

AREGU Wind Srl

Parco Eolico AREGU sito nei Comuni di Giave, Cossoine e Cheremule (SS)

Relazione Geotecnica

Dicembre 2022

<p>Regione autonoma della Sardegna</p> 	<p>Comune di Giave</p> 	<p>Comune di Cossoine</p> 	<p>Comune di Cheremule</p> 		
<p>Committente:</p> <p>AREGU Wind Srl</p>		<p>AREGU Wind Srl Via Sardegna, 40 00187 Roma P.IVA/C.F. 16181141009</p>			
<p>Titolo del Progetto:</p> <p>Parco Eolico AREGU sito nei Comuni di Giave, Cossoine e Cheremule (SS)</p>					
<p>Documento:</p> <p>Relazione Geotecnica</p>		<p>N° Documento:</p> <p>IT-VesAre-CLP-CIV-TR-20</p>			
 <p>Studio Tecnico di Geologia Applicata all'Ingegneria e all'Ambiente</p> <p>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</p>		<p>Progettista:</p> <p>Dott. Geol. Cosima Atzori</p>			
Rev	Data Revisione	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
00	15.12.2022	Prima emissione	Cosima Atzori		

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 3 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

Sommario

1. Premessa	6
2. Normativa di riferimento	6
3. Studio e indagini di riferimento	6
4. Inquadramento geografico generale	7
5. Caratteristiche di progetto dell'opera	12
6. Inquadramento geologico	14
6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento	14
6.2. Successione litostratigrafica dell'area di intervento	15
6.2.1. Distretto vulcanico di Capo Marargiu (Miocene Inferiore)	15
6.3. Depositi Quaternari dell'area continentale	16
7. Analisi qualitativa di stabilità dell'ammasso roccioso	16
10.1. Caratteristiche delle acque sotterranee	18
10.2. Analisi della vulnerabilità degli acquiferi	24
8. Indagini geognostiche	24
8.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione	26
8.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche	27
8.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata	27
8.1.3. Elaborazione dei dati	28
8.1.4. Specifiche delle indagini svolte	29
8.1.5. Caratteristiche della strumentazione impiegata	29
8.1.6. Interpretazione dei segnali acquisiti	30
8.1.7. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	30
8.2. Tomografia elettrica	31
8.2.1. Tecnica e parametri utilizzati	31
8.2.2. Geometria delle acquisizioni	32
8.2.3. Strumentazione e attrezzatura utilizzata	32
8.2.4. Elaborazione dei dati e software	32
8.3. Risultati delle indagini del sito SMT01	33
8.3.1. Masw SMT01	33
8.3.2. Rifrazione SMT01 e Tomografia elettrica SMT01	34
8.4. Risultati delle indagini del sito SMT02	37

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 4 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

8.4.1.	Masw SMT02	37
8.4.2.	Rifrazione SMT02 e Tomografia elettrica SMT02	38
8.5.	Risultati delle indagini del sito SMT03.....	41
8.5.1.	Masw SMT03	41
8.5.2.	Rifrazione SMT03 e Tomografia elettrica SMT03	42
8.6.	Risultati delle indagini del sito SMT04.....	45
8.6.1.	Masw SMT04	45
15.6.2.	Rifrazione SMT04 e Tomografia elettrica SMT04	46
8.7.	Risultati delle indagini del sito SMT05.....	49
8.7.1.	Masw SMT05	49
8.7.2.	Rifrazione SMT05 e Tomografia elettrica SMT05	50
9.	Modellazione geologica	60
9.1.	Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi	60
9.2.	Viabilità di impianto e sottostazione	67
10.	Modello geologico di sito	69
10.1.	Modello Geologico 01 – AG08/AG10/AG11	69
10.2.	Modello Geologico 02 – AG03/AG04/AG05/AG09.....	70
10.3.	Modello Geologico 03 – AG01.....	71
10.4.	Modello Geologico 04 – AG02, AG06, AG07	72
11.	Descrizione dell’opera di fondazione degli aerogeneratori	74
12.	Azioni e resistenze nelle verifiche agli stati limite.....	75
13.	Verifiche di sicurezza (§c6.4.2)	76
	Verifiche di sicurezza agli SLU di tipo geotecnico (GEO) (§C6.4.2.1).....	76
	Verifiche di esercizio (SLE) (§C6.4.2.2)	77
14.	Condizioni di carico delle fondazioni degli aerogeneratori.....	77
15.	Modelli geotecnici di riferimento per le verifiche	77
1.	Modello Geotecnico 04	78
16.	FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6).....	81

Indice delle figure

Figura 1	Localizzazione del progetto	7
Figura 2	Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione W	9
Figura 3	Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione E.....	10
Figura 4	Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000	11

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 5 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio.....	12
Figura 6 Schema tettonico-strutturale della Sardegna.....	14
Figura 7 Particolare della litologia appartenente all'unità di Uri	15
Figura 8 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione.....	17
Figura 9 A sinistra esempio di ersione regressiva e formazione dei parete aggettante e a destra lo schema del ribaltamento di blocchi per scalzamento alla base	18
Figura 10 Pozzi presenti nell'area di interesse (dall'Archivio Nazionale delle Indagini del Sottosuolo)	19
Figura 11 - Monografie dei pozzi censiti nell Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo	22
Figura 12 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo.....	23
Figura 13 corrispondenze fra gli stendimenti.....	26
Figura 14 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 E 57,5m	27
Figura 15 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	34
Figura 16 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	38
Figura 17 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	42
Figura 18 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	46
Figura 19 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	50
Figura 20 - Ubicazione delle indagini geofisiche.....	54
Figura 21 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia	61
Figura 22 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso.....	61
Figura 23 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia.....	62
Figura 24 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.	63
Figura 25 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData la formazione di Mores	65
Figura 26 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData la formazione di Chelchedu-Tiloromo	66
Figura 27 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData la formazione di Uri	67
Figura 28 - Caratteristiche geometriche della fondazione	74

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 6 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

1. Premessa

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "AREGU" dislocato nel territorio comunale dei comuni di **Giave, Cossoine e Cheremule** - Provincia di Sassari (SS), al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta la presente **Relazione Geotecnica** la cui stesura ottempera quanto previsto dal D.M. del 17/01/2018 recante le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC), con l'obiettivo di evidenziare, le caratteristiche geologico-morfologiche e il comportamento fisico-meccanico dei terreni interessati dalle opere in progetto attraverso:

1. La caratterizzazione geotecnica preliminare del modello geologico di sito;
2. L'analisi dell'interazione opera-terreno nel volume significativo in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni di imposta, in relazione alla generica tipologia di fondazioni previste e le potenziali interazioni con le dinamiche di circolazione sotterranea eventualmente esistenti.
3. La valutazione preliminare della portanza dei terreni e l'indicazione delle indagini da realizzarsi in fase esecutiva necessarie alla determinazione dei parametri geotecnici specifici per ogni sito.

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 17, 21 e 24 novembre nella zona di interesse.

4. Inquadramento geografico generale

Giave è un comune italiano di 493 abitanti della provincia di Sassari, nell'antica regione del Meilogu, in Sardegna. Dista 44 km da Sassari e 59 km da Alghero. Il comune fa parte della Comunità montana del Logudoro e della Regione Agraria numero 6 - Colline del Meilogu.

Il territorio di Giave è contraddistinto da rilievi pronunciati, come la famosa "Pedra Mendalza", che si staglia isolata sulla pianura, suggestivamente denominata valle dei Nuraghi a nord-est e Campu Giavesu a sud-ovest. La Pedra Mendalza rappresenta un esempio spettacolare di un antico condotto vulcanico riemerso grazie all'azione dell'erosione, nel gergo dei geologi è chiamato neck, originatosi dalla precedente presenza di un vulcano ostruito e poi spentosi, una struttura osservabile anche in località Santa Giusta fra Semestene e Bonorva.

Nell'ambito della riscoperta della cultura pastorale esistono una serie di itinerari agevoli, segnati dalle pinnette, le tradizionali abitazioni a cono, coperte, costruite a secco da piccole lastre di pietra e usate dai pastori. Accanto a queste testimonianze, si segnalano delle domus de janas ("case delle fate") riconducibili al Neolitico Recente, tra le quali quella di Riu Mulinu ed i monumenti dell'età nuragica del bronzo, come il noto nuraghe Oes.

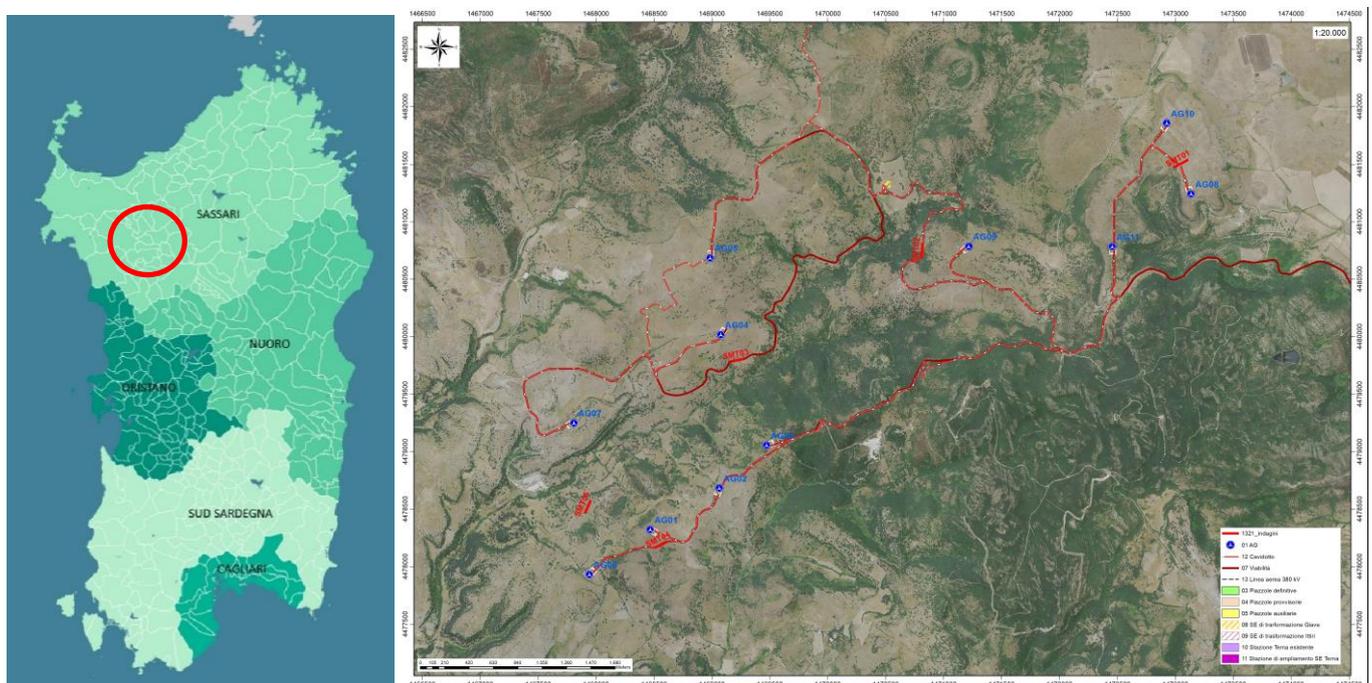


Figura 1 Localizzazione del progetto

Grazie alla fertilità dei suoli la zona di Giave fu intensamente abitata sin dalla preistoria, trovandosi nei pressi della Valle dei Nuraghi, una delle regioni d'Europa più ricche di testimonianze della civiltà megalitica. Tuttavia le prime fonti storiche riguardo al sito attuale del villaggio risalgono al periodo punico: il nome Giave è infatti una storpiatura del toponimo "Hafa", un fragile insediamento (più a valle del sito attuale) nella tarda età cartaginese, quando gli

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 8 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	-------------------

invasori meridionali riuscirono a valicare la costera e raggiungere Turrus Lybissonis (l'odierna Porto Torres) sulla costa settentrionale.

Ma furono i Romani il primo popolo forestiero a colonizzare realmente la zona, creandovi la biforcazione della strada che congiungeva Caralis (Cagliari) a Turrus da una parte e ad Olbia dall'altra, e insediandovi varie legioni in difesa degli attacchi dalle tribù nuragiche non romanizzate, che si erano rifugiate nelle impervie montagne a sud-est.

Durante il medioevo appartenne al giudicato di Torres e fece parte della curatoria di Capuabbas. In quell'epoca la popolazione viveva un relativo benessere economico. Alla caduta del giudicato (1259), il territorio divenne parte dei possedimenti dei Doria. Dopo vari scontri tra i Doria e gli aragonesi (tra cui la battaglia di Aidu de Turdu), Giave passò al giudicato di Arborea, che riuscirono a conquistare tra gli altri i territori dell'ex curatoria, e successivamente al regno di Sardegna. Il sistema di oppressione del feudalesimo tra il XIV ed il XVIII secolo raggiunse i massimi livelli di oscurantismo e disumanità, con imposizioni di corvée e decime alla popolazione. Nel 1436 il re d'Aragona Alfonso V il magnanimo cedette la signoria su Giave, insieme a Cossoine, a Serafino di Montagnana per 1300 ducati d'oro. Il paese venne poi incorporato nella baronia di Capuabbas, di cui gli ultimi feudatari furono i Da Silva - Alagon, ai quali fu riscattato nel 1839 con la soppressione del sistema feudale. La situazione di oppressione non migliorò nel passaggio sotto la dominazione dei Savoia. Nel 1795 il paese prese viva parte ai moti antifeudali. Solo nel periodo Post-Unitario finalmente Giave ritrova un periodo di relativo progresso civile ed economico, grazie allo sviluppo delle reti ferroviaria e alla costruzione di una stazione a valle, che diede nuovo impulso alle tradizionali attività agro pastorali. Tuttavia dal dopoguerra anche Giave è andato incontro al depauperamento demografico che ha interessato tutte le aree interne dell'isola.

Cossoine (Cossoine in sardo) è un comune italiano di 760 abitanti della provincia di Sassari. Esso è compreso nella regione storico-geografica del Meilogu, a sua volta sub-regione del Logudoro. Dista 48 km da Sassari e 60 km da Alghero. Nel suo territorio le prime testimonianze della presenza umana risalgono alle civiltà neolitiche per la presenza di diverse domus de janas e tombe dei giganti, nonché di numerosi nuraghi, risalenti all'età del bronzo. Non mancano testimonianze del passaggio successivo di altri popoli, tra cui i Romani con Lucentia o Castrum Lucentinum (oggi Lughentinas) e i Bizantini con l'insediamento di Kourin.

Nell'XI secolo viene citata per la prima volta la chiesa bizantina di Santa Maria Iscalas nelle cui vicinanze sorgeva il villaggio detto Santa Maria di Curin. Non appare chiaro che il nome di questa località, di apparente origine greca, sia relazionata con quello di Corsein, con cui viene indicato per la prima volta il villaggio dove sorge ora l'odierno comune, poi evoluto in Cossein e quindi nell'odierno Cossoine, in seguito alle distorsioni dovute alle stratificazioni linguistiche in sequenza dei dominatori catalani, castigliani e italiani. Secondo una interpretazione etimologica questo nome deriverebbe da cossu, forse ad indicare "corso", ossia abitante della Corsica[3]. Questa interpretazione sarebbe surrogata anche dall'alta frequenza nel Paese del cognome Unali, che deriva da Gunale, una curatoria del Giudicato di Gallura storicamente abitata da tribù corse.

Cheremule (Chelèmure in sardo) è un comune italiano di 411 abitanti della provincia di Sassari, nella regione storica del Meilogu. Il territorio fu abitato già in epoca neolitica per la presenza di diversi siti archeologici, e in epoca nuragica per la presenza di alcuni nuraghi.

In epoca medievale appartenne al Giudicato di Torres e fece parte della curatoria di Caputabbas. Alla caduta del giudicato (1259) passò ai Doria, e intorno alla metà del XIV secolo divenne un feudo sotto gli aragonesi. Nel 1636 fu incorporato nel marchesato di Montemaggiore, concesso ai Canaveda. Da questi passò successivamente ai Manca, ai quali fu riscattato nel 1839 con la soppressione del sistema feudale.

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: **479 sez. I "Ittiri"**
2. **Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: 479120 "Romana" e 480090 "Campo Giveseu".**

