

# PARCO EOLICO

**COMUNE DI ISILI**  
PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



## STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

**Elaborato:**

ELABORAZIONI SIA

**Relazione geotecnica**

Codice elaborato:

**IS\_SIA\_A015**

Data: Dicembre 2023

**Il committente:** Sardeolica s.r.l.

**Coordinamento:** FAD SYSTEM SRL - Società di ingegneria

*Dott. Ing. Ivano Distinto*

*Dott. Ing. Carlo Foddis*

**Elaborazione SIA:**

*BIA s.r.l.*

*Società di ingegneria*

**Elaborato a cura di:**

*Dott.ssa Geol. Cosima Atzori*

rev.	data	descrizione revisione	rev.	data	descrizione revisione
00	01/12/2023	Emissione per procedura VIA			

## SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
1. PREMESSA .....	5
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	5
3. STUDI ED INDAGINI DI RIFERIMENTO .....	6
4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE.....	6
5. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA .....	13
6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO .....	17
6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento .....	17
7. ANALISI DELLE CONDIZIONI GEOSTRUTTURALI GENERALI .....	22
8. ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO .....	22
9. CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI .....	24
9.1. Schema della circolazione idrica superficiale e sotterranea .....	29
9.2. Caratteristiche e dinamiche delle acque sotterranee .....	29
9.3. Analisi della Vulnerabilità degli acquiferi .....	34
10. INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	35
10.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione .....	36
10.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche .....	37
10.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata.....	37
10.1.3. Elaborazione dei dati.....	37
10.2. Indagini sismiche: TOMOGRAFIA ELETTRICA.....	38
10.2.1. Caratteristiche delle stese sismiche .....	39
10.2.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata.....	39
10.2.3. Elaborazione dei dati.....	39
10.3. Indagini sismiche: MASW .....	40
10.3.1. Specifiche delle indagini svolte.....	41
10.3.2. Caratteristiche della strumentazione impiegata .....	42
10.3.1. Elaborazione dei dati.....	42

10.3.2.	Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018) .....	42
10.4.	Risultati delle indagini del sito SMT01-TURBINA IS02 .....	44
10.4.1.	SMT01-IS02: MASW M1 .....	44
10.4.2.	R1-SMT01-IS02: Sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica .....	45
10.5.	RISULTATI DELLE INDAGINI SITO SMT02-TURBINA IS03 .....	48
10.5.1.	R2-SMT02-IS03: Sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica .....	48
10.6.	RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO SMT03-TURBINA IS04.....	50
10.6.1.	M3-SMT03-IS04: Sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica .....	50
10.7.	Risultati delle indagini del sito SMT04-TURBINA IS07 .....	53
10.7.1.	SMT04-IS07: MASW M4 .....	53
10.7.2.	R3-SMT04-TL07: Tomografia elettrica e Sismica a rifrazione in onde P.....	54
10.8.	Indicazioni per la determinazioni dei parametri geomeccanici .....	57
11.	MODELLAZIONE GEOLOGICA.....	60
11.1.	Modello Geologico di sito.....	60
11.1.1.	Modello Geologico 01 .....	60
11.1.2.	Modello Geologico 02.....	61
12.	DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE DEGLI AEROGENERATORI .....	63
13.	AZIONI E RESISTENZE NELLE VERIFICHE AGLI STATI LIMITE.....	64
14.	VERIFICHE DI SICUREZZA (§C6.4.2) .....	66
14.1.	Verifiche di sicurezza agli SLU di tipo geotecnico (GEO) (§C6.4.2.1) .....	66
14.2.	Verifiche di esercizio (SLE) (§C6.4.2.2) .....	67
15.	CONDIZIONI DI CARICO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI.....	67
16.	MODELLI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE.....	69
17.	FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6) .....	74

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Localizzazione del progetto .....	7
Figura 2 Panoramica del nei pressi dell'area di studio .....	8
Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto .....	9
Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000 .....	10
Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Est - impianto .....	11
Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore ovest - sottostazione .....	12
Figura 7 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 7,2MW .....	14
Figura 8 – Stralcio della Carta Geologica d'Italia, 1:50.000 – Foglio 540 "Mandas". Nel riquadro l'area di progetto.....	19
Figura 9 – Schema Tettonico dell'area di studio (tratto da Funedda et al., 2013. Note Illustrative Foglio CARG Mandas) .....	19
Figura 10 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione .....	23
Figura 11 Tipologia di frana: 1. Crollo; 2. Ribaltamento; 3. Scivolamento .....	23
Figura 12 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia.....	25
Figura 13 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso .....	25
Figura 14 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia .....	26
Figura 15 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.....	27
Figura 16 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti per la formazione dei calcari di Dorgali.....	28
Figura 17 Reticolo idrico superficiale (Fonte RAS) .....	31
Figura 18 stralciop della Carta Idrogeologica del PUC Isili, 2015.....	32
Figura 19 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo .....	33
Figura 20 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m .....	37
Figura 21 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	45
Figura 22 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	54
Figura 23 Caratteristiche geometriche della fondazione .....	63

## 1. PREMESSA

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico dislocato nel territorio comunale di **Isili** – sub-regione del Sarcidano, Provincia del Sud Sardegna (SU), 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:

- La caratterizzazione geotecnica preliminare del modello geologico di sito;
- 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.
- 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 è redatta in osservanza a quanto stabilito dalla vigente normativa in materia, con particolare riferimento a:

- 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.
- Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24.09.1988 – Istruzioni per l'applicazione del D.M. LL.PP.11.03.1988.
- Raccomandazioni, programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche, 1975 – Associazione Geotecnica Italiana.
- 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)
- 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.
- D.L. 3 aprile 2006, n. 152 e successive modificazioni - "Norme in materia ambientale".

