaia di metri. Il settore indagato è rappresentato da serie da dacitiche a riolitiche, principalmente in espansioni ignimbritiche<sup>1</sup>, cupole di ristagno e rare colate, a cui si associano prodotti freatomagmatici e talora livelli epiclastici intercalati. Si presentano alla scala dell'affioramento di colore rossastro.

Da un punto di vista geodinamico questo ciclo vulcanico è comunemente associato ad un modello di subduzione oceanica con formazione di un bacino di retroarco che sarebbe rappresentato dal Bacino balearico, sintettonico alla rotazione del blocco Sardo-corso associata alla fase post collisionale dell'orogenesi Appenninica (Miocene inf.). Durante tali movimenti si è avuta la formazione di locali zone di compressione e distensione, quali il bacino di Chilivani-Berchidda e il bacino di Porto Torres. Tra le varie colate sono intercalati livelli di tufo di colore grigio chiaro, talvolta argillificati.

Tale successione vulcanica poggia sul basamento Paleozoico, evidente nel settore occidentale (verso Tula), rappresentato dal complesso scistoso metamorfico, di incerta datazione (pre-Cambriano ?) facente parte del complesso d'alto grado metamorfico, che affiora a nord della linea Posada-Asinara e costituisce la testimonianza dell'evoluzione tettono-metamorfica collisionale e post-collisionale ercinica della Sardegna Settentrionale. Questa formazione è costituita essenzialmente da paragneiss, micascisti e quarziti in facies anfibolitica di pressione intermedia con sovraintrusione di alta temperatura. Sono di natura essenzialmente pelitico-arenacea e presentano le tre fasi deformative della Bassa Gallura.

Nel bordo sud orientale del tavolato vulcanico lungo i ripidi versanti al di sopra del basamento Paleozoico si rinvencono invece depositi di versante (Olocene), eterometrici e spigolosi, legati a fenomeni gravitativi, crollo e scivolamento, per l'erosione e conseguente arretramento dell'orlo del tavolato vulcanico stesso. Talvolta tali depositi presentano una debole coesione, con ciottoli immersi in matrice argillosa per la presenza di minerali ferrosi dovuti ai processi di alterazione chimica della roccia d'origine. e mesozoico, sono immersi in matrice argillosa con forte presenza di minerali ferrosi.

L'assetto strutturale dell'area è costituito da lineamenti tettonici, con direzioni principali N-S, NNW-SSE e ortogonale NE-SW, che hanno scomposto il tavolato vulcanico e il sottostante basamento paleozoico, le cui lineazioni hanno definito il reticolo idrografico principale della zona.

---

<sup>1</sup> Carmignani L., Oggiano G., Barca S., Conti P., Salvadori I., Eltrudis A., Funedda A., Pasci S., (2001) - Geologia della Sardegna, Note illustrative della Carta Geologica della Sardegna alla scala 1:200.000. Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia, Serv. Geol. It., 60. Ist. Poligr. Zecca dello Stato, Roma.

### 3.1 CARATTERI GEOLOGICI DEI TERRENI AFFIORANTI

#### 3.1.1 Successione metamorfica (PALEOZOICO)

La successione metamorfica di seguito descritta rappresenta la litologia più antica affiorante nell'area: essa come detto è presente nel settore nord-est, in territorio amministrativo di Tula, e non interessa in modo diretto l'area di posa degli aerogeneratori in progetto, ma piuttosto è presente nella parte settentrionale dove è individuata l'area di ingresso al parco eolico e dove verranno eseguiti i lavori per la sistemazione della strada di accesso all'area. Essa è rappresentata in prevalenza da paragneiss, micascisti e quarziti in facies anfibolitica, di natura pelitico - arenacea, che fanno parte del Complesso d'alto grado metamorfico, affiorante a nord della linea Posada -Asinara, linea di collisione della catena ercinica, che ha determinato un elevato metamorfismo e tre distinte fasi deformative, con pieghe mesoscopiche, asimmetriche ed elevata scistosità. Si presentano in facies a grana minuta, con presenza di feldspati e un elevato grado di cristallinità, di colore vario. La loro presenza è evidente morfologicamente per il carattere montuoso dei rilievi, rispetto all'andamento tabulare delle soprastanti vulcaniti oligo - mioceniche.

#### 3.1.2 Ciclo vulcanico Calco - alcalino (OLIGO -MIOCENE)

Le rocce vulcaniche, rappresentate in prevalenza da Depositi di flusso piroclastico in facies ignimbratica, interessano l'area di posa dei generatori in progetto, e sono presenti in modo esteso in tutta l'area. Nel complesso mostrano una facies in prevalenza rocciosa e massiva, con giacitura tipica delle formazioni di copertura suborizzontale, piana, talvolta frastagliata dalle intersezioni dei tagli erosivi, ma con pendici marginali a ripida scarpata. Alla scala del rilevamento si presentano fratturate in superficie, talvolta ricoperte da un debole strato pedogeneizzato.

Petrograficamente presentano una notevole omogeneità di tipi, a composizione prevalente riolitica e dacitica; la struttura è di tipo porfirico a fenocristalli spesso corrosi, con tessiture fluidali e vetrosità abbondante; saldati, di colore rossastro.



*Figura 2 – Litologia vulcanica affiorante a piano campagna: si presenta localmente fratturata e con buone caratteristiche meccaniche sin dalla superficie.*

### *3.1.3 Depositi di versante legati a gravità (OLOCENE)*

Nel bordo sud-orientale del tavolato vulcanico, si rinvencono numerosi cumuli detritici di versante, dovuti allo smantellamento delle formazioni basaltiche oligo - mioceniche, caratterizzati da ciottoli spigolosi e massi, in matrice parzialmente compatta o semi-incoerente, spesso inglobanti massi isolati o porzioni rocciose provenienti dal franamento di porzioni di roccia provenienti dalle pareti basaltiche in sommità.

## 4. CARATTERI STRUTTURALI

L'assetto strutturale dell'area indagata, riflette gli eventi deformativi legati alle vicende tettoniche occorse durante tutte le fasi deformative che hanno interessato la regione, fin dal Paleozoico e successivamente nel Terziario e Quaternario.

Dalla fase metamorfica nel Paleozoico manifestatasi con il metamorfismo d'alto grado nelle sequenze sedimentarie precambriane, attraverso una elevata scistosità, estremamente varia in termini di inclinazione e direzione, le manifestazioni tettoniche erciniche hanno manifestato nel territorio l'apertura delle fratture post orogeniche, con movimenti distensivi caratterizzati da faglie dirette orientate prevalentemente NW-SE associate all'intrusione del Complesso intrusivo granitoidale (non presente nell'area in esame e affiorante nel settore più orientale dell'area).

Successivamente ad una lunga fase di "stasi" tettonica del periodo Mesozoico, che ha caratterizzato il settore di interesse con movimenti di risollevarimento che non hanno lasciato significative evidenze nel territorio, nel periodo Terziario (Cenozoico) si sono succedute diverse fasi tettoniche compressive: la fase pirenaica (Cherchi & Tremolieres 1984<sup>2</sup>), che ha prodotto pieghe con direzione assiale N50, e la fase appenninica, che in un contesto più generale ha determinato la fine dell'apertura del Mediterraneo occidentale a causa della collisione del blocco sardo-corso contro il blocco apulo. A questa fase sono attribuite faglie trascorrenti e fasce transtensive nella Sardegna centro-settentrionale.

Segue una fase tettonica transtensiva Oligo-Aquitaniense, con faglie trascorrenti ENE-WSW e l'importante manifestazione effusiva del vulcanismo oligo-miocenico sardo, caratterizzante il territorio in esame, che rappresenta uno degli eventi geologici terziari più importanti del Mediterraneo occidentale. L'importanza di questo ciclo vulcanico è testimoniata dalla grande estensione degli affioramenti e dai cospicui spessori delle successioni vulcaniche che raggiungono parecchie centinaia di metri. Conseguente alla messa in posto delle vulcaniti si è avuta una fase distensiva legata all'apertura del Bacino di Porto Torres e del Bacino del Logudoro, e quello Balearico (apertura del Mar di Sardegna) nel Burdigaliano con faglie che interagiscono con le precedenti strutture a pieghe realizzando complesse geometrie che hanno un ruolo fondamentale nella circolazione idrica sotterranea.

Al Pliocene infine, viene attribuita una fase tettonica responsabile del sollevamento generale della regione, che si realizza con faglie dirette ad andamento NS e con la riattivazione di strutture preesistenti con direzione ENE, che hanno generato depressioni in cui si conservano le vulcaniti mioceniche e i depositi clastici del Miocene superiore (settore a sud dell'abitato di Tula, esterno all'area in esame).

---

<sup>2</sup> Cherchi A., Tremolieres P. (1984): Nouvelles données sur l'évolution structurale au mesozoïque et cenozoïque de la Sardaigne et leurs implications Géodynamiques dans le cadre méditerranéen. C.R. Acad. Sc. Paris. Serie 2 298, Paris.



## 5. INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

I fattori che hanno più marcatamente condizionato l'evoluzione del rilievo sono essenzialmente le litologie affioranti e la tettonica post-eocenica connessa all'orogenesi alpina che ha interessato il settore.

Da un punto di vista geomorfologico, il Monte Sassu, alto morfologico avente quota media 625 m s.l.m., di natura vulcanica, è definito come un altopiano vulcanico di forma allungata, con asse SW-NE, degradante verso NW con deboli pendenze (5-10%), mentre nel settore SE, l'altopiano si interrompe con una scarpata a pendenze elevate, dell'ordine di 55-65%, che si raccorda al substrato metamorfico paleozoico sottostante e al settore di pianura, a quota circa 300 m s.l.m.

L'area di posa degli aerogeneratori in progetto viene individuata nei settori più pianeggianti dell'altopiano, con pendenze pari allo 0-0,1%.

La morfologia ad altopiano è estesamente presente in tutto il settore limitrofo, solcato da valli e incisioni torrentizie, che nella parte valliva raggiungono dislivelli rilevanti. Le valli riprendono le fratture tettoniche regionali e i sistemi di faglia principali, aventi direzione NNW-SSE e NE-SW, che hanno scomposto il tavolato vulcanico e il sottostante basamento paleozoico, definendo l'aspetto del paesaggio morbido e variamente ondulato.

Le parti morfologicamente più aspre si rinvengono in corrispondenza di rocce molto resistenti alla degradazione, quali ad esempio le rocce paleozoiche metamorfiche affioranti nel settore orientale, dove il paesaggio è caratterizzato da rilievi più pronunciati e valli più marcatamente incise.

Il paesaggio si presenta per lo più monotono, caratterizzato in prevalenza da forme sub pianeggianti e dominante rocciosità, dovuta all'affioramento della roccia vulcanica sin dalla superficie: localmente, dove i processi pedogenetici hanno avuto la possibilità di svilupparsi, è presente un suolo poco profondo, ricco in minerali argillosi e ossidi di ferro.

Da evidenziare sono gli orli del tavolato basaltico, nel settore SE, dove la rottura di pendio generata essenzialmente dall'erosione differenziale nel passaggio di litologia tra le vulcaniti e le sottostanti metamorfiti, determina processi geomorfologici in atto, legati a dinamiche di crollo e ribaltamento dei blocchi vulcanici, fratturati e dislocati, in cui la gravità gioca un ruolo determinante per la loro movimentazione. Alle pendici del tavolato si rinvengono infatti depositi di versante, caratterizzati da ciottoli spigolosi e massi, in matrice parzialmente compatta o semi-incoerente, spesso inglobanti massi isolati o porzioni rocciose provenienti dal franamento di porzioni di roccia provenienti dalle pareti vulcaniche in sommità.

I lineamenti geomorfologici ed i principali processi morfoclimatici in atto nell'area di studio sono riportati nella carta geologica e geomorfologica, nella quale vengono distinte le forme generali del rilievo e i principali processi geomorfologici in atto, elaborata a seguito del rilievo di superficie e ad un'accurata indagine fotointerpretativa.



*Figura 4 – Andamento pianeggiante del paesaggio, caratterizzato da pendenze nulle e litologia affiorante sulla gran parte del territorio.*

## 6. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

### 6.1 CENNI METEO - CLIMATICI

Da un punto di vista climatico il settore Nord Occidentale della regione è riconducibile al tipo mediterraneo secco-sub umido, influenzato dalla morfologia e dalla vicinanza dal mare (circa 20km).Le precipitazioni sono concentrate nei mesi autunnali e invernali, con valori minimi nel periodo estivo, e variano tra 475 e 900 mm nelle aree di altipiano, corrispondenti alle quote più elevate. I venti predominanti sono il maestrale e il grecale<sup>3</sup>.

### 6.2 CARATTERI IDROGEOLOGICI DEI TERRENI

Come già accennato, il paesaggio presenta una morfologia ad altipiano, sub pianeggiante e blandamente degradante verso NW. Il reticolo idrografico superficiale, di tipo semplice, poco gerarchizzato e a carattere torrentizio, ricalca le lineazioni tettoniche principali, in prevalenza parallelo nelle litologie vulcaniche, con direzione NW-SE, mentre sulle litologie metamorfiche presenta un reticolo di tipo dendritico poco gerarchizzato e valli con profilo a V, fortemente incassate a testimonianza di una energia di rilievo tuttora importante e attiva.

Il ruscellamento idrico superficiale è strettamente condizionato da fattori morfologici e litologici: le litologie vulcaniche presentano infatti una permeabilità per porosità bassa e nulla, i deflussi avvengono quasi esclusivamente per ruscellamento superficiale e spesso sono presenti, soprattutto nella stagione autunno invernale, ristagni idrici, naturali e artificiali. Tra i corsi d'acqua degni di nota si citano, da E verso W, il rio Longu Idanu, il rio Trainu de Ferulas, riu Dore.

Da un punto di vista idrogeologico è possibile suddividere i terreni in base alle caratteristiche geolitologiche, con riferimento alla capacità di assorbimento.

Le litologie vulcaniche pur essendo, come detto, impermeabili, presentano una medio alta permeabilità per fessurazione, strettamente legata ai sistemi di fratturazione e ai rapporti di giacitura delle discontinuità, che costituiscono un serbatoio acquifero importante, funzione del loro spessore, più elevato nel settore occidentale e settentrionale dell'area. La successione vulcanica, costituita da flussi piroclastici sovrapposti, immerge verso NW e, verosimilmente, da precedenti studi effettuati nella zona, la circolazione idrica sotterranea tende a far confluire i flussi idrici (isopieze) verso tale direzione, seguendo il gradiente topografico (Carmignani *et alii*, 2001). Localmente, in corrispondenza di faglie, possono essere presenti circuiti preferenziali con elevata portata, spesso sfruttate con alcuni pozzi presenti nelle aziende agricole. Sono presenti rare emergenze idriche al contatto tra le vulcaniti e il tetto delle litologie paleozoiche.

Il complesso metamorfico paleozoico anch'esso presenta una permeabilità assente per porosità, che localmente può risultare apprezzabile per fratturazione, consentendo l'infiltrazione delle acque meteoriche e alimentando la circolazione idrica sotterranea profonda, generalmente di modesta entità. Le sorgenti attestate

---

<sup>3</sup> Motroni A., Canu S., Bianco G., Loi G. (2003) - *Development of a Geographic Information System for assessing and monitoring Environmentally Sensitive Areas to Desertification in Sardinia*, in "Desertification: actors, research, policies. Comitato Nazionale per la lotta alla siccità e alla desertificazione, Roma.

su queste litologie, pur essendo legate all'andamento stagionale delle precipitazioni, e quindi con portate variabili, assicurano un certo deflusso anche nei periodi più secchi.

Le coperture detritiche allo stato sciolto o semicoerente, presenti ai bordi del tavolato vulcanico, presentano permeabilità medio alta per porosità, sono comunque sede di modesti acquiferi.

Idrogeologicamente, si possono dunque riassumere i seguenti complessi acquiferi principali, riportati graficamente nell'elaborato "2.5 Carta Idrogeologica":

#### LITOTIPI PERMEABILI PER POROSITA' (PERMEABILITA' PRIMARIA)

- Depositi detritici di versante (OLOCENE): Permeabilità medio alta;
- Depositi ignimbritici in disfacimento (OLIGO-MIOCENE): Permeabilità medio bassa;

#### LITOTIPI PERMEABILI PER FRATTURAZIONE (PERMEABILITA' SECONDARIA)

- Ignimbriti (OLIGO - MIOCENE) Permeabilità medio alta per fessurazione;
- Depositi di flusso piroclastico, ignimbriti in alternanza con andesiti (OLIGO - MIOCENE) Permeabilità medio alta per fessurazione;
- Andesiti (OLIGO - MIOCENE) Permeabilità medio alta per fessurazione;
- Micascisti e Paragneiss (PRECAMBRIANO) Permeabilità bassa o assente per fessurazione.

## 7. CARTA GEOTECNICA

L'analisi geotecnica finalizzata a definire le caratteristiche meccaniche dei terreni direttamente interessati alla posa degli aerogeneratori, è stata effettuata sulla base della litologia e dell'assetto strutturale dei terreni, che ha consentito di ipotizzare un modello geotecnico del terreno in esame, riportato nell'elaborato "2.6 Carta Geotecnica", di seguito descritta.

Il modello proposto discende dai risultati del rilievo diretto in campagna, unitamente alle indagini geognostiche dirette eseguite, descritte nei successivi paragrafi, e alla analisi delle acclività, seguendo la norma UNI EN ISO 14689:2018 "Identificazione e classificazione delle rocce". La presenza di una folta copertura arborea e vegetale, e lo sviluppo del suolo pedogenetico non ha consentito il rilievo geomeccanico delle fratture e dei giunti su tutta l'area in esame, utile per una valutazione qualitativa della roccia: la classificazione della roccia è stata effettuata dove possibile attraverso analisi di tipo speditivo *in situ* e dalle risultanze dei carotaggi, attraverso l'identificazione dell'indice RQD "Rock Quality Designation", espresso in funzione del valore della frequenza dei giunti che attraversano la matrice lapidea, il cui indice ne classifica la qualità (i cui dettagli sono descritti nei paragrafi successivi).

I risultati dello studio hanno consentito di effettuare una classificazione geotecnica, che ha portato all'individuazione di unità geotecniche considerate omogenee, in riferimento alla costituzione geologica dei terreni, al grado di alterazione, alle condizioni morfologiche (acclività) e alle condizioni idrogeologiche dell'area. Essi sono sintetizzati nell'Elaborato "2.6 Carta geotecnica" effettuata in scala 1:10.000, che contiene una prima distinzione dei litotipi sulla base delle caratteristiche tecnico meccaniche. Si tratta di una valutazione di massima, che dovrà essere verificata puntualmente nella fase progettuale esecutiva.

### 7.1 RILIEVO GEOMECCANICO

In ciascun punto di posa delle turbine in progetto, è stato condotto un rilevamento geomeccanico diretto, che ha permesso di rilevare le caratteristiche fisico -meccaniche di massima dei terreni indagati, le cui caratteristiche, confrontate con i risultati delle indagini geognostiche eseguite nella campagna di indagini (sondaggi geognostici e indagini sismiche di resistività), hanno permesso di definire i caratteri geotecnici preliminari dei terreni. Sono state effettuate delle indagini di tipo speditivo *in situ*, attraverso la definizione della resistenza a compressione uniaassiale della roccia che fa riferimento alla classe litotecnica determinabile dal "Manual Index Test" proposto dall'ISRM (1978), ridefinita attraverso analisi più precisa, effettuata sugli affioramenti di roccia, mediante sclerometro per roccia "martello di Schmidt".

Il rilevamento effettuato sugli ammassi rocciosi di natura vulcanica afferenti al Ciclo vulcanico Calco alcalino Oligo - miocenico, ha evidenziato in sintesi la presenza di uno strato di alterazione superficiale poco profondo, in cui i processi pedogenetici hanno portato alla formazione di un suolo di profondità da 0.40 a 0.70 m dal piano campagna, ciottoloso, a matrice argillosa, marrone, su cui si è impostata la copertura vegetale, sfumante alla coltre alterata del substrato vulcanico di natura ignimbratica, al di sotto del quale si rileva da subito la presenza della roccia, con caratteristiche massive, fratturata e di buona qualità (il cui indice RQD già dai primi metri

presenta una percentuale di qualità discreta, compresa tra il 50-75%, come rilevato dal sondaggio WG 5, riportato in figura 5. Talvolta la roccia con buona qualità è evidente sin dalla superficie.

L'ammasso roccioso risulta interessato da vari sistemi di fratturazione, per l'intensa tettonizzazione subita, che lo ha scomposto in vari sistemi di discontinuità, avente direzione preferenziale N-S e NW-SE, con persistenza alta. Tali fratture coincidono con le principali linee di deflusso idrico superficiale e sotterraneo. In corrispondenza di queste fratture, localmente, la roccia è stata interessata da processi meccanici di granulazione con la formazione di una matrice vulcanica totalmente fratturata e debolmente alterata, con giunti obliqui e subverticali, alterati, e riempimento da millimetrico a centimetrico sabbioso argilloso, assimilabile geotecnicamente ad una ghiaia con sabbia debolmente cementata, totalmente ossidato, marrone (sondaggio WG 7, figura 6). In presenza di queste lineazioni tettoniche, si è dunque evidenziata la presenza di una unità litotecnica con caratteristiche meccaniche riferibili a un deposito ghiaioso sabbioso, le cui proprietà meccaniche sono riportate nel Modello geologico 2.

## 7.2 MANUAL INDEX TEST

Durante le indagini speditive eseguite in situ è stata effettuata una prima valutazione, del tutto indicativa, della resistenza a compressione uniassiale della roccia, attraverso una classe litotecnica determinabile dal "Manual Index Test" (ISRM, 1978) lungo le aree di posa degli aerogeneratori.

Questa prova prevede l'utilizzo in campagna del martello da geologo sull'affioramento roccioso e, in funzione della "reazione" dell'ammasso, è possibile identificare la roccia in una classe litotecnica, avente determinate caratteristiche di Resistenza alla compressione (definita in MPa), attraverso il confronto con la seguente tabella:

MANUAL INDEX TEST (da ISRM, 1978)

CLASSE	DESCRIZIONE	IDENTIFICAZIONE	U.C.S. (MPa)
R1	ROCCIA MOLTO DEBOLE	Si sbriciola sotto colpi decisi con la punta del martello. Si graffia con coltello	1.0-5.0
R2	ROCCIA DEBOLE	Graffiata con difficoltà dal coltello. Piccole scalfitture provocate da colpi decisi con la punta del martello	5.0-25
R3	ROCCIA MEDIAMENTE RESISTENTE	Non può essere scalfita né graffiata dal coltello. Un campione può fratturarsi con un singolo colpo di martello	25-50
R4	ROCCIA RESISTENTE	Un campione richiede più di un colpo di martello per fratturarsi	50-100
R5	ROCCIA MOLTO RESISTENTE	Un campione richiede molti colpi di martello per fratturarsi	100-250
R6	ROCCIA ESTREM. RESISTENTE	Un campione può solo essere scheggiato col martello	>250

- \* U.C.S. = Resistenza a compressione uniassiale (MPa).
- \* Le classi da S1 a S6 riguardano terre coesive, argille, argille limose e combinazioni di limo e argilla con sabbia a drenaggio lento.
- \* Le classi R0 a R6 riguardano rocce.

Figura 5: Tabella di riferimento per la definizione del Manual Test Index (ISRM, 1978).

Dalle indagini effettuate, è stato possibile classificare la roccia in esame secondo le classi R 4 (Roccia Resistente) e R 5 (Roccia molto resistente), con un grado di resistenza alla compressione uniassiale pari a 50-100 MPa e 100-250 MPa.