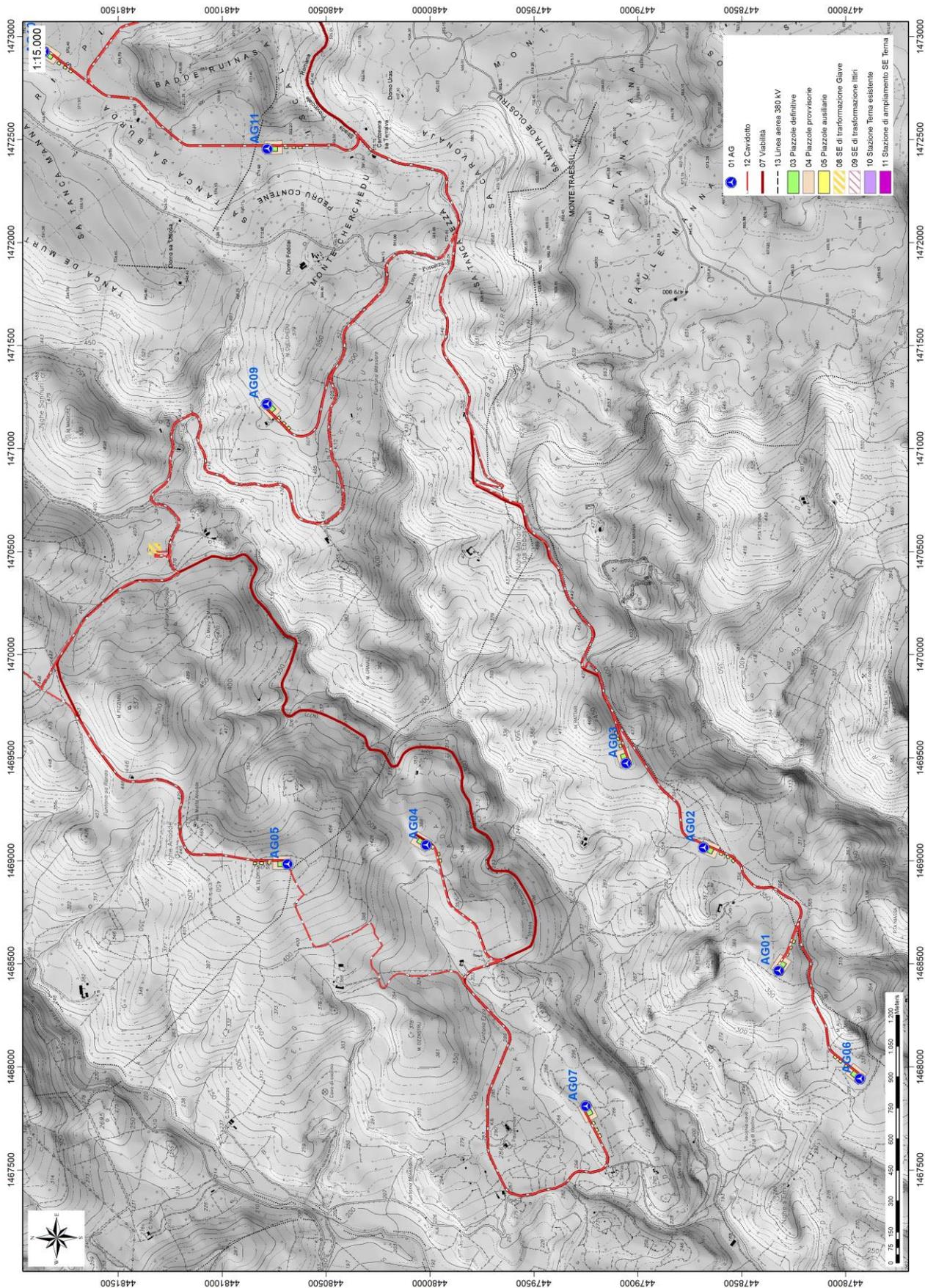


Figura 2 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione W

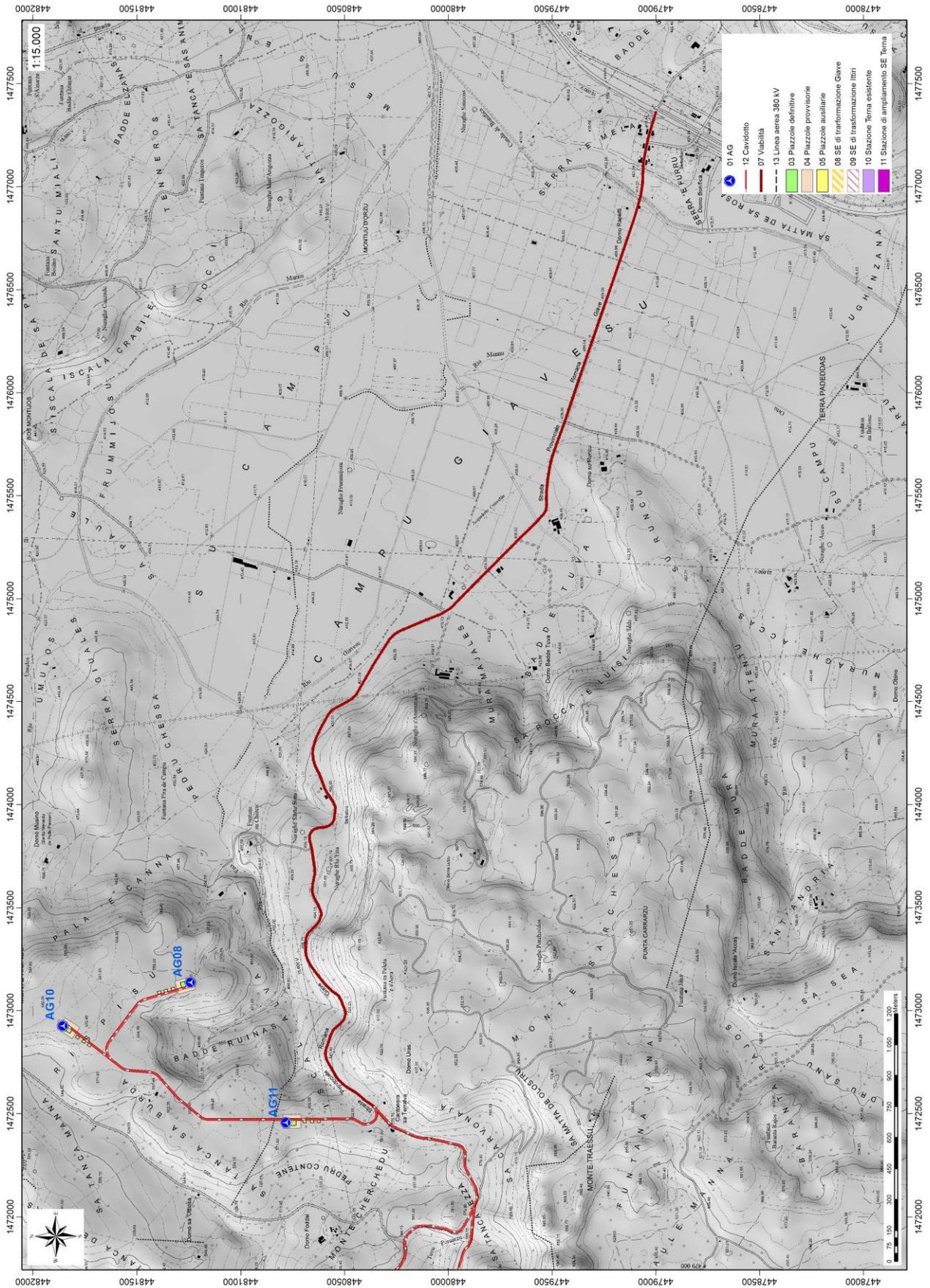


Figura 3 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, sezione E

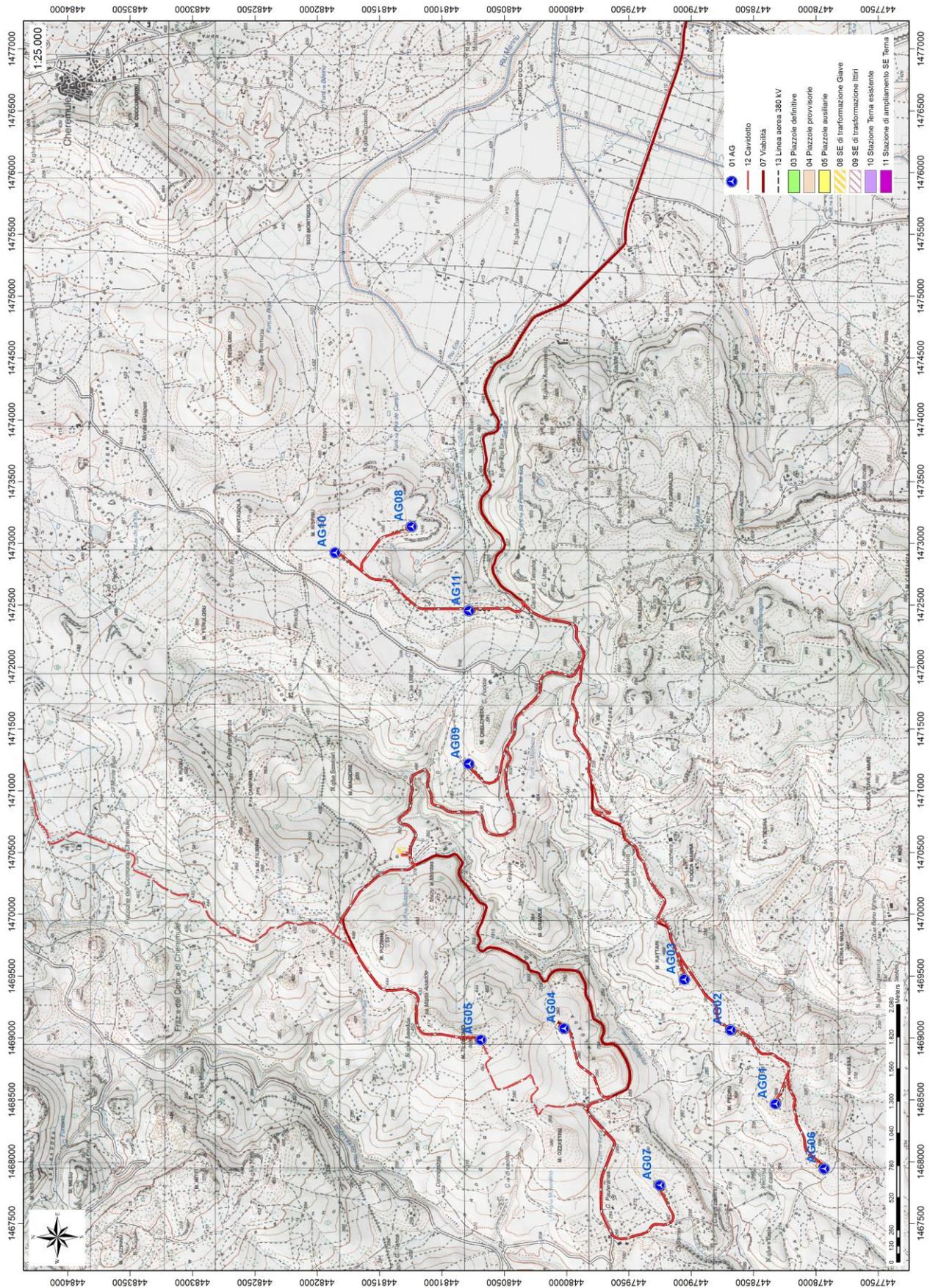


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000



Figura 5 Paesaggio caratteristico dell'area di studio

5. Caratteristiche di progetto dell'opera

Il Parco Eolico è costituito quindi da 11 aerogeneratori ad asse orizzontale montati su torri tubolari ad elementi in acciaio; dopo attente valutazioni ed alla luce dei dati del vento rilevati in loco ed in siti attigui, il modello più adatto a questo tipo di ventosità è risultato il V162 da 6,0 MW prodotto dalla fabbrica VESTAS con sede in Danimarca, ormai collaudato con risultati altamente prestazionali. Questi sono posizionati ad una distanza mediamente tra di loro pari a 6 volte il diametro del rotore, nel senso del vento dominante proveniente dal quadrante nordovest, e 3,5 volte il diametro del rotore, in senso perpendicolare alla direzione del vento dominante.

La potenza nominale del parco eolico installata è pari a 66 MW. Con un vento medio annuale di 6.36 m/s e un funzionamento annuale previsto pari a circa 2.861 ore equivalenti la produzione di energia elettrica lorda stimata è di circa 197.285 MWh/anno.

Per poter disporre di dati del vento attendibili e originali, sono stati installati due anemometri, MM1 in data 14.01.2022 in località "M. Rattari" e MM2 in data 18.02.2022 in località "Rispu", dopo un apposito studio, un anemometro con altezza di 100 m, adatto al rilevamento delle caratteristiche della ventosità del sito, che ha permetterà di elaborare un report preliminare della ventosità composto da un database relativo agli ultimi 12 mesi.

Le caratteristiche tecniche degli aero-generatori e del parco sono le seguenti:

- generatori asincroni trifase con potenza nominale pari a 6,0 MW, tensione 3 X 0.96 Kv, freq. 50 Hz
- rotor a tre pale con diametro pari a 162 m;
- torri in acciaio a sviluppo tronco conico di altezza pari a 125 m;
- cabine elettriche secondarie di trasformazione inserite in ogni aerogeneratore;
- rete elettrica interrata MT a 30 KV dai singoli aerogeneratori alla sottostazione di trasformazione MT/AT;
- sottostazione di trasformazione MT/AT (Media Tensione 30 kV - Alta Tensione 150 kV), comprendente sezionamento, ricezione e smistamento;
- rete telematica interrata per il monitoraggio e controllo dell'impianto;
- connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) in alta tensione 150 KV.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 13 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

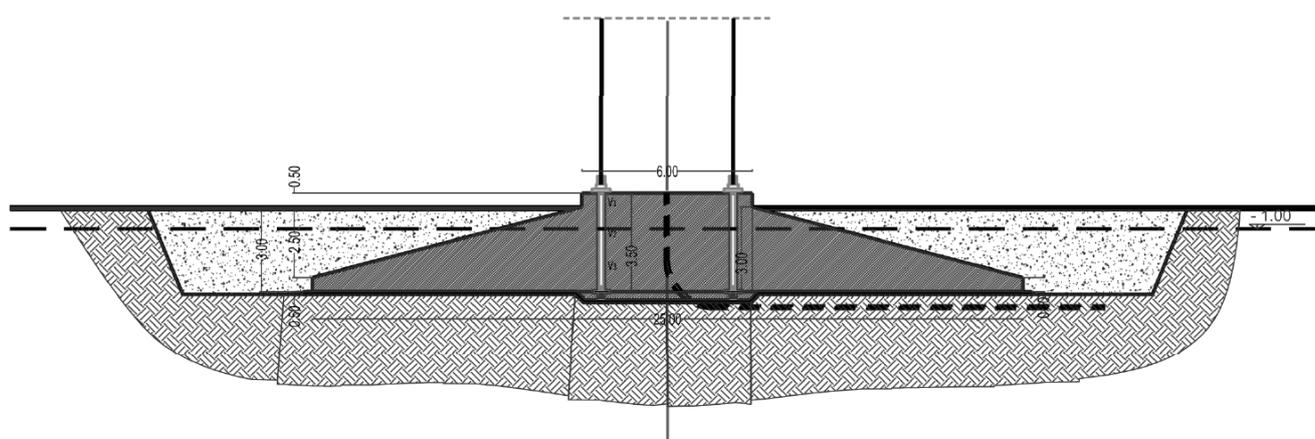
Le fondazioni delle torri saranno costituite da piastre in cemento armato atte a ripartire sia le azioni statiche dovute al peso proprio dell'apparato eolico che le azioni dinamiche dovute al vento trasmesse alla base delle torri dagli "apparati eolici". Da un predimensionamento di massima risulta che per terreni sufficientemente portanti ($\sigma > 1 \text{ N/mm}^2$), dovranno realizzarsi fondazioni a platea di forma circolare aventi un raggio di 12,5 m e un'altezza complessiva di 3,50 m

In caso di terreni dalle caratteristiche meccaniche scarse, si realizzeranno delle platee su pali di grande diametro (cm 100) disposti su tutta l'area di base atti a garantire adeguata stabilità al sistema fondazione-terreno.

Le fondazioni saranno interrato e ricoperte da uno strato di terreno dello spessore di circa m 1.

L'utilizzo di una tipologia o di un'altra scaturirà dalle indagini geotecniche derivanti dai sondaggi previsti in fase esecutiva in corrispondenza di ogni aerogeneratore.

Il volume di scavo della fondazione per ogni aerogeneratore è di circa 2260 mc.



Schema di fondazione

Il basamento di fondazione previsto in progetto è del tipo a plinto superficiale, da realizzare in opera in calcestruzzo armato, a pianta circolare di diametro pari a 25 metri.

La fondazione oggetto di verifica è sostanzialmente una piastra circolare a sezione variabile con spessore massimo al centro, pari a circa 350 cm, e spessore minimo al bordo, pari a 50 cm.

La porzione centrale, denominata "colletto", presenta altezza costante di 3,50 m per un diametro pari a circa 6.00 m.

Il colletto è il nucleo del basamento in cui verranno posizionati i tirafondi di ancoraggio del primo anello della torre metallica, il restante settore circolare sarà ricoperto con uno strato orizzontale di rilevato misto arido, con funzione stabilizzante e di mascheramento.

6. 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.

6.1. 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 costituita dalla copertura sedimentaria e vulcanica post-ercinica; principalmente è costituita dalle coperture sedimentarie mioceniche, dalle rocce della successione vulcano-sedimentaria Miocenica, e dai depositi quaternari. Il vulcanismo oligo-miocenico sardo 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.

Si tratta di un'associazione di prodotti con affinità calcicalina e subordinatamente tholeiitica e calcicalina alta in potassio (BECCALUVA et alii, 1987), rappresentata da serie vulcaniche da basaltico- andesitiche a dacitiche (principalmente

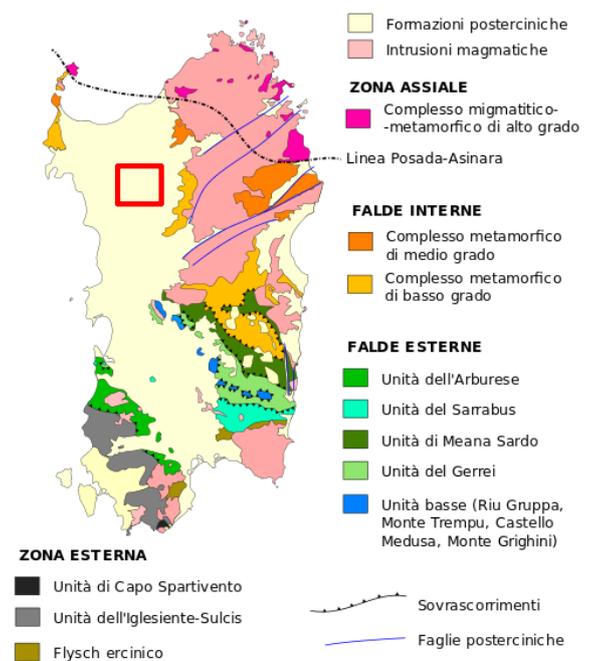


Figura 6 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 15 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

in colate laviche e cupole di ristagno) e da serie da dacitiche a riolitiche (principalmente in espandimenti ignimbrici). In particolare, l'area vasta è compresa all'interno *Distretto vulcanico di Capo Marargiu*, del *Distretto vulcanico di Osilo Castelsardo* e della *Successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese*.

6.2. Successione litostratigrafica dell'area di intervento

La successione vulcanica oligo-miocenica affiorante nell'area di interesse è costituita da ammassi lavici, duomi e piroclastiti messi in posto in condizioni subaeree e da subordinate epiclastiti.

6.2.1. Distretto vulcanico di Capo Marargiu (Miocene Inferiore)

(MTD) Unità di Pala Mantedda. Lave da andesitiche a dacitiche talora scoriacee ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Cpx; in domi e colate separate da livelli conglomeratici. ?AQUITANIANO – BURDIGALIANO

(SSU) Unità di Su Suerzu: rappresentati da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbrica, saldati, e con tessitura paratassitica, di colore rossastro, con fiamme grigiastre di dimensioni comprese tra 2 cm e 20 cm, e litici centimetrici costituiti da altre ignimbriti o da andesiti. Nell'area a NNW di Thiesi è presente un prodotto di aspetto ossidiano, probabilmente originato dalla silicizzazione di una piroclastite, di colore grigio da chiaro a scuro, con spessore limitato (7-8 m), preceduto da cineriti bianche contenenti frustoli carboniosi e litici e lapilli accrezionali. I depositi di Su Suerzu sono delimitati dalle Lave di Pala Mantedda (MTD) a letto, e dai corpi di Nuraghe Vittore (UNV) a tetto, con rapporti di disconformità. La composizione chimica delle ignimbriti è riodacitica, mentre lo spessore varia tra 15-20 m fino a 70 m. Burdigaliano.

(UUI) Unità di Uri: è costituita da depositi di flusso piroclastico in facies ignimbrica, variamente saldati, di colore grigiastro e subordinatamente rossastro per alterazione, ricchi in frammenti litici e cristalli liberi. Il deposito piroclastico è costituito da pomice biancastre e litici eterometrici (4-5 cm) di natura andesitica o ignimbrica, in matrice cineritica grossolana nella quale sono immersi anche cristalli di plagioclasio, pirosseno e biotite. Il diverso grado di saldatura varia dalla base (nullo) verso il tetto della successione (elevato), influenza la tessitura della roccia, che si presenta debolmente isorientata nei termini poco saldati, mentre è marcatamente eutassitica nei termini saldati. La composizione delle piroclastiti è riolitica, e lo spessore varia da pochi metri fino a 30 m. Le datazioni radiometriche ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, Gattacecca et al., 2007) indicano un'età di $18,95 \pm 0,07$ (Burdigaliano).



Figura 7 Particolare della litologia appartenente all'unità di Uri

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 16 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

(RESa) Litofacies nella Formazione di Mores: nota come “calcari inferiori”, è costituita da una successione di calcareniti, calcari bioclastici fossiliferi, e calcari a componente terrigena variabile, con faune a gasteropodi “Turritelle”, ostreidi ed echinidi (Scutella, Amphiope), riferibili al Miocene inferiore (Burdigaliano). Il passaggio alla soprastante formazione di Borutta (RTU) presenta spesso caratteri eteropici, infatti può esser sormontata direttamente dalla Formazione di Monte Santo (NST). Burdigaliano superiore.

(UNV) Unità di Nuraghe Vittore. Andesiti e daciti porfiriche per fenocristalli di Pl, Px e Ol; in colate. BURDIGALIANO è costituita da colate di andesiti basaltiche e basalti, con caratteristiche prevalenti di autobrecce, e daciti porfiriche. Le lave coerenti hanno colore grigio scuro e tessitura porfirica per fenocristalli di plagioclasio, pirosseno e olivina in pasta di fondo microcristallina. Presentano frequente fratturazione tipo *platy jointing* secondo la direzione di flusso. Le lave a blocchi sono costituite da blocchi irregolari e eterometrici di lava, debolmente vescicolati, a tessitura clasto-sostenuta, con arrossamento dovuto ad alterazione idrotermale.

(TLR) Unità di Chelchedu-Tiloromo. Andesiti e andesiti basaltiche in cupole di ristagno, ipocristalline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Ol, Cpx; intercalate e/o iniettate entro i depositi piroclastici dell'unità UUI.

(TSU) Unità di Monte Traessu. Rioliti in colate e depositi piroclastici tipo block and ash flows prevalentemente monogenici e caotici. (K/Ar: $16,8 \pm 0,2$ Ma: Lecca et alii, 1997). BURDIGALIANO

(RUG) Unità di Monte Rugiu. Daciti e riodaciti porfiriche per fenocristalli di Pl, San, Am e Bt; in cupole di ristagno. (K/Ar: $17,5 \pm 0,5$ Ma: Lecca et alii, 1997). BURDIGALIANO

(NIA) UNITÀ DI PUNTA NIASSA. Riodaciti in cupole di ristagno, filoni, guglie e laccoliti. (K/Ar: $14,3 \pm 0,2$ Ma - $13,3 \pm 0,2$ Ma: Lecca et alii, 1997). LANGHIANO

6.3. Depositi Quaternari dell'area continentale

I depositi quaternari cartografati nell'area di studio sono generalmente poco rilevanti; sono rappresentati principalmente da depositi alluvionali, depositi di versante e sedimenti legati a gravità.

(PVM2a) Litofacies nel Subsistema di Portovesme: si tratta di depositi di ghiaie e alluvioni terrazzate, da medie a grossolane, con subordinate sabbie. Pleistocene superiore.

(a) Depositi di versante: sono costituiti da detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Olocene.

(b2) Coltri eluvio-colluviali. Detriti immersi in matrice fine sabbiosi o limosi, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. L'apresenza di frazione organica indica che si tratta di sedimenti derivati dall'erosione del suolo durante l'Olocene, mescolati, a sedimenti provenienti, per degradazione fisica, direttamente dal substrato. OLOCENE

In particolare le turbine AG02, AG06 e AG07 ricadono nella litologia RESa; la turbina AG01 ricade nella litologia NIA; le turbine AG03, AG04, AG05 e AG09 ricadono nella litologia TLR e le Turbine AG08, AG10 e AG11 ricadono nella litologia TSU.

7. Analisi qualitativa di stabilità dell'ammasso roccioso

L'intensa fratturazione descritta nei precedenti capitoli produce sulla roccia una geometria estremamente variabile in termini di direzione e immersione, nelle tre direzioni principali dello spazio. Ciò che varia in relazione alla composizione granulometrica dei singoli strati originari è la spaziatura tra i giunti e il grado di fissilità. Pertanto è estremamente difficile se non impossibile definire l'assetto a piccola scala per quanto appena descritto.

Si può definire un range di spaziatura alla mesoscala, tale da individuare una potenziale compagine di blocchi in grado di staccarsi dall'ammasso se le condizioni geostrutturali lo permettono (piani a franapoggio o intersezione di piani con direttrice a franapoggio).

Tali dimensioni possono essere individuate tra il decimo di metro cubo a qualche metro cubo. La variabilità direzionale delle famiglie di giunti che individuano i blocchi è piuttosto marcata e diversificata in funzione, come detto della competenza degli strati soggetti agli sforzi.

Ne deriva di fatto, una difficile previsione delle potenziali propensioni a fenomeni di crollo e/o scivolamento, ma si tratta di caratteri locali la cui eteropia laterale risulta sempre molto marcata.

In generale si può affermare che versanti come questi sono oggetto di due fenomeni di scivolamento distinti in relazione al dominio di famiglie di giunti.

Alla piccola scala laddove il materiale originario è costituito da granulometrie medie e fini, sono più frequenti fenomeni di sfaldamento e distacco di lamine da centimetriche a decimetriche. Queste ultime divengono più simili a piccoli blocchi la dove la granulometria aumenta.

A scala media difatti, le spaziature nella stessa famiglia sono maggiori, anche oltre metro ed interessano blocchi più grandi ma che rispondono alle medesime dinamiche di quelli pocanzi analizzati.

Di fatto quindi, non potendo generalizzare alla piccola scala è sempre d'obbligo un rilievo puntuale sugli affioramenti ove possibile. Il materiale distaccato si raccoglie ai piedi del pendio, in accumuli più o meno estesi in funzione della pendenza.

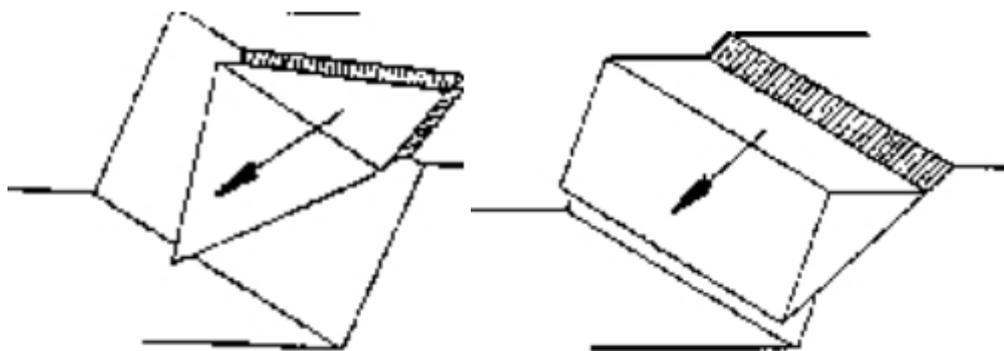


Figura 8 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

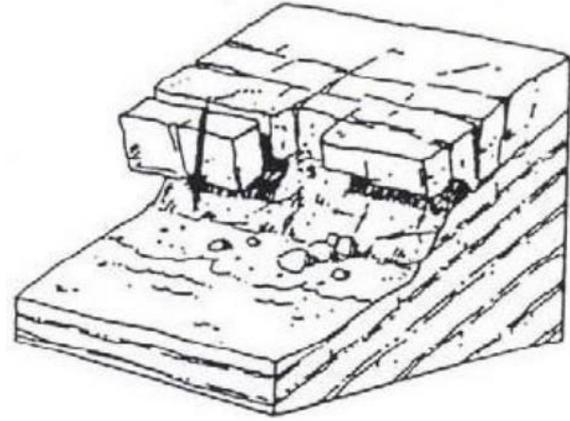


Figura 9 A sinistra esempio di erosione regressiva e formazione di parete aggettante e a destra lo schema del ribaltamento di blocchi per scalzamento alla base

In fig.9 viene illustrata una parete affiorante appartenente alla Formazione di Mores (RESa) caratterizzata da stratificazione a giacitura orizzontale, questa è soggetta ad erosione differenziale in strati meno competenti, ciò comporta uno scalzamento alla base con conseguente distacco di blocchi nei livelli soprastanti più competenti ma fratturati; ai piedi sono presenti blocchi distaccatisi tendenzialmente per crollo/ribaltamento.

Gli ammassi rocciosi costituiti in litologie dacitiche, ovvero quelle su cui poggiano tutte le turbine, presentano le medesime caratteristiche per quanto riguarda instabilità, ovvero tendono a formare scarpate che arretrano per crollo ribaltamento e per scivolamento planare o di cunei. La differenza con le formazioni carbonatiche sopra citate sta nella natura dei giunti, ovvero, mentre nelle prime sono dovuti anche a stratificazione, in queste ultime sono di tipo *platy joints*, presentano in ogni caso una forte regolarità anche alla scala dell'ammasso, è pertanto prevedibile, almeno in parte, come vari la stabilità dell'ammasso al variare dell'orientazione e della pendenza del versante.

10.1. Caratteristiche delle acque sotterranee

Uno studio idrogeologico ha lo scopo di identificare lo schema di circolazione idrica sotterranea relativo ad una determinata area per poter ricavare informazioni circa i rapporti tra litotipi presenti, la presenza di acqua e le possibili conseguenze derivanti dalla realizzazione di un'opera.

Le rocce si presentano raramente compatte. La proprietà di contenere spazi vuoti tra gli elementi solidi che le compongono, detta porosità, esprime l'attitudine che ha la roccia ad immagazzinare ed a liberare acqua sotterranea.

Le litologie che circondano l'area di studio sono caratterizzate da permeabilità da bassa medio-bassa per fratturazione per le litologie vulcaniche mentre medio-alta per le soprastanti litologie carbonatiche (RES a).

Da un censimento nell'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo ex Lg 464/1984 non sono presenti perforazioni per uso di acque sotterranee nell'area di interesse. Nelle immagini seguenti le schede di un pozzo (Cod.170595) nei pressi della turbina AG04 (a sinistra dell'immagine) e di due pozzi (Cod.170547 e Cod.176552) situati a nord dell'area di installazione della turbina AG10 (a destra dell'immagine).

