

ORUNE Wind Srl

# Parco Eolico ORUNE sito nei Comuni di Orune (NU)

Relazione sulla Pericolosità Sismica di Base

Maggio 2023

Regione Autonoma della  
Sardegna



Comune di Orune



Committente:

**ORUNE Wind Srl**

**ORUNE Wind Srl**

Via Sardegna, 40  
00187 Roma  
P.IVA/C.F. 15802491009

Titolo del Progetto:

**Parco Eolico ORUNE sito nei Comuni di Orune (NU)**

Documento:

**Relazione sulla Pericolosità Sismica di  
Base**

N° Documento:

**IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19**



**Studio Tecnico di Geologia  
Applicata all'Ingegneria e  
all'Ambiente**

Centro Direzionale "Pittarello"  
Loc. Scala Sa Perda, 87  
09028 Sestu (CA)  
T +39 070 734 6008  
Mob +39 345 788 2814  
e-mail: [info@gaiac consulting.eu](mailto:info@gaiac consulting.eu)

Progettista:

**Dott.ssa Geol. Cosima Atzori**

Rev	Data Revisione	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
00	04.05.2023	Prima emissione	Cosima Atzori		

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 3 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

## Sommario

<b>1. Premessa</b>	<b>6</b>
<b>2. Normativa di riferimento</b>	<b>6</b>
<b>3. Studio e indagini di riferimento</b>	<b>6</b>
<b>4. Inquadramento geografico generale</b>	<b>7</b>
<b>5. Inquadramento geologico</b>	<b>12</b>
5.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento	12
5.2. Successione litostratigrafica dell'area di intervento	13
5.2.1. Unità Intrusive del Paleozoico	13
5.2.2. Depositi Quaternari dell'area continentale	14
<b>6. Inquadramento geomorfologico</b>	<b>17</b>
6.1. Lineamenti geomorfologici dell'area di studio	17
6.2. Definizione dell'area geomorfologicamente significativa	19
<b>7. Inquadramento sismico</b>	<b>21</b>
7.1. Azione sismica	21
7.2. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento	22
7.3. Amplificazione stratigrafica e topografica	23
<b>8. Indagini geognostiche</b>	<b>24</b>
8.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione	24
8.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche	25
8.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata	25
8.1.3. Elaborazione dei dati	26
8.1.4. Specifiche delle indagini svolte	27
8.1.5. Caratteristiche della strumentazione impiegata	27
8.1.6. Interpretazione dei segnali acquisiti	28
8.1.7. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	28
8.2. Risultati delle indagini del sito <b>S/M_01 – AG03</b>	29
8.2.1. Masw M1	29
8.2.2. Rifrazione S1	30
8.3. Risultati delle indagini del sito <b>S/M_02 – AG06</b>	31
8.3.1. Masw M2	31
8.3.2. Rifrazione S2	32

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 4 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

8.4. Risultati delle indagini del sito <b>S/M_03 – AG15</b> .....	33
8.4.1. Masw M3 .....	33
8.4.2. Rifrazione S3 .....	34
8.5. Risultati delle indagini del sito <b>S/M_04 – AG10</b> .....	35
8.5.1. Masw M4 .....	35
8.5.2. Rifrazione S4 .....	36
8.6. Risultati delle indagini del sito <b>S/M_05 – AG12</b> .....	38
8.6.1. Masw M5 .....	38
8.6.2. Rifrazione S5 .....	39
<b>9. Categorie di sottosuolo e parametri di pericolosità sismica</b> .....	<b>42</b>
<b>10. Conclusioni</b> .....	<b>43</b>

#### Indice delle figure

Figura 1 Localizzazione del progetto .....	7
Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione Nord .....	8
Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione Sud .....	9
Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000 .....	10
Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio (pressi AG01) .....	11
Figura 6 Schema strutturale della Sardegna.....	12
Figura 7 - Depositi colluviali (b2) – (pressi AG15).....	15
Figura 8 Stralcio carta geologica (Fonte RAS) .....	16
Figura 9 Vista dell'altopiano a Nord dell'AG12 .....	18
Figura 10 Vista verso Nord dall'AG15 .....	18
Figura 11 Particolare della cataste di blocchi/tor verso Nord dall'AG09 .....	19
Figura 12 Vista della vallecola del Canale Broccone a Nord-Est della AG02 .....	19
Figura 13 Carta della pericolosità sismica del territorio nazionale. ....	21
Figura 14 Valori minimi della Vita nominale VN di progetto per i diversi tipi di costruzioni. ....	22
Figura 15 Valori di coefficiente d'uso CU .....	23
Figura 16 Categorie topografiche (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.II) .....	23
Figura 17 Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica ST (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.V) .....	23
Figura 18 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 .....	25
Figura 19 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M1.....	29
Figura 20 - Sezione sismica R1 .....	30
Figura 21 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M2.....	31
Figura 22 Sezione sismica R2 .....	32
Figura 23 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M3.....	33
Figura 24 Sezione sismica R3 .....	34
Figura 25 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M4.....	36
Figura 26 Sezione sismica R4 .....	37

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 5 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

Figura 27 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M5 .....38

Figura 28 Sezione sismica R4 .....39

Figura 29 Ubicazione della prospezione geofisica .....41

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 6 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

## 1. Premessa

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "ORUNE" dislocato nel territorio comunale dei comuni di **Orune** - Provincia di Nuoro (NU), al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta **la Relazione sulla Pericolosità Sismica di Base** in supporto al progetto.

Sono stati eseguiti di n°5 stendimenti di sismica con tecnica MASW e rifrazione in onde P. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni. Le attività di acquisizione si sono svolte nei giorni 29 e 30 marzo 2023.

## 2. Normativa di riferimento

La presente relazione è redatta in osservanza a quanto stabilito dalla vigente normativa in materia, con particolare riferimento a:

1. D.M LL.PP. 11.03.1988 "Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii attuali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione in applicazione della Legge 02.02.1974 n°64.
2. Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
3. Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
4. D.M. Infrastrutture 17.01.2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. (6.2.1 – Caratterizzazione e modellazione geologica del sito, 6.4.2 Fondazioni superficiali)
5. Circ. Min. Infrastrutture e Trasporti 21.01.2019 n°7 – Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 17.01.2018.
6. D.L. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni - "Norme in materia ambientale".

## 3. Studio e indagini di riferimento

Le informazioni topografiche e geologiche dell'area oggetto della presente relazione sono state ricavate dalle pubblicazioni ufficiali e cartografia tematica esistente. Si elencano di seguito:

1. Carta Topografica I.G.M. scala in 1:25000
2. Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000
3. Carta Geologica dell'Italia in scala 1:100000
4. Carta Geologica dell'Italia in scala 1:50.000 (CARG).
5. Cartografia Geologica di base della R.A.S. in scala 1:25.000
6. RAS - Carta dell'Uso del Suolo della Regione Sardegna, 2008
7. I.S.P.R.A. - Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (legge 464/84)
8. RAS – Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, annali idrologici 1922-2009
9. RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico
10. RAS – Autorità di Bacino - Piano di Tutela delle Acque
11. RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio delle Fasce Fluviali
12. Foto aeree, Regione Sardegna

I dati a disposizione sono stati integrati con le informazioni derivanti dai sopralluoghi effettuati dalla scrivente in sito e dagli esiti della campagna di indagini geognostiche eseguite rispettivamente in data 29 e 30 marzo 2023 nella zona di interesse.

## 4. Inquadramento geografico generale

Il paese di Orune dall'alto dei suoi 800 metri sul livello del mare raggiunti dal rione Cuccuru 'e Teti, appare come un balcone affacciato alla vallata del rio Isalle da dove si può intravedere un panorama che spazia dal Massiccio del Mont'Albo, al Mare della Baronia di Orosei, alla catena del Gennargentu nella Barbagia di Ollolai, fino ai Monti del Marghine. Inoltre dalla cima di Cucumache, 909 metri di altezza che etimologicamente significa punto di Guerra, per la sua vastità di vedute si può allargare la vista fino alle lontane Gallura, il Logudoro e alle più vicine regioni del Monte Acuto e del Goceano.

Nel suo vasto territorio (128 km quadrati, dei quali 64 di proprietà del comune e i restanti di proprietà di privati) vi sono splendidi boschi di quercia da sughero, leccio e roverella. Dal punto di vista altimetrico, il territorio comunale è compreso tra i 99 metri s.l.m. della valle di Isalle e i 914 metri s.l.m. di Cùccuru 'e su piràstru.

L'area fu abitata già in epoca prenuragica e nuragica, per la presenza sul territorio di alcune domus de janas, tombe dei giganti, nuraghi e pozzi sacri, siti ricchi di numerosi reperti archeologici.

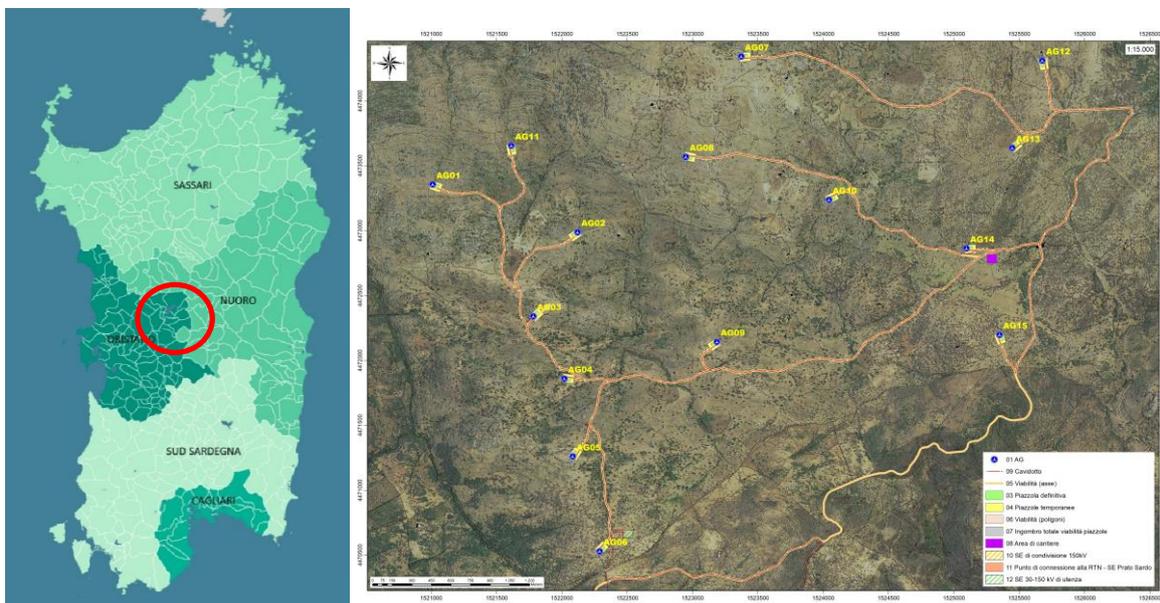


Figura 1 Localizzazione del progetto

In epoca medievale appartenne al Giudicato di Torres e fece parte della curatoria del Goceano e alla diocesi di Castro. Alla caduta del giudicato (1259) entrò a far parte del giudicato di Arborea sotto il quale dal 1339 fece parte della contea del Goceano, e all'estinzione del casato giudicale passò al Marchesato di Oristano. Alla definitiva sconfitta del marchesato (1478) tutta la contea del Goceano passò sotto il dominio aragonese, ove divenne un feudo regio. Fu riscattato agli ultimi feudatari nel 1839 con la soppressione del sistema feudale. Proprio per questo alcuni studiosi sostengono che Orune sia ultimo centro del Goceano. A vantaggio di questa ipotesi viene in aiuto la parlata orunese che ha molte affinità con il sardo Logudorese parlato in quelle zone con le desinenze che finiscono in di, da, de.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

1. Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **481 sez. II "Benetutti", 499 sez. I "Nuoro Ovest"**
2. Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: **481160 "Sa Pedra 'e sa Rucche", 499040 "Cantoniera Lardine" e 481150 Janna Sas Ferulas.**