### 7.3 PROVE SCLEROMETRICHE

Le prove sclerometriche eseguite mediante il Martello di Schmidt, sono state effettuate perpendicolarmente alle superfici pulite delle discontinuità rilevate negli affioramenti rocciosi superficiali. Le prove sono state condotte sulla base di almeno 10 letture di cui si sono scartate le 5 più basse, con calcolo della media delle 5 più alte. Il valore medio di ogni riferimento è utilizzato per la valutazione finale dell'indice JCS (resistenza alla compressione delle pareti delle discontinuità).

<i>Punti indagati</i>	<i>Valori indici di rimbalzo</i>										<i>media</i>	<i>Resistenza (MPa)</i>
OZ 1	20	20	38	38	38	39	40	40	40	41	40	52,3
OZ 5	20	35	38	38	38	39	40	40	42	42	40	52,3
OZ 6	20	20	38	38	39	40	40	42	45	46	43	54,6
OZ 7	20	35	38	40	42	42	45	45	46	46	45	56,2
OZ 8	21	21	38	41	43	43	45	45	48	49	46	57

**Tabella 1: Indice di rimbalzo e correlazione con la Resistenza alla compressione uniassiale ricavati mediante Martello di Schmidt mediante la relazione di Irfan e Dearman (1978):  $Su = 0,775 R + 21,3$ .**

### 7.4 ACCLIVITÀ

Attraverso l'analisi morfometrica sulla acclività del territorio, elaborata in ambiente GIS attraverso il rilievo planomaltrimetrico eseguito nel corso delle indagini, è stato possibile definire due classi di acclività:

la prima include i terreni aventi morfologia pianeggiante, con pendenze che vanno dallo 0 al 20%,

la seconda include i terreni con pendenze che vanno dal 20 al 50%.

Pendenze maggiori non interessano le aree di posa degli aerogeneratori.

Attraverso questa indagine di acclività del pendio, insieme alle caratteristiche litologico stratigrafiche, è stata effettuata una suddivisione del territorio per aree omogenee, in riferimento alle proprietà geologiche, idrogeologiche, morfologiche, fisiche e meccaniche. Tali areali definiscono le unità geotecniche osservate nell'area di rilevamento, riportate nella cartografia di sintesi allegata (Elaborato 2.6 - Carta geotecnica).

### 7.5 CLASSIFICAZIONE GEOTECNICA DEI LITOTIPI AFFIORANTI

La classificazione geotecnica effettuata ha portato all'individuazione di due unità geotecniche sulle litologie Ignimbriche, I<sub>1</sub> e I<sub>2</sub>, e due unità geotecniche sulle litologie dei Depositi di deflusso piroclastico II<sub>1</sub> e II<sub>2</sub>; è stata

inoltre definita una classe (III<sub>1</sub>) riferita alle Ignimbriti in disfacimento, con una coltre superficiale di potenza fino a 6-7 m dal piano campagna, al di sotto del quale la roccia assume nuovamente caratteristiche massive.

Le classi I<sub>1</sub> e II<sub>1</sub> si riferiscono ad aree in sommità con morfologia sub-pianeggiante, con indice RQD compreso tra 50-75%, classe II, classificabile come "discreta" e corrisponde a resistenza a compressione monoassiale di 75-100 MPa. In queste litologie, indagate per ogni aerogeneratore in progetto, attraverso indagini speditive precedentemente descritte, sono verosimilmente rinvenibili dei depositi di alterazione superficiali poco profondi, da 0 a 0,70 m, al di sotto del quale la roccia, consistente, assume buone caratteristiche meccaniche i cui parametri sono riassumibili nel Modello geologico 1.

Le classi I<sub>2</sub> e II<sub>2</sub> sono riferite a zone di pendio con pendenze che vanno da 20 a 50%, in cui la fratturazione della roccia è stata considerata sfavorevolmente orientata rispetto al pendio, per cui l'indice RQD ha dato valori in classe III, con valori di resistenza a compressione monoassiale di 50-75 MPa, pur essendo litotipi molto competenti. Anche in questo caso nelle aree di posa degli aerogeneratori ricadenti in questi areali si è riscontrata la presenza della roccia fin dai primi cm di profondità, con parametri geotecnici assimilabili al Modello geologico 1.

Alla classe III<sub>1</sub> corrispondono le litologie Ignimbritiche e piroclastiche in disfacimento, che seppure in aree in sommità a morfologia sub-pianeggiante, con pendenze da 0 a 20%, sono caratterizzate da uno strato superficiale in cui la roccia è stata interessata da processi meccanici di granulazione con la formazione di una matrice vulcanica totalmente fratturata e debolmente alterata. Tali litologie sono assimilabili geotecnicamente ad un deposito ghiaioso sabbioso, le cui caratteristiche geotecniche sono riferibili al Modello geologico 2.

## 8. INDAGINI GEOGNOSTICHE E QUADRO DEI RISULTATI OTTENUTI NELLE INDAGINI IN SITU

Lo studio geologico - geotecnico è stato esteso in profondità fino ad indagare il volume di terreno direttamente influenzato dalla costruzione delle opere in progetto. Le indagini di seguito descritte, portate avanti per una caratterizzazione di massima dei terreni per una progettazione definitiva delle opere, sono state rapportate alle caratteristiche strutturali e all'importanza dell'opera, nonché alle caratteristiche del sottosuolo e allo stato delle conoscenze della zona.

Per le opere previste in progetto, si è proceduto alla caratterizzazione dei terreni di fondazione con indagini e prove in situ ed in laboratorio geotecnico certificato. In caso di esito positivo di autorizzazione, in fase di progettazione esecutiva sarà necessario effettuare ulteriori indagini puntuali per ciascun punto di posa delle pale eoliche.

La campagna di indagini eseguita ha visto la realizzazione di n. 2 sondaggi verticali a rotazione, a carotaggio continuo, di diametro 101 mm, eseguiti con sonda idraulica cingolata.

I due sondaggi, denominati WG5 e WG7, sono stati spinti rispettivamente alla profondità di 10 m e 13 m dal p.c., permettendo di ricostruire esaustivamente la stratigrafia del sottosuolo. La scelta della loro ubicazione, distribuita nell'area di indagine, è stata fatta in modo da ricostruire la stratigrafia della zona nel maggior dettaglio, tenendo conto delle caratteristiche stratigrafiche delle litologie affioranti, e delle possibilità logistiche di esecuzione. Durante la loro esecuzione sono stati prelevati dei campioni per le analisi di laboratorio.

Ai sondaggi sono stati associati delle indagini geofisiche, quali n. 2 stendimenti sismici con il metodo MASW e n. 2 profili a rifrazione con elaborazione tomografica, utili alla ricostruzione dell'andamento geomeccanico delle litologie vulcaniche riscontrate nei sondaggi geognostici. I materiali prelevati durante i sondaggi sono stati catalogati su apposite cassette catalogatrici in plastica a 5 scomparti. Di seguito si riportano le coordinate geografiche in Gauss Boaga delle indagini eseguite.

<i>INDAGINE</i>	<i>Gauss Boaga EST coord</i>	<i>Gauss Boaga NORD coord</i>
Sondaggio WG 5	1493982,905	4509188,052
Sondaggio WG 7	1493247,896	4508687,039
Indagine sismica 1 - M1G1	1493157,894	4508656,038
Indagine sismica 1 - M1G24	1493193,895	4508635,038
Indagine sismica 2 - M2G1	1494862,918	4509520,063
Indagine sismica 2 - M2G24	1494930,919	4509513,063

**Tabella 2: Coordinate geografiche GAUSS BOAGA delle indagini geognostiche eseguite.**

## 8.1 SONDAGGI A CAROTAGGIO CONTINUO

I sondaggi, la cui localizzazione è riportata nella figura seguente, hanno messo in evidenza nel territorio la presenza delle litologie vulcaniche afferenti alle Ignimbriti in facies massiva e ai depositi di flusso piroclastico intensamente fratturati, il cui grado di alterazione è variabile, con fasce da molto fratturate a totalmente fratturate, debolmente alterate, più superficiali, le cui caratteristiche meccaniche migliorano in profondità.

Per la realizzazione dei sondaggi a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm, sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sonda idraulica cingolata BOART LONGYEAR, modello DELTABASE 520;
- Carotiere semplice con corone *widia* Ø 101 mm;
- Carotiere doppio T6 con corone *diamantate* Ø 101 mm;
- Cassette catalogatrici monostampo in PVC;

La tabella sottostante riporta l'identificativo del sondaggio e la profondità raggiunta:

ID sondaggio	Profondità (m)
WG5	10,00
WG7	13,00

*Tabella 3: Riferimento sondaggi geognostici*

### 8.1.1 Sondaggio geognostico WG 5

Il sondaggio geognostico WG5, individuato alle coordinate Gauss Boaga (E 1493982,905 - N 4509188,052), riporta nella parte più superficiale un suolo poco profondo (0,70 m) ciottoloso con matrice argillosa, di color marrone umido, sfumante nella coltre totalmente alterata dell'ignimbrite, al di sotto del quale si rinviene la roccia ignimbritica rosacea, a carattere lapideo, già fratturata con giunti verticali e subordinatamente obliqui, scabri, serrati, e locale riempimento argilloso - sabbioso.

*-0,00m / 0,70m: Suolo ciottoloso in matrice argillosa;*

*-0,70m / 10,00m: Ignimbrite in facies massiva, da fratturata a poco fratturata, le cui caratteristiche geomeccaniche migliorano con la profondità.*

Si evidenzia che in profondità la roccia migliora le sue caratteristiche meccaniche, ed in particolare da -4,80m in poi si presenta integra o poco fratturata.

Dall'analisi dei cartoraggi è stato possibile effettuare una prima analisi qualitativa della roccia secondo il valore dell'indice RQD, espresso in funzione del valore della frequenza dei giunti che attraversano la matrice lapidea, e dai valori riscontrati è emersa una discreta qualità della roccia sin dai primi metri di profondità, ed in particolare:

- da 0,70m a 3,00m: RQD 52%;
- da 3,00m a 6,00m: RQD 73%;
- da 6,00m a 10,00m: RQD 87%.

Alle quote -1,65m e -5,00m sono stati prelevati i campioni per l'analisi di laboratorio.

**DR. ANTONELLO ANGIUS**

Via Italia, 143 Cagliari 09134

angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com

SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE

Committente		Profondità spugna		Quota max. T.C.		Certificato n°		Pagina	
Dr. Geol. Francesca Demurtas		-10,00				1		1	
Operatore		Disciplina		Cantiera		Data		Foglio/Finestra	
Sala Giampetro		Geotecnica		Eolico Ozieri		19/20.05.2020		1/1	
Relatore		Sondaggio		Tipo Sonda		Coordinate X Y			
Dott. Geol. Angius Antonello		Sond. WGS		Continuo 101 mm		Database 520			
Profondità (m)	Litologia	Descrizione	Quota	Spessore (m)	Volume (m³)	Volume (m³)	Volume (m³)	Volume (m³)	Volume (m³)
0		Sudie ciottolose con matrice argillosa, sabbione, unico e saturo spumante nella coltre totalmente attraversata dall'ignimbrite.	0,70						
1		Ignimbrite vesacosa, fratturata, giunti subverticali e subordinatamente obliqui, scabri, serrati, non pareti nerastre e grigie e locale riempimento argilloso-sabbioso.							
		RQD da 0,70 a 3,00 m = 52%							
		RQD da 3,00 a 6,00 m = 73%							
4			-1,65						
5		Ignimbrite vesacosa, integra o poco fratturata, giunti subverticali e subordinatamente obliqui, scabri, serrati, con pareti nerastre e grigie e locale riempimento argilloso-sabbioso.							
		RQD da 6,00 a 10,00 m = 87%							
10			-5,00						
11			-10,00						

*Figura 6: Sondaggio WG5*



*Figura 7: Sondaggio WG5: da 0,00 m a 5,00 m.*



*Figura 8: Sondaggio WG7: da 5,00 m a 10,00 m.*

### 8.1.2 Sondaggio geognostico WG 7

Il sondaggio geognostico WG7 è stato eseguito poco distante dal punto di posa dell'aerogeneratore wg7, e individuato alle coordinate Gauss Boaga (E 1493247,896 - N 4508687,039). Esso ha messo in evidenza la presenza, al di sotto di un suolo bruno ciottoloso argilloso poco profondo (0,40m), di un detrito di vulcanite sfumante nella coltre molto alterata, ma con struttura riconoscibile, del substrato vulcanico, marrone, addensato, umido, presente fino alla profondità di -1,70m. Al di sotto si rinvergono i Depositi di flusso piroclastico qualitativamente molto scadenti, da molto fratturati a totalmente fratturati, debolmente alterati, con giunti obliqui e subverticali con pareti scabre, alterate e riempimento da millimetrico a centimetrico sabbioso argilloso.

Alla quota -4,40m si è in presenza di un livello scoriaceo assimilabile geotecnicamente ad una ghiaia con sabbia debolmente cementata, fino alla quota -7,40m, dove si rinviene nuovamente un Deposito di flusso piroclastico qualitativamente molto scadenti, da molto fratturati a totalmente fratturati, debolmente alterati, con giunti obliqui e subverticali con pareti scabre, alterate e riempimento da millimetrico a centimetrico sabbioso argilloso.

Alla quota -11,60m si rinviene una roccia piroclastica grigio rossastra, poco fratturata, con indice RQD pari al 64%, afferente alla classe "discreta". Schematicamente si riporta la stratigrafia come segue:

-0,00m / 0,40m: Suolo bruno ciottoloso in matrice argillosa;

-0,40m / 1,70m: Detrito vulcanico sfumante nella coltre alterata del substrato vulcanico;

- 1,70m / 4,40m: Depositi di flusso piroclastico da molto a totalmente fratturati; di basse caratteristiche geomeccaniche. Prelievo campione alla quota -1,80m;

-4,40m / 7,40m: Livello scoriaceo assimilabile ad una ghiaia con sabbia debolmente cementata;

-7,40m / 11,60m: Depositi di flusso piroclastico da molto a totalmente fratturati; di basse caratteristiche geomeccaniche. Prelievo campione alla quota -7,45m;

-11,60m / 13,00m: Piroclastite grigio rossastra, poco fratturata, con giunti obliqui e serrati. Prelievo campione alla quota -12,40.

I sondaggi geognostici eseguiti hanno permesso di rilevare una stratigrafia estremamente variabile nel sito di indagine, da tenere in considerazione nel modello geologico di riferimento per le verifiche geotecniche, che faranno riferimento essenzialmente a due tipi di fondazione: la prima da attestare sulle Ignimbriti in facies massiva, presente sin dai primi metri dalla superficie del piano campagna; la seconda tipologia dovrà tenere conto della presenza, fino alla quota -11,00m dal piano campagna, di un deposito di flusso piroclastico da totalmente fratturato a molto fratturato, aventi proprietà geomeccaniche scadenti.

Di seguito si riportano la stratigrafia del sondaggio e il report fotografico.

**DR. ANTONELLO ANGIUS**

Via Italia, 143 Cagliari 09134

angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com

SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE

Committente		Profondità (spessore)		Quota (m) N.C.		Certificazione		Pagina	
Dr. Geol. Francesca Demurtas		-13.00				3		5	
Costruttore		Integrale		Cantiera		Data/Pratica		Data/Pratica	
Sella Giampèolo		Geotecnica		Eolico Ozieri		20/21.05.2020		20/21.05.2020	
Responsabile		Sondaggio		Tipo Sonda		Database		Coordinate X Y	
Dott. Geol. Angius Antonello		Sond. WG7		Continuo 101 mm		Database 510			
Quota (m)	Struttura	Descrizione	Spessore (m)	Quota (m)	Spessore (m)	Spessore (m)	Spessore (m)	Spessore (m)	Spessore (m)
0.00		Suolo bruno ciottoloso-argilloso.	0.40						
		Detrito di vulcanite sfumante nella coltre molto alterata, ma con struttura riconoscibile, nel substrato vulcanico, massone, addensato, umido.	1.70						
1.70		Depositi di flusso piroclastico rossastro da totalmente fratturati a molto fratturati, debolmente alterati. Giunti obliqui e subverticali con pareti scabre, alterate e riempimento da millimetrico a centimetrico sabbioso-argilloso, sfaccettato.	4.40					2.70	2.70
4.40		Livello scoriaceo assimilabile geotecnicamente ad una ghiaia con sabbia debolmente cementata; totalmente ossidato, massone.	7.40					2.40	2.40
7.40		Depositi di flusso piroclastico, grigi con cemento giallo-rossastro, da totalmente a molto fratturati, ossidati. Giunti obliqui e subverticali, scabri con riempimento sabbioso-terroso.	11.00					1.70	1.70
11.00		Piroclastite grigio-rossastra, poco fratturata, giunti obliqui e serrati con pareti ossidate.	13.00					12.00	12.00

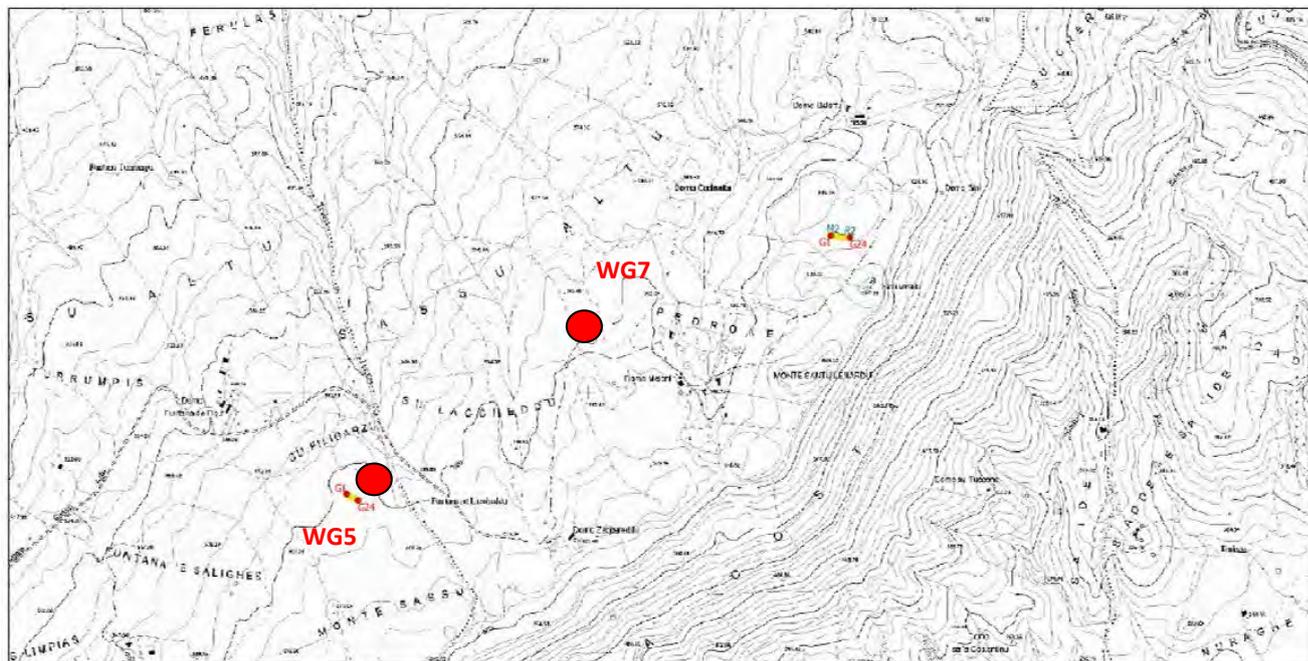
Figura 9: Sondaggio WG7



*Figura 10: Sondaggio WG7: da 0,00 m a 5,00 m.*



*Figura 11: Sondaggio WG7: da 5,00 m a 13,00 m.*



*Figura 12: Ubicazione sondaggi geognostici su stralcio Carta C.T.R. – Sez. 460-080 Tula (non in scala).*

## 8.2 INDAGINE GEOFISICA

Nel corso della campagna di indagini sono state effettuate due indagini di tipo sismico: la MASW , al fine di determinare la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni", e la geofisica a rifrazione in onde P, al fine di ricostruire l'assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione:

- l'indagine sismica attiva 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 Decreto 17/01/2018;
- 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, del terreno investigato e le velocità dei sismostrati.

Sono stati effettuati due stendimenti geofisici, le cui caratteristiche principali sono riportate nella Tabella seguente:

N. progressivo	ID intervento	Sigla stendimento	Intervallo Geofoni (m)	Lunghezza (m)
1	WG7	M1_R1	2	46
2	WG4	M2_R2	3	69

*Tabella 4: Caratteristiche principali dei profili sismici*

### 8.2.1 Indagine sismica mediante metodologia MASW

Durante i lavori di indagine è stata portata avanti una campagna investigativa geofisica al fine di definire la categoria di sottosuolo dei terreni interessati dalle opere di progetto, in accordo con le NTC 2018. L'indagine è stata condotta mediante la metodologia MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves).

La tecnica consiste nella registrazione multicanale di segnali sismici generati da sorgenti impulsive all'interfaccia della superficie libera del terreno. Si tratta di una prova totalmente non invasiva basata sulla propagazione di onde di superficie (Rayleigh e Love) per la stima del profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$ , nell'ipotesi di semispazio monodimensionale, caratterizzato da legame costitutivo (visco-) elastico lineare. Le prove per onde superficiali sfruttano le caratteristiche dispersive dei mezzi stratificati. In altre parole, in presenza di un mezzo multistrato, la velocità di fase e di gruppo del segnale risulta dipendente dalla frequenza di eccitazione. Per questo motivo, le componenti spettrali ad alta frequenza forniscono informazioni sugli strati più superficiali, perché caratterizzate da una minor capacità penetrativa, a causa della maggiore attenuazione subita durante il percorso all'interno del mezzo di propagazione. Viceversa, le componenti a grande lunghezza d'onda e bassa frequenza permettono di ricavare informazioni circa le proprietà dei terreni più profondi, così come schematizzato in Figura 13. Il profilo di velocità  $V_s(z)$  in funzione della profondità  $z$  viene determinato attraverso la soluzione di un problema inverso.

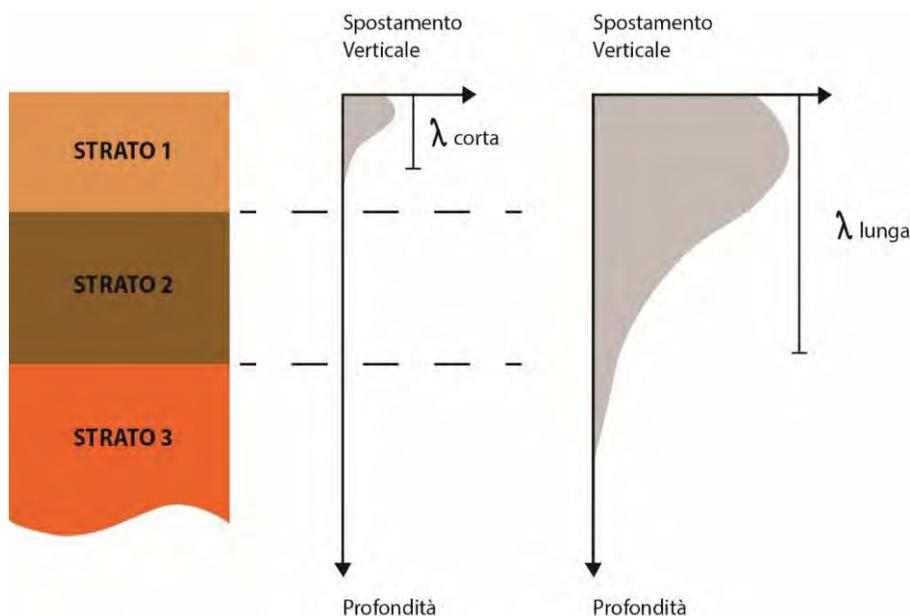


Figura 13 - Dipendenza della profondità di indagine dalla frequenza del segnale.