Nei pozzo con cod.170595 la falda si rinviene a quota -6m da piano campagna (livello statico), negli altri due pozzi censiti la falda si ritrova a profondità superiori ai 40m.

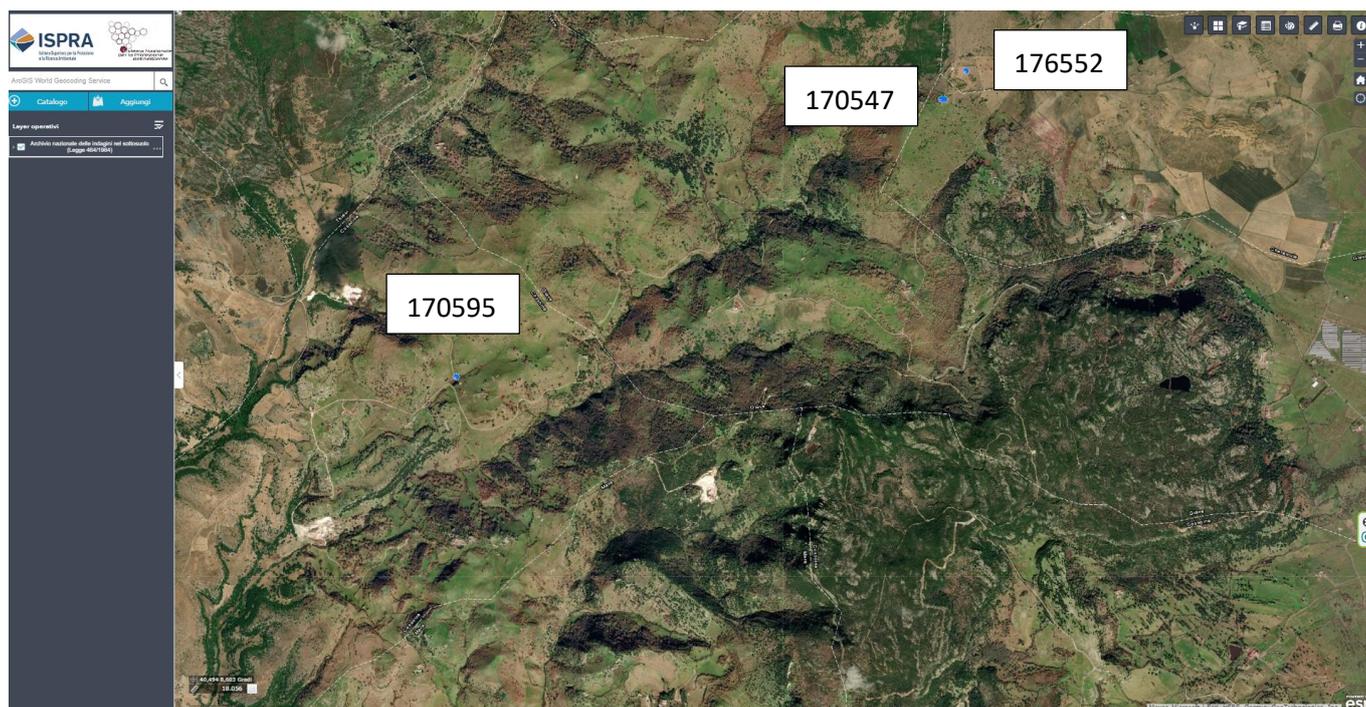
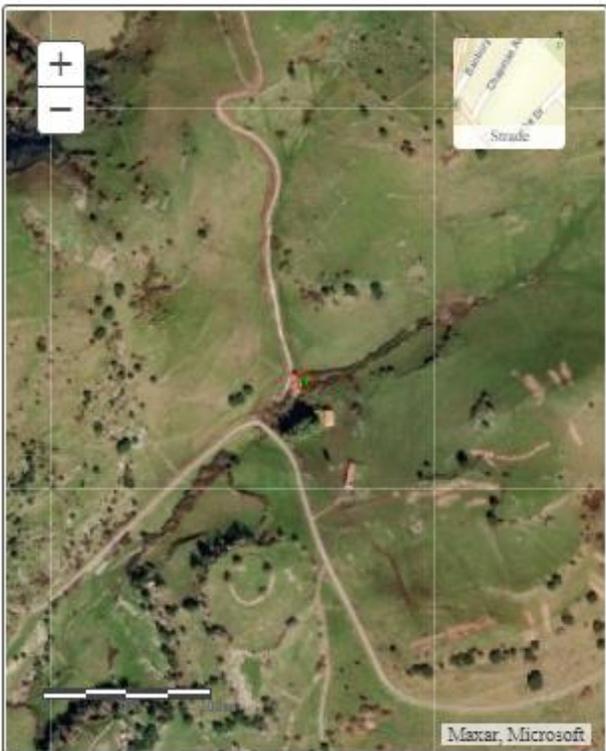
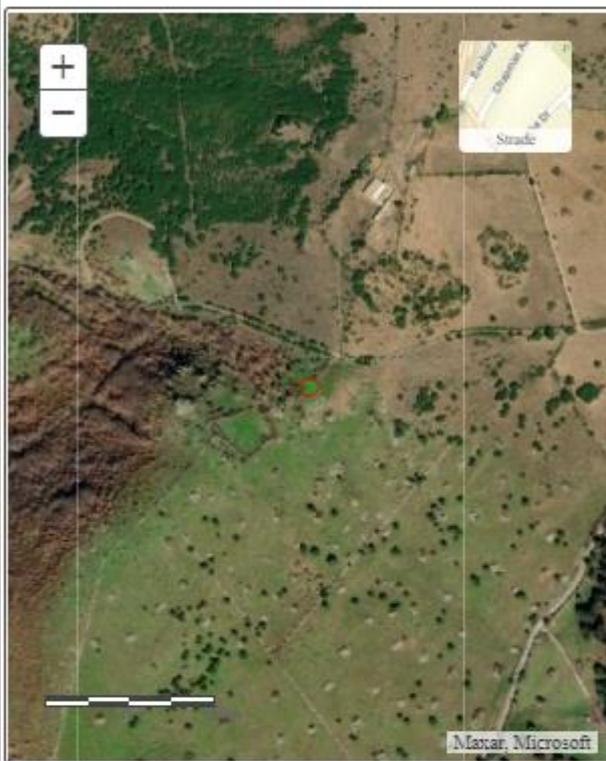


Figura 10 Pozzi presenti nell'area di interesse (dall'Archivio Nazionale delle Indagini del Sottosuolo)

 	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale																					
Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)																						
Dati generali	Ubicazione indicativa dell'area d'indagine																					
<p> Codice: 170595 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: COSSOINE Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 60,00 Quota pc slm (m): 312,00 Anno realizzazione: 1994 Numero diametri: 1 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): 2,500 Portata esercizio (l/s): 0,500 Numero falde: 1 Numero filtri: 0 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: SI Certificazione(*): NO Numero strati: 2 Longitudine WGS84 (dd): 8,627925 Latitudine WGS84 (dd): 40,469011 Longitudine WGS84 (dms): 8° 37' 40.54" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 28' 08.45" N </p> <p>(*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia</p>																						
DIAMETRI PERFORAZIONE																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Progr</th> <th style="width: 20%;">Da profondità (m)</th> <th style="width: 20%;">A profondità (m)</th> <th style="width: 20%;">Lunghezza (m)</th> <th style="width: 30%;">Diametro (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,00</td> <td>60,00</td> <td>60,00</td> <td>220</td> </tr> </tbody> </table>					Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)	1	0,00	60,00	60,00	220								
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)																		
1	0,00	60,00	60,00	220																		
FALDE ACQUIFERE																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Progr</th> <th style="width: 20%;">Da profondità (m)</th> <th style="width: 20%;">A profondità (m)</th> <th style="width: 50%;">Lunghezza (m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,00</td> <td>9,00</td> <td>9,00</td> </tr> </tbody> </table>					Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	1	0,00	9,00	9,00										
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)																			
1	0,00	9,00	9,00																			
MISURE PIEZOMETRICHE																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Data rilevamento</th> <th style="width: 20%;">Livello statico (m)</th> <th style="width: 20%;">Livello dinamico (m)</th> <th style="width: 20%;">Abbassamento (m)</th> <th style="width: 20%;">Portata (l/s)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ott/1994</td> <td>6,00</td> <td>9,00</td> <td>3,00</td> <td>2,000</td> </tr> </tbody> </table>					Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)	ott/1994	6,00	9,00	3,00	2,000								
Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)																		
ott/1994	6,00	9,00	3,00	2,000																		
STRATIGRAFIA																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;">Progr</th> <th style="width: 15%;">Da profondità (m)</th> <th style="width: 15%;">A profondità (m)</th> <th style="width: 10%;">Spessore (m)</th> <th style="width: 15%;">Età geologica</th> <th style="width: 45%;">Descrizione litologica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0,00</td> <td>2,00</td> <td>2,00</td> <td></td> <td>TERRENO MOLTO COMPATTO</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>2,00</td> <td>60,00</td> <td>58,00</td> <td></td> <td>ROCCIA DI NATURA BASALTICA</td> </tr> </tbody> </table>					Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Spessore (m)	Età geologica	Descrizione litologica	1	0,00	2,00	2,00		TERRENO MOLTO COMPATTO	2	2,00	60,00	58,00		ROCCIA DI NATURA BASALTICA
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Spessore (m)	Età geologica	Descrizione litologica																	
1	0,00	2,00	2,00		TERRENO MOLTO COMPATTO																	
2	2,00	60,00	58,00		ROCCIA DI NATURA BASALTICA																	

 		Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale			
Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (Legge 464/1984)					
Dati generali		Ubicazione indicativa dell'area d'indagine			
<p> Codice: 170547 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: CHEREMULE Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 50,00 Quota pc slm (m): 600,00 Anno realizzazione: ND Numero diametri: 0 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): ND Portata esercizio (l/s): ND Numero falde: 1 Numero filtri: 0 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: SI Certificazione(*): NO Numero strati: 1 Longitudine WGS84 (dd): 8,671536 Latitudine WGS84 (dd): 40,488169 Longitudine WGS84 (dms): 8° 40' 17.54" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 29' 17.42" N </p> <p>(*)Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia</p>					
FALDE ACQUIFERE					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)		
1	40,00	40,00	0,00		
MISURE PIEZOMETRICHE					
Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)	
giu/1988	10,00	40,00	30,00	0,500	
STRATIGRAFIA					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Spessore (m)	Età geologica	Descrizione litologica
1	0,00	50,00	50,00		TRACHITE LAMELLARE E SABBIA

Dati generali		Ubicazione indicativa dell'area d'indagine			
<p>Codice: 176552 Regione: SARDEGNA Provincia: SASSARI Comune: THIESI Tipologia: PERFORAZIONE Opera: POZZO PER ACQUA Profondità (m): 114,00 Quota pc slm (m): 600,00 Anno realizzazione: 2003 Numero diametri: 1 Presenza acqua: SI Portata massima (l/s): 0,550 Portata esercizio (l/s): 0,450 Numero falde: 1 Numero filtri: 1 Numero piezometrie: 1 Stratigrafia: SI Certificazione(*): SI Numero strati: 1 Longitudine WGS84 (dd): 8,673758 Latitudine WGS84 (dd): 40,490111 Longitudine WGS84 (dms): 8° 40' 25.53" E Latitudine WGS84 (dms): 40° 29' 24.41" N</p> <p>(*):Indica la presenza di un professionista nella compilazione della stratigrafia</p>					
DIAMETRI PERFORAZIONE					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)	
1	9,00	114,00	105,00	219	
FALDE ACQUIFERE					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)		
1	85,00	88,00	3,00		
POSIZIONE FILTRI					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Lunghezza (m)	Diametro (mm)	
1	84,50	88,50	4,00	160	
MISURE PIEZOMETRICHE					
Data rilevamento	Livello statico (m)	Livello dinamico (m)	Abbassamento (m)	Portata (l/s)	
mar/2003	68,00	74,00	6,00	0,400	
STRATIGRAFIA					
Progr	Da profondità (m)	A profondità (m)	Spessore (m)	Età geologica	Descrizione litologica
1	0,00	114,00	114,00	OLIGOCENE SUP-MIOCENE IN	TRACHIANDESITI ROSSASTRE FRATTURATE

ISPRA - Copyright 2018

Figura 11 - Monografie dei pozzi censiti nell'Archivio Nazionale delle Indagini nel Sottosuolo

Complessivamente, le pendenze dei versanti insieme alla bassa permeabilità di alcune litologie non sono favorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche (vulcaniti terziarie), mentre in alcune litologie (calcari bioclastici) la permeabilità è alta per carsismo, oltre che per fratturazione. La circolazione idrica profonda è strettamente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso e alla sua permeabilità.

La permeabilità secondaria, o per fessurazione, viene acquisita dalla roccia a seguito della sua formazione.

Tale proprietà può esser limitata dalla presenza di riempimento delle fratture costituito da materiali derivanti dall'alterazione della roccia madre ad alta componente argillosa. Ne consegue che seppur presente una buona rete di fratture anche con importanti spazature, la presenza di tali riempimenti limita fortemente il passaggio delle acque.

La parte superficiale dell'ammasso roccioso è generalmente più fratturata e pertanto con permeabilità più elevata rispetto alla parte più profonda meno interessata dalla fratturazione, al contatto tra le due si possono sviluppare delle risorgive che hanno carattere prettamente stagionale legato all'andamento pluviometrico generale.

Di seguito viene illustrato in uno schema il processo di infiltrazione accumulo e circolazione legato al regime delle piogge e caratterizzante le litologie vulcaniche nella porzione sommitale e di interesse alle opere del parco eolico. Gli afflussi che arrivano sul terreno sotto forma per lo più di piogge, più raramente e poco tempo di neve, in parte scorrono lungo la superficie in genere a lamina d'acqua per poi organizzarsi in deboli rivoli che si concentrano lungo gli impluvi fino a raggiungere il bordo dell'altopiano oltre il quale si riversano lungo valli strette a V ancora in evoluzione geomorfologica.

La frazione di acqua che non scorre in superficie in parte evapora e in parte si infiltra nel terreno e nella roccia sottostante scorrendo lungo le fratturazioni in maniera più o meno efficace in funzione del grado di apertura delle stesse, e in funzione della permeabilità della roccia.

Maggiore è la presenza di fratture, maggiore è la possibilità che l'acqua prosegua il suo percorso in profondità. Le falde acquifere e le conseguenti sorgenti che si hanno lungo i versanti e nei tagli erosivi sono per l'appunto legate principalmente alla presenza dei sistemi di frattura a diversa scala e dal materiale derivante dall'alterazione superficiale degli ammassi rocciosi.

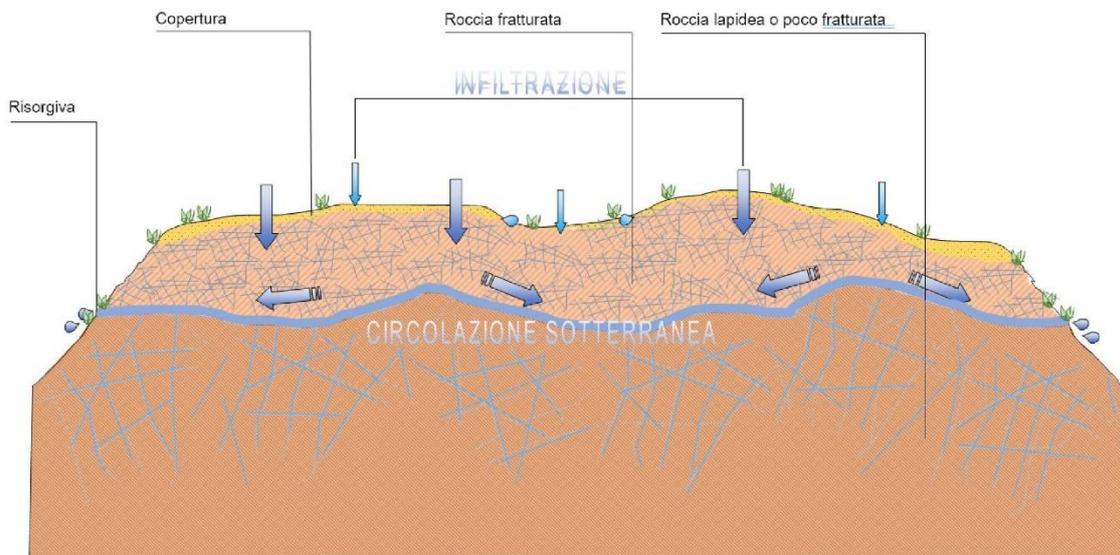


Figura 12 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo

Nell'area di studio si possono distinguere:

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 24 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

1. litologie con permeabilità medio-alta, come le calcareniti della litofacies della Formazione di Mores (RESa), per via della fratturazione o del carsismo;
2. litologie con permeabilità medio-bassa per fratturazione, come le rocce delle vulcaniti terziarie: Unità di di Uri (UUI), di Pala Mantedda (MTD) e di Nuraghe Vittore (UNV), Unità di Chelchedu-Tiloromo (TLR), Unità di Monte Traessu (TSU), Unità di Monte Rugiu (RUG) E Unità di Punta Niassa (NIA).

Da un punto di vista idrogeologico le formazioni dell'area di studio possono essere divise in tre gruppi principali:

1. Rocce del Distretto vulcanico di Capo Marargiu, e di Osilo. È costituito da rocce poco permeabili per fratturazione (piroclastiti, lave andesitiche, ecc...) $K=1 \times 10^{-5}$ - 1×10^{-6} m/sec
2. Coperture della successione sedimentaria oligo-miocenica del Logudoro-Sassarese. Tali coperture sono costituite da litotipi a permeabilità medio-alta dovuta alla fratturazione e al carsismo delle rocce carbonatiche intercalate nelle successioni; $K= 1 \times 10^{-6}$ m/sec
3. Depositi quaternari. I depositi quaternari occupano aree molto limitate e raggiungono spessori poco significativi, la permeabilità è di tipo medio-alta per porosità. Le alluvioni terrazzate recenti hanno permeabilità medio-alta e sono di solito sede di una falda freatica di subalveo. I depositi di versante invece essendo in gran parte costituiti da una struttura clasto-sostenuta e scarsa matrice (falde di detrito), presentano una permeabilità molto elevata, in ogni caso i loro spessori esigui non garantiscono una potenza sufficiente per generare acquiferi significativi; $K=1 \times 10^{-5}$ - $1 \times 10^{-6} \leq 1 \times 10^{-4}$ m/sec

Dalla carta della permeabilità dei suoli, resa disponibile dal Geoportale della Regione Autonoma della Sardegna, si evince che l'area di studio presenta nella zona di installazione delle turbine, una **permeabilità medio-bassa per fratturazione**, eccetto che per le aree in cui affiorano i depositi carbonatici (RESa) per cui la permeabilità è **Permeabilità medio alta per carsismo e fratturazione** e quaternari legati a gravità (al piede dei rilievi) che presentano **permeabilità medio-alta per porosità**.

Nell'area attraversata dal cavidotto e alla sottostazione invece la permeabilità risulta medio-bassa per fratturazione, e medio-alta per porosità.

10.2. Analisi della vulnerabilità degli acquiferi

Ai fini della tutela della risorsa idrica si è operata una valutazione qualitativa della vulnerabilità degli acquiferi presenti in relazione alle opere da realizzare e in relazione alle varie attività di cantiere.

Non sono presenti sorgenti alle quote di realizzazione delle opere che prevedono gli scavi più profondi (fondazioni degli aerogeneratori, piazzole e aree di deposito temporaneo) e la profondità dell'acquifero così come deriva dalle informazioni geologiche è tale che quest'ultimo non venga influenzato dalle opere in possesso e con il normale deflusso delle acque sotterranee. Altresì le opere in progetto non determinano per loro natura produzione di agenti inquinanti che possono riversarsi nella circolazione idrica sotterranea se non per accidentale guasto meccanico che andrà trattato con le opportune misure di salvaguardia dettate dal T.U. sull'Ambiente.

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;

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 25 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

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 geoelettrica**, **5 stendimenti di sismica** con tecnica **MASW e rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni, così come i 5 stendimenti geoelettrici, i quali hanno il medesimo centro degli allineamenti sismici ma sono leggermente più lunghi (93,0 m).

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	NE-SW	24	3,0	69,0
R/M 2 (SMT02)	Rifrazione/MASW	N-S	24	2,5	57,5
R/M 3 (SMT03)	Rifrazione/MASW	E-W	24	3,0	69,0
R/M 4 (SMT04)	Rifrazione/MASW	SW-NE	24	3,0	69,0
R/M 5 (SMT05)	Rifrazione/MASW	S-N	24	3,0	69,0
T 1 (SMT01)	Tomografia Elettrica	NE-SW	32	3,0	93,0
T 2 (SMT02)	Tomografia Elettrica	N-S	32	2,5	77,5
T 3 (SMT03)	Tomografia Elettrica	E-W	32	3,0	93,0
T4 (SMT04)	Tomografia Elettrica	SW-NE	32	3,0	93,0
T5 (SMT05)	Tomografia Elettrica	S-N	32	3,0	93,0

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

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

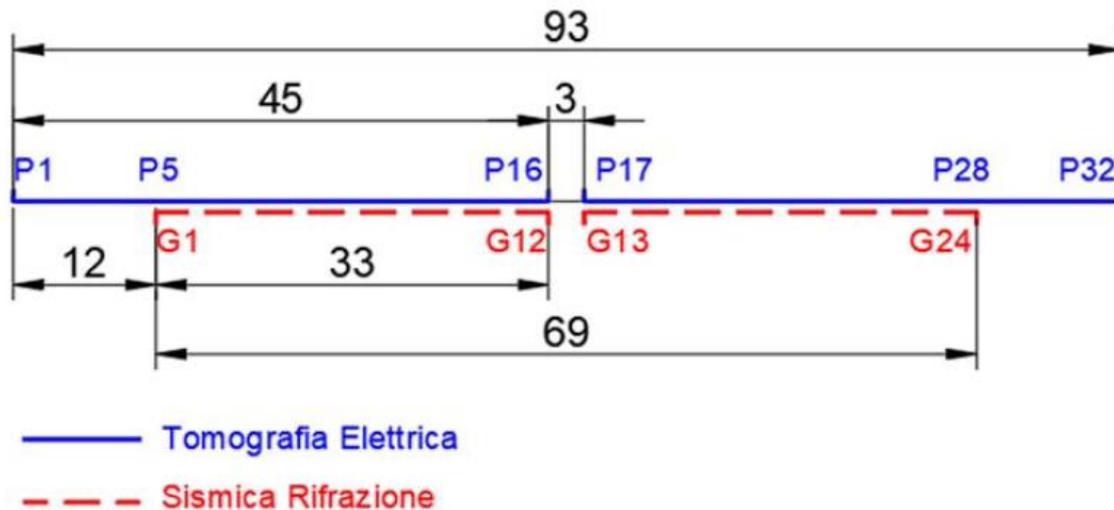


Figura 13 corrispondenze fra gli stendimenti

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).

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 9 energizzazioni intervallate ogni 3 geofoni secondo lo schema di acquisizione definito dalla specifiche tecniche.