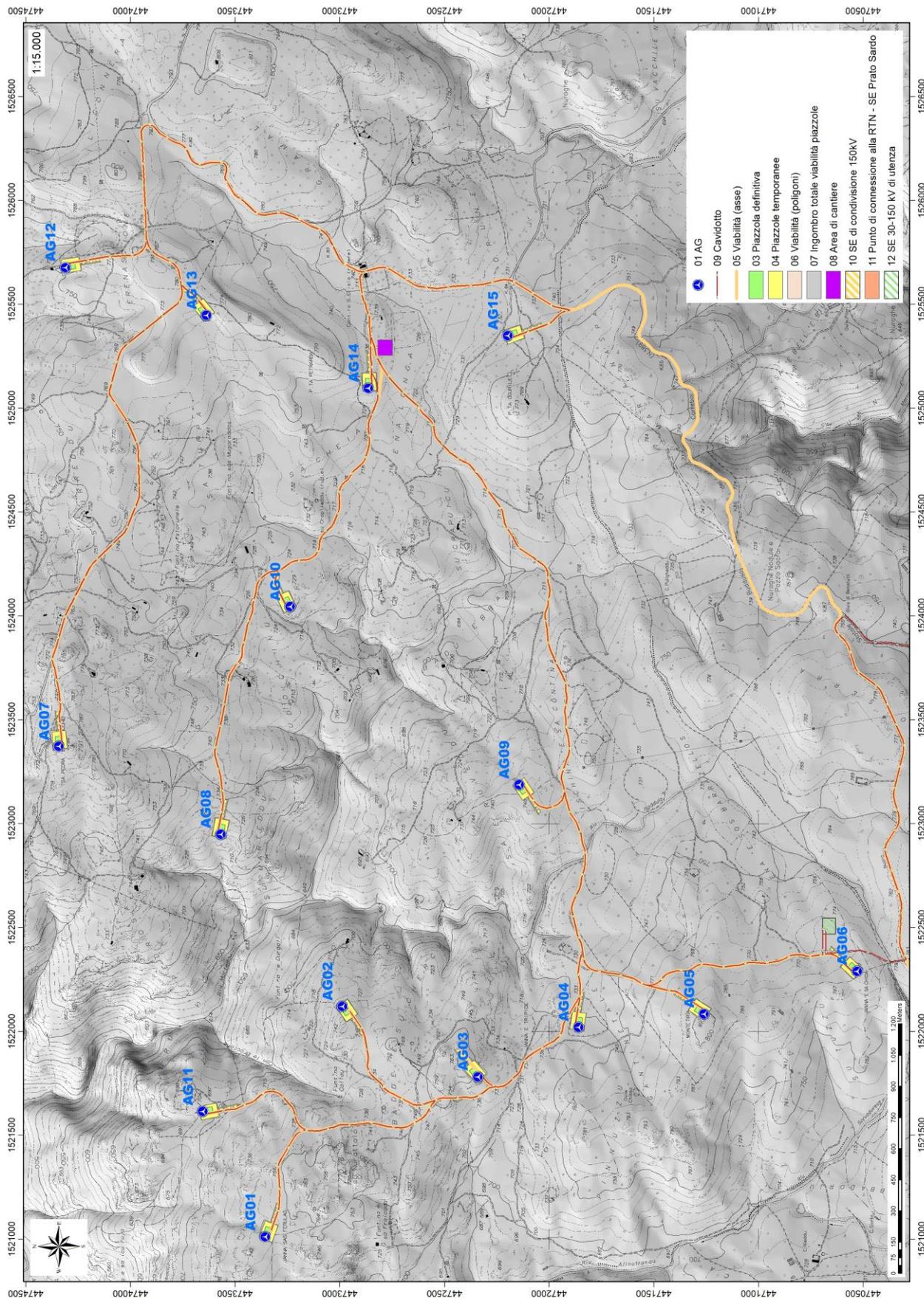


Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione Nord

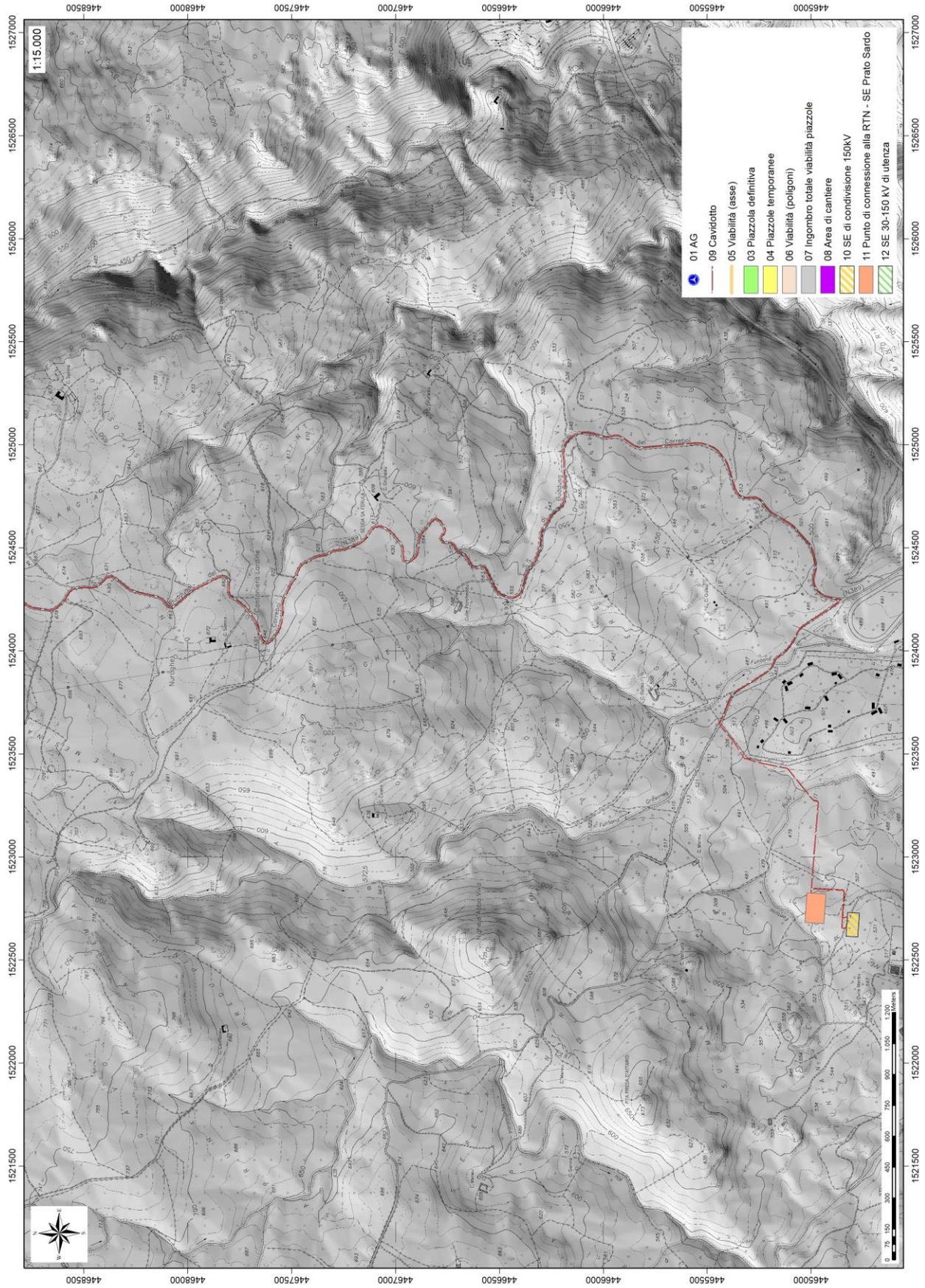


Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione Sud

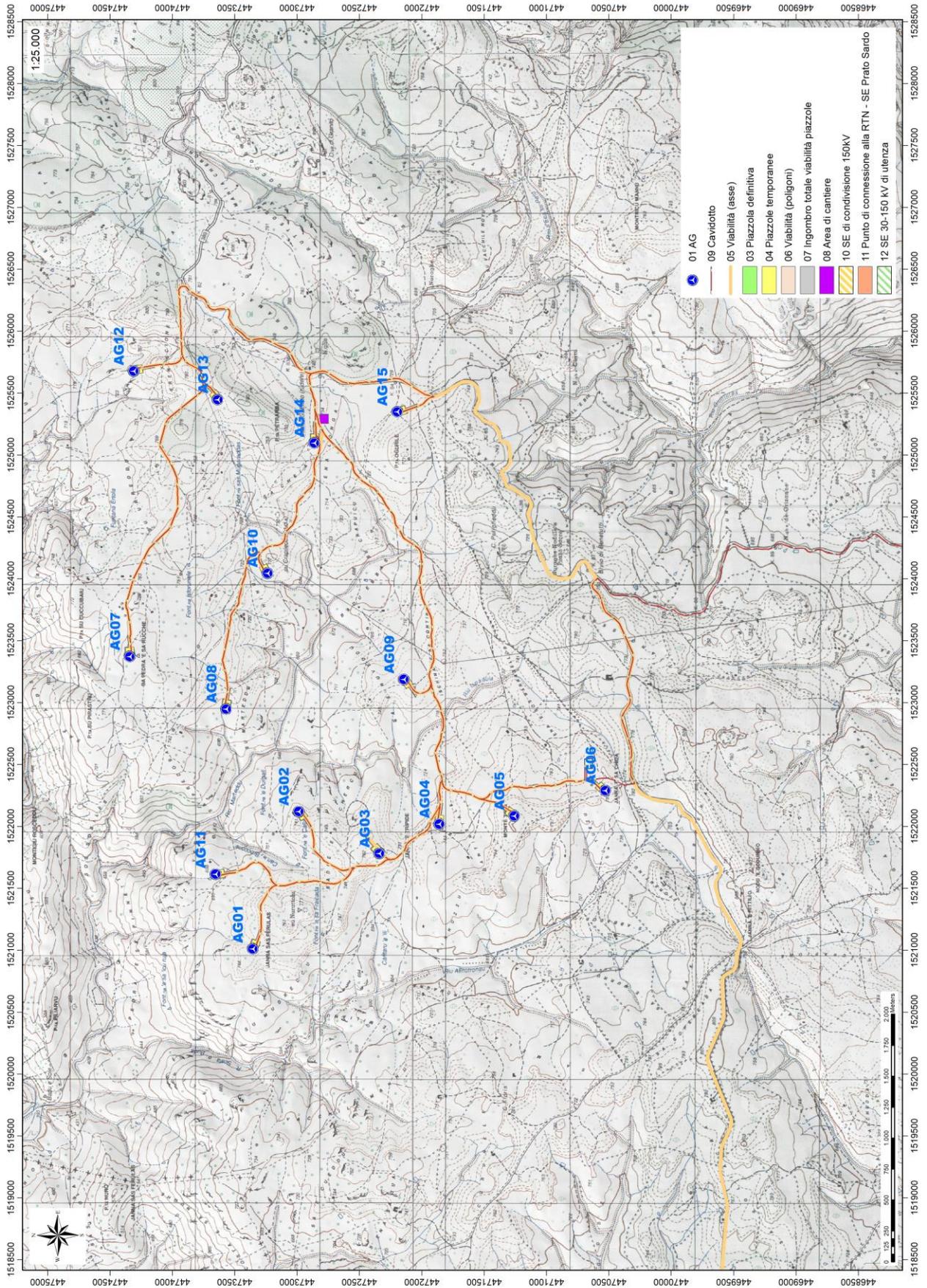


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000



**Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio (pressi AG01)**

## 5. Inquadramento geologico

L'obiettivo dell'analisi dell'assetto geologico è quella di caratterizzare geologicamente e geotecnicamente l'area ove verrà installato il parco eolico e quella geomorfologicamente significativa, con particolare riferimento alle condizioni del substrato roccioso di fondazione, agli scavi ed ai riporti necessari per la realizzazione del sistema di fondazione e delle sue potenziali interazioni con le condizioni al contorno (dinamica geomorfologica, circolazione idrica superficiale e sotterranea, rapporti fra le componenti litologiche interessate) attraverso:

1. Definizione dell'assetto geologico-strutturale e idrogeologico di area vasta e dell'area geomorfologicamente significativa;
2. Definizione dell'assetto stratigrafico dell'area di sedime delle opere;
3. Definizione del modello geologico di sito.

### 5.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento

A partire dal Paleozoico si sono susseguiti una serie di eventi geologici sviluppatasi nell'arco di circa mezzo miliardo di anni, che hanno reso la Sardegna una delle regioni geografiche più antiche del Mediterraneo centrale e, morfologicamente e cronologicamente eterogenea.

L'isola riflette pertanto una storia geologica molto articolata, che testimonia, in maniera più o meno completa, alcuni dei grandi eventi geodinamici degli ultimi 400 milioni di anni.

L'orogenesi Caledoniana, la più antica, le cui tracce si rinvencono principalmente nel nord della Gran Bretagna e nella Scandinavia occidentale, fu causata dalla progressiva chiusura dell'oceano Giapeto, a seguito della collisione dei continenti Laurentia, Baltica e Avalonia, dando così origine al super continente Laurussia.

La successiva fase dell'orogenesi Ercinica (o Varisica) ha avuto corso a partire dal Carbonifero, circa 350 Ma fa e si è protratta fino al Permiano determinando un'estesa catena montuosa ubicata tra il Nord America e l'Europa.

Quest'orogenesi ha prodotto in Sardegna tre zone metamorfiche principali. Procedendo dal nucleo orogenetico verso l'avanfossa si trovano le zone dette: Assiale (Sardegna NE) – a Falde interne (Sardegna centrale) - a Falde esterne (Sardegna SW).

Successivamente, tra il Carbonifero Sup. e il Permiano Inf., il basamento paleozoico è soggetto a magmatismo, intrusioni di differente composizione, che danno luogo a un batolite granitico composito, la cui ossatura fondamentale affiora in continuità nella Sardegna Settentrionale e nella Corsica Occidentale.

Nel resto dell'Isola affiorano plutoni isolati, anch'essi compositi, di minori dimensioni, quali quelli dell'Iglesiente e del Sarrabus.

L'area di studio ricade nella zona a Falde Interne del basamento varisico Sardo; principalmente è costituita da prodotti di magmatismo intrusivo quali granodioriti monzogranitiche, biotitiche, a grana medio-grossa, inequigranulari per Kfs biancastri di taglia 8-10 cm con tessitura orientata per flusso magmatico; in particolare le litologie interessate in maniera diretta dalle fondazioni degli aerogeneratori appartengono all'Unità intrusiva del Monte San Basilio (BLA) e all'Unità intrusiva di Benetutti (BTU).

La zona circostante l'area di studio vede, tra le litologie appartenenti al Paleozoico, unità tettoniche appartenenti al complesso metamorfico-sedimentario ercinico oltre che al complesso intrusivo post-ercinico.