L'analisi MASW dei segnali sismici può essere sintetizzata in alcuni passi fondamentali: la prima fase consiste nell'estrazione, mediante picking, della curva di dispersione sperimentale a partire dall'analisi spettrale del segnale nel dominio di Fourier. In altre parole, dopo aver selezionato l'intervallo caratterizzato da massima ampiezza nello spettro  $f-k$  (frequenza-numero d'onda) o  $f-V$  (frequenza-velocità) si ricostruisce la curva  $V(f)$  (velocità – frequenza) o  $S=S(f)$  (lentezza – frequenza). La seconda fase di elaborazione consiste nella soluzione

del problema inverso. Solitamente si parte da un modello di partenza con un numero prestabilito di strati sovrapposti, ciascuno caratterizzato da un proprio valore di velocità  $V_s$ .

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali. Per l'energizzazione è stata utilizzata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg.

Dall'indagine eseguita, spiegata nel dettaglio nella relazione sismica riportata nell'Allegato 1 "Relazione sulle indagini geognostiche" nell'Allegato 5, sono stati riscontrati valori di  $V_s$  progressivamente crescenti con la profondità e compresi tra circa 637 e 890 m/s per entrambe le prove.

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. Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato ( $H$ ) è riferita al piano di imposta delle stesse.

MASW 1

<p><math>H = 5,1</math> m</p> <p>Profondità di posa della fondazione = -3 m</p> <p>da cui deriva: <math>V_{s,eq} = 440</math> m/s</p>
---

MASW 2

<p><math>H = 6,4</math> m</p> <p>Profondità di posa della fondazione = -3 m</p> <p>da cui deriva: <math>V_{s,eq} = 633</math> m/s</p>
---

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato in funzione del parametro  $V_s$  eq, sono definite dalla Tab. 3.2.II, delle NTC 2018 (Tabella 5), da cui si ricava una categoria di sottosuolo, per entrambe le aree di indagine, di **tipo B**.

CATEGORIA	CARATTERISTICHE DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA
<b>B</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>

*Tabella 5 - Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Le indagini MASW hanno permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati.

PROFONDITÀ (M SOTTO IL P.C.)	DESCRIZIONE
0 - 4,1	1° SISMOSTRATO CON Vs DI 671 M/S - SUBSTRATO ALTERATO E FRATTURATO
4,1 - 8,1	2° SISMOSTRATO CON Vs 732 M/S - SUBSTRATO ROCCIOSO FRATTURATO
8,1 - 30	3° SISMOSTRATO CON Vs 888 M/S - SUBSTRATO ROCCIOSO POCO FRATTURATO

*Tabella 6: MASW M 1 - Profilo Vs eq da p.c. 699 m/s*

PROFONDITÀ (M SOTTO IL P.C.)	DESCRIZIONE
0 - 4,8	1° SISMOSTRATO CON Vs DI 637 M/S - TERRE MOLTO ADDENSATE O ROCCE TENERE E/O FRATTURATE
4,8 - 9,4	2° SISMOSTRATO CON Vs 726 M/S - SUBSTRATO ROCCIOSO FRATTURATO
9,4 - 30	3° SISMOSTRATO CON Vs 813 M/S - SUBSTRATO ROCCIOSO POCO FRATTURATO

*Tabella 7: MASW M 2 - Profilo Vs eq da p.c. 677 m/s*

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 Vp, Vs e densità per ciascun sismostrato definito dalle indagini geofisiche.

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

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

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

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

VS e PARAMETRI ELASTICI						
Strato	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Rapporto (Vp/Vs)	Spessore (m)	Profondità (m)	
					da	a
1	671	1378	2,05	4,1	0	-4,1
2	732	1614	2,2	4	-4,1	-8,1
3	888	2480	2,79	21,9	-8,1	-30

Strato	Poisson ν	Densità (g/cm³)	Shear G (kPa)	Bulk Ev (kPa)	Young E (kPa)
1	0,34	2,13	959013,33	2765938,48	2578976,82
2	0,37	2,17	1162738,08	4102523,88	3187116,52
3	0,43	2,27	1789994,88	11574748,16	5106738,16

*Tabella 8: Parametri elastici calcolati tramite i parametri di input Vp, Vs ricavati dall'indagine MASW M1*

VS e PARAMETRI ELASTICI						
Strato	Vs (m/s)	Vp (m/s)	Rapporto (Vp/Vs)	Spessore (m)	Profondità (m)	
					da	a
1	637	1784	2,8	4,8	0	-4,8
2	726	1319	1,82	4,6	-4,8	-9,4
3	813	1425	1,75	20,6	-9,4	-30
Strato	Poisson v	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Shear G (kPa)	Bulk Ev (kPa)	Young E (kPa)	
1	0,43	2,19	888634,11	5785171,16	2536051,83	
2	0,28	2,12	1117401,12	2198425,16	2866541,12	
3	0,26	2,14	1414473,66	2459572,62	3560823,86	

*Tabella 9: Parametri elastici calcolati tramite i parametri di input Vp, Vs ricavati dall'indagine MASW M2*

### 8.2.2 Indagine sismica a Rifrazione

L'esecuzione delle indagini geofisiche mediante sismica a rifrazione in onde P, ha consentito di valutare le proprietà fisico - meccaniche dei terreni oggetto di studio, e valutare il loro grado di addensamento / compattezza dei materiali attraversati. Tale indagine 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 superiore.

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.

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 assunto 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 valutata in circa il 25÷30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite 9 energizzazioni shot, al fine di meglio descrivere la geometria degli orizzonti rifrattori lungo l'intera base sismica.

Per l'esecuzione delle indagini è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24.

Per l'energizzazione è stata utilizzata 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.

Le sezioni sismiche ottenute dalla modellizzazione e interpretazione dei segnali acquisiti, riportati di seguito mediante sezioni litosismografiche, hanno permesso di individuare le principali unità geologiche nei siti di intervento. Sulla base delle velocità misurate, dei dati bibliografici e sui sondaggi eseguiti, nelle sezioni tomografiche sono stati definiti i seguenti sismostrati:

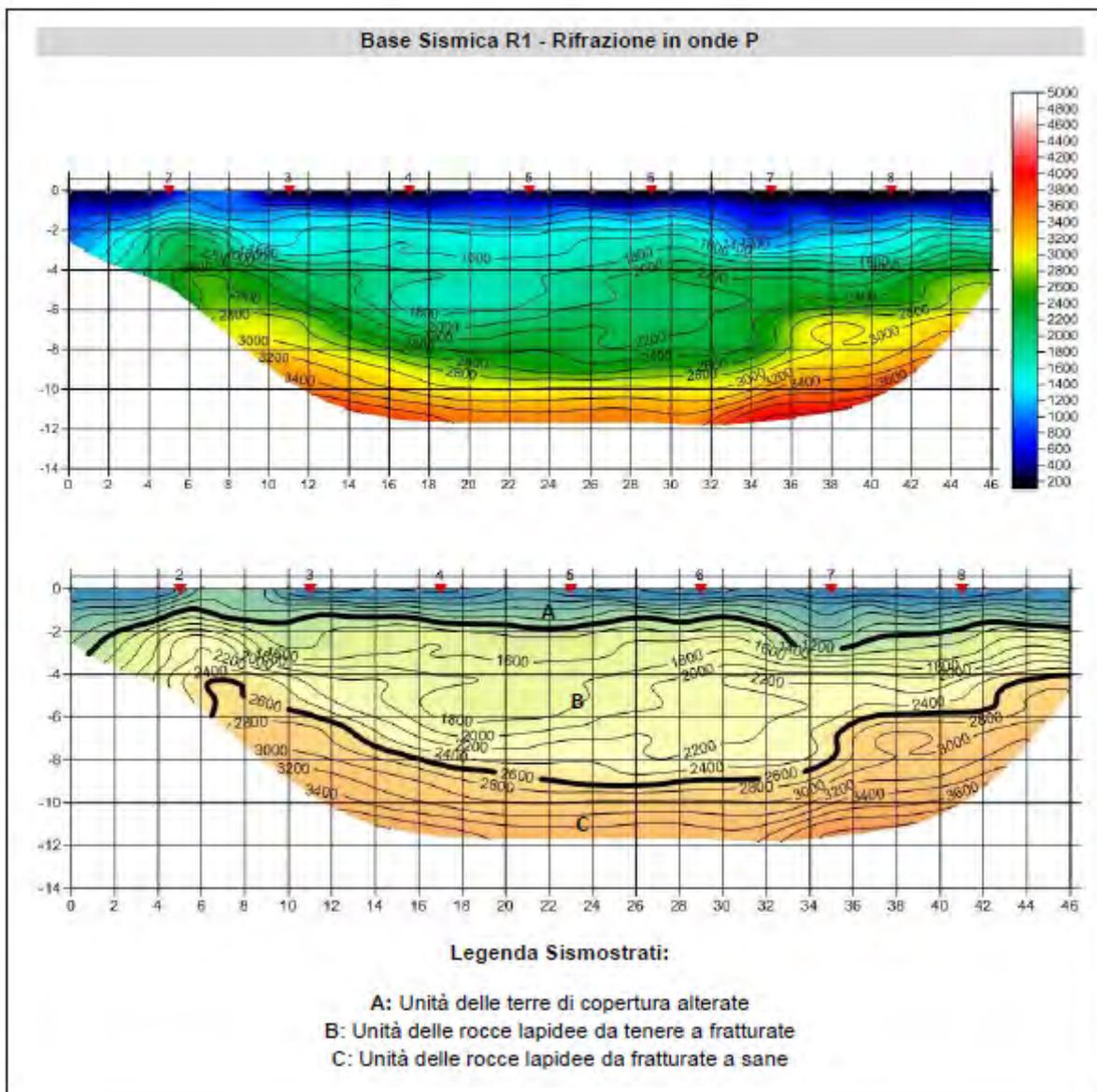
- A - Sismostrato A: Unità delle terre di copertura alterate
- B - Sismostrato B: Unità delle rocce lapidee tenere
- C - Sismostrato C: Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane

La delimitazione dei sismostrati ha lo scopo principale di distinguere le terre dalle rocce scavabili e queste da quelle non rippabili. I valori di velocità sono indicativi, e possono presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi. Nei paragrafi precedenti sono state indicate le differenti classificazioni del grado di rippabilità delle rocce. Nel contesto in esame per definire le rocce "rippabili" si ritiene ragionevole impiegare quale valore indicativo di velocità  $V_p < 1.600$  m/s. Per ulteriori dettagli sull'indagine si rimanda interamente all'Allegato "Indagine geofisica" del presente elaborato.

#### RIFRAZIONE R1

<i>SISMOSTRATI</i>	<i>Profondità da pc (m)</i>	<i>Velocità in m/s</i>
A - Unità delle terre di copertura alterate	da 0 a 1/2	200-800
B - Lاپidee tenere / fratturate	da 1/2 a 2/4	800-1600
C - Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane	da 2/4 a 10/12	1600-3600

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 200 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 all'aumentare della profondità. La sezione sismostratigrafica si presenta con una zona centrale dove le velocità delle onde si mostrano a parità di profondità inferiori, rispetto alle parti esterne della sezione.

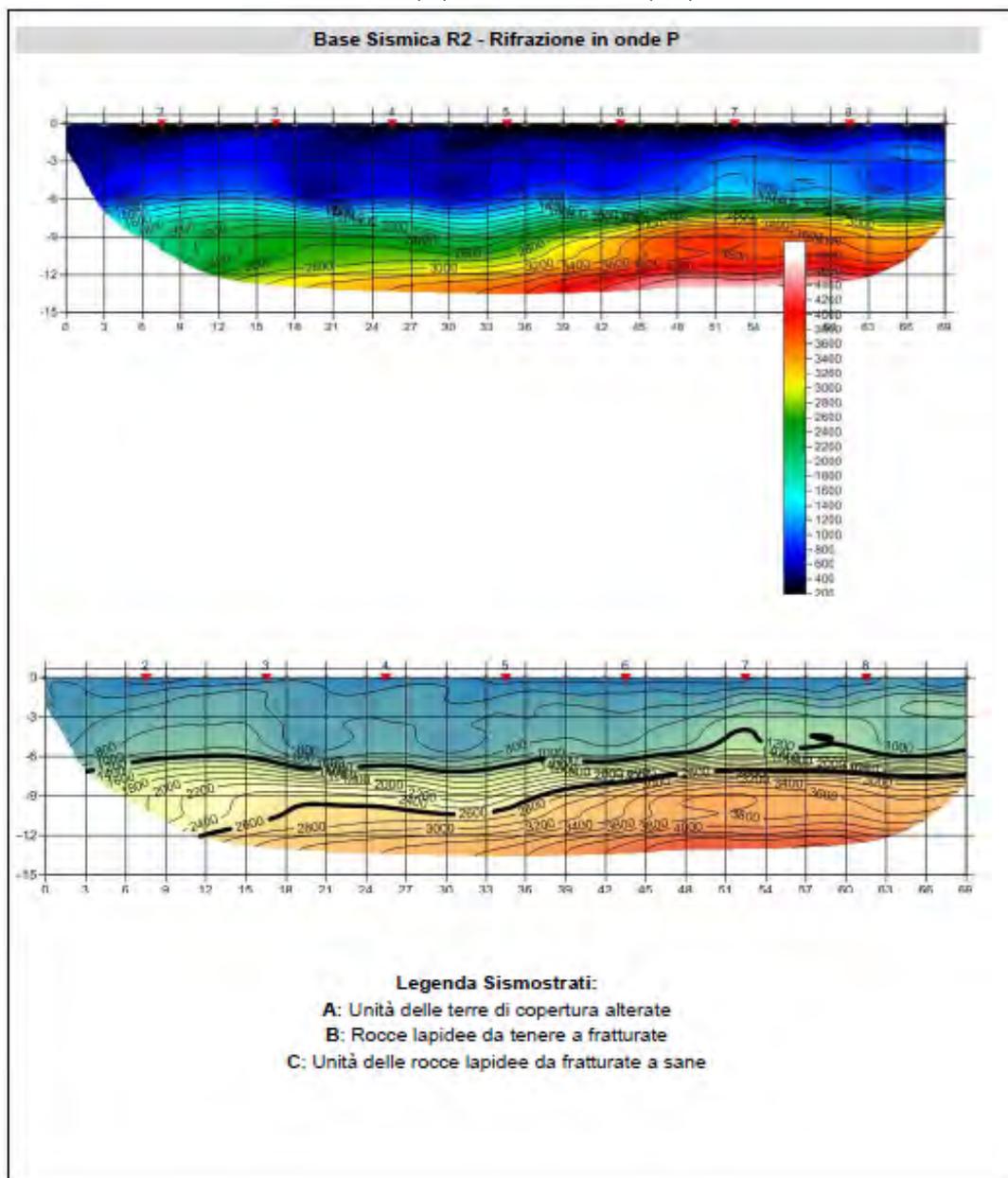


*Figura 14: Risultati indagine a rifrazione R 1*

**RIFRAZIONE R 2**

<i>SISMOSTRATI</i>	<i>Profondità da pc (m)</i>	<i>Velocità in m/s</i>
A - Unità delle terre di copertura alterate	da 0 a 5/6	200-1200
B - Lapidie tenere / fratturate	da 5/6 a 7/12	1200-2600
C - Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane	da 7/12 a 13	2600-4400

Dall'esame della sezione tomografica R2 si evince che, è presente a differenza della sezione R1, una coltre di copertura e/o alterazione di spessore variabile da 5 a 6 m. Anche qui si osserva un aumento di velocità delle onde P all'aumentare della profondità e con un range di velocità che varia dai 200 m/s della zona superficiale, ai 4600 m/s nella zone più profonde. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile a un miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nelle zone più profonde del sottosuolo.



*Figura 15: Risultati indagine a rifrazione R 2*

### 8.3 QUADRO DELLE ANALISI DI LABORATORIO

Nel corso dei sondaggi sono stati prelevati degli spezzoni di carota lapidea che sono stati trasportati presso il laboratorio geotecnico certificato Geosystem di Quartucciu (CA), al fine di determinarne i parametri geotecnici utili per la progettazione degli aerogeneratori. Le risultanze stratigrafiche riscontrate durante le indagini, e le caratteristiche litologiche delle vulcaniti hanno fatto optare per l'immediata esecuzione di prove Point Load al fine di evitare che il detensionamento dei campioni alterasse i valori di resistenza. Sono state inoltre eseguite delle prove per la determinazione dei pesi di volume dei materiali intercettati.

La tabella sottostante riporta risultati delle prove del peso di volume nei campioni di riferimento.

<i>Sondaggio</i>	<i>Prof. da p.c.</i>	<i>Litotipo</i>	<i>Massa volumica apparente (Ton/m<sup>3</sup>)</i>
WG5	1,65-2,00	Ignimbrite	2,26
WG5	7,45-7,70	Piroclastite	2,39
WG7	12,40-12,80	Piroclastite	1,86

**Tabella 10: Risultati della prova di laboratorio sulla determinazione della massa volumica.**

E' stata quindi effettuata la prova Pont Load Test, utilizzando l'apparecchiatura: Point Load digitale CONTROLS mod. 45-D0550/D matr.06053686, in pieno accordo con le Norme di riferimento: ASTM D5731, Raccomandazioni ISRM.

Tali prove hanno permesso di definire l'indice Is (Point Load Strenght Index), dato dalla seguente espressione

$$Is = (P \times 1000) / De^2$$

dove Is (MPa) = resistenza al punzonamento (Point Load Strength Index)

P (kN) = Resistenza massima a rottura

De = (mm) Diametro equivalente della carota (diametro del provino) (De = 89 mm)

Il valore IS, prima corretto per rapportarlo a provini con diametro pari a 50 mm, come segue:

$$IS_{(50)} = F \times IS \quad F = (DE / 50)^{0,45} \quad (F = 1,296)$$

viene poi moltiplicato per un coefficiente K variabile in funzione della litologia indagata.

I risultati della prova sono riportati nella tabella che segue.

<b>Sondaggio</b>	<b>Prof. campione</b>	<b>P (KN)</b>	<b>Tipo rottura</b>	<b>Is (MPa)</b>	<b>Is (50) (MPa)</b>	<b>Su (MPa)</b>	<b>Litotipo</b>	<b>Resistenza</b>
WG5	1,65-2,00	18,9	Diametrale	2,62	3,39	74,6	Ignimbrite	Elevata
WG5	5,00-5,30	22,9	Diametrale	3,17	4,11	90,4	Ignimbrite	Elevata
WG7	1,80-2,00	1,2	Diametrale	0,17	0,22	4,84	Piroclastite	Molto bassa
WG7	7,45-7,70	22,4	Diametrale	3,10	4,02	88,4	Ignimbrite	Elevata
WG7	12,40-12,80	1,4	Diametrale	0,19	0,25	5,5	Piroclastica Piroclastite	Molto bassa/bassa

**Tabella 11: Risultati della prova di laboratorio Point Load Test**

LITOTIPO	K
Rocce effusive	22
Rocce intrusive	18
Rocce sedimentarie a grana grossa	18
Rocce sedimentarie a grana fine	8
Rocce metamorfiche a basso metamorfismo	18-24
Rocce metamorfiche a medio metamorfismo	16-19
Rocce metamorfiche ad alto metamorfismo	14

*Tabella 12: Valori del coeff. di correlazione K (Bruschi, 2004)*

Dalle analisi effettuate in laboratorio si evince che le litologie afferenti alle ignimbriti presentano dunque resistenza elevata (Brown E.T., Rock characterization, testing and monitoring-ISRM suggest methods) mentre la piroclastite ha resistenza da molto bassa a bassa. I valori molto bassi sono legati alla facies color mattone, mentre i valori più elevati sono correlabili ai soli nuclei lapidei grigi.

#### 8.4 CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLA ROCCIA

Gli ammassi rocciosi sono stati analizzati tramite la classificazione di Beniaowski (1989), in funzione dell'indice RMR calcolato sulla base dei risultati della prova Point Load test, dell'indice RQD e dalle caratteristiche delle discontinuità ricavate dai sondaggi.

Il metodo Beniaowski si basa sul rilievo di sei parametri geotecnici, ad ognuno dei quali è stato assegnato un peso:

- R1 resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta
- R2 indice RQD
- R3 spaziatura delle discontinuità
- R4 condizioni delle discontinuità (rugosità, alterazione, apertura, riempimento, continuità)
- R5 condizioni idrauliche
- R6 orientamento delle discontinuità (favorevolezza delle giaciture rispetto all'opera da realizzare).

La classificazione definisce due valori dell'indice RMR:

- $RMR_{base} = R1+R2+R3+R4+R5$
- $RMR_{corretto} = R1+R2+R3+R4+R5+R6$ .

In base al valore dell'indice RMR, gli ammassi rocciosi vengono suddivisi in cinque classi, per ciascuna delle quali viene indicata una stima di massima dell'angolo di attrito, della coesione, una valutazione della qualità e un giudizio sulle difficoltà di scavo degli ammassi stessi.

Il calcolo del valore dell'indice RMR hanno permesso di definire i parametri caratteristici dell'ammasso, riportati nella tabella seguente. Di seguito si riportano anche i dati di input per il calcolo dei parametri determinati.

Sondaggio	Prof. campione	RMR base	RMR corretto	Classe	Descrizione	Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strenght Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Coesione residua (kPa)	Angolo di attrito residuo (°)
WG5	1,65-2,00	75,92	68,92	Seconda	Buono	51,84	70,92	379,6	42,96	303,68	35,37
WG5	5,00-5,30	87,22	80,22	Seconda	Buono	74,44	82,22	436,1	48,61	348,88	39,89
WG7	1,80-2,00	45,32	38,32	Quarta	Scadente	7,64	40,32	226,6	27,66	181,28	23,13
WG7	7,45-7,70	50,56	43,56	Terza	Mediocre	1,12	45,56	252,8	30,28	202,24	25,22
WG7	12,40-12,80	62,65	55,65	Terza	Mediocre	25,3	57,65	313,25	36,33	250,6	30,06

*Tabella 13: Caratterizzazione dell'ammasso roccioso secondo il Metodo di Beniawsky (1989)*

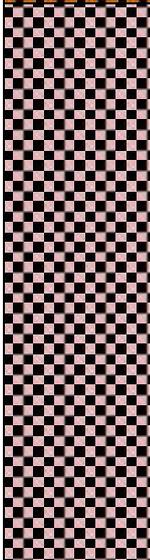
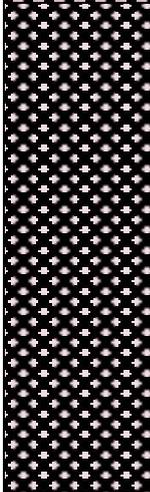
## 9. MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

La ricostruzione litostratigrafica dei terreni presenti nell'area in esame è stata effettuata sulla base dei risultati acquisiti con il rilievo di superficie e sulla base delle informazioni ottenute con la campagna di indagini eseguite nella seconda metà di maggio 2020, che hanno consentito di ricostruire un modello geologico dell'area, così come richiesto dal Testo Unico "Norme tecniche per le costruzioni" NTC 2018, schematizzato nei profili geologici riportati di seguito.

Nel complesso, è necessario distinguere due tipologie di modello litologico stratigrafico, a cui fare riferimento per le opere di fondazione in progetto: il primo, fa riferimento ad una stratigrafia rappresentata da Ignimbriti in facies massiva e con buone caratteristiche geomeccaniche sin dai primi metri dal piano campagna, come rilevato durante il sondaggio geognostico WG5, mentre il secondo fa riferimento al sondaggio WG7, che ha rilevato la presenza di un deposito piroclastico intensamente fratturato, da molto a totalmente fratturato, debolmente alterato, fino alla profondità di -11,60m dal p.c, al di sotto del quale si rinviene la roccia ignimbritica con qualità geomeccaniche migliori.

Pertanto le fondazioni previste nella presente fase progettuale dovranno fare riferimento ai modelli geologici descritti con i seguenti parametri geotecnici di riferimento.