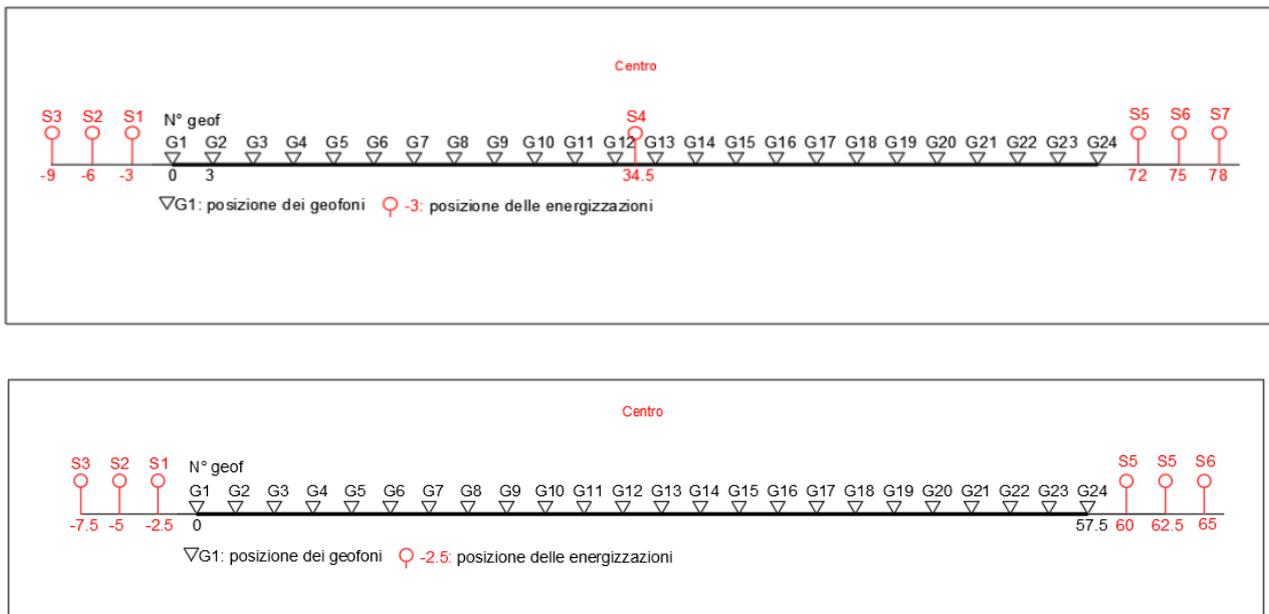


Figura 14 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 E 57,5m

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.

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.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 28 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

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

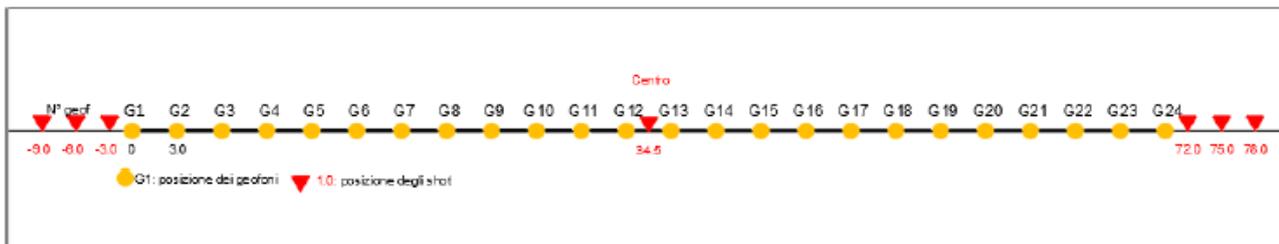
Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

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 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 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.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 30 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

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.

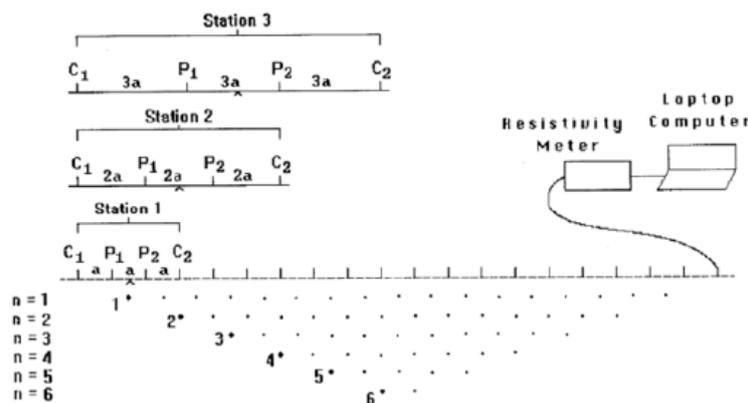
Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)

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>Depositi 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>Depositi 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. Tomografia elettrica

8.2.1. Tecnica e parametri utilizzati

Lo scopo dei metodi geofisici è quello di ottenere informazioni sulla natura e struttura del sottosuolo attraverso una serie di misure opportunamente effettuate in superficie. Il metodo utilizzato in questa indagine ricade fra i metodi geoelettrici "attivi", cioè quelli che utilizzano correnti elettriche artificialmente immesse nel terreno, con l'intento di misurare la resistività apparente degli strati attraversati dalla corrente elettrica. La tecnica tomografica si compone di uno stendimento costituito nel caso specifico da un massimo di 32 elettrodi posti ad un'interdistanza costante l'uno dall'altro, che vengono gestiti automaticamente dallo strumento di misura e commutati alternativamente come elettrodi di corrente e di misura di differenza di potenziale (d.d.p.). La metodologia permette l'acquisizione di una considerevole quantità di dati sulla resistività "apparente", rappresentativi sia delle variazioni laterali, che verticali lungo il profilo così da generare una Tomografia Elettrica lungo una linea sul terreno.



L'utilizzo appropriato dei programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico. La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante, poiché dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti, etc..

La **profondità d'esplorazione** è variabile secondo il dispositivo e della risoluzione richiesta; mediamente è pari a circa 1/5 della lunghezza dello stendimento.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 32 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

8.2.2. Geometria delle acquisizioni

Per ciascun stendimento sono state impiegate tre geometrie di acquisizione, come di seguito specificato:

- Quadripolo di Wenner
- Quadripolo di Wenner Schlumberger
- Quadripolo Dipolo-Dipolo

Ogni metodo utilizzato ha delle caratteristiche proprie e come tale tende meglio a rappresentare specifiche strutture presenti nel sottosuolo. In particolare:

1. Il quadripolo di Wenner (di seguito W) presenta caratteristiche per il quale risulta maggiormente idoneo nell'investigazione di strutture orizzontali (quali quelle sedimentarie o laviche).
2. Il quadripolo di Wenner-Schlumberger (di seguito WS) risulta essere un buon compromesso per l'investigazione sia di strutture orizzontali che verticali (faglie, dicchi, cavità),
3. Il quadripolo Dipolo-Dipolo (di seguito DD) è prevalentemente idoneo nell'investigazione di strutture verticale (faglie, dicchi, cavità), mentre risulta essere poco adatto in presenza di strutture orizzontali, quali quelle sedimentarie.

Il W e il WS si distinguono anche per un minore "rumore" delle acquisizioni, ossia una miglior rapporto tra segnale acquisito e disturbo della misura, nonché per una maggiore capacità di investigazione in profondità.

8.2.3. Strumentazione e attrezzatura utilizzata

La strumentazione utilizzata per lo studio è composta dai seguenti dispositivi:

- sistema di misurazione ed acquisizione formato da un georesistivimetro completo di unità di energizzazione ed un computer per la gestione automatica delle acquisizioni (apparecchiatura per tomografia elettrica Mod. Polares della PASI) che fornisce la corrente da immettere nel sottosuolo con una tensione in uscita di picco di $\pm 700V$ ed una corrente variabile fra 5 e 2.000 mA.;
- n° 2MUX per la gestione automatica delle acquisizioni in cui gli elettrodi collegati all'unità di acquisizione ed energizzazione sono in grado di funzionare alternativamente come elettrodi di corrente e di potenziale;
- N° 2 cavi per 16 elettrodi *cable A-B-M-N* con connettore per MUX
- 32 elettrodi in acciaio inox

8.2.4. Elaborazione dei dati e software

L'elaborazione tomografica consiste, nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle secondo uno schema definito con riferimento alla distribuzione e alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle è calcolata la resistività apparente che soddisfi il complesso delle misure eseguite, su questo schema è applicato il metodo d'ottimizzazione dei minimi quadrati modificando il modello di partenza, in maniera iterativa in modo che si riduca la differenza tra i valori di resistività apparente calcolati e quelli effettivamente misurati.

Il **grafico** che ne deriva è una sezione bidimensionale in cui le zone ad uguale resistività sono raffigurate da aree caratterizzate dal medesimo colore. Le tinte blu rappresentano resistività basse, poi si passa a colori che vanno dal verde al giallo e infine al rosso che rappresenta litologie a resistività via via sempre più alte. Le misure sperimentali sono state elaborate mediante uno specifico programma di interpretazione tomografica denominato "ZONDRES2D". Il programma d'interpretazione tomografica ZONDRES2D elabora un modello bidimensionale di resistività del sottosuolo che soddisfa i valori sperimentali acquisiti con le varie interdistanze dello stendimento.

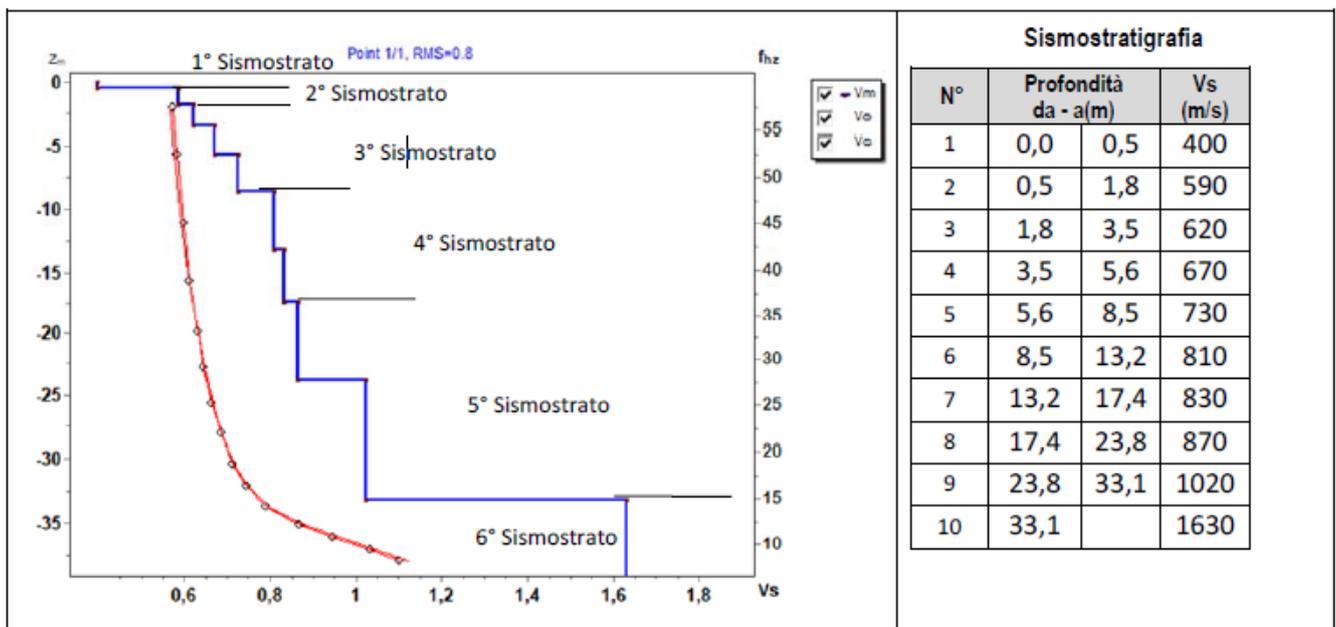
8.3. Risultati delle indagini del sito SMT01

8.3.1. Masw SMT01

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT01, 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 – 0,5	1° sismostrato con Vs di 400 m/s , Terre molto addensate
0,5 – 1,8	2° sismostrato con Vs di 590 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
1,8 – 8,5	3° sismostrato con Vs tra 620 e 730 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
8,5 – 17,4	4° sismostrato con Vs tra 810 e 830 m/s , Substrato roccioso intensamente fratturato
17,4 – 33,1	5° sismostrato con Vs tra 870 e 1020 m/s , Substrato roccioso fratturato
>33,1	6° sismostrato con Vs di 1630 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M1 - PROFILO Vs



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 Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **8,5 m** ($V_s > 800$ m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **8,5 m** di profondità dal p.c. è pari a: **$V_{s,eq} = 8,5/0,0133 = 638$ m/s** che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-0,5	terre	1.600	800	400	0,33	686	82	255	686
2	0,5-1,8	10%	1.700	1.180	590	0,33	1.579	158	588	1.579
3	1,8-8,5	15%	1.800	1.350	675	0,33	2.187	328	824	2.187
4	8,5-17,4	20%	2.000	1.640	820	0,33	3.589	718	1.344	3.589
5	17,4-33,1	25%	2.100	1.890	945	0,33	5.001	1.250	1.873	5.001
6	>33,1	30%	2.200	3.260	1.630	0,33	15.583	4.675	5.845	15.583

Figura 15 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs 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.

$$N_{SPT} = \left(\frac{V_s}{30,6} \right)^{3,021} \text{ valida per i terreni prevalentemente sabbiosi - Imai (1977)}$$

8.3.2. Rifrazione SMT01 e Tomografia elettrica SMT01

Nella sezione di sismica a rifrazione **STM01** 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 2,0/4,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,0/4,0 a 8,0/12,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 8,0/12,0 a 13,0/16,0	1800-2200
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 13,0/16,0 a 20,0/24,0	2200-2800

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 2800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori compresi tra 2,0 e 4,0 metri da p.c e un andamento quasi parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 8,0 e 12,0 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 13,0 e 16,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato

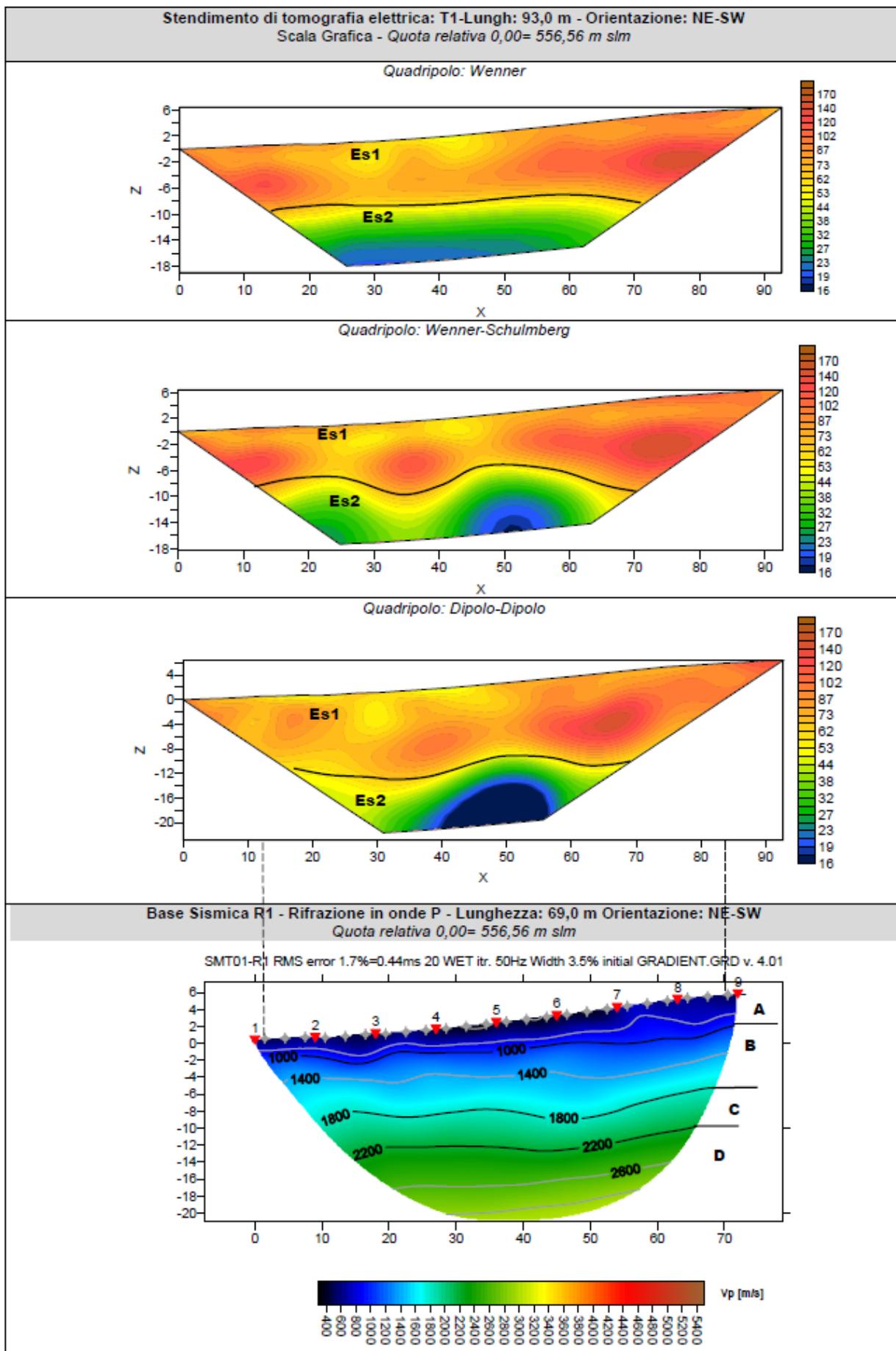
AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 35 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alla massima profondità di indagine, ovvero 20,0/24,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 8,0 e 12,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 13,0 e 16,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

La sezione di tomografia elettrica T1, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medie; nello specifico si rileva di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 8,0/12,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali e rocce tenere o intensamente fratturate, caratterizzati da resistività media con valori tra 50 e 180 $\Omega \cdot m$; segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori bassi di resistività (tra 16 e 50 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza del substrato roccioso.

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



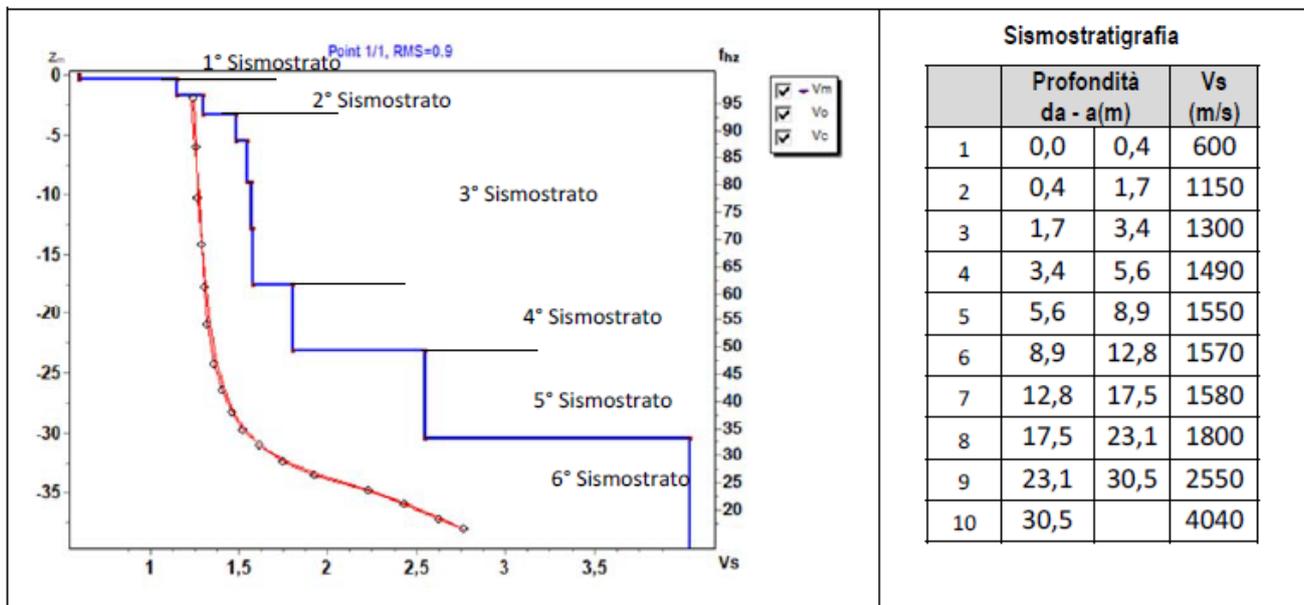
8.4. Risultati delle indagini del sito SMT02

8.4.1. Masw SMT02

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT02, 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
0,0 – 0,4	1° sismostrato con Vs di 600m/s, Terre molto addensate
0,4 – 3,4	2° sismostrato con Vs tra 1150 e 1300 m/s, Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
3,4 – 17,5	3° sismostrato con Vs tra 1490 e 1580 m/s Substrato roccioso sano
17,5 – 23,1	4° sismostrato con Vs di 1800 m/s, Substrato roccioso sano
23,1 – 30,5	5° sismostrato con Vs di 2550 m/s, Substrato roccioso sano
>30,5	6° sismostrato con Vs di 4040 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M2 - PROFILO Vs



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 Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **0,4 m** ($V_s > 800$ m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

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	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-0,4	terre	1.800	1.200	600	0,33	1.726	208	647	1.726
2	0,4-3,4	15%	1.900	2.450	1.225	0,33	7.600	1.140	2.854	7.600
3	3,4-17,5	20%	2.000	3.070	1.535	0,33	12.563	2.513	4.717	12.563
4	17,5-23,1	25%	2.100	3.600	1.800	0,33	18.143	4.536	6.806	18.143
5	23,1-30,5	30%	2.200	5.100	2.550	0,33	38.148	11.445	14.308	38.148

Figura 16 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs 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.

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

8.4.2. Rifrazione SMT02 e Tomografia elettrica SMT02

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT02** 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 1,0/2,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 3,0/6,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/6,0 a 4,0/8,0	1800-2200
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 4,0/8,0 a 20,0/22,0	2200-4800

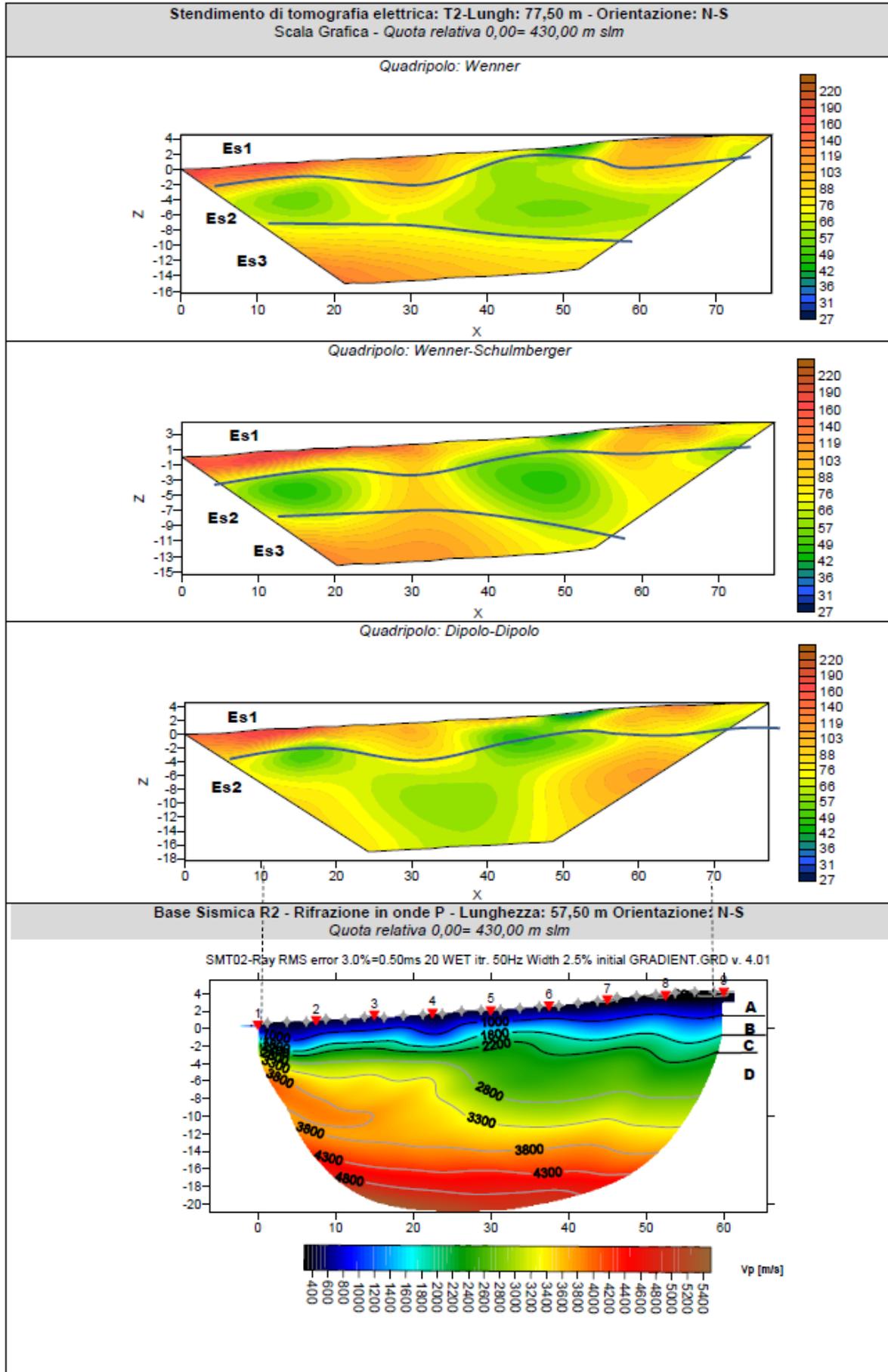
Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori molto ridotti compresi tra 1,0 e 2,0 metri da p.c e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta leggerissime variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 3,0 e 6,0 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 4,0 e 8,0 m di profondità dal p.c. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte e si riscontra fino alla massima profondità di indagine, ovvero 20,0/22,0 m dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 39 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 3,0 e 6,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 4,0 e 8,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

La sezione di tomografia elettrica T2, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medie; nello specifico si rileva la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 3,0/4,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali con valori tra 80 e 220 $\Omega \cdot m$, segue un secondo elettrostrato (Es2) sino a circa 8 m di profondità caratterizzato da valori inferiori di resistività (tra 40 e 80 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza di rocce tenere/fratturate e chiude la sequenza un terzo elettrostrato caratterizzato da valori crescenti di resistività riconducibile al substrato roccioso.