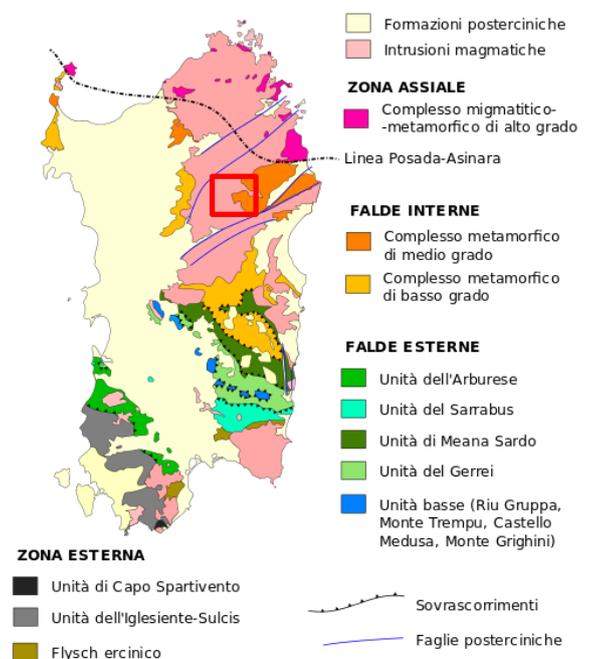


Figura 6 Schema strutturale della Sardegna

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 13 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

I termini metamorfici appartengono in scala più ampia al “Complesso metamorfico ercinico prevalentemente in facies anfibolitica”, costituito da una importante, monotona successione terrigena di quarziti, metarenarie e micascisti, rappresentate da più facies a vario grado evolutivo, prevalentemente scistose e polifasiche, riferibili all’Ordoviciano sup.-Siluriano.

Sia il Complesso metamorfico che quello intrusivo risultano diffusamente attraversati dal sistema filoniano tardoercinico a chimismo sia acido che basico, la cui messa in posto è ascrivibile alle fasi distensive post-orogenetiche: essi delimitano le quote in rilievo dell’area e le principali morfo-strutture del paesaggio in ragione della loro bassa suscettibilità all’erosione.

Le metamorfiti si manifestano intensamente strutturate, sia per via del loro carattere originariamente sedimentario, sia per le azioni di metamorfismo che hanno incrementato la fissilità, sia ancora per l’elevato grado di tettonizzazione.

Lungo le aste tributarie di primo e secondo ordine sono riconoscibili depositi torrentizi, ove presenti, di modesto spessore, costituiti da ciottoli per lo più spigolosi poco arrotondati, in matrice arenaceo-limosa spesso cementata. La successione stratigrafica delle formazioni che interessano l’area (dal Paleozoico al Quaternario) è stata oggetto di numerosi studi specialistici, a cui si fa esplicito riferimento anche nelle Note Illustrative alla carta Geologica d’Italia alla scala 1:100.000, foglio 194 “Ozieri” e nelle Note Illustrative del Foglio 500 in scala 1:50000 di Nuoro Est utilizzate come base di conoscenze per la stesura della presente relazione.

## 5.2. Successione litostratigrafica dell’area di intervento

Nell’area vasta affiorano le seguenti litologie, di seguito riportate con la nomenclatura adottata dalla RAS nella stesura della cartografia geologica in scala 1:25000:

### Unità intrusive del Paleozoico

**BTUb** - Facies Orune (UNITÀ INTRUSIVA DI BENETUTTI). CARBONIFERO SUP. – PERMIANO

**BLA2b** - Facies Riu sa Mela (Ponte S’archimissa) (Subunità intrusiva di Punta Biriai - UNITÀ INTRUSIVA DI MONTE SAN BASILIO). CARBONIFERO SUP. – PERMIANO

### Corteo Filoniano

**fb** - Filoni basaltici a serialità transizionale, di composizione basaltica olivinica e trachibasaltica, a struttura porfirica per fenocristalli di Pl, Ol, Cpx, tessitura intersertale-ofitica. CARBONIFERO SUP. - PERMIANO

**ap** - Filoni e ammassi aplitici. CARBONIFERO SUP. - PERMIANO

**mg** - Filoni e ammassi di micrograniti. CARBONIFERO SUP. - PERMIANO

### Depositi Quaternari dell’area continentale

**b2** Coltri eluvio-colluviali. OLOCENE

#### 5.2.1. Unità Intrusive del Paleozoico

##### Unità intrusiva di Benetutti (BTU)

Occupava un areale di circa 400kmq tra Benetutti, Orune, Buddusò e Pattada. È quasi sempre caratterizzata in prevalenza da granodioriti monzogranitiche spesso fortemente eterogranulari.

##### *Granodioriti monzogranitiche inequigranulari. Facies di Orùne (BTUb)*

È costituita da granodioriti monzogranitiche, localmente tonalitiche, biotitiche, grigie, a grana da media a grossa, fortemente inequigranulari per megacristalli di K-feldspato euedrale biancastro di taglia fino a 10cm, con inclusioni pecilitiche di biotite. La tessitura è orientata per flusso magmatico. La giacitura dei piani di flusso magmatico ha direzione media N120-140 mentre l’immersione ha una discreta variabilità. Dal punto di vista compositivo si

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 14 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

tratta di rocce metalluminose. Sono talvolta evidenti “effetti parete fredda” al contatto con il basamento metamorfico (filladi di Lula): la giacitura dei piani di fluidità magmatica si adatta, sebbene localmente, alla forma del “contenitore”. Sono altrettanto evidenti i rapporti con i graniti peralluminosi, che intrudono le granodiorite delle facies Orùne generando una struttura complessa e articolata, associata a diffusi fenomeni di ibridazione e assimilazione. Carbonifero-Permiano.

#### **Unità intrusiva di San Basilio**

L’unità intrusiva di San Basilio occupa, nella Sardegna centrale-orientale, una superficie molto estesa di quasi 250kmq. In tutto il suo areale di affioramento l’unità si caratterizza per la costante presenza di cordierite, spesso sostituita da pinite pseudomorfa, cui si associano andalusite, sillimanite fibrolitica e muscovite, presenti in proporzioni variabili ma sempre significative. Si tratta di rocce peralluminose.

#### *Leucomonzograniti porfirici a cordierite. Facies Ponte S’Archimissa o Riu Sa Mela (BLA2b)*

E’ costituita da monzograniti talora leucocrati, a cordierite, biotite, muscovite e rara andalusite, bianco-giallastri, a grana fine, equigranulari a tendenza porfirica per K-feldspato euedrale biancastro di taglia centimetrica e quarzo globulare. Gli inclusi microgranulari scuri sono piuttosto rari. Localmente si osservano anche litotipi più francamente granodioritici, marcati dall’aumento della percentuale di biotite e da una maggiore frequenza degli enclaves scuri.

In queste rocce risulta ben espressa alla scala mesoscopica una tessitura orientata per flusso magmatico, marcata dall’isorientazione del K-feldspato e degli inclusi femici; sono frequenti anche vistose anisotropie e mineralogiche, generate da intensi fenomeni di turbolenza in fase magmatica.

Questa facies costituisce in genere corpi allungati e disposti secondo l’andamento delle fluidità, talora posti direttamente al contatto con la granodiorite BTU, quasi a costituire facies di bordo tendenzialmente leucocrate, talora in apofisi iniettate entro la stessa granodiorite BTU.

Carbonifero superiore-Permiano

#### **Corteo Filoniano**

**fb** - Filoni basaltici a serialità transizionale, di composizione basaltica olivinica e trachibasaltica, a struttura porfirica per fenocristalli di Pl, Ol, Cpx, tessitura intersertale-ofitica. CARBONIFERO SUP. – PERMIANO

Filoni e ammassi aplitici. **(ap)**

Filoni e ammassi di micrograniti. **(mg)**

Sono costituiti da micrograniti biotitici, da grigio -biancastri a giallastri se alterati, a grana da fine a microgranulare, con tessitura da isotropa a porfirica per K-feldspato biancastro euedrale subcentimetrico e quarzo globulare, con rare biotite e muscovite, immersi in una massa di fondo granofirica. Solo localmente, in corrispondenza di salbande, la struttura è orientata. Sono rocce più tenaci e compatte rispetto alle rocce incassanti e costituiscono creste generalmente in forte rilievo. Hanno giacitura nettamente discordante con le rocce incassanti in quanto subverticali con direzione prevalente E-W e NNE-SSW.

#### 5.2.2. Depositi Quaternari dell’area continentale

I depositi quaternari cartografati nell’area di studio sono generalmente poco rilevanti; sono rappresentati principalmente da depositi di versante, coltri eluvio-colluviali e depositi alluvionali.



Figura 7 - Depositi colluviali (b2) – (pressi AG15)

### **(b2) Coltri eluvio-colluviali**

Si tratta di terreni clastici eluviali e colluviali, costituiti essenzialmente da sedimenti spesso monogenici, fini (sabbie e silt), incoerenti, talora grossolani, con lenti di ghiaie angolose, più o meno pedogenizzati ed arricchiti della frazione organica. L'attribuzione all'Olocene di questi depositi è dovuta all'elevata distribuzione della frazione organica ed alla diretta correlazione con la situazione morfologica del versante attuale. Questa suggerisce che si tratta di sedimenti derivati dall'erosione del suolo durante l'Olocene, mescolati a sedimenti mescolate a sedimenti derivate dalla degradazione meccanica del substrato. Lo spessore massimo raggiunge i 5m al centro delle vallecole dell'altopiano.

Olocene

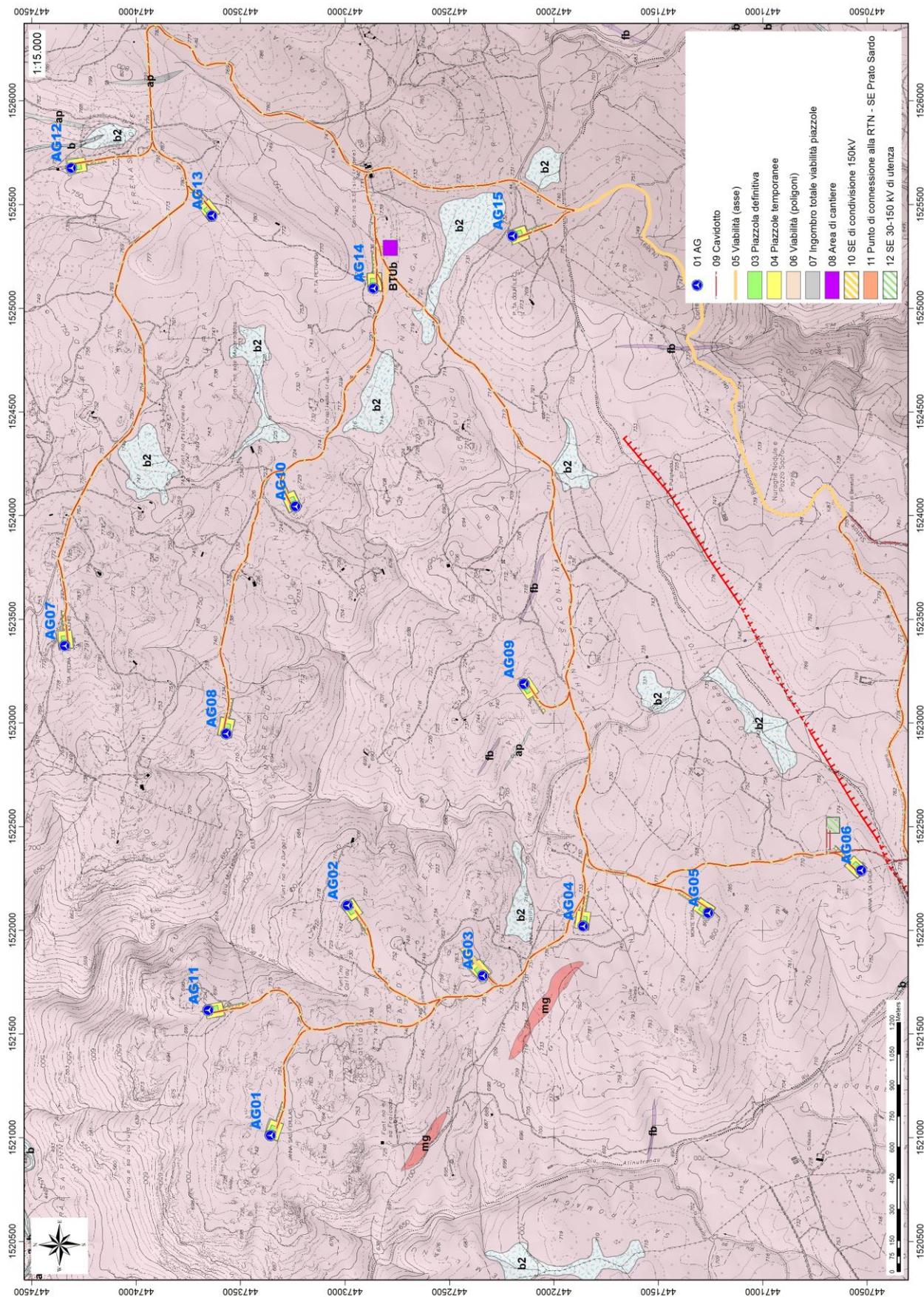


Figura 8 Stralcio carta geografica (Fonte RAS)

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 17 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

## 6. Inquadramento geomorfologico

Il territorio indagato è costituito sostanzialmente da una zona collinare, con rilievi arrotondati e dislivelli dell'ordine di 100 m circa tra monte e valle.