### 9.1 TIPOLOGIA MODELLO GEOLOGICO N. 1

Unità litologica	profondità	Descrizione
	- 0,70 m	Suolo ciottoloso con matrice argillosa, marrone, umido o saturo sfumante nella coltre totalmente alterata dell'ignimbrite
	-4,80 m	Ignimbriti in facies rocciosa (Ciclo vulcanico Calco - alcalino OLIGO-MIOCENE) Peso di Volume = 2,26 Ton/m <sup>3</sup> Resistenza a compressione monoassiale = 74,6 MPa Coesione di picco = 379 KPa Angolo di attrito di picco = 42° Coesione residua = 303 KPa Angolo di attrito residuo = 35° Modulo di deformazione = 51,8 GPa GSI = 70,9 RQD da 0.70 a 3.00 m = 52% RQD da 3.00 a 6.00 m = 73%
	- 10,0 m	Ignimbriti in facies rocciosa (Ciclo vulcanico Calco - alcalino OLIGO-MIOCENE) Peso di Volume = 2,39 Ton/m <sup>3</sup> Resistenza a compressione monoassiale = 90,4 MPa Coesione di picco = 436 KPa Angolo di attrito di picco = 48,61° Coesione residua = 348,88 KPa Angolo di attrito residuo = 39,89° Modulo di deformazione = 74,44 GPa GSI = 82,22 RQD da 6.00 a 10.00 m = 87%

## 9.2 TIPOLOGIA MODELLO GEOLOGICO N.2

Unità litologica	profondità	Descrizione
	- 1,70 m	Suolo ciottoloso con matrice argillosa, marrone, umido o saturo sfumante nella coltre totalmente alterata del deposito detritico piroclastico, incoerente
	-4,40 m	Depositi di flusso piroclastico rossastri da totalmente fratturati a molto fratturati, debolmente alterati (Ciclo vulcanico Calco - alcalino OLIGO-MIOCENE) Peso di Volume = 2,39 Ton/m <sup>3</sup> Resistenza a compressione monoassiale = 4,84 MPa Coesione di picco = 226,6 KPa Angolo di attrito di picco = 27,6° Coesione residua = 181 KPa Angolo di attrito residuo = 23° Modulo di deformazione = 7,64 GPa GSI = 40,32 RQD = 5%
	- 7,40 m	Livello scoriaceo assimilabile geotecnicamente ad una ghiaia con sabbia debolmente cementata, i cui parametri, da dati bibliografici, possono essere assunti cautelativamente nel modo seguente: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\gamma_{\text{sat}} = 20 \text{ kN/m}^3$ Angolo di resistenza al taglio = 36° Coesione = 0
	- 11,60 m	Depositi di flusso piroclastico rossastri da totalmente fratturati a molto fratturati, debolmente alterati (Ciclo vulcanico Calco - alcalino OLIGO-MIOCENE) Peso di Volume = 2,39 Ton/m <sup>3</sup> Resistenza a compressione monoassiale = 88 MPa Coesione di picco = 252,8 KPa Angolo di attrito di picco = 30,2° Coesione residua = 202,2 KPa Angolo di attrito residuo = 25,2° Modulo di deformazione = 1,12 GPa GSI = 45,56 RQD = 5 %

	<p>- 13,00</p>	<p>Piroclastite grigio-rossastra, poco fratturata (Ciclo vulcanico Calco - alcalino OLIGO-MIOCENE)</p> <p>Peso di Volume = 1,86 Ton/m<sup>3</sup></p> <p>Resistenza a compressione monoassiale = 5,5 MPa</p> <p>Coesione di picco = 313,25 KPa</p> <p>Angolo di attrito di picco = 36 °</p> <p>Coesione residua = 250,6 KPa</p> <p>Angolo di attrito residuo = 30°</p> <p>Modulo di deformazione = 25,3 GPa</p> <p>GSI = 57,65</p> <p>RQD = 64 %</p>
--	----------------	--

## 10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nella presente relazione sono riportate le caratteristiche geologiche, stratigrafiche, morfologiche e idrogeologiche di massima dell'area interessata dallo sviluppo del parco eolico, sulla base dei rilievi di superficie eseguiti nell'area, la fotointerpretazione, l'analisi cartografica dei dati di base unitamente ai sopralluoghi diretti in campo, alla campagna di indagini geognostiche descritte nei precedenti paragrafi e all'osservazione della roccia in affioramento.

Nel particolare, lo studio ha evidenziato che le aree direttamente interessate dallo sviluppo degli aerogeneratori sono delle superfici pianeggianti e subpianeggianti, con pendenze prossime allo 0 - 0,1 % e caratterizzate dall'affioramento della roccia vulcanica sin dalla superficie, che si presenta fratturata nelle porzioni più superficiali, e localmente ricoperta da un debole strato pedogeneizzato. Localmente, la compattezza delle ignimbriti, con buone caratteristiche fisico meccaniche fin dalla superficie, è incisa dai sistemi di fratturazione che pervadono l'ammasso, i quali hanno causato la degradazione della roccia per processi di alterazione chimica e fisica, con diminuzione delle proprietà geotecniche nei primi strati superficiali, come rilevato nel corso delle indagini eseguite, proprietà che tendono a migliorare con la profondità.

I parametri geotecnici dei materiali, utili per la verifiche geotecniche propedeutiche alla progettazione, sono riportati nel modello geologico di riferimento così come richiesto dalla normativa vigente (NTC 2018).

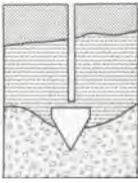
Dallo studio è emerso quanto segue:

- nell'ambito dell'area esaminata non sono stati rilevati movimenti gravitativi profondi che possano coinvolgere estese porzioni di territorio; localmente sono stati rilevati, nei settori più acclivi, processi legati alla dinamica dei versanti, interessanti porzioni di roccia e blocchi vulcanici, fratturati e dislocati, in cui la gravità gioca un ruolo determinante per la loro movimentazione. Tali processi sono comunque distanti dalle aree di posa previste per gli aerogeneratori;
- l'area indagata non evidenzia segni di dissesto profondo tanto che nel suo insieme può essere considerata stabile;
- la tipologia di intervento in progetto, non invasiva, non comporta alterazioni nell'attuale assetto idrologico del territorio, tuttavia dovrà essere curato il drenaggio delle acque superficiali, in particolare nelle piste e nelle strade di accesso, per scongiurare i fenomeni di erosione;
- il progetto non prevede modificazioni morfologiche significative rispetto all'assetto attuale, anche l'apertura della viabilità di servizio non comporta modifiche profonde allo stato dei luoghi in quanto segue, ridefinendola e adattandola, la viabilità esistente.

**ALLEGATI**

**ALLEGATO 1-5**

**RELAZIONE SULLE INDAGINI GEOGNOSTICHE**



**DR. ANTONELLO ANGIUS**

Web site: [www.angiusgeo.com](http://www.angiusgeo.com)

**INDAGINI GEOGNOSTICHE, PROVE GEOTECNICHE, MONITORAGGIO AMBIENTALE,  
PROSPEZIONI MINERARIE, CONSOLIDAMENTI, POZZI PER ACQUA, PROSPEZIONI GEOFISICHE**

Tel/Fax: +39 070 40 32 74

Pec: [angiusgeo@pec.it](mailto:angiusgeo@pec.it)

e-mail: [angiusgeo@tiscali.it](mailto:angiusgeo@tiscali.it)

**Comune di Ozieri**

---

**Provincia di Sassari**

---

**Progetto:**

**REALIZZAZIONE DEL PARCO EOLICO "ISCHINDITTA"**

---



Maggio 2020

**INDAGINE GEOGNOSTICA E GEOFISICA**

---

**Committente: GR VALUE DEP ENERGIA S.R.L.**

---

SEDE LEGALE e UFFICI: Via Italia, 143 – 09134 Cagliari (ITALY)  
Codice Fiscale: NGSNNL61H07B354Y  
Partita IVA: 01985230927  
CCIAA Cagliari: 154185 del 07/01/1991  
Albo Nazionale Gestori Ambientali: CA04576

*Società attestata da*  
**RINA SOA**  
**OS20b CLASS. I**

## Sommario

Premessa	1
1.0 Inquadramento geografico e topografico del sito	2
2.0 Caratteristiche della campagna geognostica	3
3.0 Sondaggi geognostici	4
<b>Tab.1 Sondaggi e profondità raggiunte.</b>	<b>4</b>
4.0 Prove di laboratorio geotecnico	5
<b>Tab.4 Elenco campioni e tipo di prova geotecnica eseguita.</b>	<b>5</b>
5.0 Indagine geofisica	5
6.0 Prove Point Load	6

### ALLEGATI:

ALLEGATO 1 – Planimetrie ubicazione indagini

ALLEGATO 2 – Stratigrafie sondaggi

ALLEGATO 3 – Report fotografico

ALLEGATO 4 – Determinazione del peso di volume

ALLEGATO 5 - Indagine geofisica

## PREMESSA

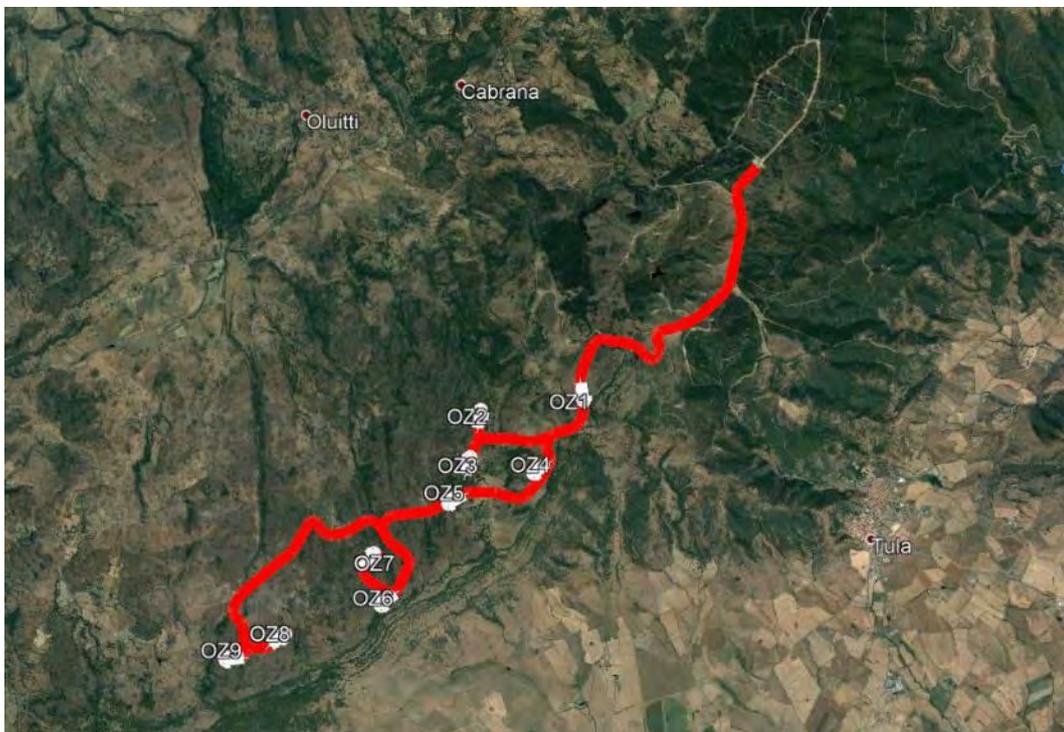
Nel mese di Maggio 2020 la Società *GR VALUE DEP ENERGIA SRL*, nell'ambito del progetto di realizzazione di un Parco eolico in località Ischinditta in agro di Ozieri (SS), ha affidato all'impresa specializzata *DR. ANTONELLO ANGIUS* una campagna di indagini geognostiche articolata in: esecuzione di sondaggi geognostici, prove Point Load e determinazione di pesi di volume, indagine sismica con tecnica MASW e rifrazione con elaborazione tomografica, al fine di ottenere una prima parametrizzazione geotecnica dei terreni di sedime.

L'indagine è stata articolata nella esecuzione 2 sondaggi a carotaggio integrati da prelievo di campioni di rocce da sottoporre a determinazione del peso di volume e prove Point Load.

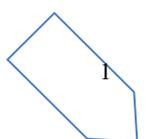
Le indagini sismiche sono consistite in 2 profili MASW, e due profili a rifrazione con elaborazione tomografica. Tutti i lavori sono stati eseguiti nel mese di Maggio 2020.

L'area di indagine ricade nei Comuni di Ozieri e Chiaramonti (SS).

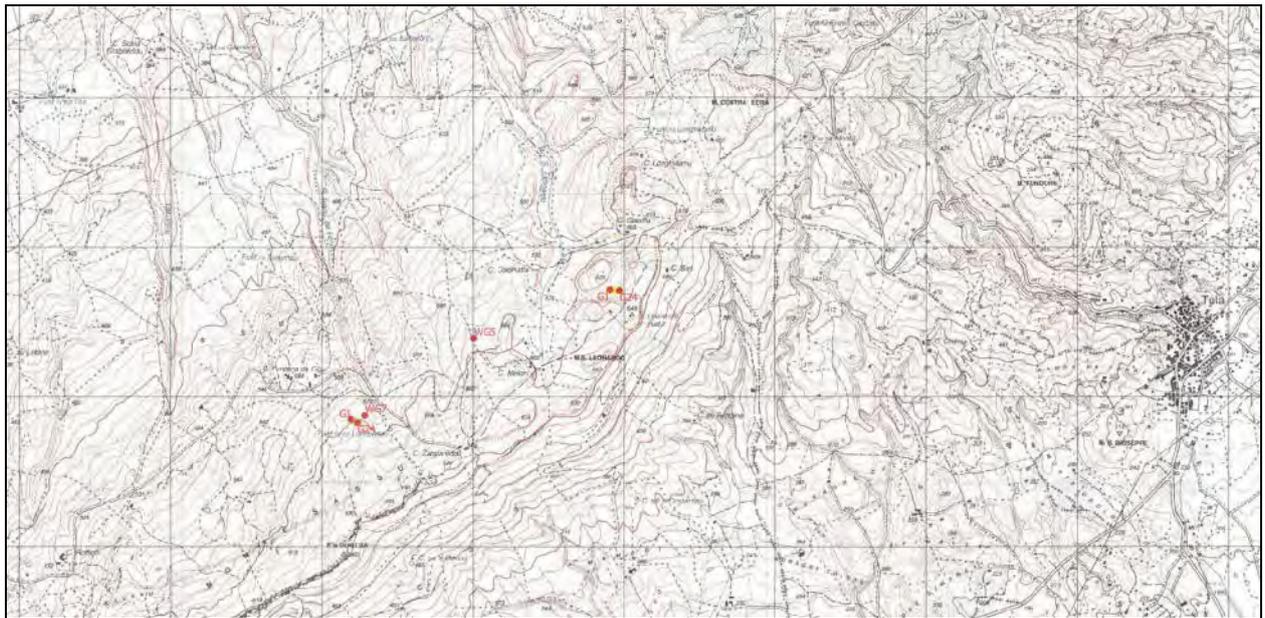
L'immagine sottostante riporta una panoramica dei luoghi d'intervento.



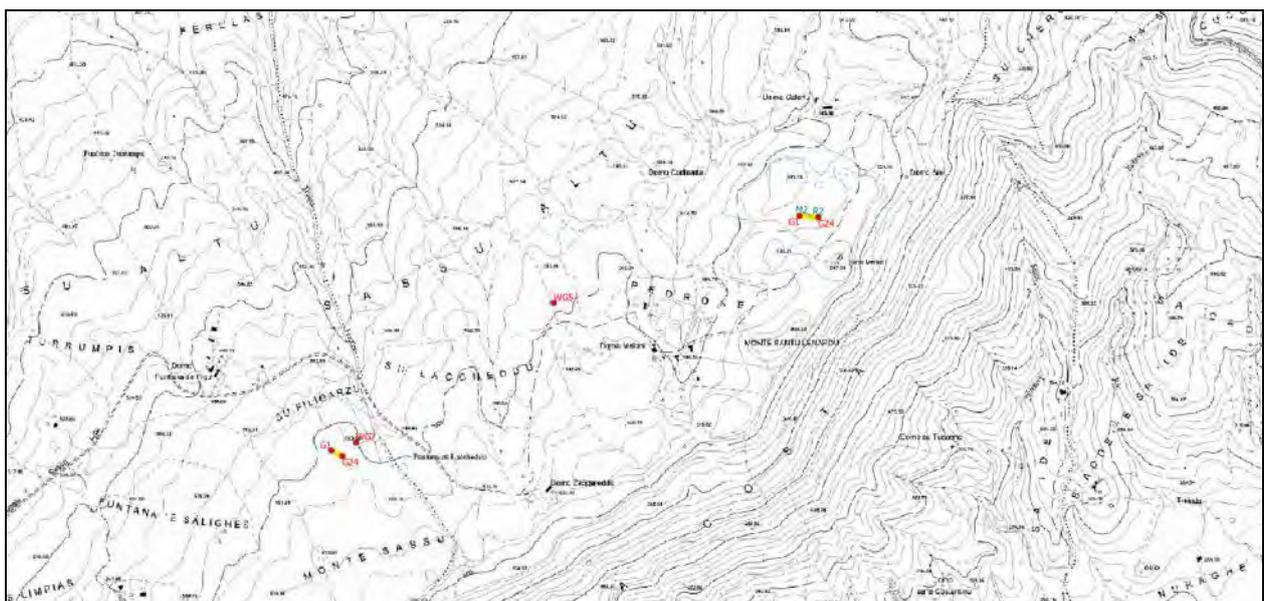
**FIGURA 1** – Panoramica dei luoghi d'intervento







**FIGURA 3** – Stralcio Cartografia I.G.M. – Foglio "460" Sez. I.



**FIGURA 4** – Stralcio Carta C.T.R. – Sez. 460-080 Tula

---

## **2.0 CARATTERISTICHE DELLA CAMPAGNA GEOGNOSTICA**

---

L'indagine è stata articolata come segue:

- Esecuzione di 2 sondaggi a rotazione a carotaggio continuo ( $\varnothing$  101 mm) denominati WG5 e WG7, spinti rispettivamente alla profondità di mt 10 e 13 dal p.c.;

- esecuzione di prove Point Load e di 3 determinazioni del peso di volume;
- esecuzione di 2 stendimenti sismici con il metodo MASW e di 2 profili a rifrazione con elaborazione tomografica;
- esecuzione del rilievo topografico dei punti di indagine.

---

### 3.0 SONDAGGI GEOGNOSTICI

---

In corrispondenza dell'Intervento sono stati eseguiti 2 sondaggi a rotazione con carotaggio continuo, di diametro 101 mm. Per la realizzazione del carotaggio continuo sono state utilizzate le seguenti attrezzature:

- Sonda idraulica cingolata BOART LONGYEAR, modello DELTABASE 520;
- Carotiere semplice con corone *widia* Ø 101 mm;
- Carotiere doppio T6 con corone *diamantate* Ø 101 mm;
- Cassette catalogatrici monostampo in PVC;

La tabella sottostante riporta l'identificativo del sondaggio e la profondità raggiunta (**Tab.1**).

ID Sondaggio	Profondità (m)
WG5	10.00
WG7	13.00

**Tab.1 Sondaggi e profondità raggiunte.**

Le carote estratte sono state riposte in cassette monostampo in PVC, dotate di coperchio, per lunghezze di ml 5 cadauna, opportunamente siglate e fotografate.

L'ubicazione dei sondaggi geognostici eseguiti è riportata **nell'Allegato 1 - Planimetria ubicazione indagini**. Le stratigrafie dei sondaggi sono riportate **nell'Allegato 2 mentre l'allegato 3 – Report fotografico** riporta le foto delle cassette catalogatrici e dei posizionamenti.

## 4.0 PROVE DI LABORATORIO GEOTECNICO

Presso il laboratorio geotecnico Geosystem di Quartucciu (CA) sono stati determinati i pesi di volume dei litotipi intercettati.

La tabella sottostante (**Tab.4**) riporta l'elenco dei campioni e le relative prove.

<b>Verticale</b>	<b>Prof. da p.c.</b>	<b>Litotipo</b>	<b>Massa volumica apparente (Ton/m<sup>3</sup>)</b>
WG5	1.65-2.00	Ignimbrite	2,26
WG7	7.45-7.70	Piroclastite	2,39
WG7	12.40-12.80	Piroclastite	1,86

**Tab.4** Elenco campioni e tipo di prova geotecnica eseguita.

## 5.0 INDAGINE GEOFISICA

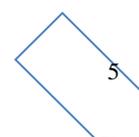
È stato richiesto di impiegare due tecniche d'indagine sismica, quali la MASW e la rifrazione in onde P, col fine di ricostruire l'assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione nonché la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni":

- l'indagine sismica attiva 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  $V_s$ , è in grado di ricostruire una sismo-stratigrafia atta a permettere la definizione della categoria di suolo ai sensi del Decreto 17/01/2018;
- l'indagine sismica a rifrazione con acquisizione ed elaborazione tomografica in onde longitudinali (P) che permette di ricostruire l'andamento stratigrafico, nel senso di spessori elastomogenei, del terreno investigato e le velocità dei sismostrati.

<b>N° progr.</b>	<b>ID Intervento</b>	<b>Sigla Stendimento</b>	<b>Intervallo Geofoni [m]</b>	<b>Lunghezza [m]</b>
1	WG7	M1_R1	2	46
2	WG4	M2_R2	3	69

**Tab.5:** Caratteristiche principali dei profili sismici.

Le risultanze dell'indagine sono descritte **nell'Allegato 5 – Indagine geofisica.**



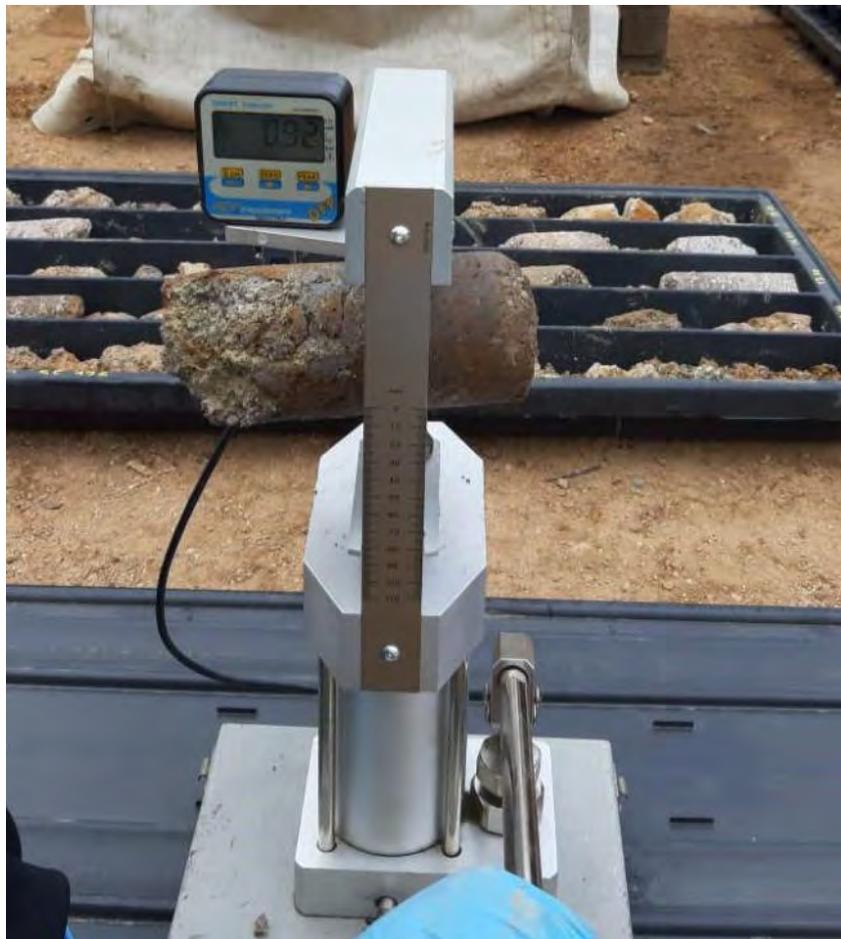
---

## **6.0 PROVE POINT LOAD**

---

Nel corso dei sondaggi sono stati prelevati vari spezzoni di carota lapidea. Le caratteristiche litologiche delle vulcaniti hanno fatto optare per l'immediata esecuzione di prove Point Load al fine di evitare che il detensionamento dei campioni alterasse i valori di resistenza.