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



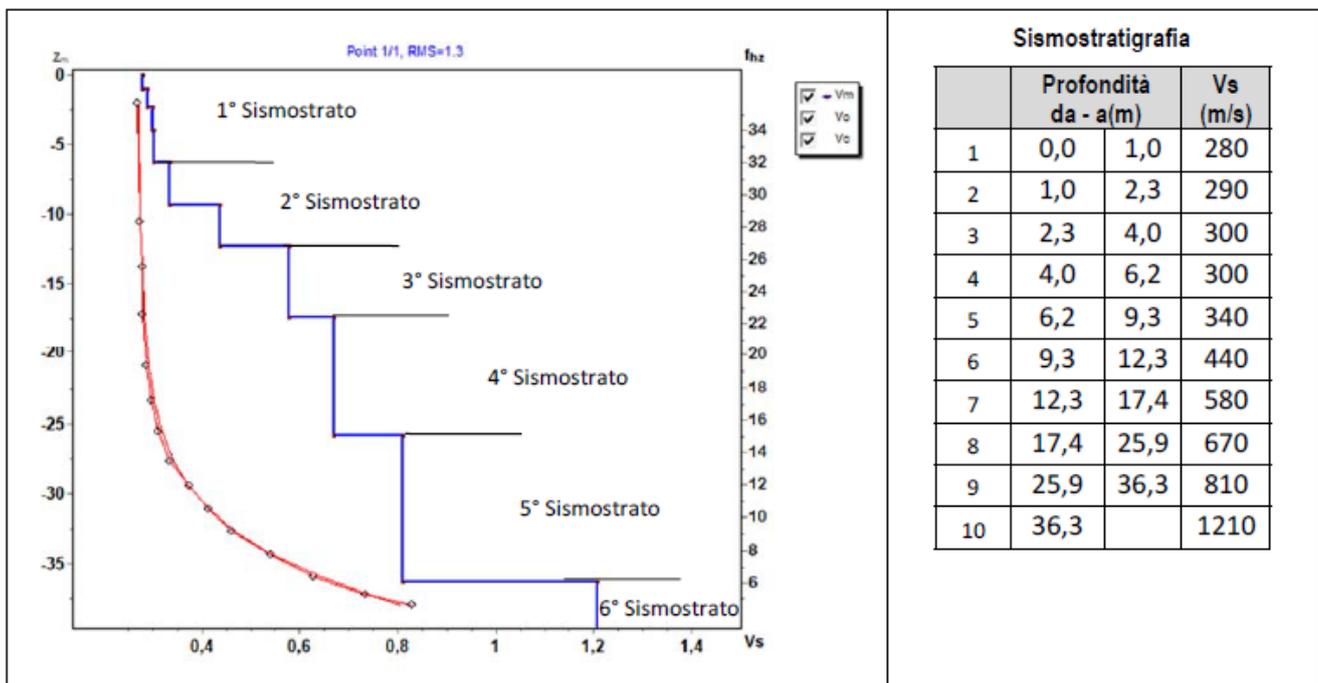
8.5. Risultati delle indagini del sito SMT03

8.5.1. Masw SMT03

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT03, 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
0,0 – 6,2	1° sismostrato con Vs tra 280 e 300 m/s , Terre poco addensate
6,2 – 12,3	2° sismostrato con Vs tra 340 e 440 m/s , Terre mediamente addensate
12,3 – 17,4	3° sismostrato con Vs di 580 m/s Roccia tenera e/o intensamente fratturata
17,4 – 25,9	4° sismostrato con Vs di 670 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
25,9 – 36,3	5° sismostrato con Vs di 810 m/s , Substrato roccioso intensamente fratturato
>36,3	6° sismostrato con Vs di 1210 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M3 - PROFILO Vs



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 Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **25,9 m** ($V_s > 800$ m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **25,9 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 25,9 / 0,0586 = 442$ m/s che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-6,2	terre	1.600	580	290	0,33	363	44	137	363
2	6,2-12,3	terre	1.700	780	390	0,33	686	82	255	686
3	12,3-17,4	10%	1.900	1.160	580	0,33	1.706	171	637	1.706
4	17,4-25,9	15%	1.900	1.340	670	0,33	2.275	341	853	2.275
5	25,9-36,3	15%	2.000	1.620	810	0,33	3.501	525	1.314	3.501
6	>36,3	20%	2.100	2.420	1.210	0,33	8.198	1.640	3.079	8.198

Figura 17 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e Nspt, 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.

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

8.5.2. Rifrazione SMT03 e Tomografia elettrica SMT03

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT03** 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 10,0/11,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 10,0/11,0 a 19,0/20,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 19,0/20,0 a 20,0/24,0	1800-2200

Dall'esame della sezione si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 2200 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori elevati compresi tra 10,0 e 11,0 metri da p.c e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta anch'esso un andamento parallelo al piano campagna e leggerissime variazioni di spessore, si rileva fino a profondità comprese tra 19,0 e 20,0 m dal p.c.

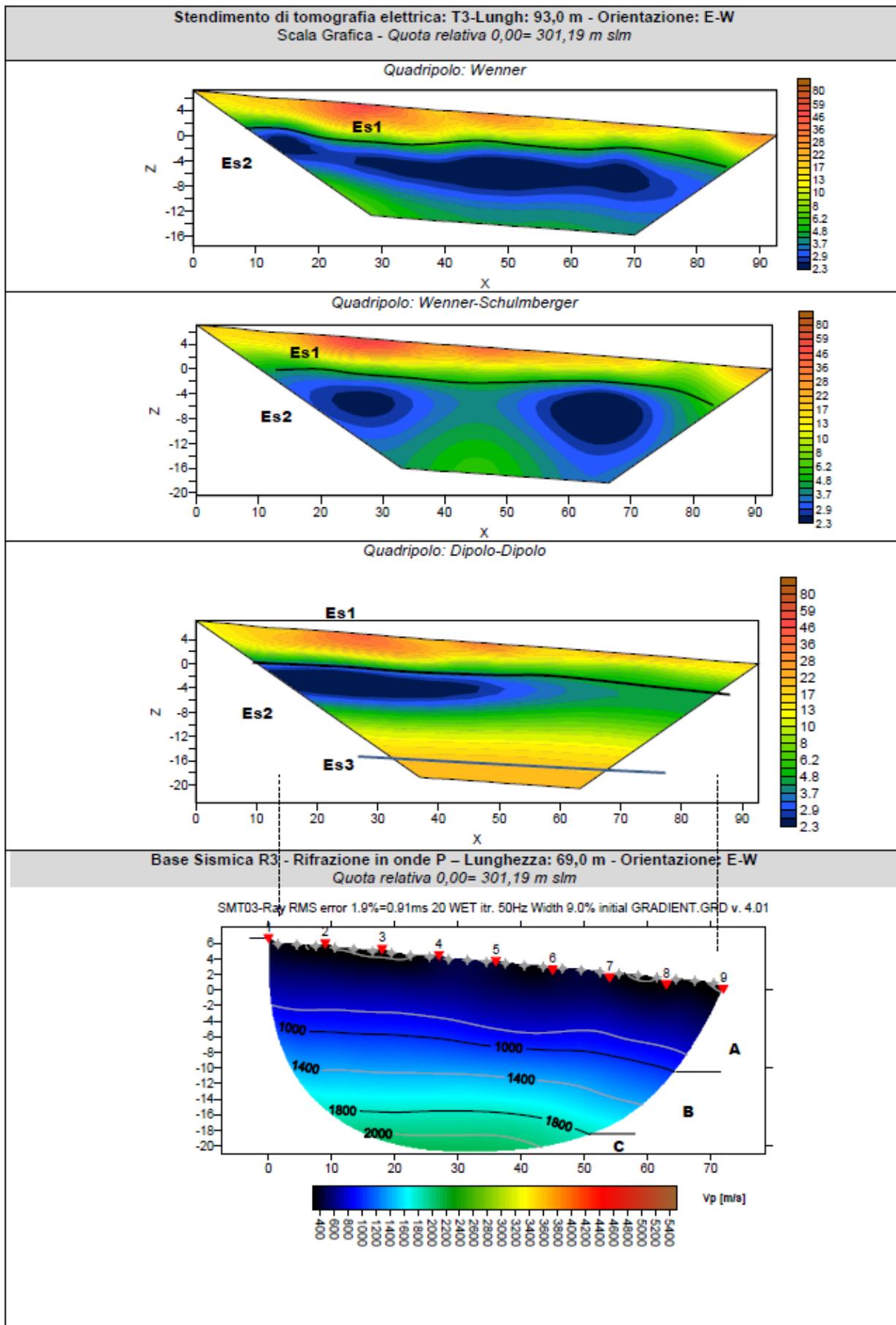
AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 43 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si riscontra fino alla massima profondità di indagine, ovvero 20,0/24,0 m di profondità dal p.c. Dall'osservazione della sezione sismica si osservano nel complesso valori di Vp abbastanza bassi, riconducibili alla presenza di elevati spessori di terre, seguiti da rocce tenere e/o intensamente fratturate.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che tutti i terreni sono rippabili; in particolare fino a profondità comprese tra 19,0 e 20,0 m dal p.c i terreni risultano rippabili e, solo oltre tale profondità, si risconterà la presenza di materiale difficilmente rippabile.

La sezione di tomografia elettrica T3, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medio bassa; nello specifico si distingue un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 6,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali con valori tra 10 e 80 $\Omega \cdot m$, segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori molto bassi di resistività (tra 2 e 10 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza di terreni e rocce alternati (argille?) e chiude la sequenza un terzo elettrostrato (ES3) ben individuabile nella configurazione Dipolo-Dipolo caratterizzato da valori crescenti di resistività riconducibile al substrato roccioso.

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

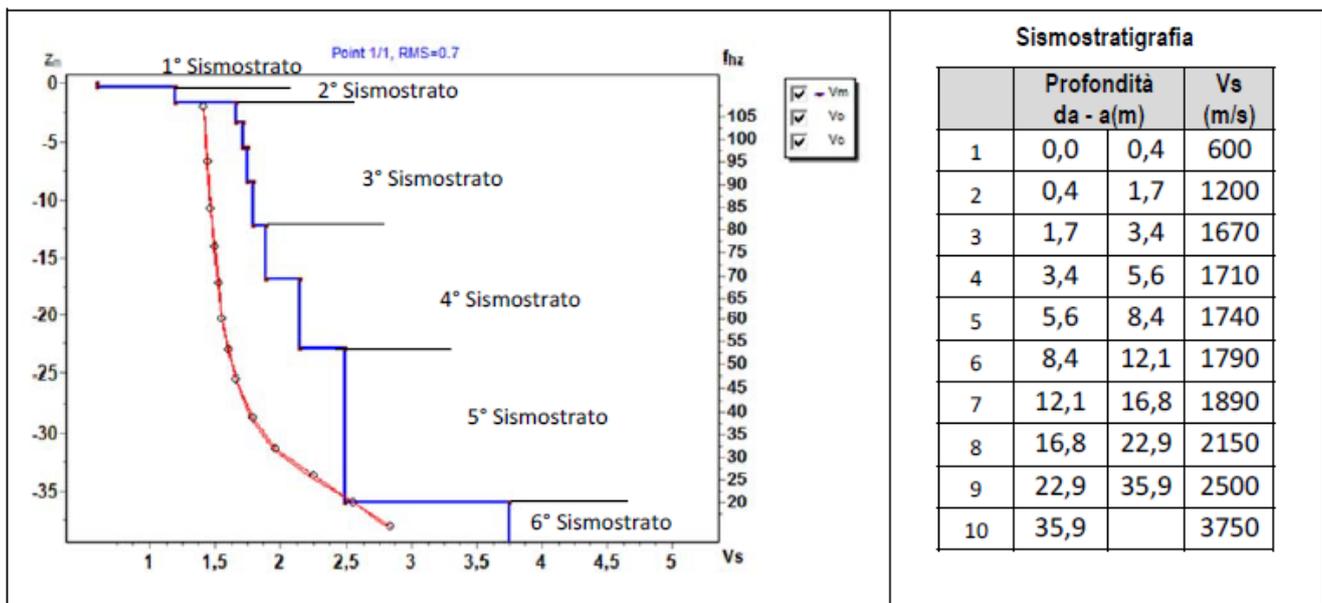


8.6. Risultati delle indagini del sito SMT04

8.6.1. Masw SMT04

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali V_s dello stendimento SMT04, 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 .

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 – 0,4	1° sismostrato con V_s di 600 m/s , Terre molto addensate e/o roccia intensamente fratturata
0,4 – 3,4	2° sismostrato con V_s tra 1200 e 1670 m/s , Substrato roccioso fratturato
3,4 – 12,1	3° sismostrato con V_s tra 1710 e 1790 m/s Substrato roccioso sano
12,1 – 22,9	4° sismostrato con V_s tra 1890 e 2150 m/s , Substrato roccioso sano
22,9 – 35,9	5° sismostrato con V_s di 2500 m/s , Substrato roccioso sano
>35,9	6° sismostrato con V_s di 3750 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M4 - PROFILO V_s 

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

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

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle V_s si pone come profondità del substrato **0,4 m** ($V_s > 800$ m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

Categoria A: Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.

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	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-0,4	terre	1.800	1.200	600	0,33	1.726	208	647	1.726
2	0,4-3,4	15%	1.900	2.870	1.435	0,33	10.434	1.565	3.913	10.434
3	3,4-12,1	25%	2.100	3.500	1.750	0,33	17.152	4.288	6.433	17.152
4	12,1-22,9	25%	2.100	4.040	2.020	0,33	22.850	5.712	8.571	22.850
5	22,9-35,9	30%	2.200	5.000	2.500	0,33	36.668	11.000	13.749	36.668

Figura 18 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e Nspt, 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.

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

15.6.2. Rifrazione SMT04 e Tomografia elettrica SMT04

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT04** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R4 Sismostrati	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 0,5/1,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 0,5/1,0 a 2,0/3,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,0/3,5 a 3,0/5,0	1800-2200
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 3,0/5,0 a 20,0/21,0	2200-4500

Dall'esame della sezione sismica si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori molto ridotti compresi tra 0,5 e 1,0 metri da p.c. e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta anch'esso spessori ridotti e si rileva fino a profondità comprese tra 2,0 e 3,5 m dal p.c. Il sismostrato C composto da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si osserva invece fino a profondità comprese tra 3,0 e 5,0 m di profondità dal p.c. con spessori sempre molto ridotti. Il sismostrato D rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte e si riscontra fino alla massima profondità di indagine, ovvero 20,0/21,0 m dal p.c.

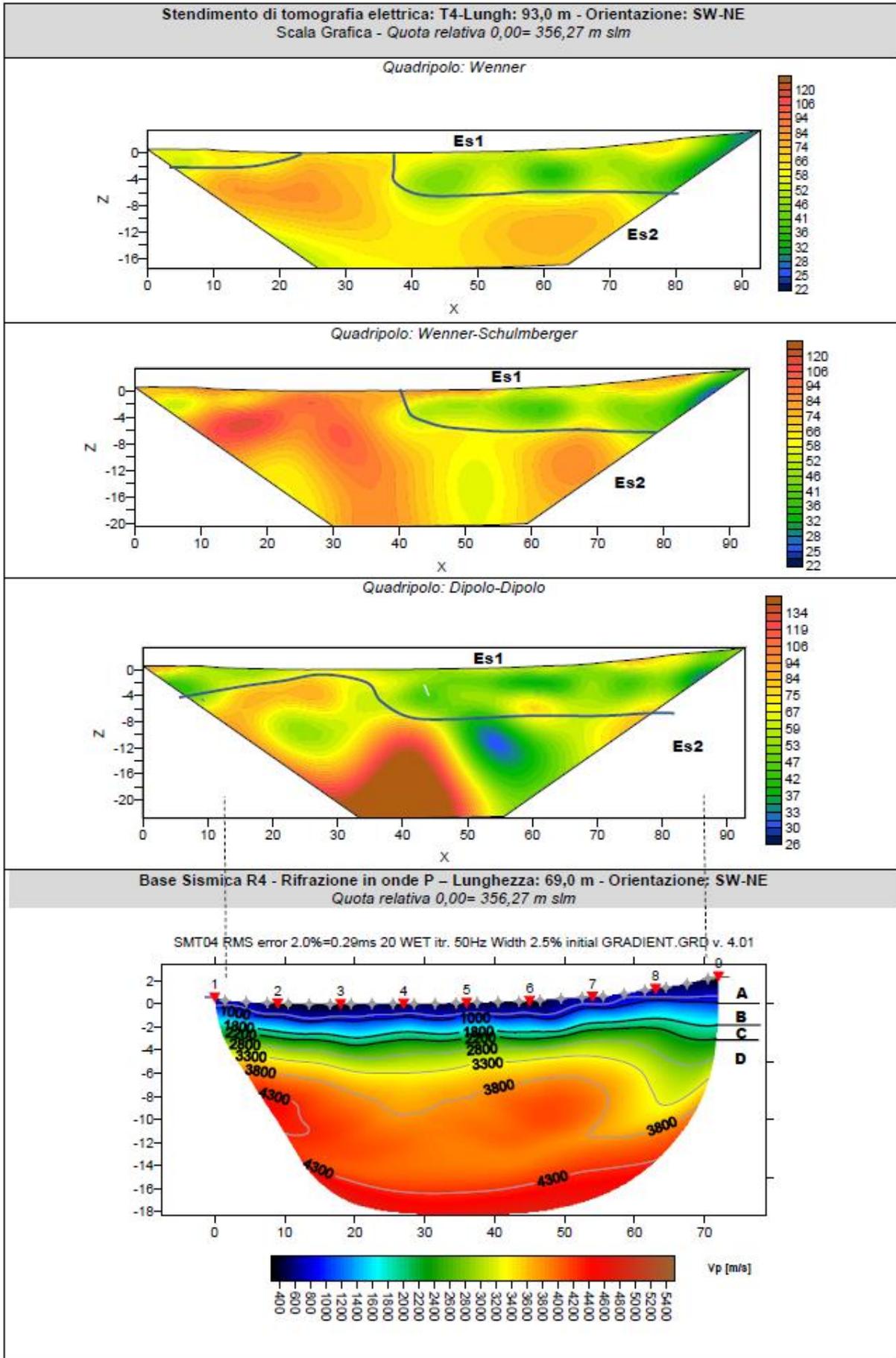
AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 47 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle Vp con valori alti già nei primi metri di profondità e con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

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

La sezione di tomografia elettrica T4, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medio bassa; nello specifico si rileva un primo elettrostrato (ES1) di spessore variabile e compreso tra 2,0 e 6,0 m riconducibile sia alla coltre di terreni superficiali che al capellaccio delle substrato roccioso con valori tra 30 e 60 $\Omega \cdot m$, segue un secondo elettrostrato (Es2) con locali variazioni di resistività presumibilmente legate alla presenza di zone fratturate/alterate con presenza d'acqua. In generale in questa tipologia di terreni la tomografia non riesce a discriminare le differenti litofacies probabilmente a causa del fatto che non sono caratterizzate da contrasti di resistività apprezzabili.

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



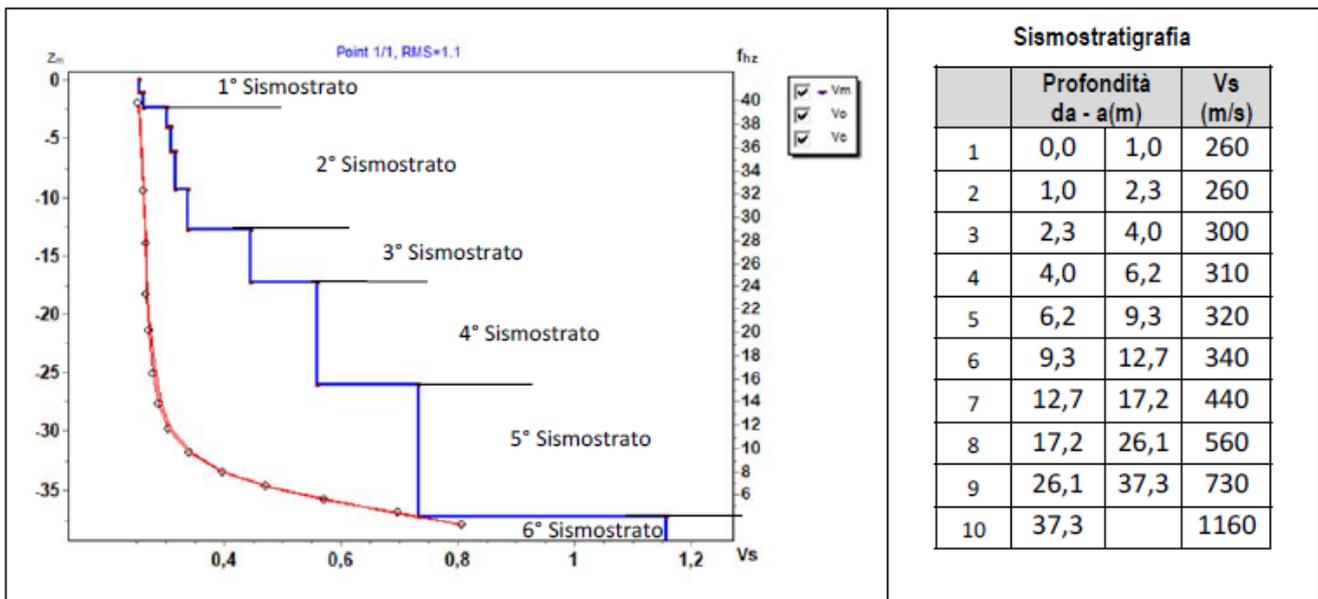
8.7. Risultati delle indagini del sito SMT05

8.7.1. Masw SMT05

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento SMT05, 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
0,0 – 2,3	1° sismostrato con Vs di 260 m/s , Terre poco addensate
2,3 – 12,7	2° sismostrato con Vs tra 300 e 340 m/s , Terre mediamente addensate
12,7 – 17,2	3° sismostrato con Vs di 440 m/s Terre molto addensate e/o roccia tenera o intensamente fratturata
17,2 – 26,1	4° sismostrato con Vs di 560 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
26,1 – 37,3	5° sismostrato con Vs di 730 m/s , Roccia intensamente fratturata
>37,3	6° sismostrato con Vs di 1160 m/s , Substrato roccioso debolmente fratturato

MASW M5 - PROFILO Vs



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 Vs non inferiore a 800 m/s.