La forma prevalentemente pianeggiante dei versanti collinari dell'area di studio è il risultato della graduale demolizione del rilievo ercinico ad opera degli agenti erosivi, avvenuta alla fine dell'orogenesi ercinica, che ha portato alla formazione di una estesa superficie strutturale nota con il nome di "penepiano ercinico".

I successivi fenomeni di sollevamento tettonico, imputabili all'orogenesi alpina, hanno ridefinito la morfologia del paesaggio operando un ringiovanimento del rilievo. La superficie strutturale paleozoica si è quindi trovata ad una quota maggiore.

Questo ha innescato una nuova azione geomorfogenetica ad opera degli agenti atmosferici (acqua, vento in primis) che hanno rimodellato l'altopiano così come lo conosciamo, ovvero solcato da incisioni vallive che riprendono le linee di fratturazione tettoniche, che isolano il settore montano distinguendolo nettamente dalle aree pianeggianti circostanti.

I prodotti di erosione sia della prima fase che della seconda e attuale vengono trasportati dall'acqua e dal vento e si depositano in relazione alla loro dimensione e all'energia di trasporto delle acque lungo le pendici dei versanti e nelle valli andando a costituire le coperture sedimentarie.

Le morfologie osservabili in quest'area sono strettamente connesse alle caratteristiche di messa in posto delle litologie e dalle caratteristiche fisico-chimiche delle litologie presenti e dalla tipologia ed intensità degli agenti modellanti predominanti.

### 6.1. Lineamenti geomorfologici dell'area di studio

L'area di studio è costituita da colline con versanti pendenza media non superiore al 15%, la cui forma addolcita è il risultato della graduale demolizione del rilievo ercinico ad opera degli agenti erosivi, avvenuta alla fine dell'orogenesi ercinica, che ha portato alla formazione di una estesa superficie erosionale in rilievo, con il denudamento delle rocce paleozoiche che costituiscono il basamento affiorante.

Qui il processo dominante, considerato il substrato graniticoide (in prevalenza granodioriti monzogranitiche), è rappresentato dalla idrolisi dei silicati, che ha avuto modo di esplicarsi con particolare penetratività nella roccia graniticoide fratturata del basamento in ambito climatico tropicale e sub-tropicale. Pertanto l'elemento geomorfologico caratterizzante è la presenza di forme erosive relitte e esumate tipiche della roccia graniticoide, quali cataste di blocchi, perlopiù sferoidali, e tor.

I fenomeni di sollevamento tettonico recente hanno ridefinito la morfologia del paesaggio con la ridefinizione della superficie erosionale post-ercinica, oggi solcata da profonde incisioni vallive che riprendono le linee di fratturazione tettoniche, che isolano il settore montano distinguendolo nettamente dalle aree pianeggianti circostanti.

Il territorio indagato rientra nella fascia altimetrica collinare - montana, essendo compreso tra 850 e 600 metri sul livello del mare. L'affioramento prevalente dell'unità litologica del Complesso Intrusivo determina una monotonia del paesaggio, caratterizzato per lo più da forme arrotondate e poco acclivi.

L'uniformità del paesaggio collinare è localmente interrotta dall'affioramento dei filoni a chimismo acido che smembrano l'ammasso scistoso, spesso ricoperto da colture erbacee e da vegetazione arborea, tali filoni sono manifesti come roccia affiorante, intensamente fratturata e dalle forme aspre. Al di sopra del substrato metamorfico e granitico sono adagate le coperture detritiche di versante, soprattutto in corrispondenza dei versanti più acclivi, dove sovente sono soggetti a processi erosivi ad opera delle acque di ruscellamento superficiale, che si incanalano lungo gli impluvi naturali presenti marginalmente all'area indagata.



Figura 9 Vista dell'altopiano a Nord dell'AG12

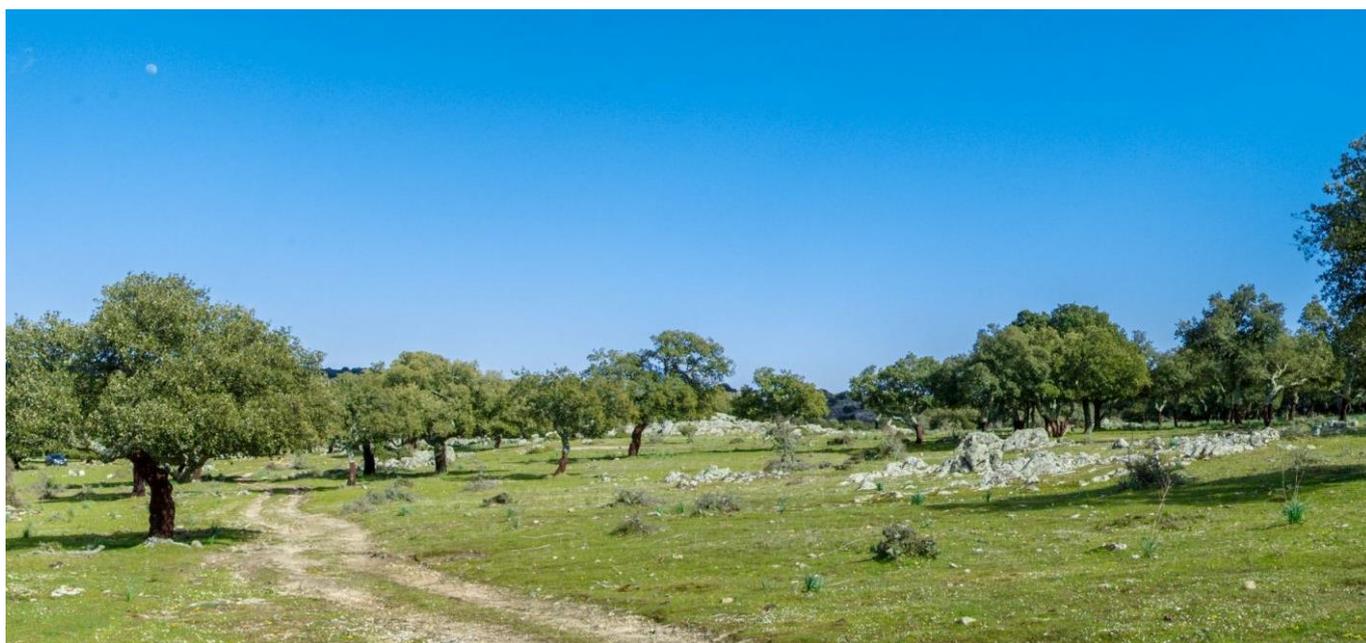


Figura 10 Vista verso Nord dall'AG15



Figura 11 Particolare della cataste di blocchi/tor verso Nord dall'AG09



Figura 12 Vista della vallecola del Canale Broccone a Nord-Est della AG02

## 6.2. Definizione dell'area geomorfologicamente significativa

La predisposizione naturale di un territorio a fenomeni di instabilità legata alle dinamiche geomorfologiche deriva in generale dall'interazione di diversi fattori come natura geologica dei terreni, loro assetto sia deposizionale che geostrutturale, circolazione delle acque superficiali e sotterranee con la morfologia, cioè la geometria del territorio. L'area oggetto di intervento, in base delle caratteristiche suddette **non presenta allo stato attuale evidenze di dissesto di natura geologico-geomorfologica in atto**, mentre, potenziali fenomeni di dissesto potrebbero presentarsi con la naturale evoluzione del pendio.

L'area geomorfologicamente significativa per le azioni di progetto è quell'area in cui si esplicano tutti i processi geomorfici, il cui effetto può generare interazioni con le dinamiche ambientali. Pertanto la stessa, nello specifico, si individua nei versanti e nei sub-bacini idrografici presenti che interferiscono con l'opera.

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 20 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

La geomorfologia di quest'area è prevalentemente interessata dall'azione geochimica e fisica che l'acqua esercitata sui graniti fratturati, la quale, assieme al clima locale caratterizzato dall'imponenza del maestrale e alle importanti escursioni termiche giornaliere, ha smussato e modellato il territorio; le valli a "V" (Riu Ispadula, Riu Alinutroneau), che in prossimità del parco non incidono il basamento per oltre 40m e dell'area a Sud del Parco (Riu Giunturas) supera i 250m, sono poi dovute all'azione delle acque superficiali che scorrono sul basamento cristallino fratturato impermeabile.

## 7. Inquadramento sismico

La sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Sulla base delle conoscenze relative alla frequenza e all'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, si attribuisce un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

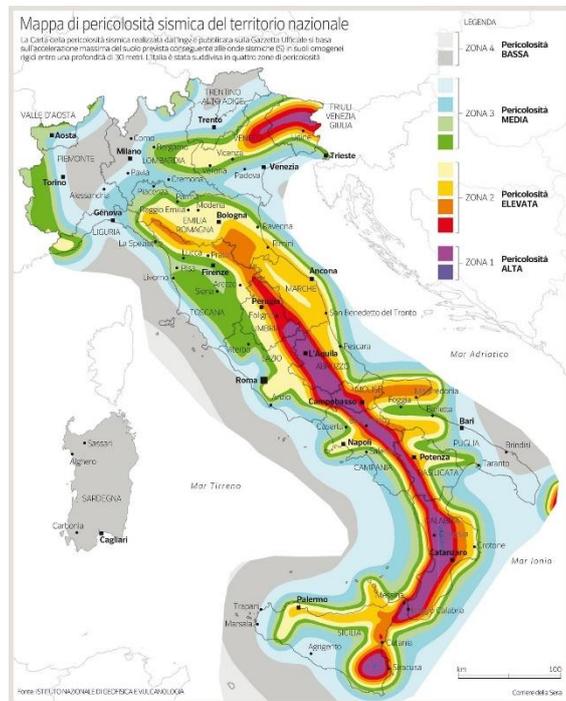


Figura 13 Carta della pericolosità sismica del territorio nazionale.

### 7.1. Azione sismica

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “**pericolosità sismica di base**” del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

Dalla normativa vigente NTC2018 si evince che la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2 della norma NTC2018), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente  $S_e(T)$ , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR come definite nel § 3.2.1 norma NTC2018, nel periodo di riferimento  $V_R$ , come definito nel § 2.4 norma NTC2018. inoltre, in alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purché correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento PVR nel periodo di riferimento  $V_R$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

**$a_g$**  accelerazione orizzontale massima al sito;

**$F_0$**  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

Le conseguenze di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze.

Infine, la maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire un danno economico, ai beni culturali, la perdita di vite umane, è definita esposizione.

Il rischio sismico, determinato dalla combinazione della pericolosità, dalla vulnerabilità e dall'esposizione, è la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti).

Per quanto concerne la sismicità, ai sensi della normativa di settore citata in precedenza, il territorio comunale di **Orune** ricade in **Zona 4 a bassa pericolosità**, vengono indicati i parametri sismici da utilizzare nelle verifiche secondo quanto previsto dalle NTC 2018.

$T_c^*$  valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.<sup>1</sup>

Per i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

## 7.2. Vita nominale, classi d'uso e periodo di riferimento

La tipologia di costruzioni previste in progetto (NTC2018 - par.2.4) ha **vita nominale  $\geq 50$  anni** e appartiene alla **classe d'uso II**.

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di $V_N$ (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

**Figura 14 Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per i diversi tipi di costruzioni.**

*Classe I:* Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

*Classe II:* Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

*Classe III:* Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

*Classe IV:* Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Le azioni sismiche su ciascuna costruzione vengono valutate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$  :

$$V_R = V_N \times C_U$$

Il valore del coefficiente d'uso  $C_U$  è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato in Tab. 2.4.II (Figura 22). Nel Caso specifico  $C_U = 1,0$ .

<sup>1</sup> Per i valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$  necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

<b>CLASSE D'USO</b>	I	II	III	IV
<b>COEFFICIENTE <math>C_T</math></b>	0,7	1,0	1,5	2,0

Figura 15 Valori di coefficiente d'uso CU

Il valore del periodo di riferimento è  $V_r = 50$

### 7.3. Amplificazione stratigrafica e topografica

Nel caso di pendii con inclinazione maggiore di  $15^\circ$  e altezza maggiore di 30 m, l'azione sismica di progetto deve essere opportunamente incrementata o attraverso un coefficiente di amplificazione topografica o in base ai risultati di una specifica analisi bidimensionale della risposta sismica locale, con la quale si valutano anche gli effetti di amplificazione stratigrafica

Per le aree di installazione delle turbine la **categoria topografica è la T1** a cui corrisponde un valore del fattore di amplificazione pari a 1.0.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Figura 16 Categorie topografiche (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.II)

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a $30^\circ$	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di $30^\circ$	1,4

Figura 17 Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica  $S_T$  (NTC 2018 3.2 - Tab. 3.2.V)

Al fine di definire l'azione sismica di progetto, basata sull'identificazione della categoria del sottosuolo di riferimento, si è voluto definire il parametro fondamentale per la "classificazione sismica dei terreni", e quindi per la determinazione della categoria, **corrispondente alla velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio VS30**, valutata entro i primi 30 m di profondità dal piano campagna ma nel caso specifico relativa alla quota di imposta delle fondazioni.

Per tale scopo, in accordo agli approcci semplificati proposti dal D.M. 17/01/2018 - Tab. 3.2.II (Figura 23) la determinazione del parametro delle onde di taglio VS30 è stato stimato mediante misura delle velocità sismiche attraverso l'esecuzione di una prospezione geofisica MASW di seguito descritta in dettaglio.