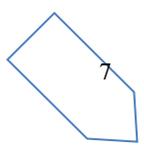
E' stata utilizzata l'apparecchiatura: Point Load digitale CONTROLS mod. 45-D0550/D matr.06053686, applicando le Norme di riferimento: ASTM D5731, Raccomandazioni ISRM (in allegato si riporta il certificato di taratura)



Esecuzione delle prove Point load

<b>CONTROLS</b>		<b>VERIFICA MACCHINA DI COMPRESSIONE COMPRESSION TESTING MACHINE</b>			<b>CERT.Nr. 1396/19</b>		
Cliente <b>Impresa Dott. Antonello Angius</b>		Indirizzo					
Client		Site address					
Costruttore <b>CONTROLS</b>	Modello <b>D0550/D</b>	Matricola <b>06053686</b>	Carico max <b>50 kN</b>				
Customer	Model	Serial no	Max Load				
Carico misurato con-Load measured by		Scala-Ranges	Risol.-Resol.	Carico min.ver.-Lower limit	Mat.-Serial no.		
Indicat. Manometrico - Manometer indicator							
Display dig. - Digital dis.		0-50 KN	0,001	5 kN	06053686		
Altri - Others							
Verificata con-Verified with		Scala-Ranges	Certificato n°-Certificate no.	Valid.-Validity	Mat.-Serial no.		
Dinamometri electr. - Force transducer		0-50000 N	147817F	07/2019	414009		
Centralina digitale-Digital electronic tester			147817F	07/2019	10096		
Manometri-Manometers							
Anelli di prova-Proving rings							
Verificata secondo		Carico ver. da <b>5 kN</b>		a <b>50 kN</b>			
Conform to <b>L.Q.P1 rev.2</b>		Load verified from		to			
Forza Load	Uscite centralina (division) Output digital electronic tester (division)			Temperatura <b>20 °C</b>			
kN	Ciclo-Cycles 1	Ciclo-Cycles 2	Ciclo-Cycles 3	Temperature °C			
0	0,0	0,0	0,0	<b>Memo</b>			
5	5,030	4,998	5,042	Calcolo forze misurate/Calculation of measured forces			
10	10,030	9,990	10,016	$F_i = C+D*(U_i-U_0)+E*(U_i-U_0)^2+F*(U_i-U_0)^3$			
20	20,091	20,020	20,078	Accuratezza/Accuracy	Ripetibilità/Repeatability		
30	30,010	30,038	30,048	$A_i = F_i/M_i * 100$	$R_i = F_{i\max}-F_{i\min} * 100$		
40	40,092	40,074	40,056	$M_i$	$M_i$		
50	50,114	50,108	50,064		Media/Media		
					$M_i = F_1+F_2+F_3$		
$F_n$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	Max			
Zero	0	0	0	0			
<b>ELABORAZIONE DATI - DATA ELABORATION</b>							
Coefficients dell'equazione del dinamometro - Index of strain gauge equation							
C = 0,00000E+00		D = 1,00027E+00		E = -1,95047E-10		F = -1,12987E-13	
Forza Load	Forze Misurate Load measured			Media Media	Err. Accurat. Accuracy err.	Err. Ripetibilità Repeatab. err.	
kN	Ciclo-Cycles 1	Ciclo-Cycles 2	Ciclo-Cycles 3	kN	%	%	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	
5	5,031	4,999	5,043	5,025	-0,49	0,88	
10	10,033	9,993	10,019	10,015	-0,15	0,40	
20	20,096	20,025	20,083	20,068	-0,34	0,35	
30	30,018	30,046	30,056	30,040	-0,13	0,13	
40	40,103	40,085	40,069	40,085	-0,21	0,08	
50	50,128	50,122	50,078	50,109	0,00	0,00	
$F_n$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	M	A	R	
<b>LIMITI DI CLASSE - FORCE SCALE TOLERANCES</b>							
	Err. accurat. Accuracy err.	Err. ripetibilità Repeatab. err.	Ritorno a 0 Zero error	Risoluzione Resolution			
Classe-Class	%	%	% F.S.	%			
1	1	1	0,2	0,5			
2	2	2	0,4	1			
Campo di misura - Range		Da - From <b>5 kN</b>		a - to <b>50 kN</b>			
		0,49	0,88	0,00	0,02	Classe assegnata <b>1</b>	
Campo di misura - Range		Da - From		a - to			
				Classe assegnata			
Data - Date		Firma collaudatore - Operator signature			Verificata da - Verified by		
05-giu-19							
0							

Certificato taratura pressa Point load



Tipo del provino: carote  $\varnothing$  85 mm

La resistenza al punzonamento (Point Load Strength Index) è data dalla seguente espressione

$$I_s = (P \times 1000) / D_E^2$$

$I_s$  (MPa) = Point Load Strength Index

P (kN) = Resistenza massima a rottura

$D_E$  (mm) = Diametro equivalente della carota (diametro del provino)  $D_E = 89$  mm)

Il valore  $I_s$  deve essere corretto per rapportarlo a provini con  $\varnothing$  50 mm, come segue:

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad F = (D_E / 50)^{0,45} \quad (F = 1,296)$$

Per ottenere una stima della resistenza a compressione monoassiale si dovrà moltiplicare il valore  $I_{s50}$  per un coeff. K variabile in funzione del litotipo testato.

Sond.	Prof. camp.	P (KN)	Tipo rottura	$I_s$ (MPa)	$I_{s50}$ (MPa)	Su (MPa)	Litotipo	Resistenza
WG50	1.65-2.00	18.9	Diametrale	2.62	3.39	74.6	Ignimbrite	Elevata
WG50	5.00-5.30	22.9	Diametrale	3.17	4.11	90.4	Ignimbrite	Elevata
WG7	1.80-2.00	1.2	Diametrale	0.17	0.22	4.84	Piroclastite	Molto bassa
WG7	7.45-7.70	22.4	Diametrale	3.10	4.02	88.4	Ignimbrite piroclastica	Elevata
WG7	12.40-12.80	1.4	Diametrale	0.19	0.25	5.5	Piroclastite	Molto bassa/bassa

Tab. prove Point load

LITOTIPO	K
Rocce effusive	22
Rocce intrusive	18
Rocce sedimentarie a grana grossa	18
Rocce sedimentarie a grana fine	8
Rocce metamorfiche a basso metamorfismo	18-24
Rocce metamorfiche a medio metamorfismo	16-19
Rocce metamorfiche ad alto metamorfismo	14

Valori del coeff. di correlazione K (Bruschi, 2004)

Il campione intatto della ignimbrite ha dunque resistenza elevata (Brown E.T., Rock characterization, testing and monitoring-ISRM suggest methods) mentre la piroclastite ha

resistenza da molto bassa a bassa. I valori molto bassi sono legati alla facies color mattone, mentre i valori più elevati sono correlabili ai soli nuclei lapidei grigi.

*Cagliari, 26.05.2020*

*L'Impresa*

  
Ditta Dr. Antonello Angius  
INDAGINI GEOGNOSTICHE  
Via Italia, 143 - 09134 Cagliari

# Allegato 1

## PLANIMETRIE UBICAZIONI INDAGINI

TAV.1 - Planimetria generale ubicazione indagini

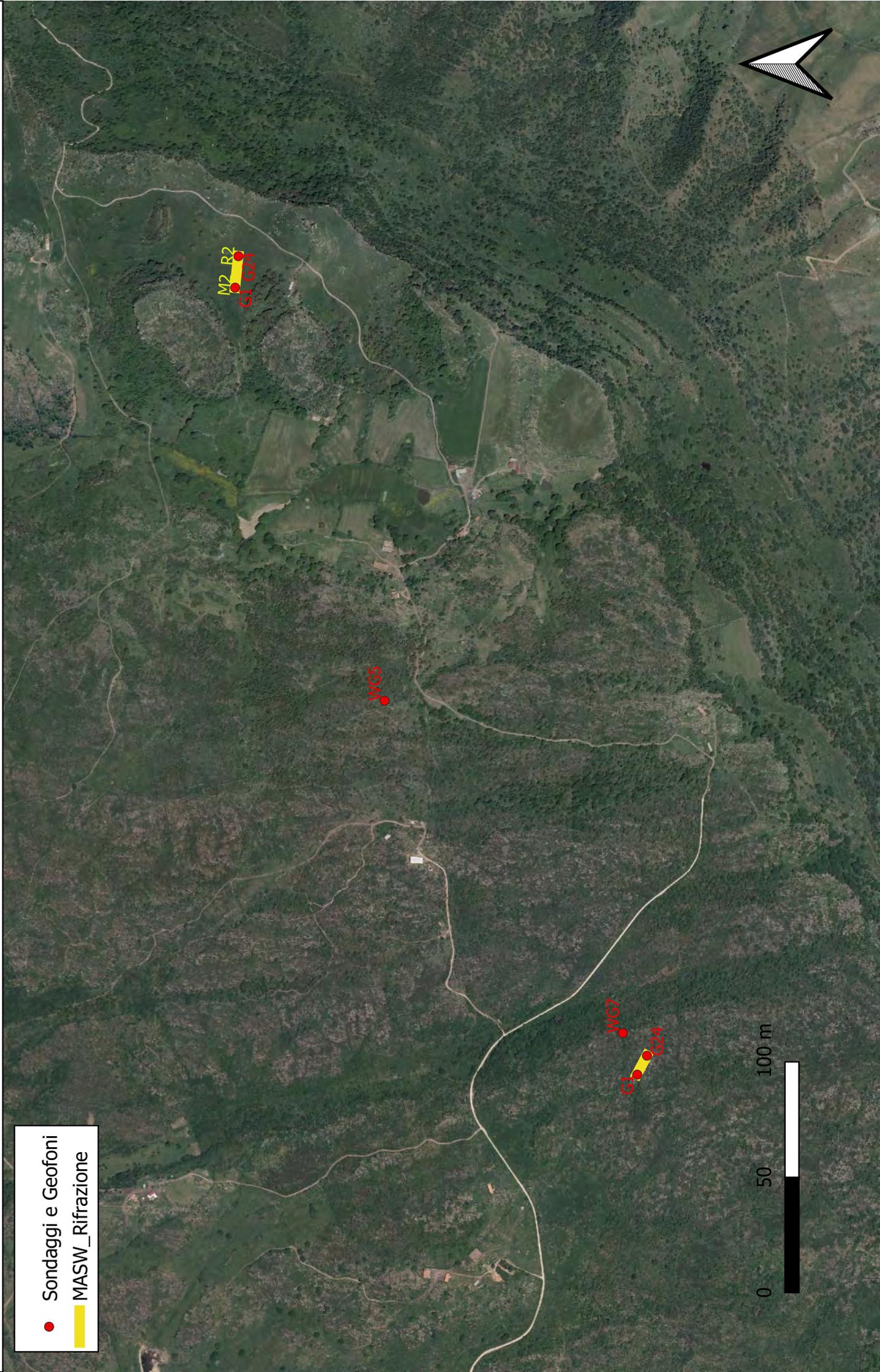
TAV.2 - Planimetria ubicazione Sondaggio e Sismica WG7

TAV.3 - Planimetria ubicazione Sondaggio WG5

TAV.2 - Planimetria ubicazione Sismica WG4

# TAVOLA 1 - Planimetria Generale ubicazioni indagini Comune di Ozieri e Chiaramonti - SCALA 1:10.000

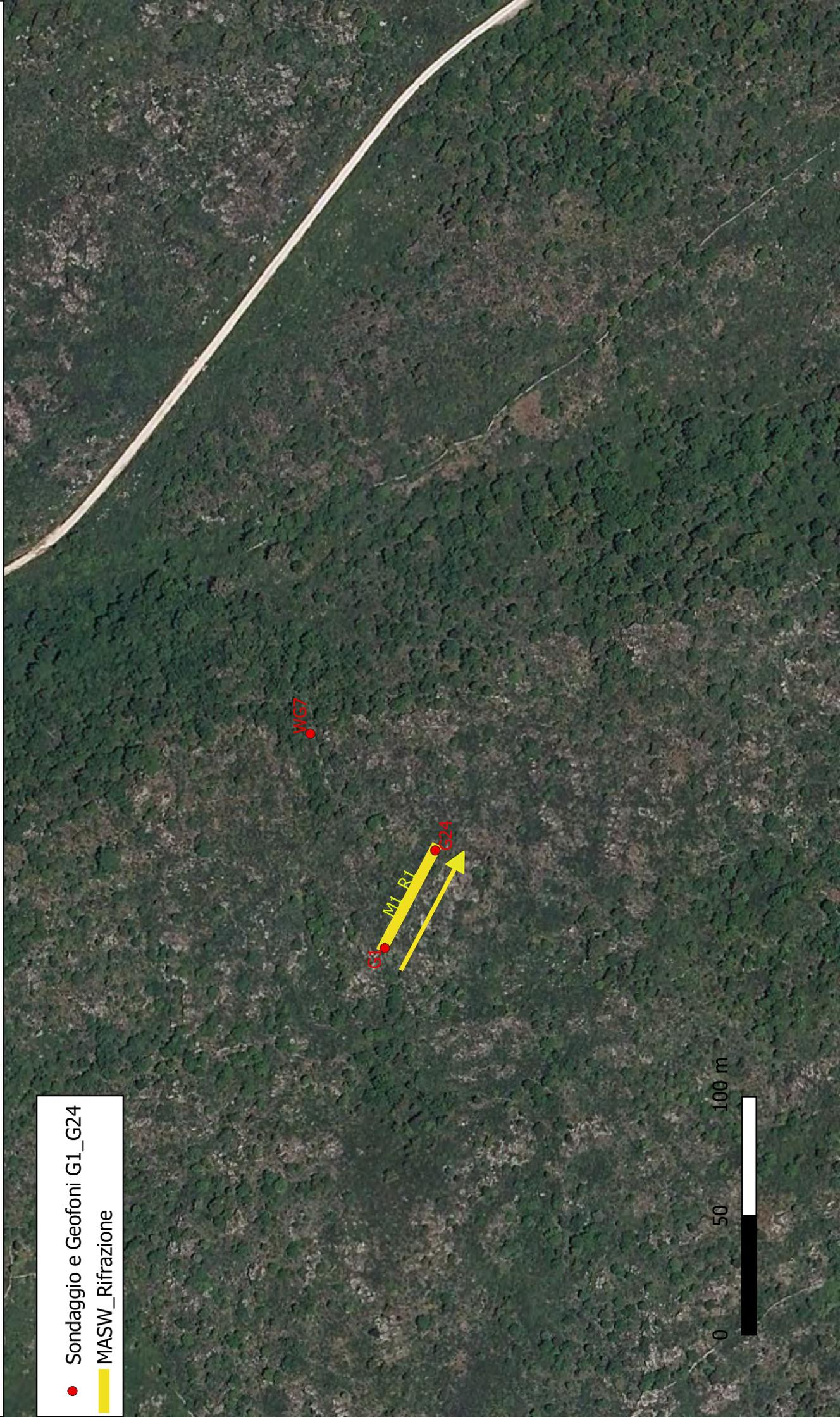
- Sondaggi e Geofoni
- MASW\_Rifrazione



**TAVOLA 2 - Planimetria ubicazioni indagini Sondaggio WG7  
Comune di Chiaramonti - SCALA 1:2.000**

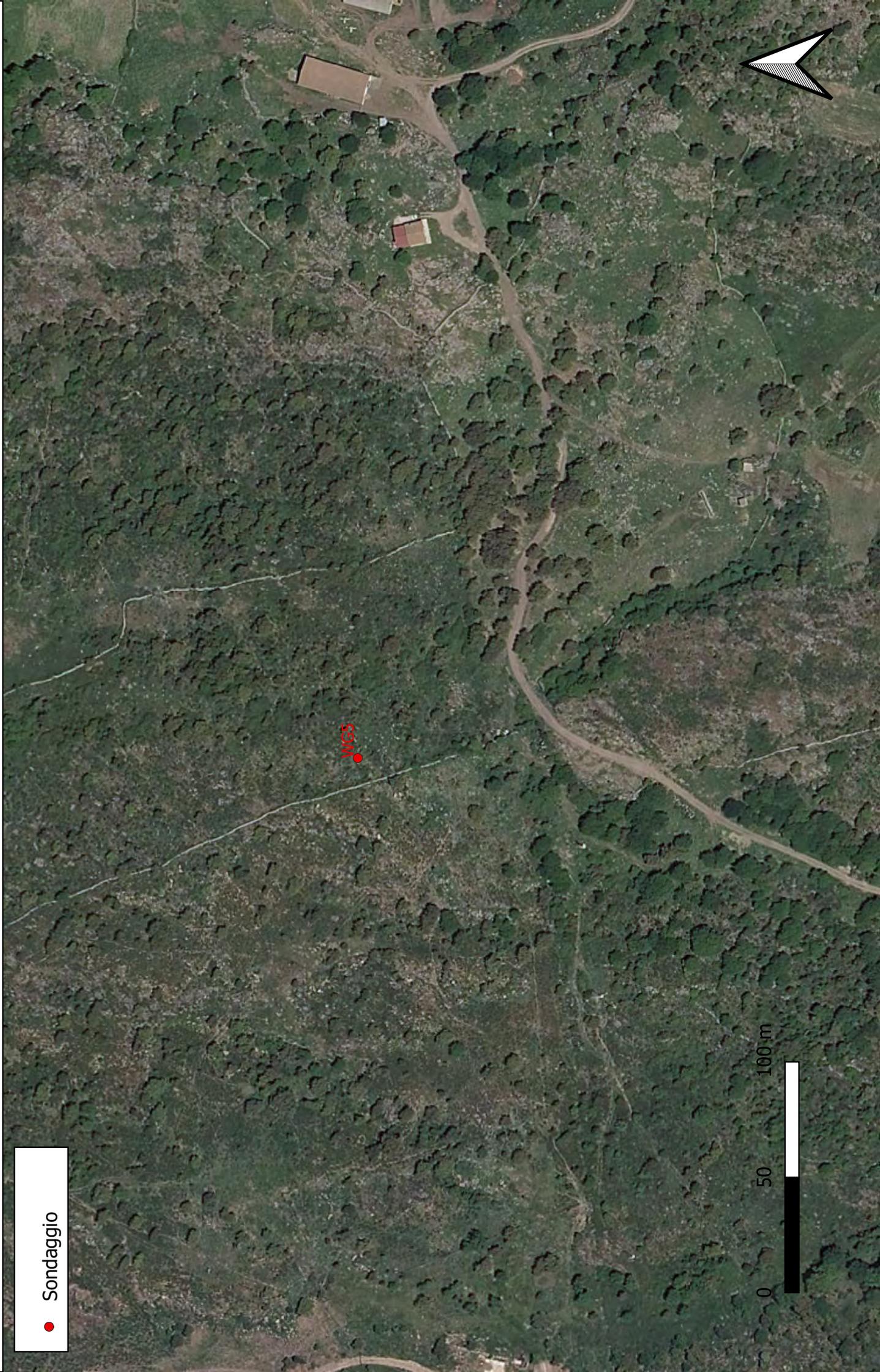
**Direzione dello stendimento (G1-G24)** 

-  Sondaggio e Geofoni G1\_G24
-  MASW\_Rifrazione



**TAVOLA 3 - Planimetria ubicazioni indagine WG5  
Comune di Ozieri - SCALA 1:2.000**

● Sondaggio



0 50 100 m

**TAVOLA 4 - Planimetria ubicazioni indagine sismica WG4  
Comune di Ozieri - SCALA 1:2.000**

**Direzione dello stendimento (G1-G24)**



MASW\_Rifrazione



0 50 100 m



# Allegato 2

## STRATIGRAFIE DEI SONDAGGI

# DR. ANTONELLO ANGIUS

Via Italia, 143 Cagliari 09134

angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com

SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE

Committente		Profondità raggiunta	Quota Ass. P.C.	Certificato n°	Pagina						
Dr.Geol. Francesca Demurtas		-10.00		1	1						
Operatore		Indagine	Cantiere			Inizio/Fine Esecuzione					
Salis Giampaolo		Geotecnica	Eolico Ozieri			19/20.05.2020					
Responsabile		Sondaggio	Tipo Carotaggio	Tipo Sonda	Coordinate X Y						
Dott. Geol. Angius Antonello		Sond. WG5	Continuo 101 mm	Deltabase 520							
Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T.	Pocket Test Kg/cmq	Vane Test Kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Falda	
		Suolo ciottoloso con matrice argillosa, marrone, umido o saturo sfumante nella coltre totalmente alterata dell'ignimbrite.	0.70								
1		Ignimbrite rosacea, fratturata, giunti subverticali e subordinatamente obliqui, scabri, serrati, con pareti nerastre o grigie e locale riempimento argilloso-sabbioso.									
2		RQD da 0.70 a 3.00 m = 52% RQD da 3.00 a 6.00 m = 73%								1.65 P 2.00	
3											
4			4.80								
5		Ignimbrite rosacea, integra o poco fratturata, giunti subverticali e subordinatamente obliqui, scabri, serrati, con pareti nerastre o grigie e locale riempimento argilloso-sabbioso.								5.00 P 5.30	
6		RQD da 6.00 a 10.00 m = 87%									
7											
8											
9											
10			10.00								
11											
12											
13											

Campioni: S-Parisi Sestili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimanezzato, Ro-Rimanezzato da SPT  
Perforazione:CS-Carriere Semplice, CD-Carriere Doppio, EC-Elica Continua  
Probe:SPF-50-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa  
Carotaggio:Continuo 101 mm

Sonda:Deltabase 520

Responsabile

# DR. ANTONELLO ANGIUS

Via Italia, 143 Cagliari 09134

angiusgeo@tiscali.it www.angiusgeo.com

SONDAGGI GEOGNOSTICI - MONITORAGGIO AMBIENTALE

Committente		Profondità raggiunta	Quota Ass. P.C.	Certificato n°	Pagina					
Dr.Geol. Francesca Demurtas		-13.00		2	1					
Operatore		Indagine	Cantiere		Inizio/Fine Esecuzione					
Salis Giampaolo		Geotecnica	Eolico Ozieri		20/21.05.2020					
Responsabile		Sondaggio	Tipo Carotaggio	Tipo Sonda	Coordinate X Y					
Dott. Geol. Angius Antonello		Sond. WG7	Continuo 101 mm	Deltabase 520						
Scala (mt)	Litologia	Descrizione	Quota	%Carotaggio R.Q.D.	S.P.T.	Pocket Test kg/cmq	Vane Test kg/cmq	Campioni	Metodo Perforazione	Falda
		Suolo bruno ciottoloso-argilloso.	0.40							
1		Detrito di vulcanite sfumante nella coltre molto alterata, ma con struttura riconoscibile, del substrato vulvanico, marrone, addensato, umido.	1.70							
2		Depositi di flusso piroclastico rossastri da totalmente fratturati a molto fratturati, debolmente alterati. Giunti obliqui e subverticali con pareti scabre, alterate e riempimento da millimetrico a centimetrico sabbioso-argilloso, biancastro. RQD = 5%								1.80 2.00
3										
4			4.40							
5		Livello scoriaceo assimilabile geotecnicamente ad una ghiaia con sabbia debolmente cementata, totalmente ossidato, marrone. RQD = 0%								
6										
7			7.40							
8		Depositi di flusso piroclastico, grigi con cemento giallo-rossastro, da totalmente a molto fratturati, ossidati. Giunti obliqui e subverticali, scabri con riempimento sabbioso-terroso. RQD = 5%								7.45 7.70
9										
10										
11			11.60							
12		Piroclastite grigio-rossastra, poco fratturata, giunti obliqui e serrati con pareti ossidate. RQD = 64%								12.40 12.80
13			13.00							