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **37,3 m** ($V_s > 800$ m/s), per cui il valore della velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$:

$V_{s30} = 30,0/0,072708 = 412$ m/s che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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	Prof/zona	CT*	Densità γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,3	terre	1.600	520	260	0,33	284	34	108	284
2	2,3-12,7	terre	1.700	640	320	0,33	461	56	177	461
3	12,7-17,2	10%	1.800	880	440	0,33	932	93	353	932
4	17,2-26,1	15%	1.900	1.120	560	0,33	1.589	238	598	1.589
5	26,1-37,3	15%	2.000	1.460	730	0,33	2.844	427	1.069	2.844
6	>37,3	20%	2.100	2.320	1.160	0,33	7.532	1.506	2.824	7.532

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

Sulla base delle correlazioni fornite nei precedenti paragrafi è possibile stimare una correlazione tra Vs e Nspt, 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.

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

8.7.2. Rifrazione SMT05 e Tomografia elettrica SMT05

Nella sezione di sismica a rifrazione **SMT05** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R5 Sismostrati	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 6,0/11,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 6,0/11,0 a 24,0	1000-1800

Dall'esame della sezione sismica, si riconoscono 2 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 1800 m/s. Il sismostrato A caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori elevati compresi tra 6,0 e 11,0 metri da p.c e un andamento quasi parallelo al piano campagna con deboli variazioni di spessore. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta anch'esso spessori elevati e si rileva fino alla massima profondità di indagine, ovvero 24,0 m dal p.c.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento graduale delle Vp con valori comunque bassi fino alla massima profondità di indagine. Si precisa che dai dati bibliografici è emerso che le rocce presenti in tale sito

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 51 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

appartengono alla Formazione di Mores (RES a): Calcareniti e calcari bioclastici appartenenti alla successione Oligo-Miocenica del Logudoro.

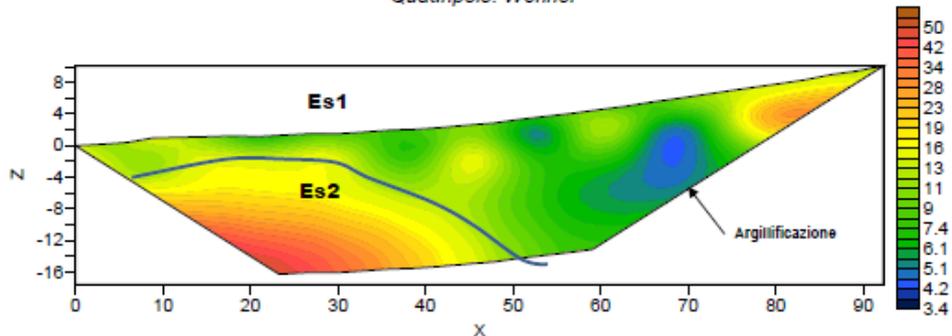
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che i terreni osservati sono facilmente rippabili fino alla massima profondità di indagine. Esclusivamente a 24,0 m di profondità dal piano campagna si inizia a riscontrare la presenza di materiale difficilmente rippabile.

La sezione di tomografia elettrica T5, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce in generale che le litologie locali sono caratterizzate da terreni a bassa resistività e nello specifico è possibile distinguere un primo elettrostrato (ES1) di spessore crescente da sinistra verso destra della sezione e compreso tra 2 e 15 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali e rocce fratturate/alterate con valori tra 2 e 10 $\Omega \cdot m$ interessati da intensa argillificazione e/o presenza d'acqua, segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori leggermente maggiori (sino a 50 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza di rocce tenere/fratturate.

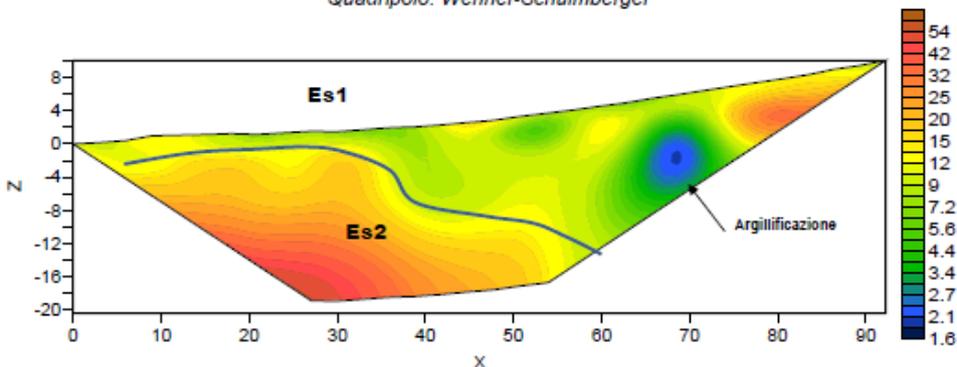
Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).

Stendimento di tomografia elettrica: T5-Lungh: 93,0 m - Orientazione: S-N
Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 249,37 m slm

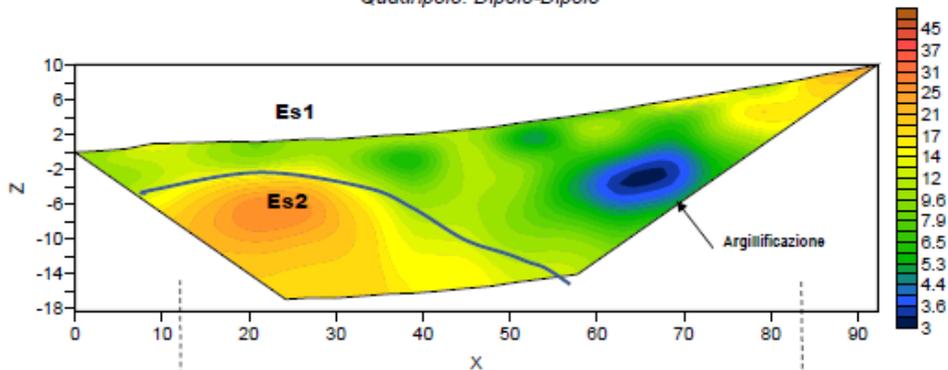
Quadripolo: Wenner



Quadripolo: Wenner-Schulberger

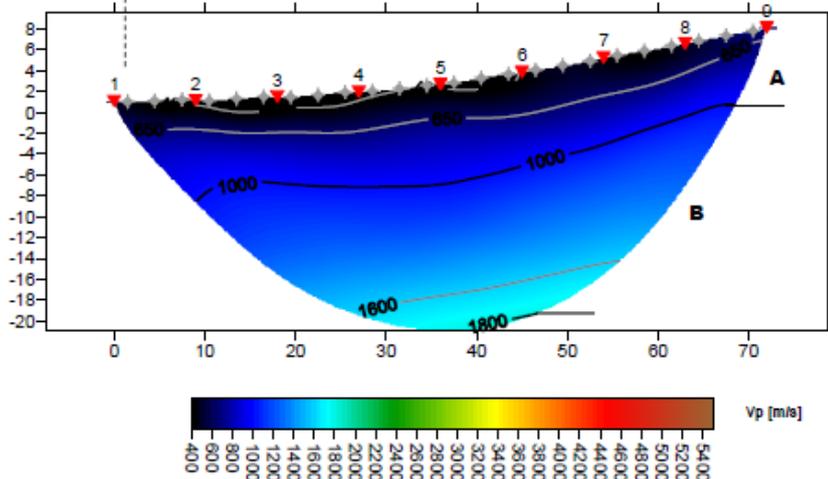


Quadripolo: Dipolo-Dipolo



Base Sismica R5 - Rifrazione in onde P – Lunghezza: 69,0 m - Orientazione: S-N
Quota relativa 0,00= 249,37 m slm

SMT05 RMS error 1.9%=0.75ms 20 WET itr. 50Hz Width 8.0% initial GRADIENT.GR0 v. 4.01



La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche ed elettriche. Lungo la verticale indagata si evince la presenza di sismostrati con velocità V_p e V_s in genere crescente con la profondità con andamento e spessori indicati nei precedenti paragrafi, mentre tutti i terreni e rocce incontrati sono caratterizzati da valori di resistività da medio bassa a bassa.

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

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	V_{seq} [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1	8,50	638	B
M2	0,4	>800	A
M3	25,9	442	B
M4	0,4	>800	A
M5	>30,0	412	B

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

L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione e di tomografia elettrica ha permesso di ricostruire l'assetto sismostratigrafico dei terreni. Nei precedenti paragrafi si illustrano i differenti sismostrati individuati dai quali è possibile distinguere i terreni delle coperture dal substrato roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che in R2 e R4 a partire da pochi metri dal p.c. si incontrano terreni non rippabili (v. anche Masw) mentre per R3 e R5 i terreni risultano rippabili sino a circa 15-18 m e infine in R1 sino a 13,0 m.

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

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

Tavola 1 : INQUADRAMENTO GENERALE DELLE AREE DI INDAGINE

Progetto: Parco eolico Aregu

Scala 1:25.000

Legenda

○ AREE DI INDAGINE

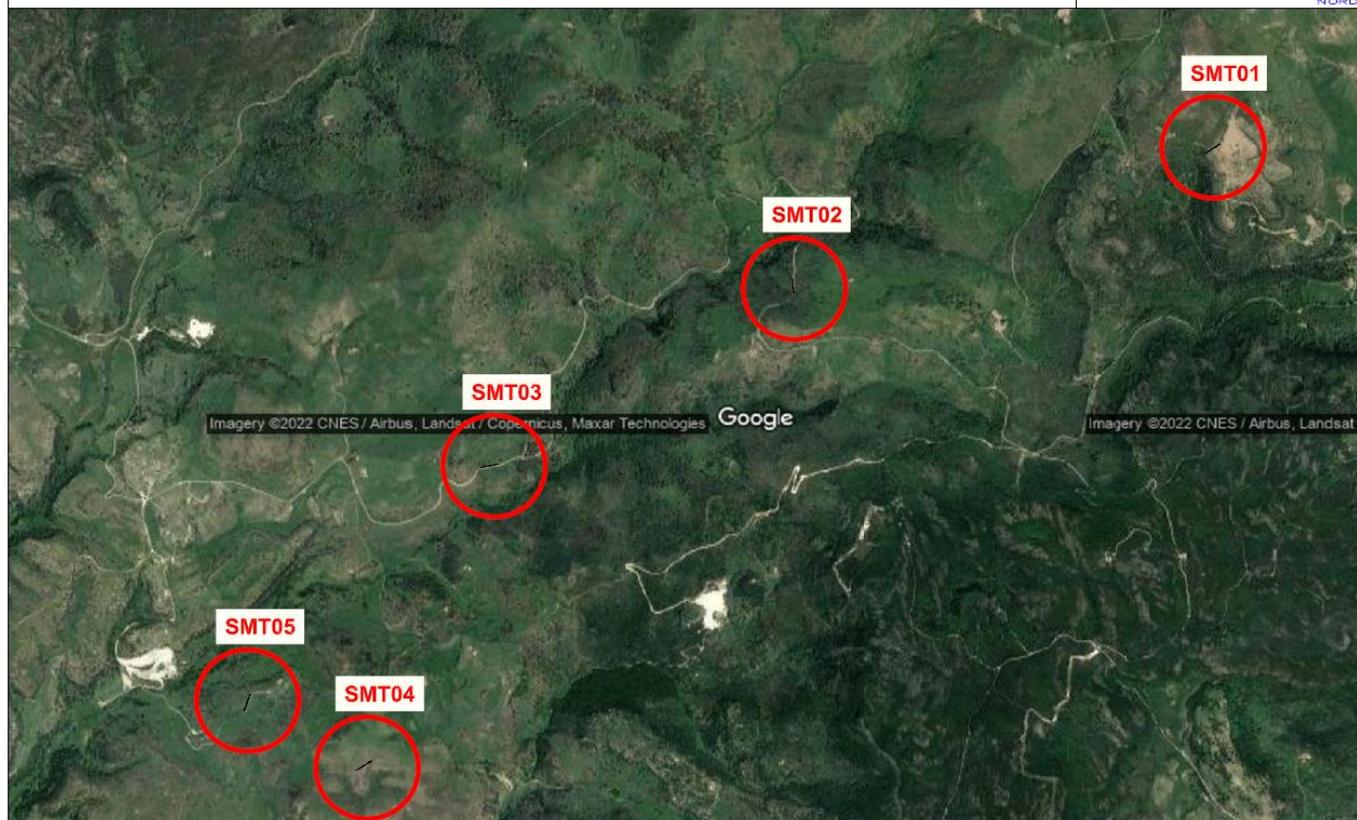
**Figura 20 - Ubicazione delle indagini geofisiche**

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

Progetto: Parco eolico Aregu

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M1 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T1 - Lunghezza = 93,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

Tavola 3 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SMT02)

Progetto: Parco eolico Aregu

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M2 - Lunghezza = 57,5 m

Stendimento T2 - Lunghezza = 77,5 m

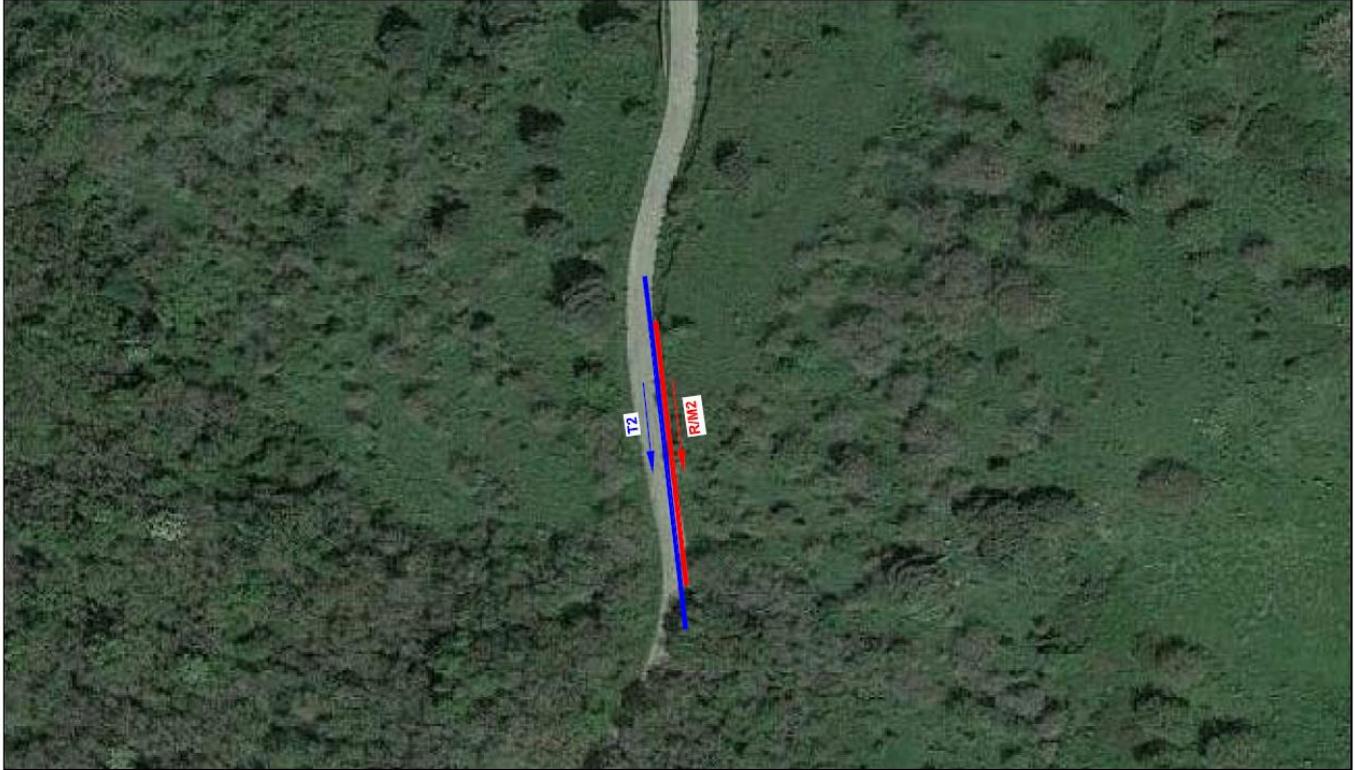
 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

Tavola 4 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SMT03)

Progetto: Parco eolico Aregu

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M3 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T3 - Lunghezza = 93,0 m

—> Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

—> Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

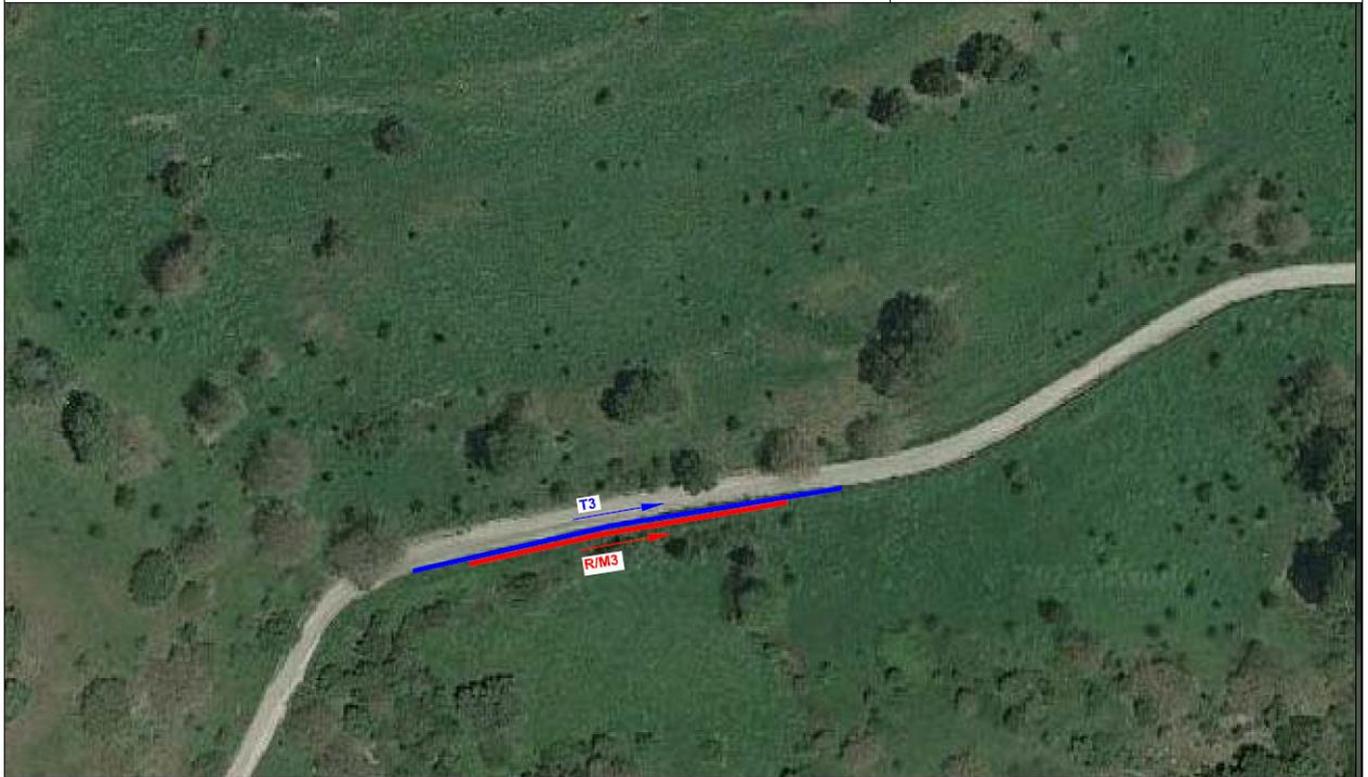


Tavola 5: PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SMT04)

Progetto: Parco eolico Aregu

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M4 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T4 - Lunghezza = 93,0 m

→ Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

→ Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo



Tavola 5: PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE (SMT05)

Progetto: Parco eolico Aregu

Scala 1:1000

Legenda

Stendimento R/M5 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento T5 - Lunghezza = 93,0 m

 Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 60 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

9. Modellazione geologica

9.1. Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi

Per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso al quale la fondazione delle turbine si appoggia, è stato adoperato il criterio di caratterizzazione dell'ammasso roccioso di Hoek-Brown generalizzato (1995), supportato dai dati geostrutturali rilevati in sito in pareti esposte, laddove disponibili, dai dati derivanti dai sondaggi geognostici.

Sulla base di tale classificazione, il cui criterio di rottura è definito dalla relazione seguente:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} (mb (\sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s)^a$$

dove:

σ'_1 e σ'_3 = sforzi efficaci principali rispettivamente massimo e minimo a rottura;

mb = costante d'ammasso

s ed a = costanti d'ammasso

σ_{ci} = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta

è stato possibile risalire ai parametri di coesione e angolo di attrito interno secondo Mohr- Coulomb.

Tale metodologia si basa su caratteristiche proprie dell'ammasso, valutabili tramite osservazioni in sito o con l'ausilio di tabelle sviluppate sulla base di una vasta raccolta di dati pubblicati in letteratura, attraverso cui è possibile stimare con una certa precisione i parametri di coesione e angolo di attrito interno necessari alle verifiche di stabilità, valutando i seguenti parametri:

1. Resistenza a compressione monoassiale (Intact Uniaxial Compressive Strength – IUCS) stimata su base empirica (Fig.60) e su valori di Point Load.
2. Stima dell'indice GSI (Geological Strength Index) in base alle caratteristiche geologiche dell'ammasso: tale indice, introdotto da Hoek, Kaiser e Bawden (1995), può esser definito sulla base delle caratteristiche dell'ammasso (Fig. 61) o sulla base di un controllo diretto con l'indice RMR della classificazione di Bieniawski.
3. Determinazione della costante m_i (Funzione del tipo di roccia): i valori delle costanti caratteristiche della roccia (σ_{ci} e m_i) vengono generalmente definiti sulla base di apposite prove di laboratorio, ma in assenza delle suddette, è possibile fare riferimento alla tabella di Fig.62, che riassume i valori della costante m_i per diversi tipi di roccia.

CLASSE [*]	DESCRIZIONE	RESISTENZA A COMPRESIONE MONOASSIALE (MPa)	INDICE DI RESISTENZA (POINT LOAD) (MPa)	VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA IN SITO	ESEMPI
R6	Resistenza estremamente elevata	> 250	> 10	Un campione può essere scheggiato solamente con un martello geologico	Basalto intatto, silice, selce, diabase, gneiss granito, quarzite
R5	Resistenza molto elevata	100-250	4-10	Un campione richiede molti colpi di un martello geologico per essere fratturato	Anfibolite, arenaria basalto, gabbro, gneiss, granodiorite calcare, marna riolite, tufi
R4	Resistenza elevata	50-100	2-4	Un campione richiede più di un martello geologico per essere fratturato	Calcare, marna, fillite, arenaria, scisto, argillite
R3	Resistenza media	25-50	1-2	Non può essere raschiato o spellato con un coltellino, un campione può essere fratturato con un solo colpo mediante un martello geologico	Argillite, carbone, calcestruzzo, scisto, siltite
R2	Resistenza bassa	5-25	[**]	Con difficoltà può essere spellato con un coltellino, una intaccatura superficiale può essere procurata con un colpo inferto mediante la punta di un martello geologico	Calcare bianco, salgemma
R1	Resistenza molto bassa	1-5	[**]	Si frantuma per effetto di alcuni colpi con la punta di un martello geologico, può essere spellato mediante un coltellino	Rocce estremamente alterate o alterate
R0	Resistenza estremamente bassa	0.25-1	[**]	Intagliato con l'unghia di un pollice	Miloniti, cataclasi

[*] In accordo a Brown E.T. Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods, pp. 171-183. Oxford, Pergamon (1981).
 [**] La prova meccanica point load su rocce con resistenza a compressione monoassiale inferiore a 25 MPa fornisce risultati poco attendibili.