## 8. Indagini geognostiche

La necessità di integrare le informazioni di tipo geologico e geotecnico derivanti da studi pregressi, dalla letteratura di settore e dai rilievi geologici e geostrutturali in sito, ha reso necessario predisporre un piano di indagini geognostiche propedeutiche alla definizione del modello geologico di riferimento di sito funzionale alle opere previste in progetto così come richiamato dalle Norme Tecniche sulle Costruzioni (NTC2018 - §Cap. 6.2.1).

L'obiettivo delle indagini realizzate è stato:

1. Definire la stratigrafia ed i rapporti tra le formazioni geologiche interessate dagli interventi;
2. Definire le caratteristiche fisico-meccaniche degli ammassi rocciosi coinvolti nelle opere in progetto;
3. Individuare la presenza di circolazione d'acqua sotterranea alle profondità di interesse in relazione ai volumi significativi delle opere (fondazioni, piazzole, trincee e rilevati stradali, stabilità dei pendii)

La metodica utilizzata è quella indiretta in sito, ovvero l'indagine geofisica, questa costituisce parte integrante delle indagini geognostiche dirette e indirette legate alla caratterizzazione dei terreni di fondazione. In particolare 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".

Sono stati eseguiti di n°5 **stendimenti di sismica** con tecnica **MASW e rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni, i quali hanno il medesimo centro degli allineamenti sismici.

E' stato inoltre eseguito il Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica. Sono stati infine elaborati i dati ottenuti tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

Stendimento	Metodo di indagine	Orientamento	Geofoni/Picchetti	Interdistanza	Lunghezza (m)
R/M 1 (SMT01)	Rifrazione/MASW	SE-NO	24	3,0	69,0
R/M 2 (SMT02)	Rifrazione/MASW	SE-NO	24	3,0	69,0
R/M 3 (SMT03)	Rifrazione/MASW	SSE-NNO	24	3,0	69,0
R/M 4 (SMT04)	Rifrazione/MASW	NNE-SSO	24	3,0	69,0
R/M 5 (SMT05)	Rifrazione/MASW	S-N	24	3,0	69,0

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

### 8.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione studia la velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo quando il terreno è sottoposto a sollecitazioni artificiali. La determinazione delle velocità si ottiene misurando i tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in diversi punti sulla superficie topografica. Operativamente i profili sismici si eseguono disponendo sul terreno una serie di sensori (geofoni), posti ad un intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare.

Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive in corrispondenza di punti prestabiliti lungo i profili: Nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con campionamento ad intervallo costante e predeterminato, dei segnali ricevuti dai sensori. L'interpretazione dei segnali e la ricostruzione del profilo di velocità delle onde P consiste di almeno due fasi ben distinte, e cioè l'interpretazione dei sismogrammi e l'interpretazione dei diagrammi tempi-istanze (dromocrone).

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 25 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

Nella prima fase i tempi di primo arrivo dei segnali sismici vengono letti direttamente sui sismogrammi di campagna visualizzati a monitor. I tempi letti in corrispondenza di ciascun canale (geofono), vengono memorizzati in appositi files che costituiscono i dati in input del software utilizzato. Per ciascun tiro, quindi, si ricostruisce un diagramma dei tempi di arrivo in funzione della distanza dal punto di tiro stesso.

L'interpretazione delle dromocrone consiste, quindi, nel suddividere la funzione tempi/distanze in segmenti a pendenza differente, indicativi della presenza di variazioni di velocità nel sottosuolo. Questa operazione viene eseguita ad un terminale videografico dove è possibile eseguire modifiche ed aggiustamenti continui dell'interpretazione.

Il numero di segmenti per ciascuna funzione equivale al numero di strati che costituiranno il modello interpretativo finale; modello che consiste in una stratigrafia del terreno basata sulle variazioni di velocità delle onde compressionali.

Nella maggior parte dei casi, comunque, si riscontrano variazioni stratigrafiche che non corrispondono a variazioni di tipo litologico in senso stretto, ma alla naturale variazione di compattezza dello stesso materiale che, per alterazione superficiale o per semplice decompressione, si presenta più allentato in prossimità della superficie rispetto alle zone più profonde.

In questi casi per la modellizzazione del sottosuolo, risulta più adatta un'altra tecnica di elaborazione: la tecnica di elaborazione tomografica.

Con questa tecnica il sottosuolo viene suddiviso in elementi finiti di forma quadrata e di dimensioni estremamente piccole (dell'ordine di grandezza di decimetri) un software specifico, (nel nostro caso si è utilizzato il software RAYFRACT vers 4.01), che stima le velocità sismiche compatibili con ogni singolo elemento affinché i tempi di percorso dei vari fronti d'onda, generati nei punti di tiro disposti lungo il profilo, risultino il più possibile simili ai tempi misurati e letti sui sismogrammi. Il risultato che si ottiene è una griglia di valori di velocità dalla superficie fino alle massime profondità di indagine che caratterizzano i vari elementi in cui è stato suddiviso il sottosuolo.

Questa griglia di valori può essere, quindi utilizzata per rappresentare l'andamento nel sottosuolo delle varie litologie presenti mediante variazioni cromatiche associate alle variazioni di velocità o mediante linee di isovelocità.

### 8.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche

Per tutte le basi sismiche sono state eseguite 5 energizzazioni intervallate ogni 3 geofoni secondo lo schema di acquisizione definito dalla specifiche tecniche.

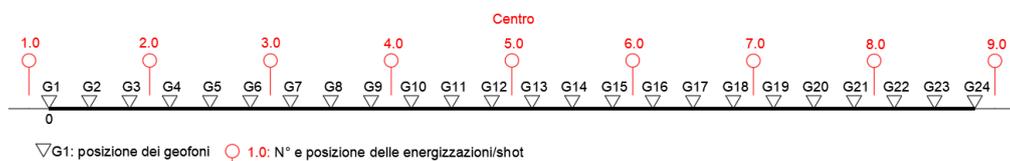


Figura 18 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0

### 8.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata

Per l'esecuzione delle indagini è stato impiegato un sismografo DoReMi, prodotto dalla SARA electronicinstruments, 24bit con frequenza di campionamento 1000 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali SARA electronics con frequenza propria di 4.5 Hz.

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

ORUNE Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesOru-CLP-CIV-TR-19	Rev 0	Pagina 26 di 43
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

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

### 8.1.3. Elaborazione dei dati

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi). La qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (Wavepath Eikonal Traveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono. Il modello stratigrafico ottenuto come insieme di elementi caratterizzati da una specifica velocità viene quindi rappresentato mediante il contour a linee di isovelocità. La colorazione dei vari elementi secondo una scala cromatica riferita a specifici intervalli di velocità facilita l'immediata visione dei risultati

## 15.2. Indagini sismiche: MASW

### **Metodologia**

La geofisica osserva il comportamento delle onde che si propagano all'interno dei materiali. Un segnale sismico, infatti, si modifica in funzione delle caratteristiche del mezzo che attraversa. Le onde possono essere generate in modo artificiale attraverso l'uso di masse battenti, di scoppi, etc.

### **Moto del segnale sismico**

Il segnale sismico può essere scomposto in più fasi ognuna delle quali identifica il movimento delle particelle investite dalle onde sismiche. Le fasi possono essere:

- P-Longitudinale: onda profonda di compressione;
- S-Trasversale: onda profonda di taglio;
- L-Love: onda di superficie, composta da onde P e S;
- R-Rayleigh: onda di superficie composta da un movimento ellittico e retrogrado.

### **Onde di Rayleigh – "R"**

In passato gli studi sulla diffusione delle onde sismiche si sono concentrati sulla propagazione delle onde profonde (P,S) considerando le onde di superficie come un disturbo del segnale sismico da analizzare. Recenti studi hanno consentito di creare dei modelli matematici avanzati per l'analisi delle onde di superficie in mezzi a differente rigidità.

### **Analisi del segnale con tecnica MASW**

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le

onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

### Modellizzazione

E' possibile simulare, a partire da un modello geotecnico sintetico caratterizzato da spessore, densità, coefficiente di Poisson, velocità delle onde S e velocità delle Onde P, la curva di dispersione teorica la quale lega velocità e lunghezza d'onda secondo la relazione:

$$v = \lambda \times \nu$$

Modificando i parametri del modello geotecnico sintetico, si può ottenere una sovrapposizione della curva di dispersione teorica con quella sperimentale: questa fase è detta di inversione e consente di determinare il profilo delle velocità in mezzi a differente rigidità.

### Modi di vibrazione

Sia nella curva di inversione teorica che in quella sperimentale è possibile individuare le diverse configurazioni di vibrazione del terreno. I modi per le onde di Rayleigh possono essere: deformazioni a contatto con l'aria, deformazioni quasi nulle a metà della lunghezza d'onda e deformazioni nulle a profondità elevate.

### Profondità di indagine

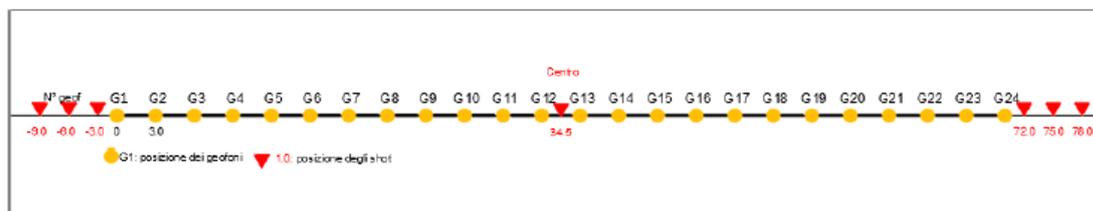
Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

#### 8.1.4. Specifiche delle indagini svolte

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

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.

**MASW: schema geometrico delle acquisizioni a 24 geofoni e interdistanza di 3,0 m**



#### 8.1.5. Caratteristiche della strumentazione impiegata

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

### 8.1.6. Interpretazione dei segnali acquisiti

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.

L'elaborazione dei dati che ha prodotto il profilo di velocità è stata realizzata grazie all'impiego del software ZondST2D.

### 8.1.7. 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. 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. Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite in Tab. 3.2.II. Per queste cinque categorie di sottosuolo, le azioni sismiche sono definibili come descritto al § 3.2.3 delle NTC 2018. Per qualsiasi condizione di sottosuolo non classificabile nelle categorie precedenti, è necessario predisporre specifiche analisi di risposta locale per la definizione delle azioni sismiche.

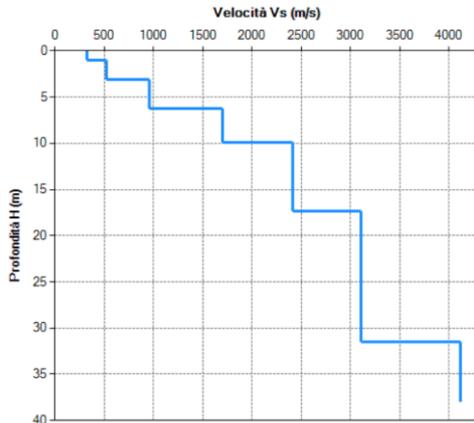
**Tabella 3.2.II.** Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</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	<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.
C	<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.
D	<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.
E	<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.

## 8.2. Risultati delle indagini del sito S/M\_01 – AG03

### 8.2.1. 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 S/M\_01 – AG03, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.



Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	hi/Vs (s)
1	1,0	1,0	330	1,0	1,0	0,003030
2	3,1	2,1	520	3,1	2,1	0,004038
3	6,2	3,1	960	6,2	3,1	
4	9,9	3,7	1700	9,9	3,7	
5	17,4	7,5	2410	17,4	7,5	
6	31,5	14,1	3110	30,0	12,6	
7	38,0	6,5	4190	0,0	0,0	

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.

Dall'esame del profilo delle Vs si evince una profondità del substrato (bedrock) pari a 3,0 m ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 3,0 m di profondità dal p.c. e piano di posa delle fondazioni è pari a:

Piano di posa [m da p.c.]	Vs eq [m/s]	Categoria sottosuolo NTC'18
Da 0,0	>800	A

Ciò consente di classificare il terreno **fondazioni poste a profondità > 3m** come **Categoria A**: *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.*

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

Sismostrato	Profondità		CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
	[m]	[m]		[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0	1,0	terre	1 800	660	330	0,33	520	63	196	520
2	1,0	3,1	8%	2 000	1 040	520	0,33	1 442	174	539	1 442
3	3,1	6,2	10%	2 100	1 920	960	0,33	5 158	622	1 932	5 158
4	6,2	9,9	12%	2 200	3 400	1700	0,33	16 956	2 035	6 355	16 956
5	9,9	17,4	15%	2 350	4 820	2410	0,33	36 403	5 460	13 651	36 403
6	17,4	31,5	25%	2 400	6 220	3110	0,33	61 901	15 475	23 213	61 901
7	31,5	38,0	35%	2 450	8 380	4190	0,33	114 700	40 145	43 013	114 700

Figura 19 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M1

## 8.2.2. Rifrazione S1

Nella sezione di sismica a rifrazione **S1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R1	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-1.000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 3,0/4,0	1.000-1.700
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,0,0 a 4,0/6,0	1.700-2.000
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 4,0/6,0	2.000-5.200

Dall'esame della sezione sismica è possibile distinguere 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5200 m/s.

Il sismostrato A, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta uno spessore di circa 1- 2 m un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce intensamente fratturate (rippabili) e andamento irregolare rispetto al p.c., si osserva fino a profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) si osserva fino a 4,0 ÷ 6,0. A seguire il sismostrato D (rocce non rippabili) sino alla massima profondità indagata.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con alcune variazioni del gradiente generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili.