Campioni: S-Pereti Sottili, O-Osterberg, M-Mazier, R-Rimaneggiato, Rs-Rimaneggiato da SPT  
 Perforazione: CS-Carotiere Semplice, CD-Carotiere Doppio, EC-Elica Continua  
 Prove SPT: PA-Punta Aperta, PC-Punta Chiusa  
 Carotaggio: Continuo 101 mm

Sonda Deltabase 520

Responsabile

# Allegato 3

## REPORT FOTOGRAFICO



Foto 1: posizionamento Sondaggio WG5



Foto 2: Sondaggio WG5, metri 0.00 – 5.00



Foto 3: Sondaggio WG5, metri 5.00 – 10.00



Foto 4: posizionamento Sondaggio WG7



Foto 5: Sondaggio WG7, metri 0.00 – 5.00



Foto 6 e 7: Sondaggio WG7, metri 5.00 – 13.00



Foto 8: Campione Sondaggio WG5, metri 1.65 – 2.00



Foto 9: Campion2 Sondaggio WG5, metri 5.00 – 5.30



Foto 10: Campione Sondaggio WG7, metri 1.80 – 2.00



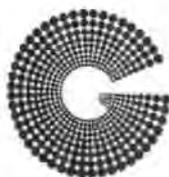
Foto 11: Campione Sondaggio WG7, metri 7.45 – 7.70



Foto 12: Campione Sondaggio WG7, metri 12.40 – 12.80

# Allegato 4

## DETERMINAZIONE PESO DI VOLUME



# GEOSYSTEM

Del Dott. Geol. G.B. Demontis

ZONA INDUSTRIALE LOC. "PILL'E MATTA"  
09044 QUARTUCCIU (CA)

TEL/FAX 070852509-070852424 - www.geosystem.ca.it  
email: geosystemca@yahoo.it - pec: geosystem@pec.it

LABORATORIO AUTORIZZATO ALL'ESECUZIONE I  
PROVE SU MATERIALI DA COSTRUZIONE SETTORE  
DI CUI ALL'ART. 59 DEL D.P.R. N.380/21  
CIRCOLARE N.781/75TC DEL 08/09/21  
AUT. MINISTERO N.54313 DEL 19/12/21  
PROVE SUI TERRENI SETTORE  
DI CUI ALL'ART. 59 DEL D.P.R. N.380/21  
CIRCOLARE N.7818/STC DEL 06/09/21  
AUT. MINISTERO N.52487 DEL 11/10/21  
CONTROLLI NON DISTRUTTIVI SU CALCESTRUZZI  
CERTIFICAZIONE UNI EN ISO 91  
REGOLAMENTO IT-IND-REG-02\_NDT I  
LABORATORIO CERTIFICATO ISO 90  
CERT. N.IT 11/0996 ISO 9001/UNI EN ISO 9001:21

V.D.A. N° 5274 DEL 25/05/2020  
COMMITTENTE Ditta Dott. Antonello Angius  
CANTIERE Eplico Ozieri

CAMPIONE Roccia PROTOCOLLO \\  
UBICAZIONE \\  
DATA PROVA 26/05/2020 DATA PRELIEVO \\  
CERTIFICATO N. 040319 DEL

26 MAG 2020

## DETERMINAZIONE DELLA MASSA VOLUMICA APPARENTE

(UNI CEN ISO/TS 17892-2 Metodo b)

Determinazione eseguita mediante pesata in acqua a temperatura ambiente dopo aver provveduto ad impermeabilizzare il provino con para

VDA N.	CAMPIONE	Massa Vol. naturale Mg/m <sup>3</sup>	Cont. D'acqua * %
5274-1	WG7 (7,45-7,70)m	2,39	\
5274-2	WG7 (12,40-12,80)m	1,86	\
5274-3	WG5 (1,65-2,00)m	2,26	\
\	\	\	\
\	\	\	\
\	\	\	\
\	\	\	\
\	\	\	\
\	\	\	\
\	\	\	\

\* (UNI CEN ISO TS 17892-1)

NOTE: Campione consegnato a cura del Committente

IL TECNICO

IL DIRETTORE  
Dott. Geol. Guido Demontis

# Allegato 5

## INDAGINE GEOFISICA

## Sommario

1	PREMESSA.....	2
2	PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE .....	2
3	SISMICA A RIFRAZIONE.....	3
3.1	Strumentazione utilizzata .....	4
3.2	Elaborazione dei dati.....	4
3.3	Valutazione della escavabilità delle rocce .....	5
4	INDAGINI SISMICHE: MASW .....	7
4.1	Tecnica e parametri utilizzati .....	7
4.2	Strumentazione utilizzata .....	8
4.3	Elaborazione dei dati.....	8
4.4	CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018) .....	10
4.5	VALORI DI VELOCITÀ DELLE ONDE P ED S PER I PRINCIPALI LITOTIPI .....	12
4.6	DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DI DEFORMAZIONE E DI RESISTENZA AL TAGLIO DALLE INDAGINI SISMICHE.....	13
4.7	MASW: RISULTATI .....	15
4.7.1	MASW M1.....	15
4.7.2	MASW M2.....	17
5	INTERPRETAZIONE DEI DATI: RIFRAZIONE.....	19
5.1	Rifrazione R1 .....	19
5.2	Rifrazione R2 .....	21
6	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	23

### Allegati:

- Allegato A. Sismica a rifrazione: dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici
- Allegato B. MASW: Sismogramma acquisiti- spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione sperimentali e calcolate con profilo Vs
- Allegato C. Documentazione fotografica indagini sismiche.

## 1 **PREMESSA**

La presente Relazione descrive le attività di indagine geofisica realizzate *nell'ambito dei lavori di progettazione di un Parco eolico in località Ischinditta in agro di Ozieri (SS)*.

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

L'indagine sismica con metodologia MASW si pone come obiettivo la ricostruzione dell'assetto sismo-stratigrafico dei terreni sede di posa delle opere di fondazione nonché la classificazione del suolo di fondazione per le categorie semplificate indicate nel Decreto 17 gennaio 2018 - NTC 2018 aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".

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, del terreno investigato.

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  $V_s$ , 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, del terreno investigato.

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

Come richiesto dalla committenza sono stati realizzati in totale n° 2 stendimenti MASW e n°2 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P.

Fanno parte integrante della presente relazione i seguenti allegati:

- Tavola 1. Planimetria generale ubicazione indagini– scala 1:10.000 (allegato 1)
- Tavola 2. Planimetria ubicazione sondaggio e sismica WG7 – scala 1:2.000 (allegato 1)
- Tavola 4. Planimetria ubicazione sismica WG4
- Allegato A. Sismica a rifrazione: dromocrone osservate e calcolate - grafico raggi sismici
- Allegato B. MASW: Sismogrammi acquisiti- spettri velocità di fase/frequenza - Curve di dispersione sperimentali e calcolate con profilo  $V_s$
- Allegato C. Documentazione fotografica indagini sismiche.

## 2 **PROGRAMMA DELLE INDAGINI SVOLTE**

Le prospezioni geofisiche sono state articolate secondo il seguente programma:

1. Esecuzione, in data 21 Maggio 2020, di n°2 stendimenti di sismica con tecnica MASW (M1-M2) e n° 2 RIFRAZIONI (R1-R2). Le basi sismiche MASW coincidono con quelle in Rifrazione;
2. Rilievo topografico tramite livella laser di tutti i punti di misura (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 degli stendimenti è indicata nelle **Tavole 1, 2 e 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.

Lo stendimento di tomografia elettrica M1/R1 presenta una lunghezza pari a 46 metri a causa della mancanza di spazi disponibili, infatti ad una estremità è presente la strada e dall'altra un corso d'acqua interessato da deflusso idrico.

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

Stendimento	Orientamento	Lunghezza(m)
M1/R1	No - SE	46
M2/R2	W-E	69

### 3 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 superiore.

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 assunto 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 valutata in circa il 25÷30% della distanza geofonica.

Nel caso in esame, in funzione della lunghezza degli stendimenti sono state eseguite 9 energizzazioni-shot 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 R1



**Schema 1:** Stendimento di sismica a rifrazione e R1 in onde P con 24 geofoni e interdistanza di 2,0 m

## Schema delle acquisizioni di sismica a rifrazione R2



**Schema 1:** Stendimento di sismica a rifrazione e R2 in onde P con 24 geofoni e interdistanza di 3,0 m

### 3.1 Strumentazione utilizzata

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysical con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24.

Per l'energizzazione 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.

### 3.2 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 in genere medio-buona e il picking è stato realizzato facilmente quanto meno per i geofoni non troppo lontani dalla sorgente di energizzazione.

L'elaborazione e la seguente modellizzazione dei dati è stata eseguita mediante i programmi INTERSISM 2.1 della Geo&Soft International e può essere riassunta nelle seguenti fasi fondamentali:

Aggiornamento delle headers e creazione dei database. In questa fase vengono caricati i sismogrammi e impostate le caratteristiche dello stendimento: quote, offset ecc. . Questo stadio è uguale sia per lo studio delle onde P che per le onde S essendo identico lo stendimento.

Picking dei primi arrivi per le tracce delle onde P e S. Prima di questa fase, se presente, vengono adottati dei filtri per eliminare o ridurre eventuali rumori o segnali non ritenuti utili.

Ricostruzione e traslazione delle dromocrone.

Modellizzazione e calcolo di un profilo del sottosuolo mediante il Metodo Reciproco Generalizzato GRM o/e Plus Minus.

Simulazione e inversione mediante il software Rayfract che utilizzando la tecnica WET, crea un modello del sottosuolo derivante da progressivi aggiustamenti, con iterazioni successive, del modello iniziale.

Modellizzazione e calcolo di un profilo del sottosuolo mediante piccoli aggiustamenti fino a un modello compatibile con la geologia del sito. Gli elaborati ottenuti dall'indagine, considerando le caratteristiche geologiche della zona, sono stati rappresentati mediante un scala cromatica che per le onde P è stata suddivisa in fasce di velocità comprese tra 400 m/s e 5000 m/s

Fra una fase e l'altra vengono eseguiti dei controlli tali da garantire la qualità e la congruenza fra il modello di sottosuolo ottenuto e la geologia nota (stratigrafia e caratteristiche geotecniche).

Le sezioni sismiche ottenute dalla modellizzazione e interpretazione dei segnali acquisiti (riportati mediante sezioni litosismografiche) permettono di individuare le principali unità geologiche.

Si ricorda che le tecniche di geofisica applicata hanno un margine intrinseco di errore dovuto a:

- Limiti della modellizzazione dell'ambiente naturale non sempre coerente (esempio stratipiano-paralleli)
- Rumori di vario genere: cavi elettrici, mezzi vari, vento. Rumore dovuto alla strumentazione esempio: contatti dovuti all'umidità, rumore termico ecc., basso rapporto segnale/rumore dovuto alle caratteristiche della sorgente.
- Limite della tecnica adottata. Nel caso in esame (sismica a rifrazione) la risoluzione del metodo non permette la determinazione di spessori inferiori al metro e le velocità Vs e Vp sono da considerare come la media dell'unità individuata.

### 3.3 Valutazione della escavabilità delle rocce

Per escavabilità o *rippabilità* s'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 di altri fattori e caratteristiche della roccia.

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*:

---

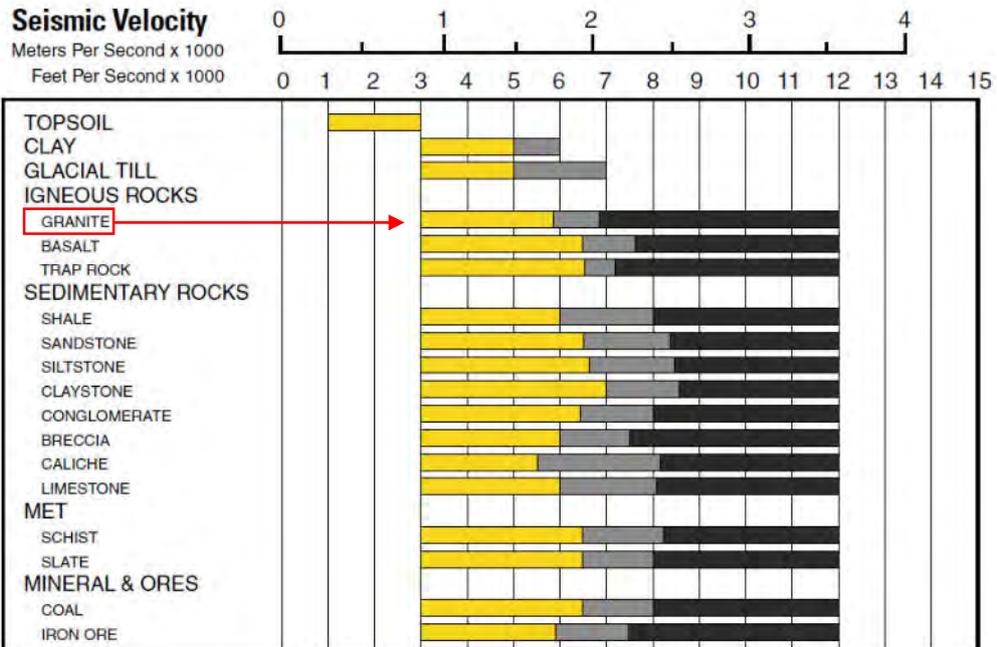
<sup>1</sup>twelfth edition - February 2000 - Caterpillar inc - Peoria , Illinois

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

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. "granite") per velocità oltre i 1700 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 (nel caso in esame vista l'ubicazione nei pressi di centri abitati si esclude l'uso dell'esplosivo).

### D8R Ripper Performance

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

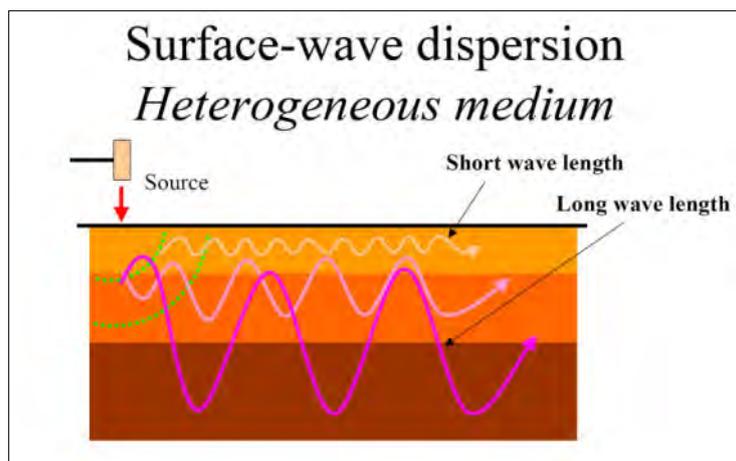


## 4 INDAGINI SISMICHE: MASW

### 4.1 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

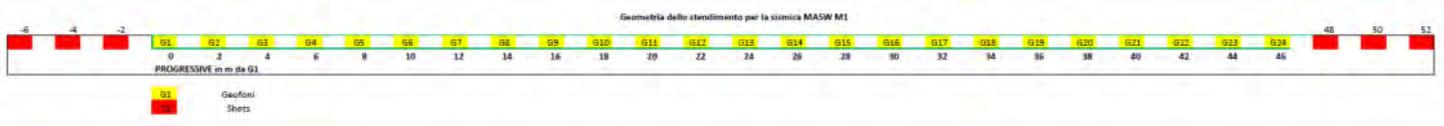
L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 2,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base 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=46 m (MASW 1)



**Schema 2.** Schema geometrico di acquisizione dei dati per gli stendimenti di lunghezza L=69 m (MASW 2)



#### 4.2 **Strumentazione utilizzata**

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali.

Per l'energizzazione 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.

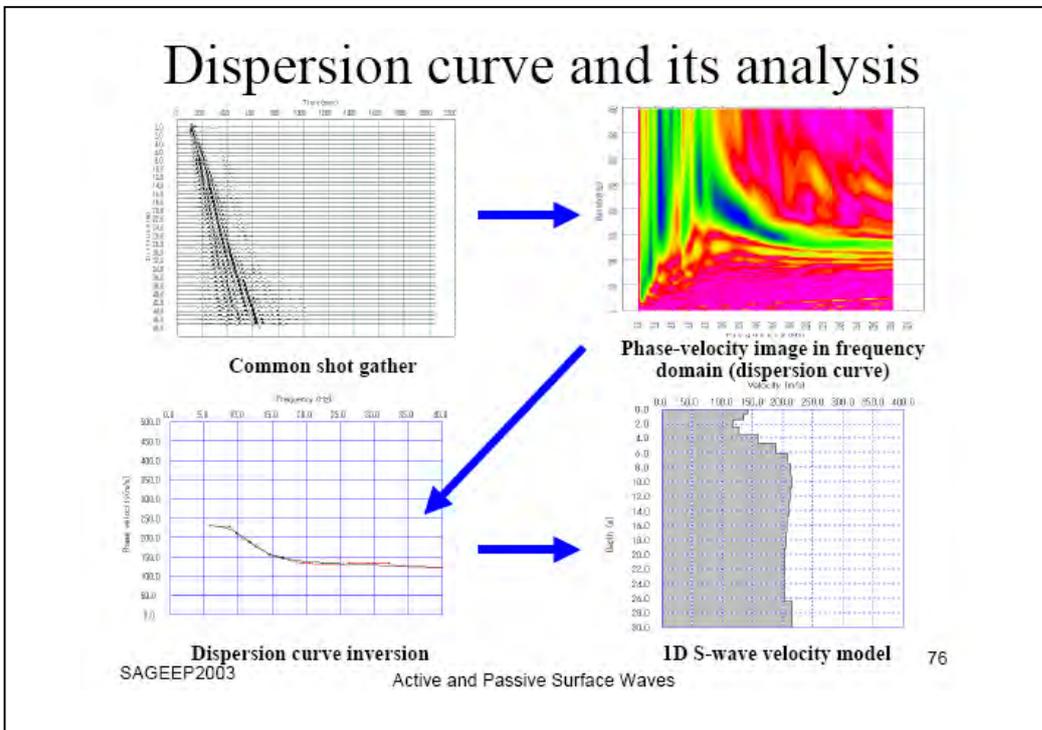
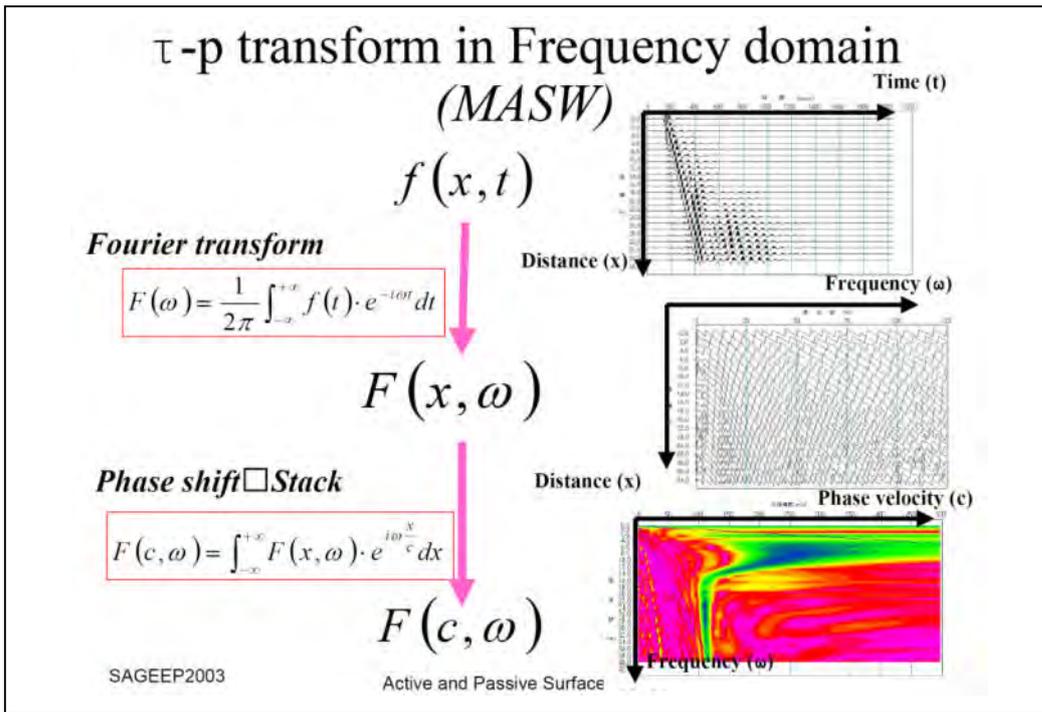
#### 4.3 **Elaborazione dei dati**

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. 3.2.11 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;

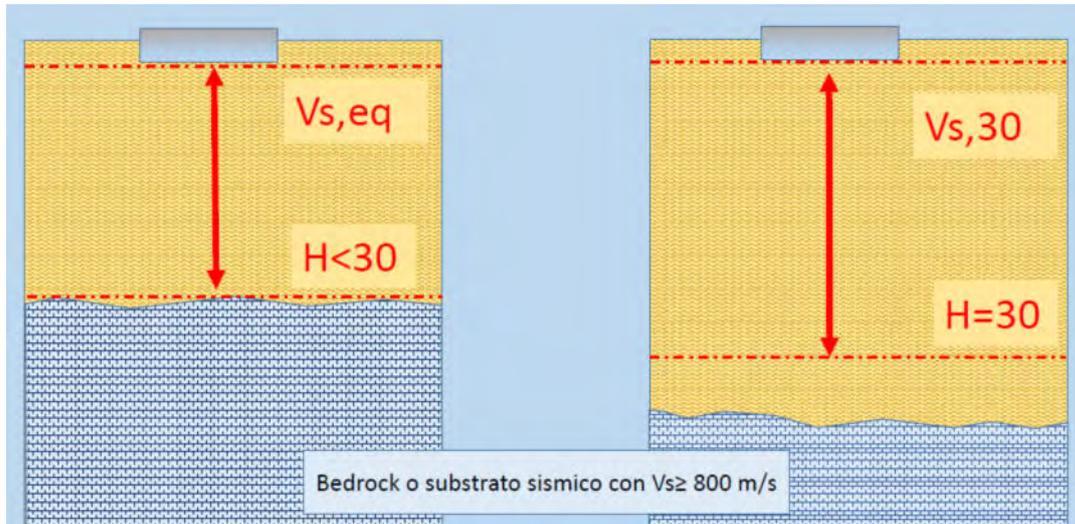
$N$  numero di strati;

$H$  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.