Figura 21 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

DESCRIZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	CONDIZIONI SUPERFICIALI	MOLTO BUONE	BUONE	COPRITE	SCALDATE
Sulla base dell'aspetto della roccia, scegliere la categoria che si pensa da la migliore descrizione delle condizioni "reali" dell'ammasso roccioso presente in sito. Da notare che la superficie visibile della roccia ottenuta da una scava con esplosivo può dare una impressione fuorviante sulla qualità della roccia sottostante. Cionon pertanto, con ogni opportunità la valutazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso per tenere in conto il disturbo arrecato dallo scavo con esplosivo. A questo riguardo può essere utile l'esame di carotaggi ottenuti da perforazioni a circolazione continua con corone diamantate o l'osservazione della superficie creata da uno scavo realizzato con tecniche di accostamento controllato. È inoltre importante ricordare che il grado di rottura di Hoek-Brown dovrebbe essere applicato come la dimensione del "volume unitario" di ammasso roccioso molto piccola in confronto alle dimensioni dello scavo in considerazione.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature. MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.
STRUTTURA	CONDIZIONI SUPERFICIALI	MOLTO BUONE	BUONE	COPRITE	SCALDATE
A BLOCCHI - Ammasso roccioso indisturbato costituito da blocchi cubici, formati da tre famiglie di discontinuità tra loro ortogonali, con un elevato grado di mutuo incastro.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.
CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disturbato con blocchi angolari, mutuamente incastriati, con più sfaccettature formati da quattro o più famiglie di discontinuità.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.
A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.
DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.	MOLTO BUONE: Superficie molto scabra, sara, non abietta. BUONE: Superficie scabra, leggermente abietta, ossidata. COPRITE: Superficie liscia, moderatamente abietta. SCALDATE: Superficie di facile liscia (calcestruzzo), scisto, roccia alterata con fratture e intaccature.

Figura 22 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

Sulla base di queste caratteristiche si ottengono i seguenti valori di mb , s , a :

$$mb = mi [(GSI-100)/28]$$

$$s = e [(GSI-100)/(9-3D)]$$

$$a = 0,5 \text{ (per } GSI > 25)$$

tramite i quali si stimano coesione e angolo di attrito interno secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb:

$$\sigma'1 = (2c' \cos \phi' / 1 - \sin \phi') + (1 + \sin \phi' / 1 - \sin \phi') \sigma'3$$

I valori coesione e di angolo di attrito interno ottenuti attraverso l'applicazione di tale classificazione sono in generale rispondenti alla tipologia litologica interessata.

È utile sottolineare che esistono delle correlazioni dirette fra i valori di GSI e il valore RMR del sistema di classificazione di Bieniawski

TIPO DI ROCCIA	CLASSE	GRUPPO	TESSITURA			
			GROSSOLANA	MEDIA	FINE	MOLTO FINE
SEDIMENTARIE	Clastiche		Conglomerato (22)	Arenaria 19 Grovacche (18)	Siltite 9	Argillite 4
	Non clastiche	Organogene		Calcare bianco (7) Carbone (8-21)		
		Carbonatiche	Breccia(20)	Calcare Sparitico (10)	Calcare Micritico 8	
		Chimiche		Gesso 16	Anidride 13	
METAMORFICHE	Non foliate		Marmo 9	Hornfels (19)	Quarzite 24	
	Leggermente foliate		Migmatite (30)	Anfibolite 25-31	Miloniti (6)	
	Foliate*		Gneiss 33	Scisti 4-8	Filliti (10)	Scisti argillosi 9
IGNEE	Chiare		Granito 33		Riolite (16)	Ossidiana (19)
	Scure		Granodiorite (30)		Dacite (17)	
			Diorite (28)		Andesite 19	
		Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalto (17)		
		Norite 22				
	Effusive piroclastiche		Agglomerato (20)	Breccia (18)	Tufo (15)	

Questi valori sono validi per campioni di roccia intatta portati a rottura applicando il carico normale alla stratificazione o scistosità. Il valore di m, sarà sensibilmente inferiore se la rottura avviene lungo un piano di debolezza

Figura 23 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia

<p>Criterio di rottura empirico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{u(r)}\sigma_3 + s\sigma_{u(r)}^2}$ <p>σ_1 = tensione efficace principale massima σ_3 = tensione efficace principale minima $\sigma_{u(r)}$ = resistenza a compressione monoassiale m ed s: costanti empiriche</p>	COSTANTI DEL MATERIALE: m, s	<p>ROCCIE CARBONATICHE CON CLIVAGGIO CRISTALLINO BEN SVILUPPATO</p> <p>Dolomite, calcare e marmo.</p>	<p>ROCCIE ARGILLOSE LITIFICATE</p> <p>Argillite, siltite, scisti argillosi con clivaggio ben marcato.</p>	<p>ROCCIE ARENACEE CON ELEVATA CRISTALLIZZAZIONE E LIMITATO SVILUPPO DI CLIVAGGIO PER CRISTALLIZZAZIONE</p> <p>Arenarie e quarzite</p>	<p>ROCCIE CRISTALLINE IGNEE E GRANA FINE</p> <p>Andesite, dolerite, diabase e riolite</p>	<p>ROCCIE IGNEE A GRANA GROSSOLANA E ROCCIE CRISTALLINE METAMORFICHE</p> <p>Amfibolite, gabbro, gneiss, novite, quarzo-clorite</p>
<p>CAMPIONI DI ROCCIA INTATTA</p> <p>Campioni di laboratorio senza discontinuità (matrice rocciosa)</p> <p>Indice CSIR: RMR = 100</p> <p>Indice NGI: Q = 500</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>7.00</p> <p>1.00</p>	<p>10.00</p> <p>1.00</p>	<p>15.00</p> <p>1.00</p>	<p>17.00</p> <p>1.00</p>	<p>25.00</p> <p>1.00</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI OTTIMA QUALITÀ</p> <p>Ammasso roccioso indisturbato con giunti non alterati di spaziatura compresa fra 1 e 3 m</p> <p>Indice CSIR: RMR = 65</p> <p>Indice NGI: Q = 100</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>2.40</p> <p>0.082</p>	<p>3.43</p> <p>0.062</p>	<p>5.14</p> <p>0.062</p>	<p>5.82</p> <p>0.062</p>	<p>8.56</p> <p>0.062</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ</p> <p>Roccia sana o leggermente alterata, leggermente disturbato con giunti di spaziatura compresa fra 1 e 3 m.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 65</p> <p>Indice NGI: Q = 10</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.575</p> <p>0.00293</p>	<p>0.821</p> <p>0.00293</p>	<p>1.231</p> <p>0.00293</p>	<p>1.395</p> <p>0.00293</p>	<p>2.052</p> <p>0.00293</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI DISCRETA QUALITÀ</p> <p>Numerose famiglie di giunti moderatamente alterati, con spaziature comprese fra 0.3 e 1 m.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 44</p> <p>Indice NGI: Q = 1</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.128</p> <p>0.00009</p>	<p>0.183</p> <p>0.00009</p>	<p>0.275</p> <p>0.00009</p>	<p>0.311</p> <p>0.00009</p>	<p>0.458</p> <p>0.00009</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ SCADENTE</p> <p>Numerosi giunti alterati con spaziatura compresa fra 30 e 500 mm, alcuni con riempimento. Detrito di roccia pulita compattata.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 23</p> <p>Indice NGI: Q = 0.1</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.029</p> <p>0.000003</p>	<p>0.041</p> <p>0.000003</p>	<p>0.061</p> <p>0.000003</p>	<p>0.069</p> <p>0.000003</p>	<p>0.102</p> <p>0.000003</p>
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ MOLTO SCADENTE</p> <p>Numerosi giunti molto alterati con spaziatura inferiore a 50 mm e con riempimento. Detrito di roccia con materiale fine.</p> <p>Indice CSIR: RMR = 3</p> <p>Indice NGI: Q = 0.01</p>	<p>m</p> <p>s</p>	<p>0.007</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.010</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.015</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.017</p> <p>0.0000001</p>	<p>0.025</p> <p>0.0000001</p>

CSIR (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization) Organizzazione Scientifica ed Industriale di Ricerca (Bieniawski 1974)
NGI Norway Geotechnical Institute (Barton 1974)

Figura 24 Correlazione fra valori di m, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 64 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

L'analisi delle caratteristiche geomeccaniche in sito degli ammassi rocciosi interessati dal progetto e l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso ha portato alla classificazione di nr. **1 tipologia** tra le litologie che caratterizzano le formazioni presenti.

Per il calcolo degli indici e della relativa trasformazione in parametri di coesione e angolo di attrito interno secondo Mohr- Coulomb è stato utilizzato il software RocData vers.3.0 della Rocscience Inc.

Di seguito si riportano gli schemi di analisi degli ammassi rocciosi e i relativi diagrammi di Mohr –Coulomb, in base alle osservazioni su campo e unitamente ai dati ottenuti dalle prospezioni geofisiche, si è ipotizzata una variazione del grado di fratturazione del substrato al variare della profondità per unità omogenee in relazione anche ai dati geofisici, che vanno dalle “terre debolmente addensate” al “substrato roccioso sano”.

Nello specifico: nel livello S1, che come da descrizione sulla relazione geofisica viene indicato come “terre debolmente addensate”, è stato considerato un valore estremamente basso di sgci (valore indicativo della resistenza a compressione uniassiale) poichè non si tratta di un materiale litoide.

Nei livelli S2 e S3 l'sgci è stato riportato come da osservazioni e classifica speditiva di campo in base al fatto che “il campione di roccia si rompe con pochi colpi di martello” (rif. Fig.49).

Nei livelli S4 e S5 il valore sgci cresce poichè si passa gradualmente dalla roccia fratturata al substrato roccioso sano e inalterato. Il secondo valore che varia al variare della profondità è il GSI, tale valore dà indicazioni sullo stato di fratturazione della roccia, in questo caso unicamente nel livello S1 non si è tenuto conto di questo valore poichè trattasi di terre sciolte, mentre dal livello S2 al livello S5 si passa da “disintegrated” a “intact or massive”(rif Fig.50). *Si tratta di valori stimati in base a indagini indirette e a osservazioni su campo, pertanto da confermare puntualmente in fase di progettazione esecutiva.*

Formazione di Mores

Standard ISRM = R4 Un campione richiede pochi colpi di martello per essere fratturato

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= da poco a fratturato

Struttura= massiccia

Alterazione= poco alterata

Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – da asciutta a umida

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial compressive strength = 140 MPa
GSI = 85 $m_i = 9$ Disturbance factor = 0.7

Hoek-Brown Criterion

$m_b = 3.947$ $s = 0.1137$ $a = 0.500$

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 12.799 MPa friction angle = 36.93 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -4.034 MPa
uniaxial compressive strength = 47.176 MPa
global strength = 51.270 MPa
modulus of deformation = 48743.12 MPa

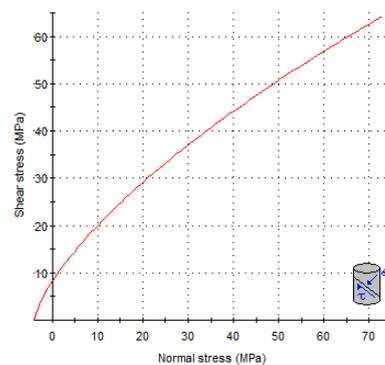
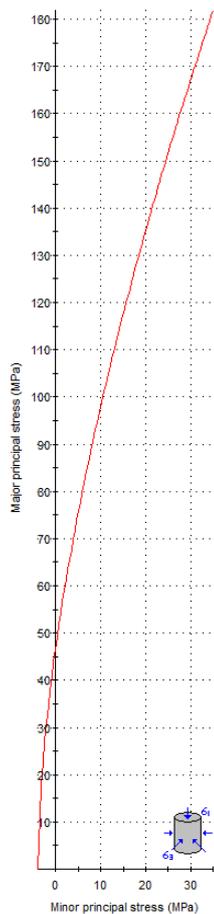


Figura 25 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData la formazione di Mores

Unità di Chelchedu-Tiloromo

Standard ISRM = R4 Molto resistente (>100Mpa)

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= poco fratturato e mediamente alterato

Struttura= massiccia

Alterazione= poco alterato

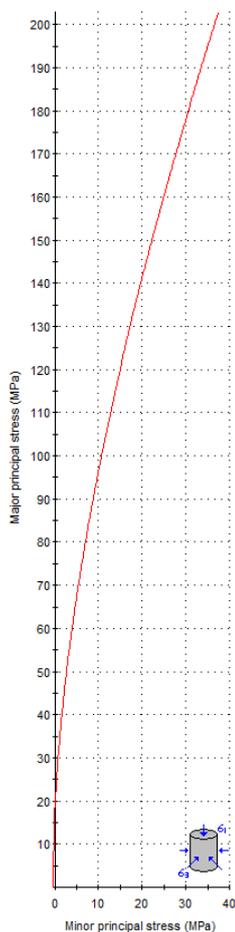
Spaziatura totale delle discontinuità (s)= 0,35 m

Lunghezza media del giunto = 2 m

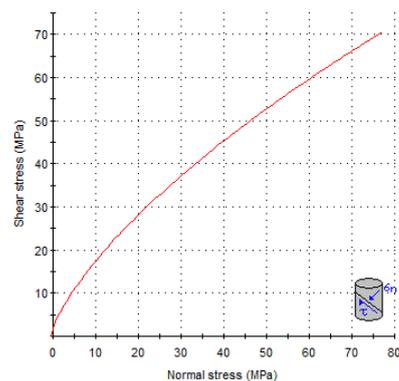
Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto/assente

Roccia – da asciutta a umida

Analysis of Rock/Soil Strength using RocData**Hoek-Brown Classification**intact uniaxial compressive strength = 150 MPa
GSI = 70 $m_i = 25$ Disturbance factor = 0.7**Hoek-Brown Criterion** $m_b = 4.809$ $s = 0.0129$ $a = 0.501$ **Mohr-Coulomb Fit**

cohesion = 10.691 MPa friction angle = 39.50 deg

Rock Mass Parameterstensile strength = -0.403 MPa
uniaxial compressive strength = 16.960 MPa
global strength = 45.334 MPa
modulus of deformation = 20554.80 MPa**Figura 26 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData la formazione di Chelchedu-Tiloromo**

Unità di Uri

Standard ISRM = Mediamente resistente (45Mpa)

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= poco fratturato e mediamente alterato

Struttura= massiccia

Alterazione= da mediamente alterato a molto alterato

Spaziatura totale delle discontinuità (s)= 1,3 m

Lunghezza media del giunto = >3 m

Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – da asciutta a umida

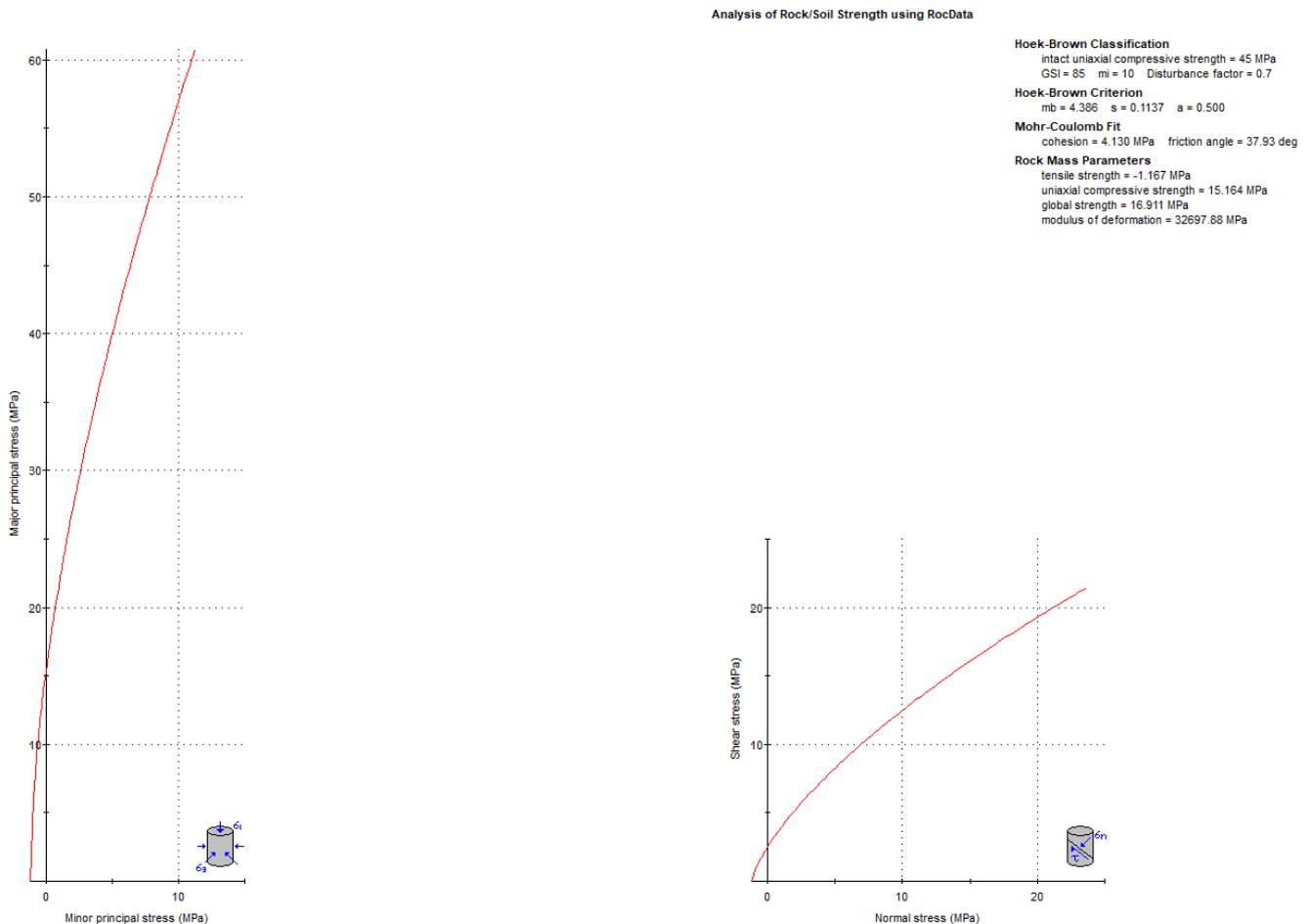


Figura 27 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti utilizzando il software RocData la formazione di Uri

9.2. Viabilità di impianto e sottostazione

La viabilità di impianto è stata scelta utilizzando dei tracciati preesistenti che verranno adeguatamente ridefiniti nelle sezioni nella misura utile e funzionale al servizio destinato con particolare riferimento alla fase di realizzazione del parco ove avverrà la maggior se non totale movimentazione di carichi e mezzi. La stessa viabilità sarà mantenuta in fase di esercizio.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 68 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

La viabilità dovrà sopportare un peso per asse pari a 20,5 tonnellate/metro quadro, una pressione massima di circa 2 kg/cm. La carreggiata dovrà essere pari a 5 metri. La pendenza longitudinale massima della viabilità per strade con fondo sterrato o ghiaioso deve essere in condizioni ordinarie del 10% circa, la pendenza potrà essere del 12 % (16% pendenza massima in alcuni tratti) sia in rettilineo che in curva. La pendenza longitudinale minima sarà superiore o al più uguale al 0.5% per permette una rapida evacuazione delle acque superficiali dal manto stradale, che sarà in ogni caso permeabile. Si esclude l'uso di bitume.

Sostanzialmente tutta la viabilità si snoda lungo substrato roccioso con presenza in taluni casi di una copertura superficiale di terreno vegetale e /o roccia degradata con spessori variabili **da 0,00m a 4,00m**.

Per quanto riguarda a scavabilità del substrato roccioso esso nelle varie facies presenti e nella parte superficiale risulta quasi sempre da fratturato a molto fatturato per cui facilmente scavabile con ripper e martellone.

La possibile presenza di alcune saccature a forte componente argillosa suggerisce di prevedere opere di smaltimento delle acque superficiale adeguatamente dimensionate.

Il tracciato del cavidotto si snoda lungo aree pianeggianti e tracciati stradali esistenti. Il cavidotto in progetto andrà a interessare le coperture sedimentarie e vulcaniche del Miocene costituito dalle **Unità di Su Suerzu, di Uri, di Nuraghe Vittore** e dai **depositi quaternari**.

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 69 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

10. Modello geologico di sito

Sulla base di quanto emerso dai rilievi e dalle indagini in sito, nell'approccio progettuale, stante il contesto geologico si evidenziano le seguenti criticità a cui sarà necessario prestare la opportuna attenzione nella progettazione esecutiva dell'opera e nelle varie fasi di realizzazione.

L'analisi di tali fattori è funzionale alla progettazione e ha lo scopo di valutare la risposta del terreno ai nuovi carichi ed individuare azioni correttive o accorgimenti tali da limitarne gli effetti. Nello specifico:

1. Azioni sulle pareti e stabilità dei fronti. Lo scavo stesso, in quanto genera depressione, può innescare locali smottamenti in corrispondenza degli orizzonti meno competenti a causa di fenomeni di detensionamento determinati dall'asportazione del materiale durante l'escavazione, sia in relazione ai livelli meno competenti sia alle direzioni del sistema di fratturazione che può generare componenti a franapoggio. La profonda deformazione che le metamorfite hanno subito genera variazioni di giacitura anche nell'ordine del metro pertanto si ritiene importante in fase di realizzazione degli scavi di fondazione eseguire un dettagliato rilievo geostrutturale finalizzato all'esclusione di ogni possibile rischio di crollo e/o slittamento di porzioni di parete.
2. Circolazione idrica sotterranea secondaria o indotta e/o stagnazione di acque di pioggia – pur se non è stata rilevata in fase di indagine, vanno considerati gli effetti dell'eventuale presenza d'acqua alla quota di imposta delle fondazioni in relazione ad una possibile circolazione idrica indotta dai fenomeni di detensionamento dovuti agli scavi, con particolare riferimento alla stagionalità degli apporti idrici e del relativo flusso negli ambiti più superficiali. In tal caso, in fase esecutiva, sarà opportuno provvedere a mantenere lo scavo asciutto mediante l'installazione di pompe adeguatamente dimensionate per la portata da emungere.

L'analisi ha permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, è stato individuato **nr.4 modelli geologici rappresentativi** descritti di seguito:

10.1. Modello Geologico 01 – AG08/AG10/AG11

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico **SMT01** e le osservazioni in sito. Il modello interessa le formazioni **TSU** e **UUI**.

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di circa 0,50 in terre addensate si incontra un livello superficiale di roccia intensamente fratturata dallo spessore di circa 8,0m, il sottostante substrato roccioso fratturato prosegue fino ad una profondità di circa 17,40 m, quota verosimilmente di contatto stratigrafico fra le due formazioni riolitica (TSU) e piroclastica (UUI). Il substrato prosegue fratturato fino ad una profondità di circa 33m da p.c. oltre la quale le velocità Vs risultano oltre i 1600m/sec indicando roccia poco da fratturata a sana.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da range abbastanza ridotti e valori di resistività generalmente medio bassi. Nelle varie sezioni non si evidenziano anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione, che nel contesto in esame possono essere interpretate come dei settori caratterizzati dalla presenza di materiale maggiormente alterato (argillificazione)/fratturato rispetto alla roccia adiacente e/o alla presenza d'acqua. Altresì non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 8,0 e 12,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 13,0 e 16,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

TSU	0,00m – 2,00m	Roccia tenera e/o fratturata
	2,00m – 8,50m	Roccia tenera e/o intensamente fratturata
	8,50m – 17,40m	Substrato roccioso intensamente fratturato
UUI	17,40m – 33,10m	Substrato roccioso fratturato
	33,1m – in poi	Substrato roccioso sano

GIAVE/COSSOINE/CHERMULE - MODELLO GEOLOGICO 01 - AG08/AG10/AG11						
Dati Parametri Resistenza						
Tipo di Terreno		S1- Roccia tenera e/o fratturata	S2 – Roccia tenera e/o intensamente fratturata	S3 – Substrato roccioso intensamente fratturato	S4- Substrato roccioso fratturato	S5 – Substrato roccioso sano
Descrizione						
Peso di volume	[kg/mc]	1700	1800	2000	2200	2300
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1800	1900	2100	2300	2400
Angolo di attrito interno	[°]	22,67	26,01	35,04	40,52	43,71
Coesione	[Mpa]	1,218	2,011	2,815	3,257	3,620
Dati Parametri Deformabilità						
Modulo elastico	[Mpa]	1000	2190	3590	5000	15583
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	588	824	1344	1873	5845
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	590	675	820	945	1630

10.2. Modello Geologico 02 – AG03/AG04/AG05/AG09

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico **SMT02** e **SMT03** e le osservazioni in sito. Il modello interessa le formazioni andesitiche **TLR**.