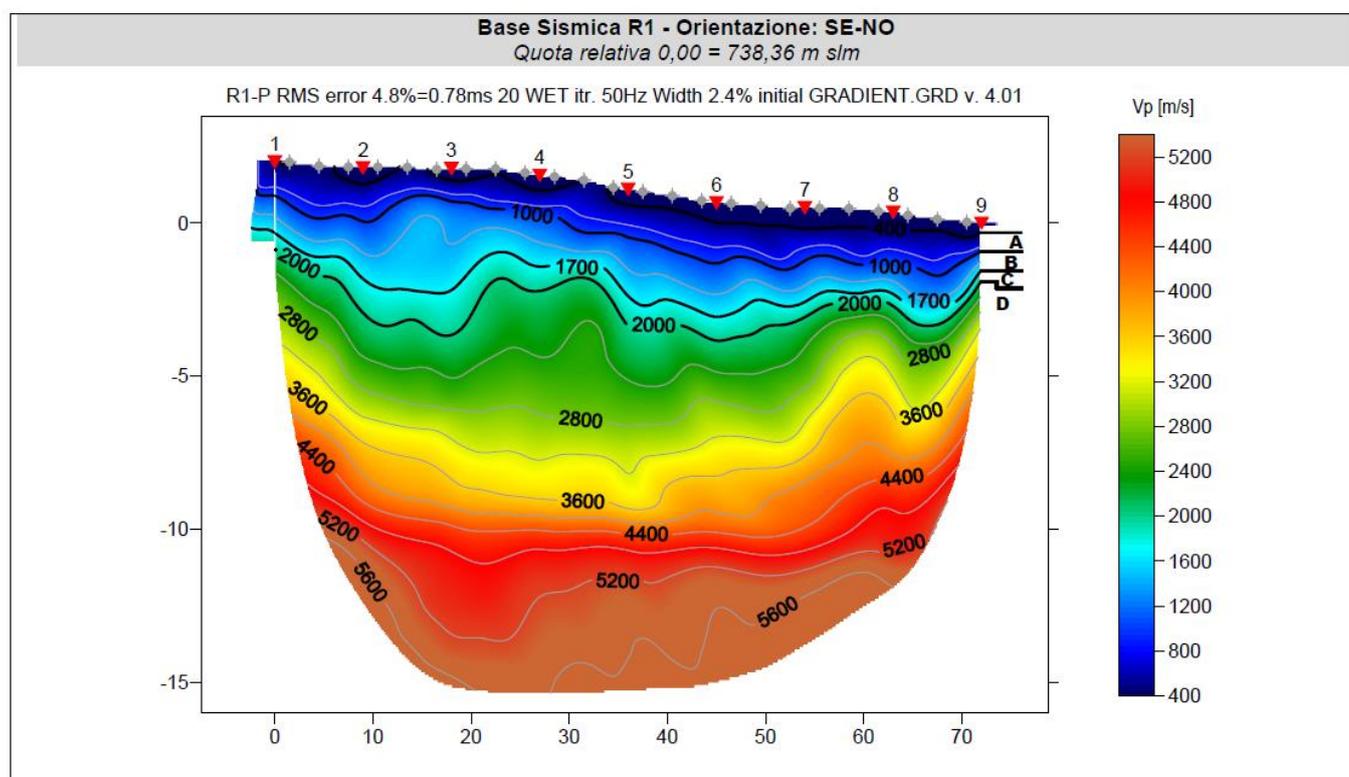
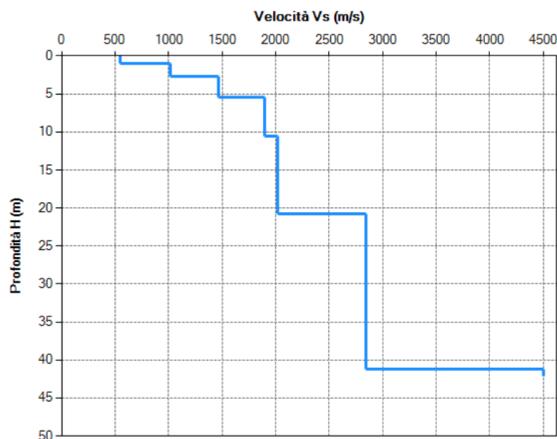


Figura 20 - Sezione sismica R1

8.3. Risultati delle indagini del sito **S/M\_02 – AG06**

8.3.1. 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 **S/M\_02 – AG06**, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.



Sismostratigrafia e calcolo Vs eq

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	Vs (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	hi/Vs (s)
1	1,0	1,0	550	1,0	1,0	
2	2,7	1,7	1020	2,7	1,7	
3	5,5	2,8	1470	5,5	2,8	
4	10,5	5,0	1900	10,5	5,0	
5	20,8	10,3	2020	20,8	10,3	
6	41,2	20,4	2840	30,0	9,2	
7	42,2	1,0	4500	0,0	0,0	

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.

Dall'esame del profilo delle Vs si evince una profondità del substrato (bedrock) pari a 2,7 m (Vs>800 m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 2,7 m di profondità dal p.c. e piano di posa delle fondazioni è pari a:

Piano di posa [m da p.c.]	Vs eq [m/s]	Categoria sottosuolo NTC'18
Da 0,0	>800	A

Ciò consente di classificare il terreno per **fondazioni poste a profondità > 2,7m** come **Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.**

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

Sismostrato	Profondità		CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
	[m]	[m]		[Kg/m³]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0	1,0	terre	1 800	1 100	550	0,33	1 451	175	549	1 451
2	1,0	2,7	8%	2 000	2 040	1020	0,33	5 551	669	2 079	5 551
3	2,7	5,5	10%	2 100	2 940	1470	0,33	12 102	1 458	4 541	12 102
4	5,5	10,5	12%	2 200	3 800	1900	0,33	21 183	2 542	7 944	21 183
5	10,5	20,8	15%	2 350	4 040	2020	0,33	25 566	3 835	9 591	25 566
6	20,8	41,2	25%	2 400	5 680	2840	0,33	51 623	12 906	19 359	51 623
7	41,2	42,2	35%	2 450	9 000	4500	0,33	132 304	46 306	49 613	132 304

Figura 21 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M2

### 8.3.2. Rifrazione S2

Nella sezione di sismica a rifrazione **S2** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,5/2,0	400-1.000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 3,0/4,0	1.000-1.700
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,0,0 a 4,0/5,0	1.700-2.000
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 4,0/5,0	2.000-5.200

Dall'esame della sezione sismica è possibile distinguere 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5200 m/s.

Il sismostrato A, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta uno spessore di circa 1- 2 m un andamento parallelo rispetto al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce intensamente fratturate (rippabili) si osserva fino a profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c. Il sismostrato C, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) si osserva fino a 4,0 ÷ 5,0. A seguire il sismostrato D (rocce non rippabili) sino alla massima profondità indagata.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con alcune variazioni del gradiente generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili.

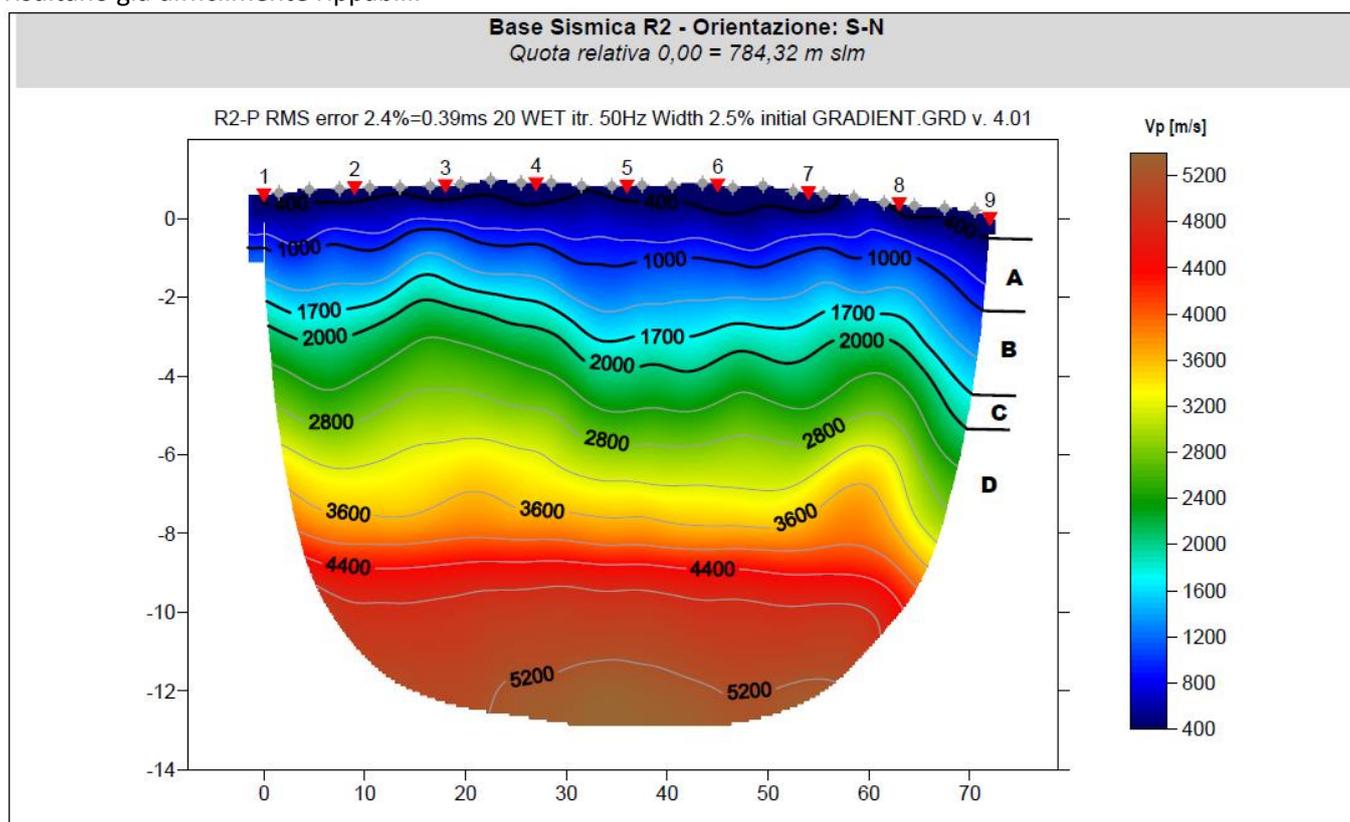
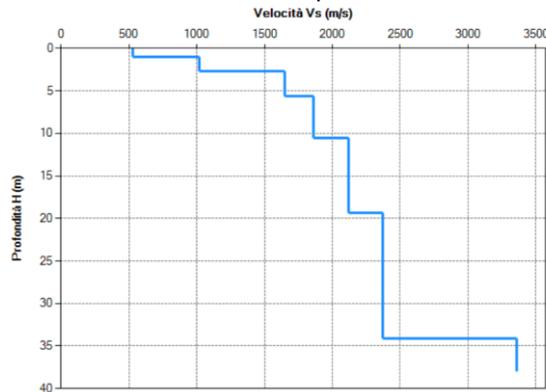


Figura 22 Sezione sismica R2

#### 8.4. Risultati delle indagini del sito **S/M\_03 – AG15**

##### 8.4.1. Masw M3

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  dello stendimento **S/M\_03 – AG15**, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio  $V_s$ .



Sismostratigrafia e calcolo  $V_{s,eq}$

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	$V_s$ (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	hi/ $V_s$ (s)
1	1,00	1,00	530,00	1,00	1,00	
2	2,70	1,70	1020,00	2,70	1,70	
3	5,60	2,90	1650,00	5,60	2,90	
4	10,50	4,90	1860,00	10,50	4,90	
5	19,30	8,80	2120,00	19,30	8,80	
6	34,10	14,80	2370,00	30,00	10,70	
7	38,00	3,90	3360,00	0,00	0,00	

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

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

con:  
 $h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato;  
 $V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;  
 $N$  numero di strati;  
 $H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Dall'esame del profilo delle  $V_s$  si evince una profondità del substrato (bedrock) pari a 2,7 m ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 2,7 m di profondità dal p.c. e piano di posa delle fondazioni è pari a:

Piano di posa [m da p.c.]	$V_s$ eq [m/s]	Categoria sottosuolo NTC'18
Da 0,0	>800	A

Ciò consente di classificare il terreno **fondazioni poste a profondità > 2,7m** come **Categoria A**: *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.*

Nella tabella seguente 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.

Sismostrato	Profondità		CT*	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
	[m]	[m]		[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0	1,0	terre	1 800	1 060	530	0,33	1 344	162	510	1 344
2	1,0	2,7	8%	2 000	2 040	1020	0,33	5 551	669	2 079	5 551
3	2,7	5,6	10%	2 100	3 300	1650	0,33	15 250	1 837	5 717	15 250
4	5,6	10,5	12%	2 200	3 720	1860	0,33	20 300	2 436	7 610	20 300
5	10,5	19,3	15%	2 350	4 240	2120	0,33	28 165	4 225	10 562	28 165
6	19,3	34,1	25%	2 400	4 740	2370	0,33	35 952	8 988	13 484	35 952
7	34,1	38,0	35%	2 450	6 720	3360	0,33	73 757	25 815	27 665	73 757

Figura 23 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M3

#### 8.4.2. Rifrazione S3

Nella sezione di sismica a rifrazione **S3** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R3	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0	400-1.000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0 a 2,0	1.000-1.700
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 2,0 a 3,0	1.700-2.000
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 3,0	2.000-5.200

Dall'esame della sezione sismica è possibile distinguere 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5200 m/s.