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

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

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

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

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

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

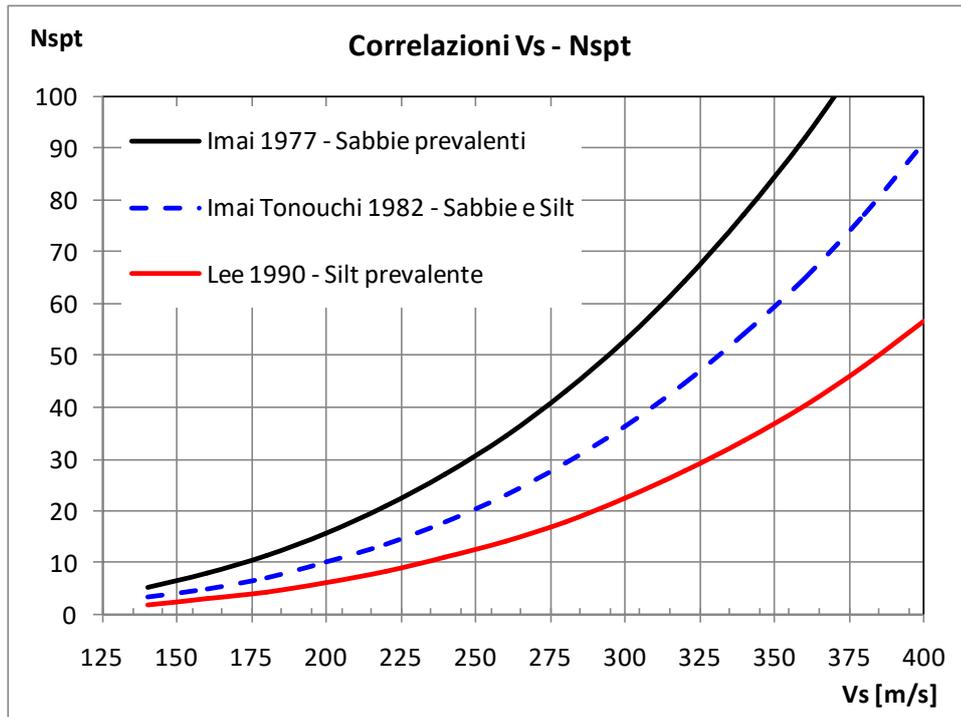
A tale scopo si illustrano le correlazioni proposte da Imai 1977, Imai e Tonuchi (1982) e Lee (1990) valide per tre differenti tipologie di terreni che caratterizzano in genere tutti i terreni:

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

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

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

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>

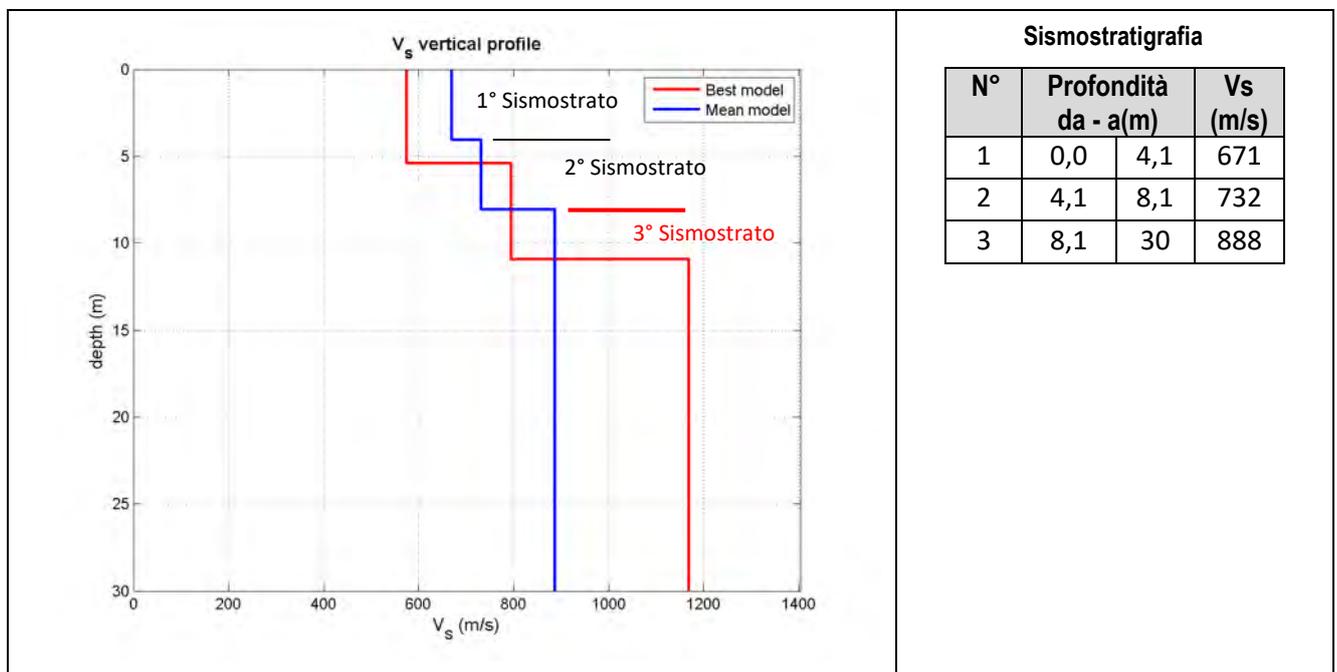
## 4.7 MASW: RISULTATI

### 4.7.1 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 – 4,1	1° sismostrato con Vs DI <b>671 m/s</b> , Substrato alterato e fratturato
4,1– 8,1	2° sismostrato con Vs di <b>732 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
8,1 – 30	3° sismostrato con Vs di <b>888 m/s</b> Substrato roccioso poco fratturato

MASW M1 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c= 699 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 **8,1 m dal p.c.** ( $V_s > 800$  m/s);

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **8,1 m** di profondità dal p.c. è pari a:

**Vs eq= 8,1/0,01157=699 m/s.**

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a -3,00 m dal p.c., la Vs equivalente diventa:

**H= 8,1-3,0= 5,1 m** dal piano della fondazioni

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,4** m di profondità dal piano di fondazione è pari a:

**$V_s \text{ eq} = 5,1/0,01157 = 440 \text{ m/s}$ .**

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s

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

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

**Tabella 2.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

VS e PARAMETRI ELASTICI						
Strato	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Rapporto ( $V_p/V_s$ )	Spessore (m)	Profondità (m)	
					da	a
1	671	1378	2,05	4,1	0	-4,1
2	732	1614	2,2	4	-4,1	-8,1
3	888	2480	2,79	21,9	-8,1	-30
Strato	Poisson $\nu$	Densità ( $\text{g/cm}^3$ )	Shear G (kPa)	Bulk $E_v$ (kPa)	Young E (kPa)	
1	0,34	2,13	959013,33	2765938,48	2578976,82	
2	0,37	2,17	1162738,08	4102523,88	3187116,52	
3	0,43	2,27	1789994,88	11574748,16	5106738,16	

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

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

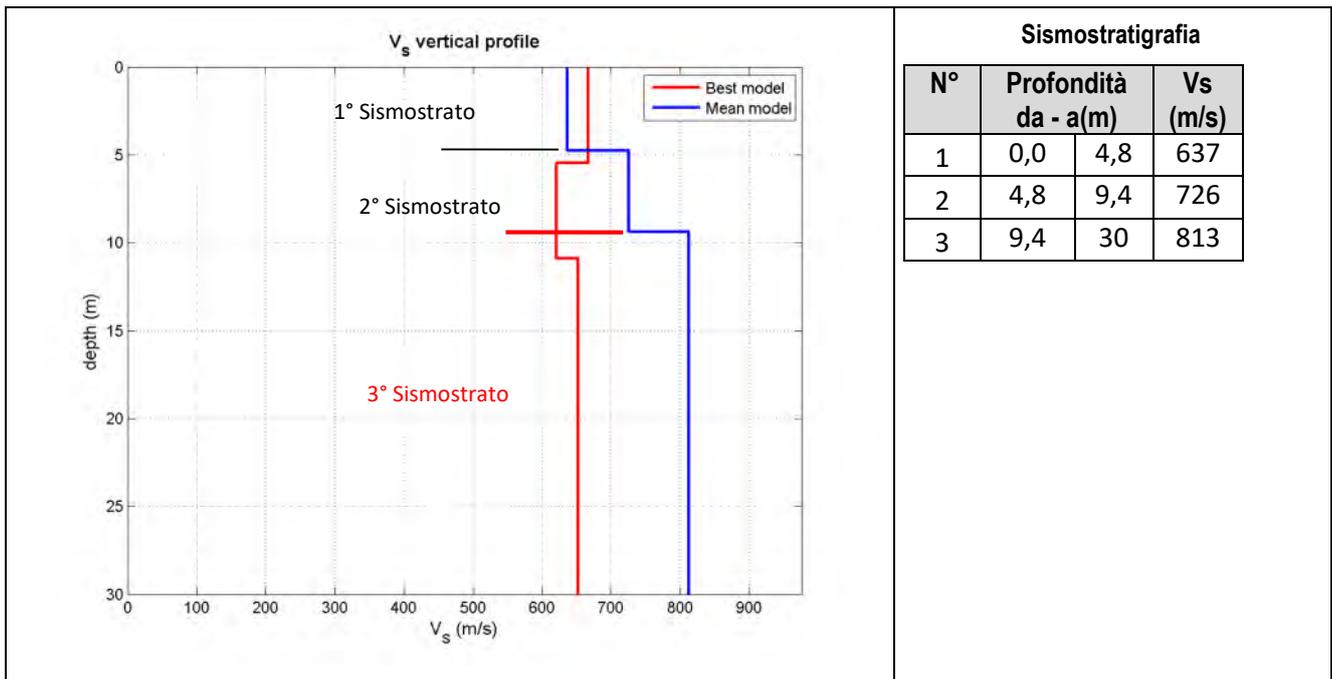
$$N_{SPT} = \left( \frac{V_s}{80,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

### 4.7.2 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
0-4,8	1° sismostrato con Vs di <b>637 m/s</b> , terre molto addensate o rocce tenere e/o fratturate
4,8-9,4	2° sismostrato con Vs di <b>726 m/s</b> Substrato roccioso fratturato
9,4-30	3° sismostrato con Vs di <b>813 m/s</b> , Substrato roccioso poco fratturato

**MASW M2 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c.= 677m/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 **9,4 m** (Vs>800 m/s);

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **3,9 m** di profondità dal p.c. è pari a:

**Vs eq= 9,4/0,01387=677m/s.**

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

Nell'ipotesi in cui le fondazioni siano realizzate a -3,00 m dal p.c., la Vs equivalente diventa:

**H= 9,4-3,0= 6,4 m** dal piano della fondazioni

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **6,4** m di profondità dal piano di fondazione è pari a:

$$V_s \text{ eq} = 6,4/0,01387 = 461 \text{ m/s.}$$

Ciò consente di classificare il terreno come **Categoria B: Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti**, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s

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

Nella **tabella 5** 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 3.** Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

VS e PARAMETRI ELASTICI						
Strato	$V_s$ (m/s)	$V_p$ (m/s)	Rapporto ( $V_p/V_s$ )	Spessore (m)	Profondità (m)	
					da	a
1	637	1784	2,8	4,8	0	-4,8
2	726	1319	1,82	4,6	-4,8	-9,4
3	813	1425	1,75	20,6	-9,4	-30
Strato	Poisson $\nu$	Densità ( $\text{g/cm}^3$ )	Shear $G$ (kPa)	Bulk $E_v$ (kPa)	Young $E$ (kPa)	
1	0,43	2,19	888634,11	5785171,16	2536051,83	
2	0,28	2,12	1117401,12	2198425,16	2866541,12	
3	0,26	2,14	1414473,66	2459572,62	3560823,86	

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

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

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

## 5 INTERPRETAZIONE DEI DATI: RIFRAZIONE

Sulla base delle velocità misurate, dei dati bibliografici e sui sondaggi eseguiti, nelle sezioni tomografiche sono stati definiti i seguenti sismostrati:

- A - Sismostrato A: Unità delle terre di copertura alterate
- B - Sismostrato B: Unità delle rocce lapidee tenere
- C - Sismostrato C: Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane

La delimitazione dei sismostrati ha lo scopo principale di distinguere le terre dalle rocce scavabili e queste da quelle non rippabili. I valori di velocità sono indicativi, e possono presentare delle oscillazioni locali a causa delle variazioni delle caratteristiche dei litotipi. Nei paragrafi precedenti sono state indicate le differenti classificazioni del grado di rippabilità delle rocce. Nel contesto in esame per definire le rocce "rippabili" si ritiene ragionevole impiegare quale valore indicativo di velocità  $V_p < 1.600$  m/s.

Nelle descrizioni che seguono le profondità sono riferite al piano di campagna e per direzione dello stendimento si intende l'orientamento geografico formato dalla linea che unisce il geofono iniziale con quello finale, che nelle planimetrie delle **Tavole 2 e 3** è stato indicato con una freccia.

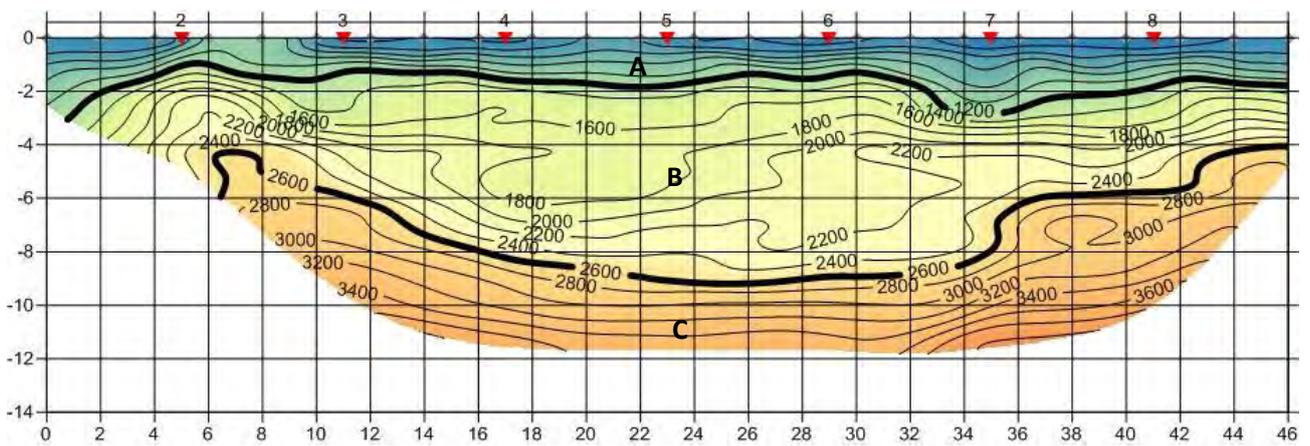
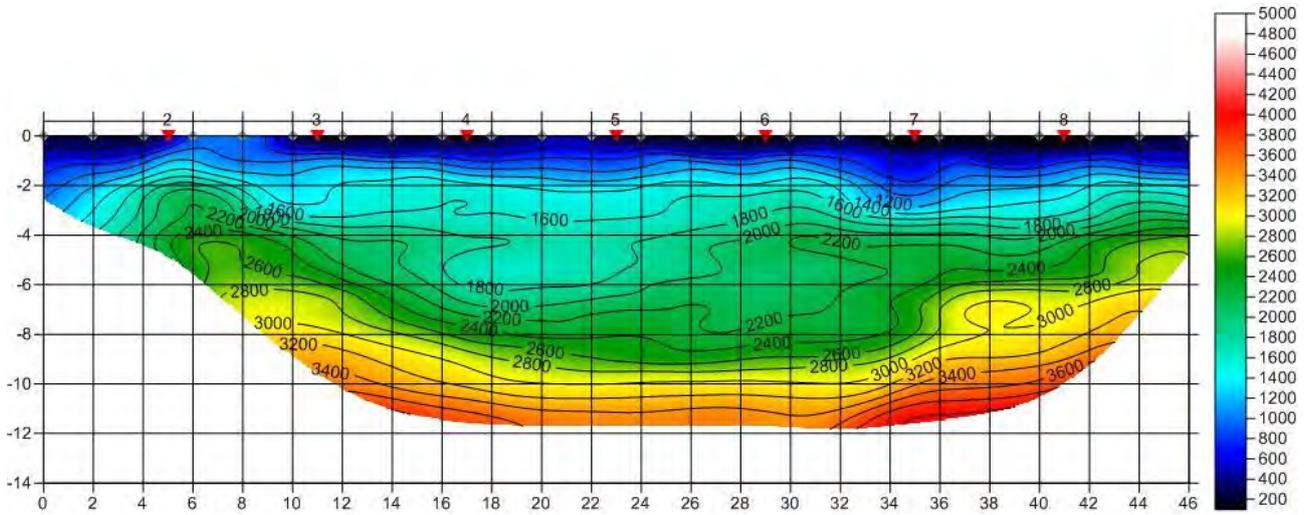
### 5.1 Rifrazione R1

Nella **sezione R1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R1	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura alterate	da 0 a 1/2	200-800
B: Lapidiee tenere/fratturate	da 1/2 a 2/4	800-1600
C: Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane	Da 2/4 a 10/12	1600-3600

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 200 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 all'aumentare della profondità. La sezione sismostratigrafica si presenta con una zona centrale dove le velocità delle onde si mostrano a parità di profondità inferiori, rispetto alle parti esterne della sezione.

Base Sismica R1 - Rifrazione in onde P



Legenda Sismostrati:

- A: Unità delle terre di copertura alterate
- B: Unità delle rocce lapidee da tenere a fratturate
- C: Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane

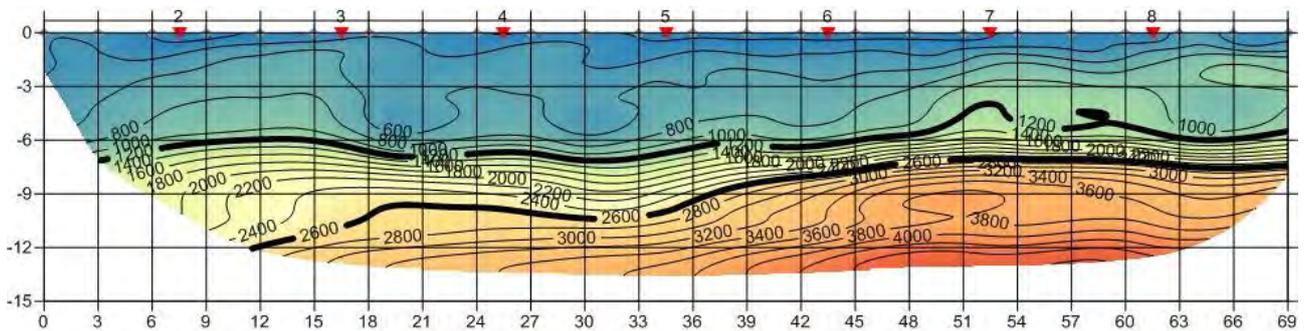
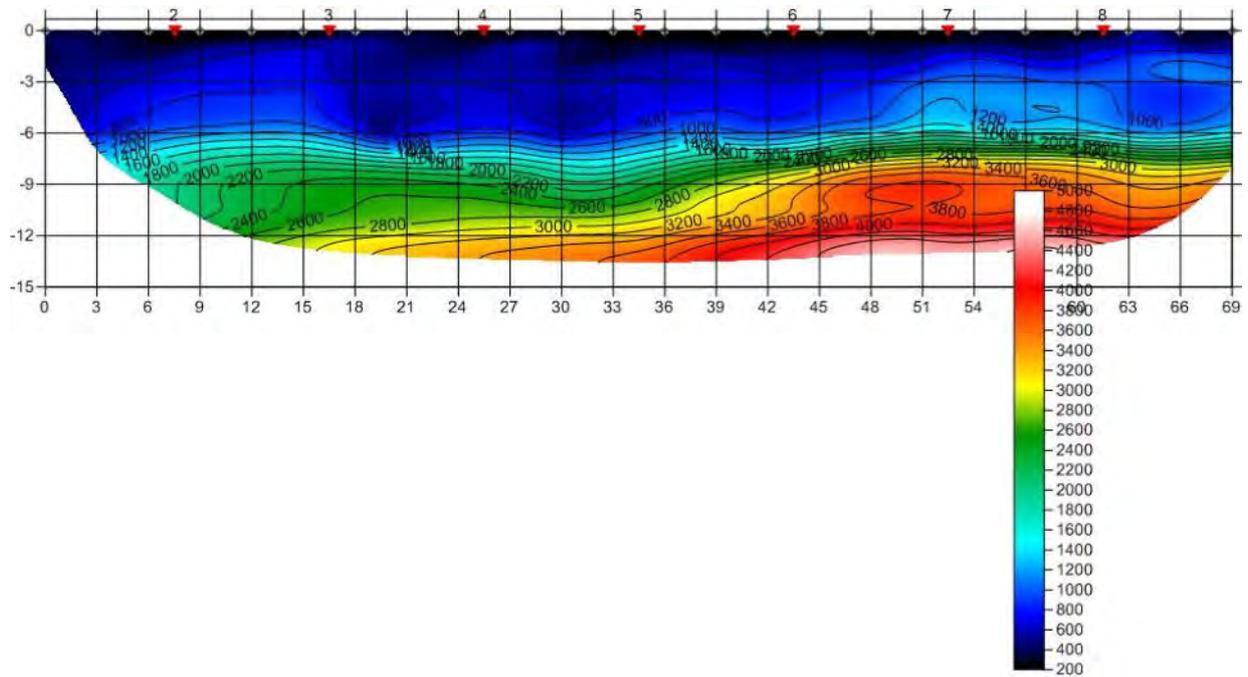
## 5.2 Rifrazione R2

Nella **sezione R2** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2	ONDE P	
	Sismostrati	Profondità da pc (m)
A: Unità delle terre di copertura alterate	da 0 a 5,0/6,0	200-1200
B: Lapidie tenere/fratturate	da 5,0/6,0 a 7,0/12,0	1200-2600
C: Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane	da 7,0/12,0 a 13,0	2600-4400

Dall'esame della sezione tomografica R2 si evince che, è presente a differenza della sezione R1, una coltre di copertura e/o alterazione di spessore variabile da 5 a 6 m. Anche qui si osserva un aumento di velocità delle onde P all'aumentare della profondità e con un range di velocità che varia dai 200 m/s della zona superficiale, ai 4600 m/s nella zone più profonde. L'aumentare delle velocità delle onde P è riconducibile a un miglioramento delle caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nelle zone più profonde del sottosuolo.

Base Sismica R2 - Rifrazione in onde P



**Legenda Sismostrati:**

- A:** Unità delle terre di copertura alterate
- B:** Rocce lapidee da tenere a fratturate
- C:** Unità delle rocce lapidee da fratturate a sane

## 6 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  $V_s$  crescente con la profondità con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi.

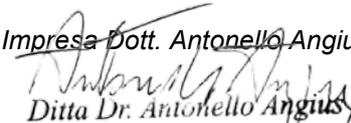
La prospezione geofisica attraverso l'impiego della tecnica della sismica con tecnica MASW ha permesso di ricostruire con buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurne le caratteristiche sismiche. Lungo gli stendimenti si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_s$  crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamento e spessori indicati nel precedente paragrafo.