A partire dal piano campagna si incontra un livello dello spessore di circa 6 m costituito da terre poco addensate con velocità Vs molto basse. Questa condizione seppur migliore si sviluppa fino a quota 12m da piano campagna. rocce tenere intensamente fratturate proseguono fino ad una profondità di circa 17,40 m, e successivamente fino a 36m profondità oltre la quale le velocità Vs risultano oltre i 1200m/sec indicando roccia poco da fratturata a sana.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei

precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da range abbastanza ridotti e valori di resistività generalmente molto bassi. Nelle varie sezioni non si evidenziano anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione, che nel contesto in esame possono essere interpretate come dei settori caratterizzati dalla presenza di materiale maggiormente alterato (argillificazione)/fratturato rispetto alla roccia adiacente e/o alla presenza d'acqua. Altresì non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità)

Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

TLR	0,00m – 6,20m	Terre poco addensate
	6,20m – 12,30m	Terre mediamente addensate
	12,30m – 17,40m	Roccia tenera intensamente fratturato
	17,40m – 36m	Substrato roccioso intensamente fratturato
	36,0m – in poi	Substrato roccioso sano

GIAVE/COSSOINE/CHERMULE - MODELLO GEOLOGICO 02 - AG03/AG04/AG05/AG09						
Dati Parametri Resistenza						
Tipo di Terreno		S1- Terre poco addensate	S2 – Terre mediamente addensate	S3 – Roccia tenera intensamente fratturato	S4- Substrato roccioso intensamente fratturato	S5 – Substrato roccioso sano
Descrizione						
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1900	1950	2100
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	2000	2150	2150
Angolo di attrito interno	[°]	24,55	32,06	35,50	39,42	42,30
Coesione	[Mpa]	0,075	7,738	10,520	22,284	25,755
Dati Parametri Deformabilità						
Modulo elastico	[Mpa]	363	683	1706	2888	8198
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	137	255	637	1084	3079
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	290	390	580	740	1210

10.3. Modello Geologico 03 – AG01

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico **SMT04** e le osservazioni in sito. Il modello interessa le formazioni andesitiche **NIA** e **RESa**.

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di circa 0,50 in terre molto addensate si incontra un livello superficiale di roccia fratturata dallo spessore di circa 3,0m, il sottostante substrato roccioso risulta poco o nulla fratturato prosegue fino ad una profondità di circa 22,90 m, quota verosimilmente di contatto stratigrafico fra le

due formazioni rioclastica (NIS) e carbonatica (RESa). L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da resistività medio bassa; nello specifico si rileva un primo elettrostrato (ES1) di spessore variabile e compreso tra 2,0 e 6,0 m riconducibile sia alla coltre di terreni superficiali che al capellaccio delle substrato roccioso, segue un secondo elettrostrato con locali variazioni di resistività presumibilmente legate alla presenza di zone fratturate/alterate con presenza d'acqua. Non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità). In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 2,0 e 3,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 3,0 e 5,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

NIA	0.00m – 0,40m	Terre molto addensate e/o roccia tenera intensamente fratturata
	0,40m – 3,40m	Substrato roccioso fratturato
	3,40m – 22,9m	Substrato roccioso sano
RESa	22,9m – in poi	Substrato roccioso sano

GIAVE/COSSOINE/CHERMULE - MODELLO GEOLOGICO 03 - AG01					
Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1- Terre molto addensate e/o roccia tenera intensamente fratturata	S2 Substrato roccioso fratturato	S3 - Substrato roccioso sano	S4- Substrato roccioso sano
Descrizione					
Peso di volume	[kg/mc]	1800	1900	2100	2200
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1900	2000	2100	2200
Angolo di attrito interno	[°]	29,25	36,95	41,21	49,78
Coesione	[Mpa]	0,400	14,230	26,104	32,285
Dati Parametri Deformabilità					
Modulo elastico	[Mpa]	1726	10434	20000	36668
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	647	3913	7502	13749
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	600	1435	1885	2500

10.4. Modello Geologico 04 – AG02, AG06, AG07

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico **SMT05** e le osservazioni in sito. Il modello interessa le formazioni carbonatiche **RESa**.

A partire dal piano campagna circa i primi 15m sono caratterizzati da velocità molto basse che definiscono un terreno da poco a mediamente addensato o rocce tenere molto fratturate ed alterate. A partire dalla profondità di 17m si presenta roccia tenere intensamente fratturata con fratturazione sempre meno evidente con l'aumentare della profondità. L'andamento è caratteristico di rocce carbonatiche interessate da alterazione e/o diversa composizione maggiormente friabile. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che i terreni osservati sono facilmente rippabili fino alla massima profondità di indagine. Esclusivamente a 24,0 m di profondità dal piano campagna si inizia a riscontrare la presenza di materiale difficilmente rippabile.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare lungo i vari stendimenti i diversi elettrostrati riportati e descritti nei precedenti paragrafi, caratterizzati in ogni caso da resistività molto bassa e nello specifico è possibile distinguere un primo elettrostrato (ES1) di spessore crescente da sinistra verso destra della sezione e compreso tra 2 e 15 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali e rocce fratturate/alterate con valori tra 2 e 10 $\Omega \cdot m$ interessati da intensa argillificazione e/o presenza d'acqua, segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori leggermente maggiori (sino a 50 $\Omega \cdot m$) riconducibile alla presenza di rocce tenere/fratturate.

Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità). Per quanto sopra considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione definitiva/esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

RESa	0,00m – 2,30m	Terre poco addensate
	2,30m – 12,70m	Terre mediamente addensate
	12,70m – 17,2m	Terre molto addensate e/o roccia tenera intensamente fratturata
	17,2m – 37,3m	Roccia tenera intensamente fratturata
	37,9m – in poi	Substrato roccioso debolmente fratturato

GIAVE/COSSOINE/CHERMULE - MODELLO GEOLOGICO 04 - AG02, AG06, AG07						
Dati Parametri Resistenza						
Tipo di Terreno		S1- Terre poco addensate	S2 – Terre mediamente addensate	S3 – Roccia tenera intensamente fratturato	S4- Roccia tenera intensamente fratturata	S5 – Substrato roccioso debolmente fratturato
Descrizione						
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1800	1950	2100
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	1900	2100	2200
Angolo di attrito interno	[°]	24,55	32,06	35,50	39,42	42,30
Coesione	[Mpa]	0,075	7,738	10,520	22,284	25,755
Dati Parametri Deformabilità						
Modulo elastico	[Mpa]	284	461	932	2217	7532
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33

Modulo di taglio (G)	[Mpa]	108	177	353	834	2824
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	260	320	440	645	1160

11. Descrizione dell'opera di fondazione degli aerogeneratori

Il dimensionamento preliminare, in attesa della scelta progettuale del committente, tiene conto del modello tipologico di aerogeneratore descritto in premessa.

In questa fase si prevede la realizzazione di opere di fondazione di tipo diretto costituite da un plinto con forma tronco-conica, con pianta circolare avente diametro massimo pari a 25,00 m ed una sezione trapezia avente altezza minima al bordo esterno pari a 0,50, altezza di 2,50m nel profilo della connessione della parte tronco-conica con il colletto centrale dove raggiunge i 3,50m d'altezza.

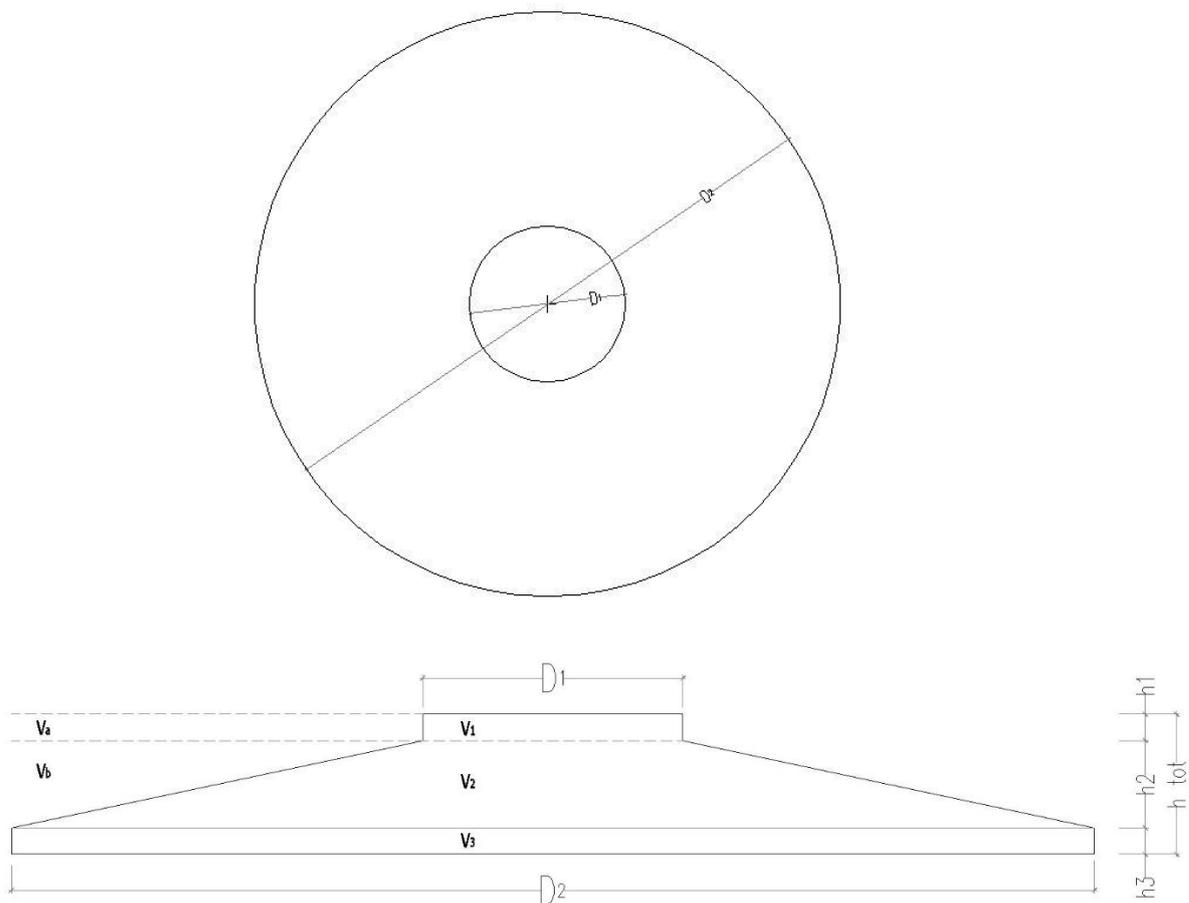


Figura 28 - Caratteristiche geometriche della fondazione

DATI GEOMETRICI FONDAZIONE:

diametro colletto =	$d_1 = 6,00 \text{ m}$
diametro esterno =	$d_2 = 25,00 \text{ m}$
altezza colletto =	$h_1 = 0,50 \text{ m}$
altezza intermedia =	$h_2 = 2,50 \text{ m}$
altezza alla base =	$h_3 = 0,50 \text{ m}$
altezza totale =	$h_{tot} = 3,50 \text{ m}$

12. Azioni e resistenze nelle verifiche agli stati limite

La nuova normativa sulle costruzioni prevede i coefficienti parziali γ_F relativi alle azioni indicati nella Tab. 6.2.I. Ad essi deve essere fatto riferimento con le precisazioni riportate nel § 2.6.1 delle NTC. Si deve comunque intendere che il terreno e l'acqua costituiscono carichi permanenti (strutturali) quando, nella modellazione utilizzata, contribuiscono al comportamento dell'opera con le loro caratteristiche di peso, resistenza e rigidezza.

Nella valutazione della combinazione delle azioni i coefficienti di combinazione ϕ_{ij} devono essere assunti come specificato nel Cap. 2.

Tabella 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni.

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Nel caso specifico di fondazioni superficiali come quella in progetto [6.4.2] "si considerano azioni sull'opera di fondazione quelle dovute al peso proprio del terreno e del materiale di riempimento, ai sovraccarichi, all'acqua, ad eventuali ancoraggi presollecitati, ad urti e collisioni, alle variazioni di temperatura e al ghiaccio.

Per quanto concerne i sovraccarichi si deve tener conto della eventuale presenza di costruzioni, di depositi di materiale, di veicoli in transito, di apparecchi di sollevamento.

Il valore di progetto della resistenza R_d può essere determinato:

- in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale γ_M specificato nella successiva Tab. 6.2.II e tenendo conto, ove necessario, dei coefficienti parziali γ_R specificati nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;
- in modo analitico, con riferimento a correlazioni con i risultati di prove in sito, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera;
- sulla base di misure dirette su prototipi, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R riportati nelle tabelle contenute nei paragrafi relativi a ciascun tipo di opera.

Per le rocce, al valore caratteristico della resistenza a compressione uniaassiale q_u deve essere applicato un coefficiente parziale $\gamma_{qu}=1,6$. Per gli ammassi rocciosi e per i terreni a struttura complessa, nella valutazione della resistenza caratteristica occorre tener conto della natura e delle caratteristiche geometriche e di resistenza delle discontinuità strutturali.

Nello specifico, la normativa evidenzia anche che ...[6.2.4] nei casi in cui a causa della particolare complessità della situazione geotecnica e dell'importanza e impegno dell'opera, dopo estese ed approfondite indagini permangano documentate ragioni di incertezza risolvibili solo in fase costruttiva, la progettazione può essere basata sul metodo osservazionale.

Nell'applicazione di tale metodo si deve seguire il seguente procedimento:

- devono essere stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
- si deve dimostrare che la soluzione prescelta è accettabile in rapporto a tali limiti;

3. devono essere previste soluzioni alternative, congruenti con il progetto, e definiti i relativi oneri economici;
4. deve essere istituito un adeguato sistema di monitoraggio in corso d'opera, con i relativi piani di controllo, tale da consentire tempestivamente l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.

13. Verifiche di sicurezza (§6.4.2)

VERIFICHE DI SICUREZZA AGLI SLU DI TIPO GEOTECNICO (GEO) (§6.4.2.1)

Gli stati limite ultimi delle fondazioni superficiali si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che compongono la fondazione stessa.

Nel caso di fondazioni posizionate su o in prossimità di pendii naturali o artificiali deve essere effettuata la verifica anche con riferimento alle condizioni di stabilità globale del pendio includendo nelle verifiche le azioni trasmesse dalle fondazioni.

Le verifiche devono essere effettuate almeno nei confronti dei seguenti stati limite:

1. SLU di tipo geotecnico (GEO)
2. collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno
3. collasso per scorrimento sul piano di posa
4. stabilità globale
5. SLU di tipo strutturale (STR)
6. raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali,

accertando che la condizione (6.2.1) sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

La verifica di stabilità globale deve essere effettuata secondo l'Approccio 1:

- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I e 6.2.II per le azioni e i parametri geotecnici e nella Tabella 6.8.I per le resistenze globali.

La rimanenti verifiche devono essere effettuate, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tab. 6.2.I, 6.2.II e 6.4.I, seguendo almeno uno dei due approcci:

Approccio 1:

- Combinazione 1: (A1+M1+R1)

- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2:

(A1+M1+R3).

Nelle verifiche effettuate con l'approccio 2 che siano finalizzate al dimensionamento strutturale, il coefficiente g_R non deve essere portato in conto.

Nel caso in esame le verifiche dovranno essere condotte secondo l'approccio 1 combinazione 2.

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali.

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,8$	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$	$\gamma_R = 1,1$

VERIFICHE DI ESERCIZIO (SLE) (§C6.4.2.2)

Si devono calcolare i valori degli spostamenti e delle distorsioni per verificarne la compatibilità con i requisiti prestazionali della struttura in elevazione (§§ 2.2.2 e 2.6.2), nel rispetto della condizione (6.2.7).

Analogamente, forma, dimensioni e rigidità della struttura di fondazione devono essere stabilite nel rispetto dei già menzionati requisiti prestazionali, tenendo presente che le verifiche agli stati limite di esercizio possono risultare più restrittive di quelle agli stati limite ultimi.

Si fa notare come la scelta di valori dei parametri geotecnici "cautelativi" in mancanza di indagini dirette su ogni singolo aerogeneratore potrebbe sottostimare la capacità portante dei terreni di imposta. E' quindi opportuno, in fase esecutiva disporre un accurato piano di indagini localizzato sulle singole postazioni.

14. Condizioni di carico delle fondazioni degli aerogeneratori

Nella fase di predimensionamento sono stati utilizzati i carichi agenti sulle fondazioni ricavati specifiche tecniche rese disponibili dalla Società Vestas Wind che si riportano di seguito

Characteristic Extreme							
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]
Mbt	14Ecdvraa00(fam89)	1.35	Abs	147900	3222	1142	-6853
Mzt	23NTMSCHWO100(fam216)	1.35	Abs	43280	-16550	475.0	-6595
FndFr	1314etm00(fam81)	1.35	Abs	127100	-2004	1252	-6863
Fzt	12IceUHWO100(fam70)	1.35	Abs	67050	-2263	502.1	-7071

I carichi forniti da Vestas Wind come "Extreme load" sono i carichi statici massimi per la specifica turbina eolica calcolati per qualsiasi condizione.

15. Modelli geotecnici di riferimento per le verifiche

Le verifiche sono state eseguite sul modello geotecnico 04 maggiormente cautelativo. Il piano di appoggio del basamento di fondazione è stato ipotizzato sullo **Strato n. 02**, terre mediamente addensate, a quota pari a circa 4.00 m da piano campagna, considerando che gli strati superficiali saranno rimossi dalle attività di scavo; si rimanda alle successive fasi della progettazione la valutazione dei dati geotecnici puntuali per ogni singola piazzola di installazione.

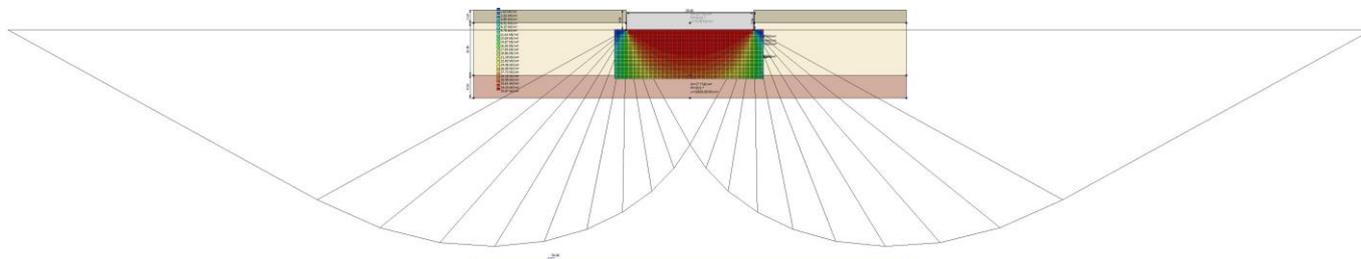
È stato utilizzato il software Loadcap 2023 della GEOSTRU. La fondazione è stata schematizzata come una piastra circolare dello spessore pari all'altezza delle due fondazioni proposte, in quanto il programma non permette l'inserimento di plinto circolare a sezione tronco-conica, con un leggero surplus di carico dovuto al differente peso tra c.a. e terreno di riporto.

La fondazione proposta risulta verificata.

Si riporta di seguito la sintesi delle analisi effettuate e si rimanda all'**Allegato 1 - Relazione di calcolo** allegata alla presente per le specifiche di ogni caso analizzato.

La scelta di valori dei parametri geotecnici “cautelativi”, in mancanza di indagini dirette su ogni singolo aerogeneratore, potrebbe sottostimare la capacità portante dei terreni di imposta. E’ quindi opportuno, in fase esecutiva disporre un accurato piano di indagini localizzato sulle singole postazioni.

1. Modello Geotecnico 04



DATI GENERALI

Normativa NTC_2018
 Zona Giave
 Lat./ Long. [WGS84] 40.4517211914063/8.75143051147461
 Diametro della fondazione 25.0 m
 Profondità piano di posa 4.0 m
 Profondità falda 50.0
 Sottofondazione...Sporgenza, Altezza 0.1/0.1 m
 Correzione parametri

SISMA

Accelerazione massima (amax/g) 0.038
 Effetto sismico secondo Paolucci, Pecker (1997)
 Coefficiente sismico orizzontale 0.0075

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

Tipo opera: 2 - Opere ordinarie
 Classe d'uso: Classe IV
 Vita nominale:50.0 [anni]
 Vita di riferimento: 100.0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: B
 Categoria topografica: T1

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18	Rev 0	Pagina 79 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	-------	--------------------

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	60.0	0.249	2.685	0.3
S.L.D.	101.0	0.307	2.73	0.307
S.L.V.	949.0	0.587	2.976	0.371
S.L.C.	1950.0	0.693	3.061	0.393

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.2988	0.2	0.0061	0.003
S.L.D.	0.3684	0.2	0.0075	0.0038
S.L.V.	0.7044	0.2	0.0144	0.0072
S.L.C.	0.8316	0.2	0.017	0.0085

STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore [m]	Peso unità di volume [kN/m ³]	Peso unità di volume saturo [kN/m ³]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m ²]	Coesione non drenata [kN/m ²]	Modulo Elastico [kN/m ²]	Modulo Edometrico [kN/m ²]	Poisson	Coeff. consolidaz. primaria [cmq/s]	Coeff. consolidazione secondaria	Descrizione
2.6	15.69	16.67	24.55	75.0	0.0	284000.0	0.0	0.33	0.0	0.0	S1
10.4	16.67	17.65	32.06	350.0	0.0	461000.0	0.0	0.33	0.0	0.0	S2
4.5	17.65	18.63	35.5	10520.0	0.0	932000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S3

Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m ²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A2+M2+R2	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Progetto
2	Sisma	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Servizio
4	A(1)+M(2)+R(2)	92.00	7071.00	16550.00	147900.00	1252.00	0.00	Progetto

Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale	Coef. Rid. Capacità portante orizzontale
1	Si	1.25	1.25	1.4	1	1	1.8	1.1
2	Si	1.25	1.25	1.4	1	1	1.8	1.1

AREGU Wind Srl	Geol. Cosima Atzori	N° Doc. IT-VesAre-CLP-CIV-TR-18				Rev 0	Pagina 80 di 81
----------------	---------------------	------------------------------------	--	--	--	-------	--------------------

3	Si	1	1	1	1	1	1.8	1
4	Si	1.25	1	1.25	1	1	1.8	1

CARICO LIMITE FONDAZIONE COMBINAZIONE...A2+M2+R2

Autore: Brinch - Hansen 1970

Carico limite [Qult]	1094.22	kN/m ²
Resistenza di progetto[Rd]	607.9	kN/m ²
Tensione [Ed] 92.0	kN/m ²	
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	11.89	

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler	43768.92	kN/m ³
---------------------	----------	-------------------

VERIFICA A SCORRIMENTO (A(1)+M(2)+R(2))

Adesione terreno fondazione	19.9	kN/m ²
Angolo di attrito terreno fondazione	0	°
Frazione spinta passiva	0	%
Resistenza di progetto	10109.84	kN
Sollecitazione di progetto	1252	kN

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata

CEDIMENTI PER OGNI STRATO

*Cedimento edometrico calcolato con: Metodo consolidazione monodimensionale di Terzaghi

Pressione normale di progetto	92.0	kN/m ²
Cedimento dopo T anni	7.0	
Distanza	10.90	m
Angolo	28.17	°
Cedimento totale	0.01	cm

CEDIMENTI ELASTICI

Pressione normale di progetto	92.0	kN/m ²
Spessore strato	5.0	m
Profondità substrato roccioso	10.0	m
Modulo Elastico	461000.0	kN/m ²
Coefficiente di Poisson	0.33	

Coefficiente di influenza I1	0.03
Coefficiente di influenza I2	0.07
Coefficiente di influenza Is	0.07

Cedimento al centro della fondazione 0.15 mm

Coefficiente di influenza I1	0.01
Coefficiente di influenza I2	0.04
Coefficiente di influenza Is	0.03
Cedimento al bordo	0.03 mm