I 3 sismostrati A, B e C sono compresi entro i primi 3 metri di profondità e a seguire si rileva la presenza del bedrock non rippabile (sismostrato D) con velocità superiori a 2.000 m/s.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento repentino delle Vp sino a circa 4-5 metri di profondità, tipico della presenza del bedrock semi-affiorante.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,0-3,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili.

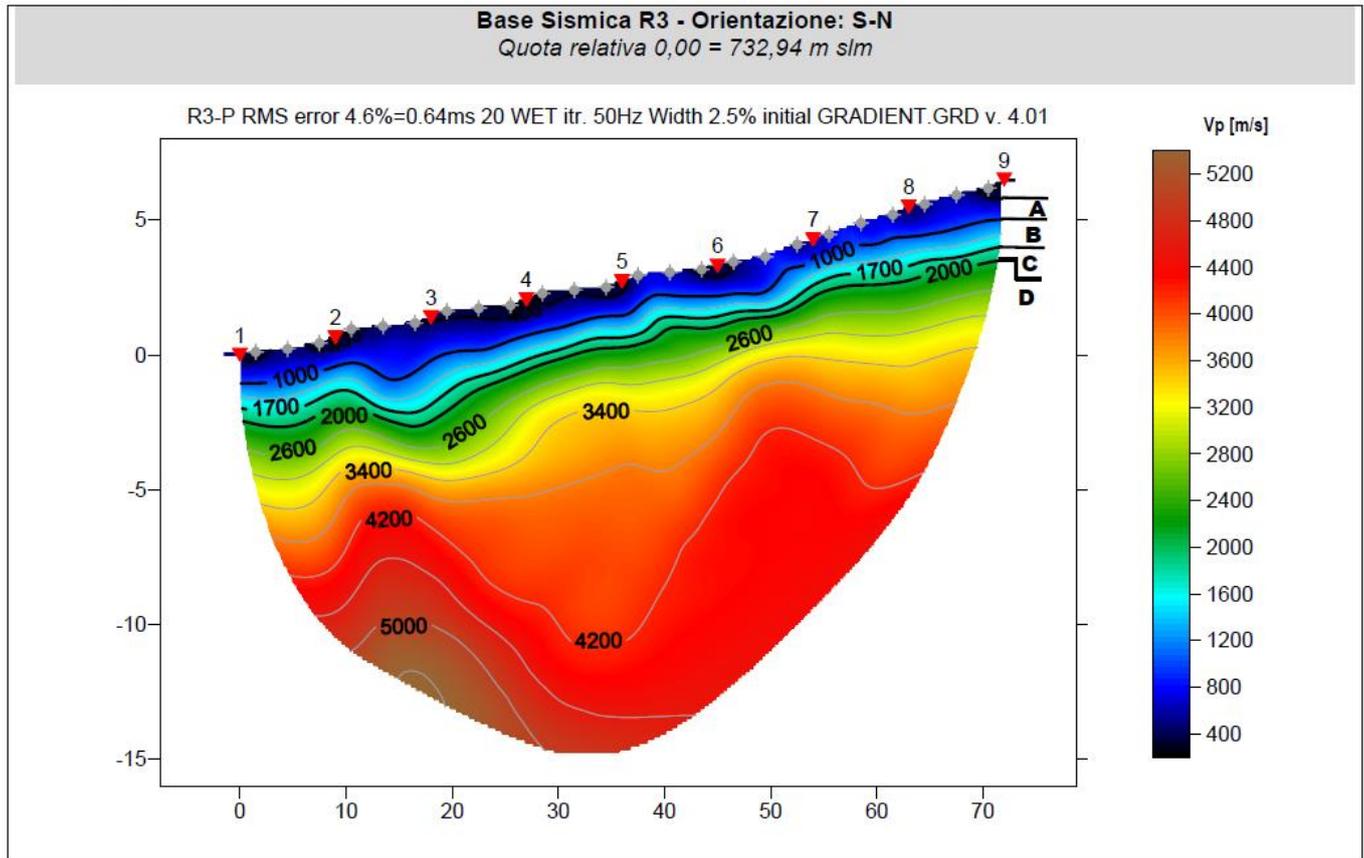
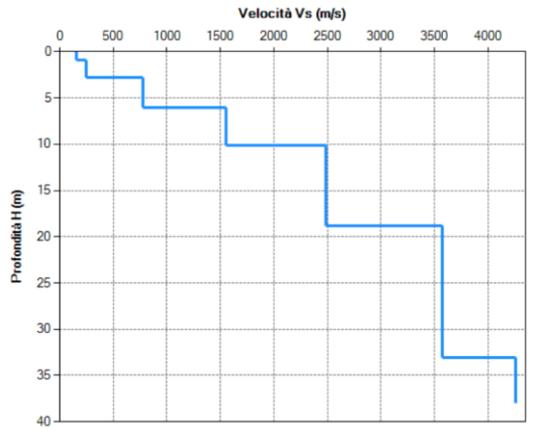


Figura 24 Sezione sismica R3

## 8.5. Risultati delle indagini del sito **S/M\_04 – AG10**

### 8.5.1. Masw M4

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  dello stendimento **S/M\_04 – AG10**, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio  $V_s$ .



Sismostratigrafia e calcolo  $V_{s,eq}$

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	$V_s$ (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	hi/ $V_s$ (s)
1	0,90	0,90	160	0,90	0,90	0,005625
2	2,80	1,90	250	2,80	1,90	0,007600
3	6,00	3,20	780	6,00	3,20	0,004103
4	10,10	4,10	1550	10,10	4,10	
5	18,80	8,70	2490	18,80	8,70	
6	33,10	14,30	3570	30,00	11,00	
7	38,00	4,90	4260	0,00	0,00	

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

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

con:  
 $h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato;  
 $V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;  
 $N$  numero di strati;  
 $H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Dall'esame del profilo delle  $V_s$  si evince una profondità del substrato (bedrock) pari a 6,00 m ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 6,00 m di profondità dal p.c. e piano di posa delle fondazioni è pari a:

Piano di posa [m da p.c.]	$V_{s,eq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo NTC'18
Da 0,0 ÷ <0,2	346 ÷ 359	E
0,2 ÷ <3,0	360 ÷ 798	B
≥ 3,0	>800	A

Ciò consente di classificare il terreno per **fondazioni poste tra 0,20m e 3,00m** di profondità 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*, mentre per **fondazioni poste a profondità >3,0 m** ricade come **Categoria A**: *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.*

Nella tabella seguente 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.

Sismostrato	Profondità		CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
	[m]			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0	0,9	terre	1 800	320	160	0,33	127	16	49	127
2	1,0	2,9	8%	2 000	500	250	0,33	333	40	127	333
3	2,9	6,1	10%	2 100	1 560	780	0,33	3 403	410	1 275	3 403
4	6,1	10,2	12%	2 200	3 100	1550	0,33	14 092	1 691	5 286	14 092
5	10,2	18,9	15%	2 350	4 980	2490	0,33	38 855	5 828	14 573	38 855
6	18,9	33,2	25%	2 400	7 140	3570	0,33	81 573	20 393	30 587	81 573
7	33,2	38,1	35%	2 450	8 520	4260	0,33	118 564	41 497	44 464	118 564

Figura 25 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M4

### 8.5.2. Rifrazione S4

Nella sezione di sismica a rifrazione **S4** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R4	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
<b>Sismostrati</b>		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/3,0	400-1.000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/3,0 a 3,5/7,0	1.000-1.700
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 3,5/7,0,0 a 4,5/9,0	1.700-2.000
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 8,0/9,0	2.000-5.200

Dall'esame della sezione sismica è possibile distinguere 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5200 m/s.

Il sismostrato A, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta uno spessore di variabile e crescente da sinistra verso destra della sezione tra 1,0 e 3,0 m circa. Il sismostrato B caratterizzato da rocce intensamente fratturate (rippabili) si osserva fino a profondità comprese tra 6,0 e 7,0 m dal p.c. Il sismostrato C, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) è presente sino a 8,0 ÷ 9,0. A seguire, il sismostrato D (rocce non rippabili) sino alla massima profondità indagata.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con alcune variazioni del gradiente generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 3,5 e 7,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili.

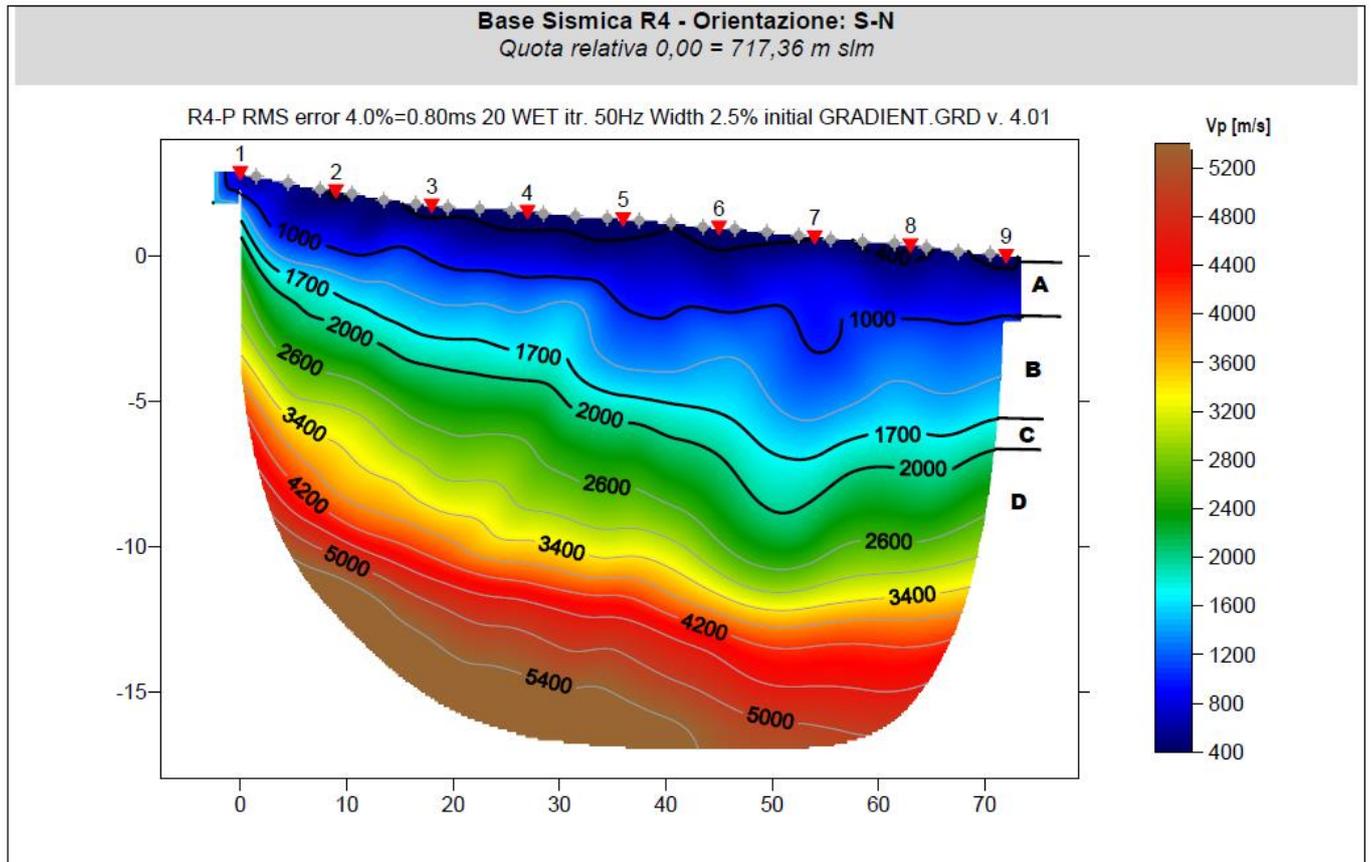
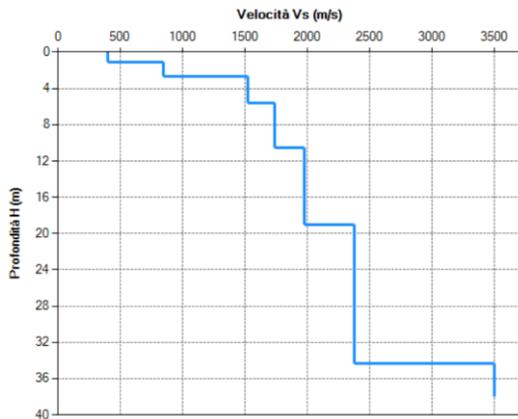


Figura 26 Sezione sismica R4

8.6. Risultati delle indagini del sito **S/M\_05 – AG12**

## 8.6.1. Masw M5

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  dello stendimento **S/M\_05 – AG12**, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio  $V_s$ .

Sismostratigrafia e calcolo  $V_{s,eq}$ 

Nr.	Profondità (m)	Spessori (m)	$V_s$ (m/s)	Hcalc (m)	hi calc (m)	hi/ $V_s$ (s)
1	1,10	1,10	400	1,10	1,10	
2	2,70	1,60	850	2,70	1,60	
3	5,60	2,90	1520	5,60	2,90	
4	10,50	4,90	1740	10,50	4,90	
5	19,00	8,50	1980	19,00	8,50	
6	34,30	15,30	2380	30,00	11,00	
7	38,00	3,70	3500	0,00	0,00	

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

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

con:  
 $h_i$  spessore dell' $i$ -esimo strato;  
 $V_{s,i}$  velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;  
 $N$  numero di strati;  
 $H$  profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

Dall'esame del profilo delle  $V_s$  si evince una profondità del substrato (bedrock) pari a 2,7 m ( $V_s > 800$  m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 2,7 m di profondità dal p.c. e piano di posa delle fondazioni è pari a:

Piano di posa [m da p.c.]	$V_{s,eq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo NTC'18
Da 0,0	>800	A

Ciò consente di classificare il terreno **fondazioni poste a profondità > 2,7m** come **Categoria A**: *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.*

Nella tabella seguente 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.