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per i differenti siti di indagine, anche in funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

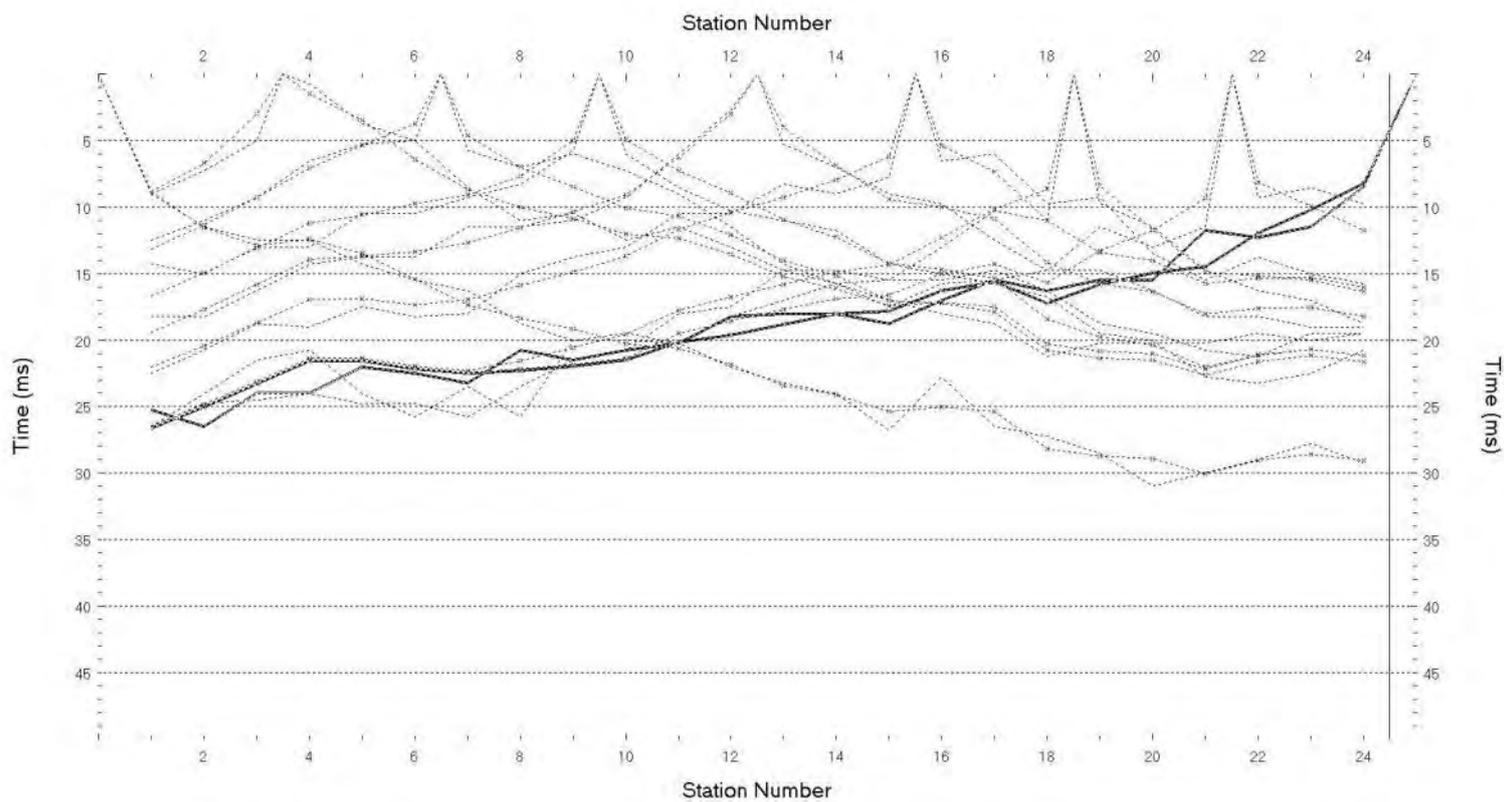
Sigla Stendimento	Profondità Piano di posa [m da p.c]	Profondità substrato [m]	$V_{Seq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1	0.00	8.1	699	<b>B</b>
	3.00	5.1	440	<b>B</b>
M2	0.00	9.4	677	<b>B</b>
	3.00	6.4	461	<b>B</b>

I dati derivati dalla MASW rapportati alle correlazione 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.

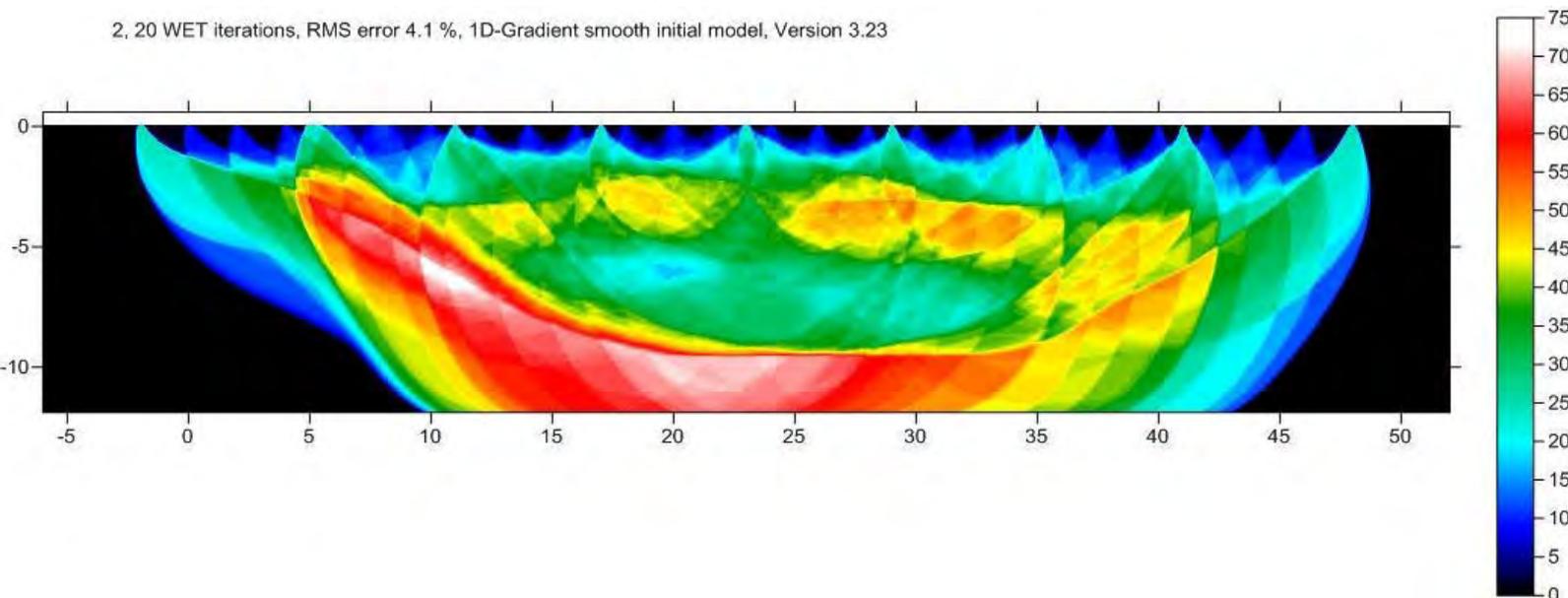
Cagliari 05.06.2020

Impresa Dott. Antonello Angius  
  
 Ditta Dr. Antonello Angius  
 Via Italia, 143 - 09134 Cagliari  
 C.F. NGSNNL61H07B354Y  
 P. Iva 01985230927

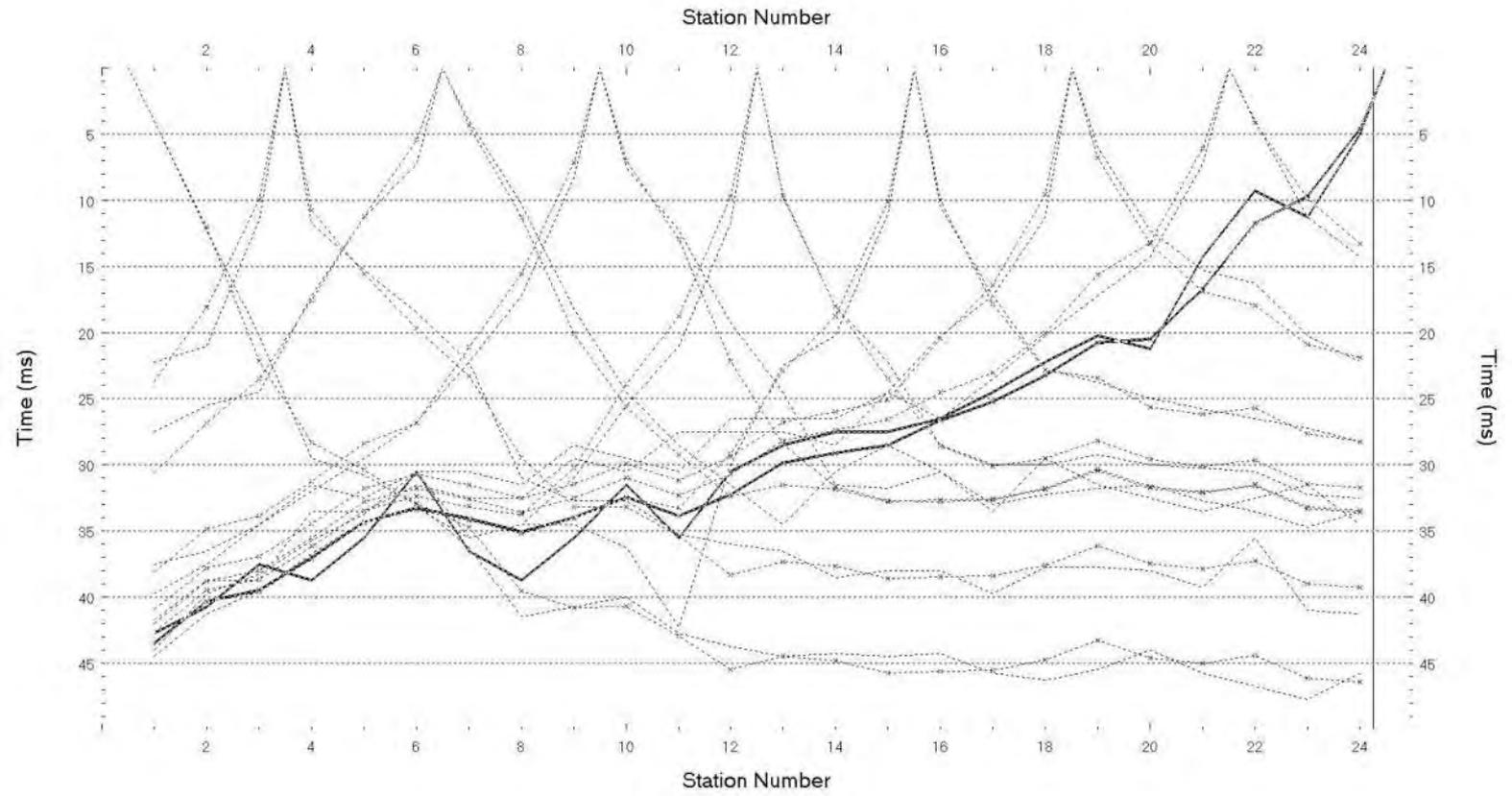
**ALLEGATO A – Rifrazione R1**  
Dromocrone Osservate/calcolate  
Copertura raggi sismici



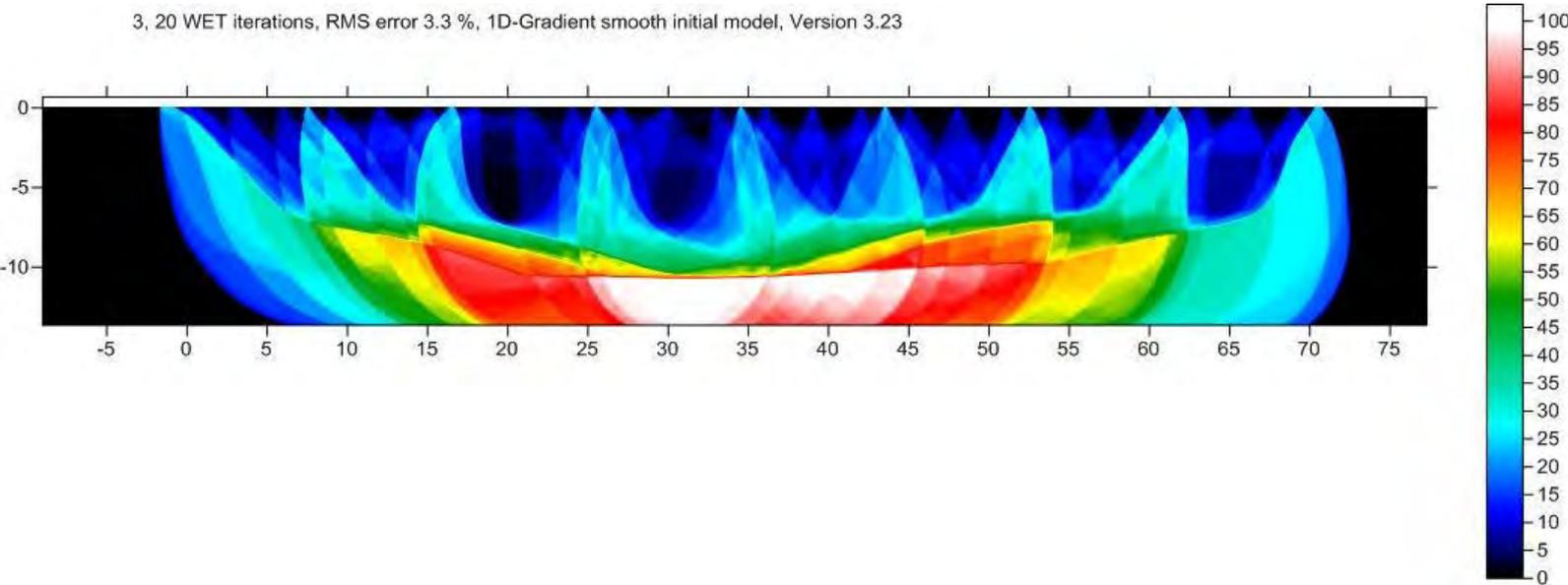
2, 20 WET iterations, RMS error 4.1 %, 1D-Gradient smooth initial model, Version 3.23



**ALLEGATO A – Rifrazione R2**  
Dromocrone Osservate/calcolate  
Copertura raggi sismici

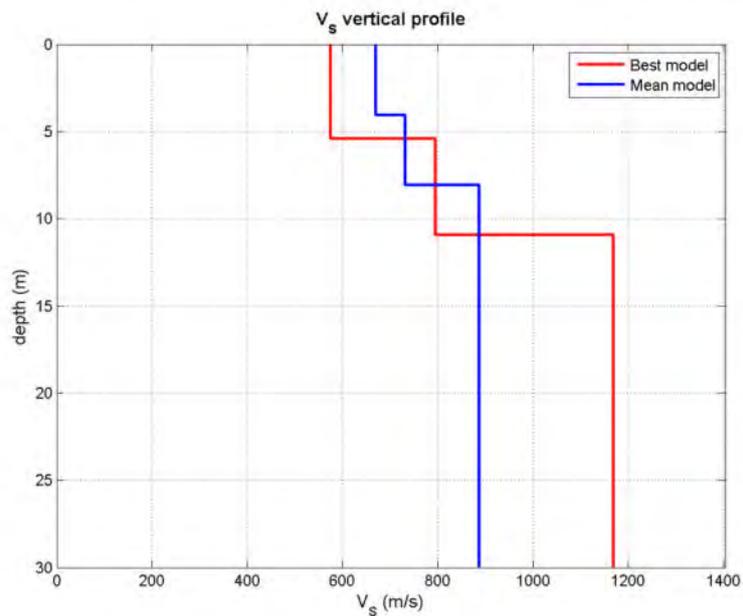
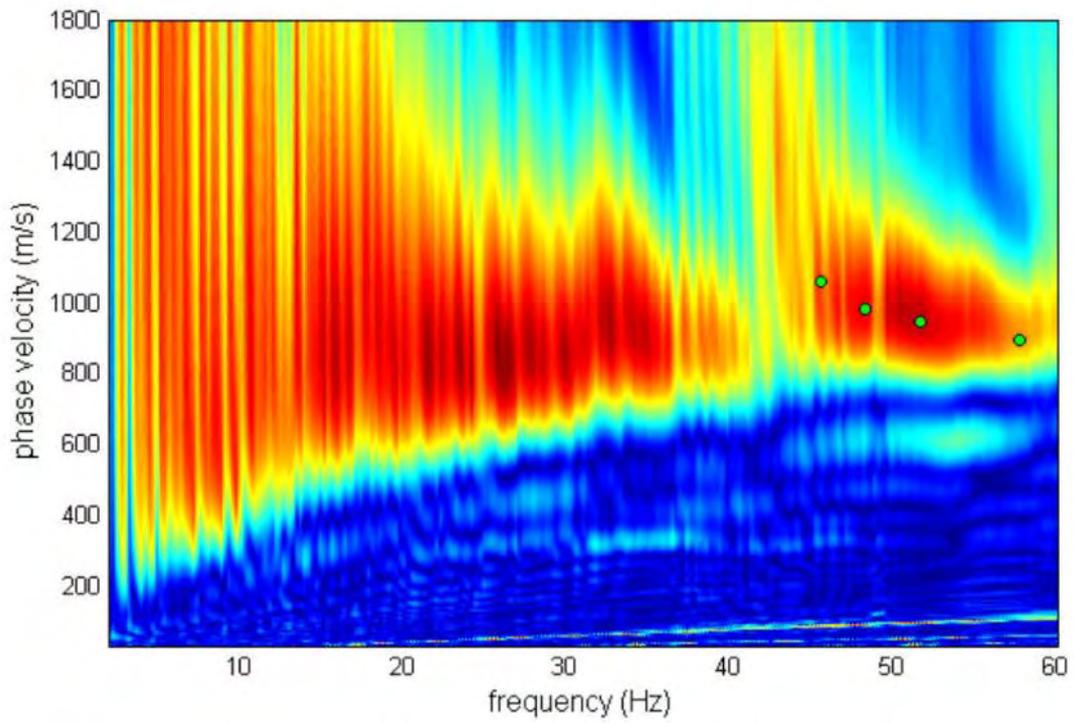
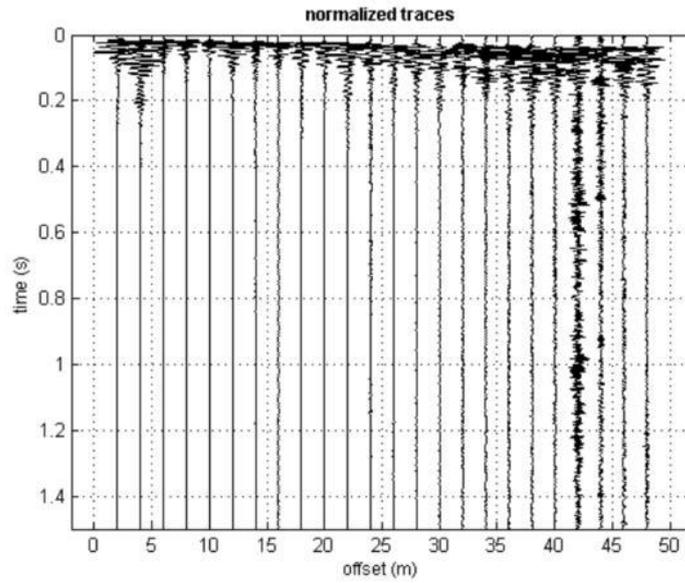


3, 20 WET iterations, RMS error 3.3 %, 1D-Gradient smooth initial model, Version 3.23



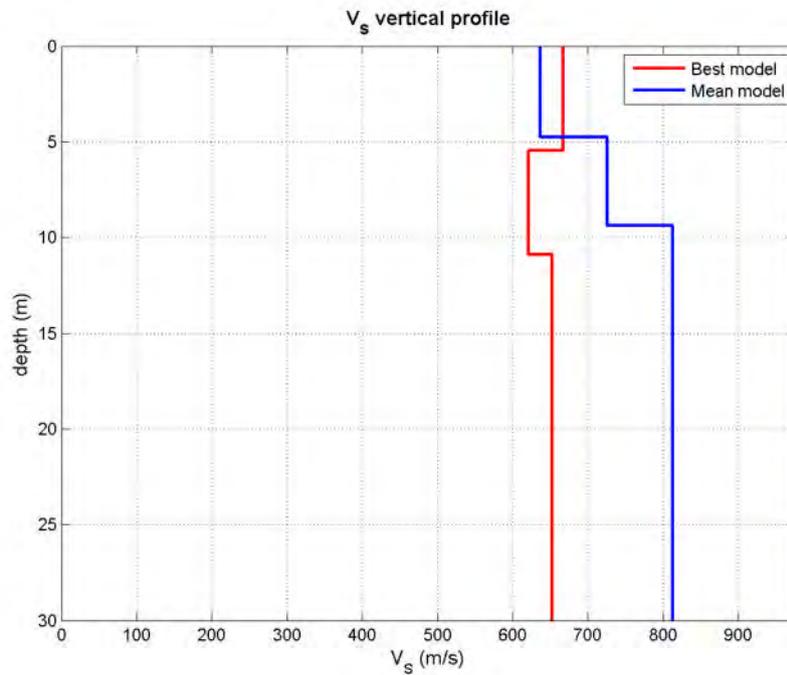
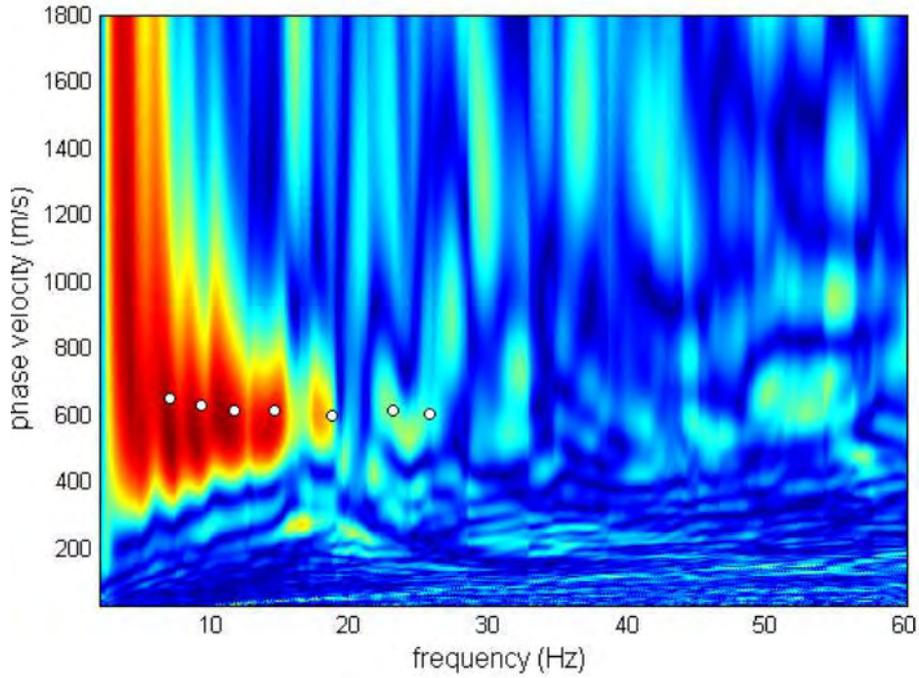
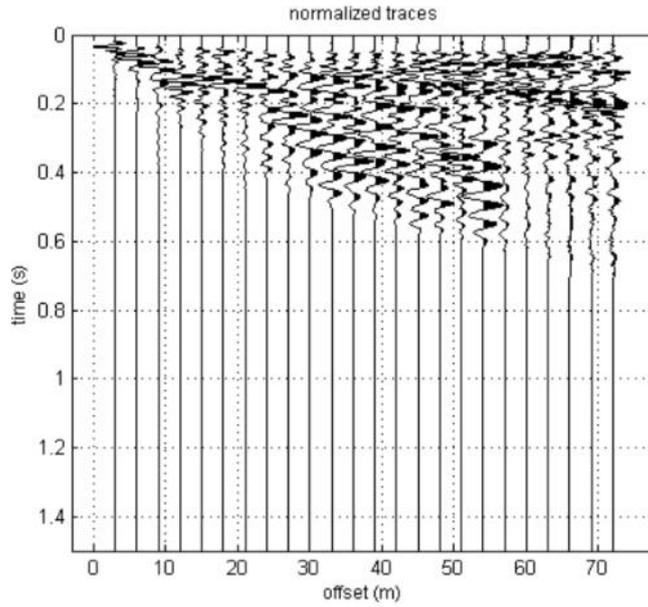
### ALLEGATO B – MASW 1

Sismogramma acquisito – spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo VS  
(Acquisizione con shot a 2 m)



### ALLEGATO B – MASW 2

Sismogramma acquisito – spettro velocità di fase/frequenza  
Curva di dispersione sperimentale e calcolata con profilo VS  
(Acquisizione con shot a 2 m)



**Foto 1: Unità acquisizione del dato**



**Foto 2: Vista stendimento da G24**



**Foto 3: Rilievo topografico**

**Foto 1: Unità acquisizione del dato**



**Foto 3: Rilievo topografico e quote**



**Foto 2: Vista stendimento da G1**



**Foto 2: Vista stendimento da G24**