Sismostrato	Profondità		$CT^*$	Densità $\gamma$	$V_p$	$V_s$	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
	[m]			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0	1,1	terre	1 800	800	400	0,33	765	92	284	765
2	1,0	2,6	8%	2 000	1 700	850	0,33	3 854	464	1 442	3 854
3	2,6	5,5	10%	2 100	3 040	1520	0,33	12 935	1 558	4 854	12 935
4	5,5	10,4	12%	2 200	3 480	1740	0,33	17 760	2 131	6 659	17 760
5	10,4	18,9	15%	2 350	3 960	1980	0,33	24 566	3 685	9 209	24 566
6	18,9	34,2	25%	2 400	4 760	2380	0,33	36 256	9 064	13 592	36 256
7	34,2	38,0	35%	2 450	7 000	3500	0,33	80 033	28 012	30 009	80 033

Figura 27 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche – M5

## 8.6.2. Rifrazione S5

Nella sezione di sismica a rifrazione **S5** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R5	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0	400-1.000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0 a 2,0	1.000-1.700
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 2,0 a 3,0	1.700-2.000
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 3,0	2.000-5.200

Dall'esame della sezione sismica è possibile distinguere 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 5200 m/s.

I 3 sismostrati A, B e C sono compresi entro i primi 3 metri di profondità e a seguire si rileva la presenza del bedrock non rippabile (sismostrato D) con velocità superiori a 2.000 m/s.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento repentino delle Vp sino a circa 4-5 metri di profondità, tipico della presenza del bedrock semi-affiorante.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 2,0-3,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili.

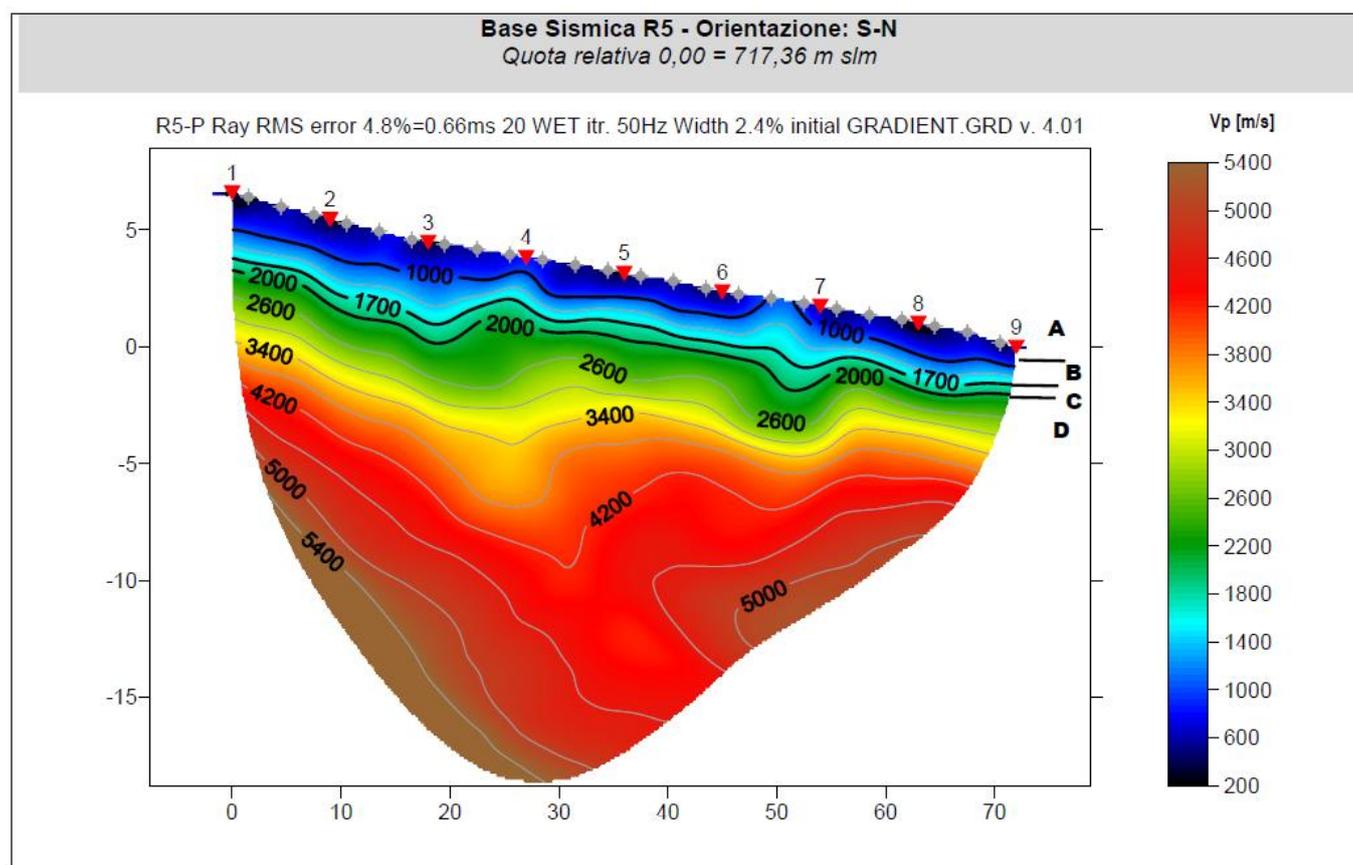


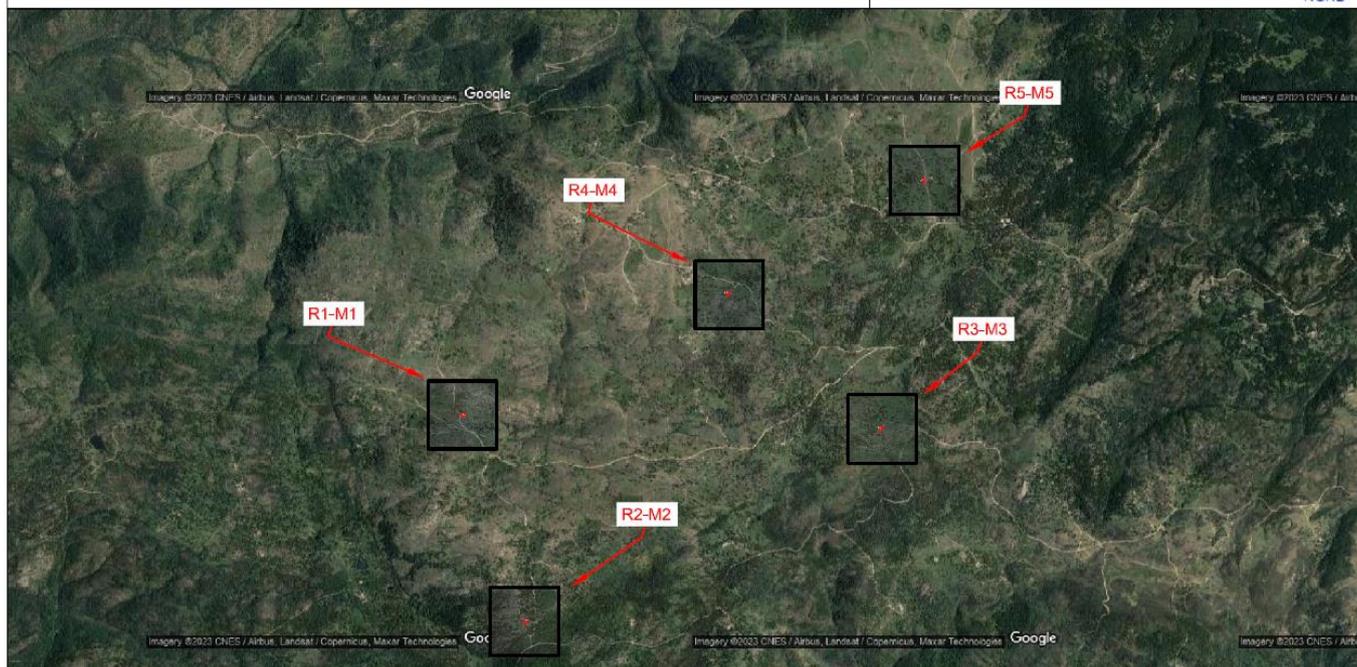
Figura 28 Sezione sismica R4

**TAVOLA 1. PLANIMETRIA GENERALE CON INDAGINI GEOFISICHE E GEOGNOSTICHE**

Progetto: Realizzazione di un parco eolico  
Località: Orune (Nu)  
Scala 1:40.000

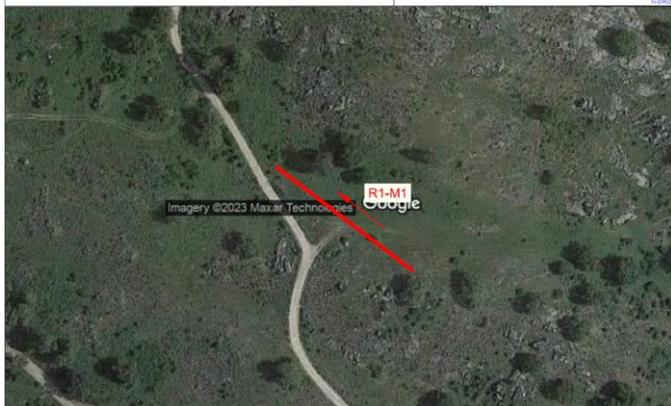
**Legenda**

 Indagini MASW-RIFRAZIONE



**TAVOLA 2. PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE R1-M1**  
Progetto: Realizzazione di un parco eolico  
Località: Orune (Nu)  
Scala 1:1.000

**Legenda**  
Stendimento MASW-RIFRAZIONE R1-M1 - Lunghezza G1-G24= 69,0 m  
 Direzione stendimento da G1 a G24



**TAVOLA 3. PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE R2-M2**  
Progetto: Realizzazione di un parco eolico  
Località: Orune (Nu)  
Scala 1:1.000

**Legenda**  
Stendimento MASW-RIFRAZIONE R2-M2 - Lunghezza G1-G24= 69,0 m  
 Direzione stendimento da G1 a G24



**TAVOLA 4. PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE R3-M3**  
Progetto: Realizzazione di un parco eolico  
Località: Orune (Nu)  
Scala 1:1.000

**Legenda**  
Stendimento MASW-RIFRAZIONE R3-M3 - Lunghezza G1-G24= 69,0 m  
 Direzione stendimento da G1 a G24



**TAVOLA 5. PLANIMETRIA UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE R4-M4**  
Progetto: Realizzazione di un parco eolico  
Località: Orune (Nu)  
Scala 1:1.000

**Legenda**  
Stendimento MASW-RIFRAZIONE R4-M4 - Lunghezza G1-G24= 69,0 m  
 Direzione stendimento da G1 a G24





Figura 29 Ubicazione della prospezione geofisica

## 9. Categorie di sottosuolo e parametri di pericolosità sismica

Attraverso le indagini con la tecnica MASW si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_s$  crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi. La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per i differenti siti di indagine, che si ricorda sarà anche funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	$V_{Seq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1	3,0	>800	A
M2	2,7	>800	A
M3	2,7	>800	A
M4	6,0	360 ÷ 798*	B
	6,0	>800**	A
M5	2,7	>800	A

\*con profondità piano di posa da 0,2 a 3,0 m p.c.; \*\* con piano di posa  $\geq 3,0$ .

Il substrato roccioso ( $V_s > 800$  m/s) si rileva profondità variabile tra 2.7m e 6,00m che dà luogo alle categoria A e B come specificato nello schema sottostante.

Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	Annessi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
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.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

In base ai dati di localizzazione, tipologia dell'opera e classe d'uso si quindi sono calcolati i parametri sismici relativi alle verifiche SLO, SLD, SLV e SLC:

Stato Limite	Tr [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$	$T_c^*$ [s]
Operatività (SLO)	30	0.019	2.610	0.273
Danno (SLD)	35	0.020	2.628	0.280
Salvaguardia vita (SLV)	332	0.045	2.855	0.332
Prevenzione collasso (SLC)	682	0.055	2.930	0.356
Periodo di riferimento per l'azione sismica:	35			

dove:  
 Stati limite di esercizio  
 Stato Limite di Operatività (SLO)  
 Stato Limite di Danno (SLD)

Stati limite ultimi  
 Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)  
 Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC)

$a_g$  accelerazione orizzontale massima al sito  
 $F_o$  valore massimo del fattore di ampl. dello spettro in accelerazione orizzontale  
 $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in acc. orizzontale

## 10. Conclusioni

Il territorio comunale di **Orune** ricade in **Zona 4 a bassa pericolosità**.

Le indagini condotte hanno permesso di definire le condizioni dei terreni secondo quanto richiesto dalle NTC 2018 in relazione alla pericolosità sismica di base.

**I terreni investigati appartengono alla categoria di sottosuolo A – Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi, con velocità equivalenti superiori agli 800m/s e B – Rocce tenere e/o depositi a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con velocità equivalenti comprese tra 360m/s e 798m/s.**