### 3. STUDI ED INDAGINI DI RIFERIMENTO

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

- Carta Topografica I.G.M. scala in 1:25000
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000
- Carta Geologica dell'Italia in scala 1:100000
- Carta Geologica dell'Italia in scala 1:50.000 (CARG).
- Cartografia Geologica di base della R.A.S. in scala 1:25.000
- RAS - Carta dell'Uso del Suolo della Regione Sardegna, 2008
- I.S.P.R.A. - Archivio nazionale delle indagini nel sottosuolo (legge 464/84)
- RAS – Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, annali idrologici 1922-2009
- RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio d'Assetto Idrogeologico
- RAS – Autorità di Bacino - Piano di Tutela delle Acque
- RAS – Autorità di Bacino - Piano Stralcio delle Fasce Fluviali
- 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 eseguita in data **29/05/2023** e **5-6/06/2023** nella zona di interesse.

### 4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE

**Isili** si eleva ai margini di un altopiano che si affaccia sulla vallata del Sarcidano, in un paesaggio caratterizzato da estese valli e colline. La superficie pianeggiante, resa fertile da numerosi fiumi e ruscelli, è coltivata soprattutto a cereali e foraggi. Le abbondanti acque del territorio sono imbrigliate dalla diga realizzata nella gola di Is Borrocos (il cui nome è stato erroneamente distorto secondo il lessico campidanese in "Is Barrocos", divenuta poi la denominazione ufficiale dell'invaso), tra il 1985 e il 1991, che, ostruendo il corso del fiume, ha creato un bacino artificiale nel quale spicca un isolotto formatosi per effetto del riempimento dell'invaso, sul quale è presente una vecchia chiesetta (ristrutturata) intitolata a San Sebastiano. Il lago di Is Borrocos viene utilizzato prioritariamente come bacino di acqua potabile e, secondariamente, per la pratica di diverse discipline sportive quali la pesca sportiva, la canoa e le escursioni.

Le pareti ripide o più spesso strapiombanti delle gole che si aprono nel suo territorio, attirano gli appassionati del free climbing. Isili è il capolinea della linea ferroviaria a scartamento ridotto per Cagliari, e della tratta turistica del Trenino Verde per Laconi (sino a poco tempo fa si arrivava sino a

Sorgono). Il vecchio percorso della ferrovia che collegava Isili Sarcidano a Villacidro è stato parzialmente trasformato in pista ciclabile panoramica che parte da Isili e raggiunge Barumini.

Nella zona settentrionale del territorio comunale si trova l'area industriale di Perd' 'e Cuaddu, a nord-est della quale sorgerà l'impianto in progetto, purtroppo mai decollata e oggi in gran parte ricoperta da un impianto fotovoltaico per la produzione di energia elettrica. Ancora più a nord è presente una Casa di reclusione con circa 650 ha di terreno forestale e porzioni dedicate al pascolo e alla coltivazione, lavorate dai detenuti.

L'inquadratura cartografica di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **540 sez. IV "Isili"**;
- Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Foglio: **540020 "Nurallao"**.

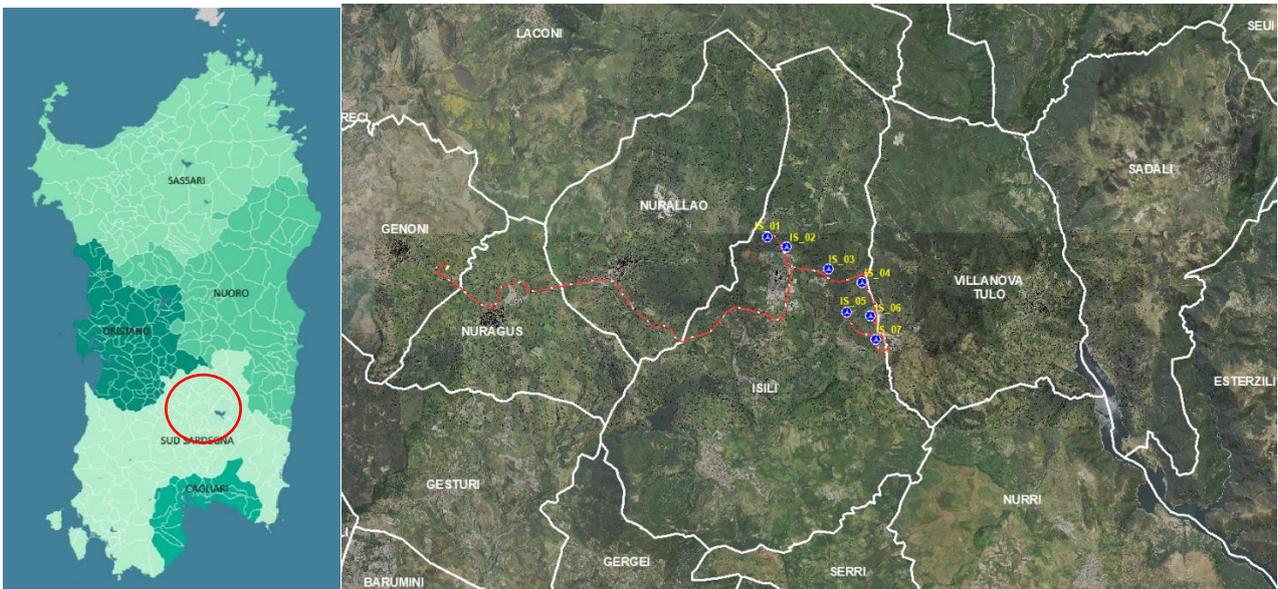


Figura 1 Localizzazione del progetto



Figura 2 Panoramica nei pressi dell'area di studio

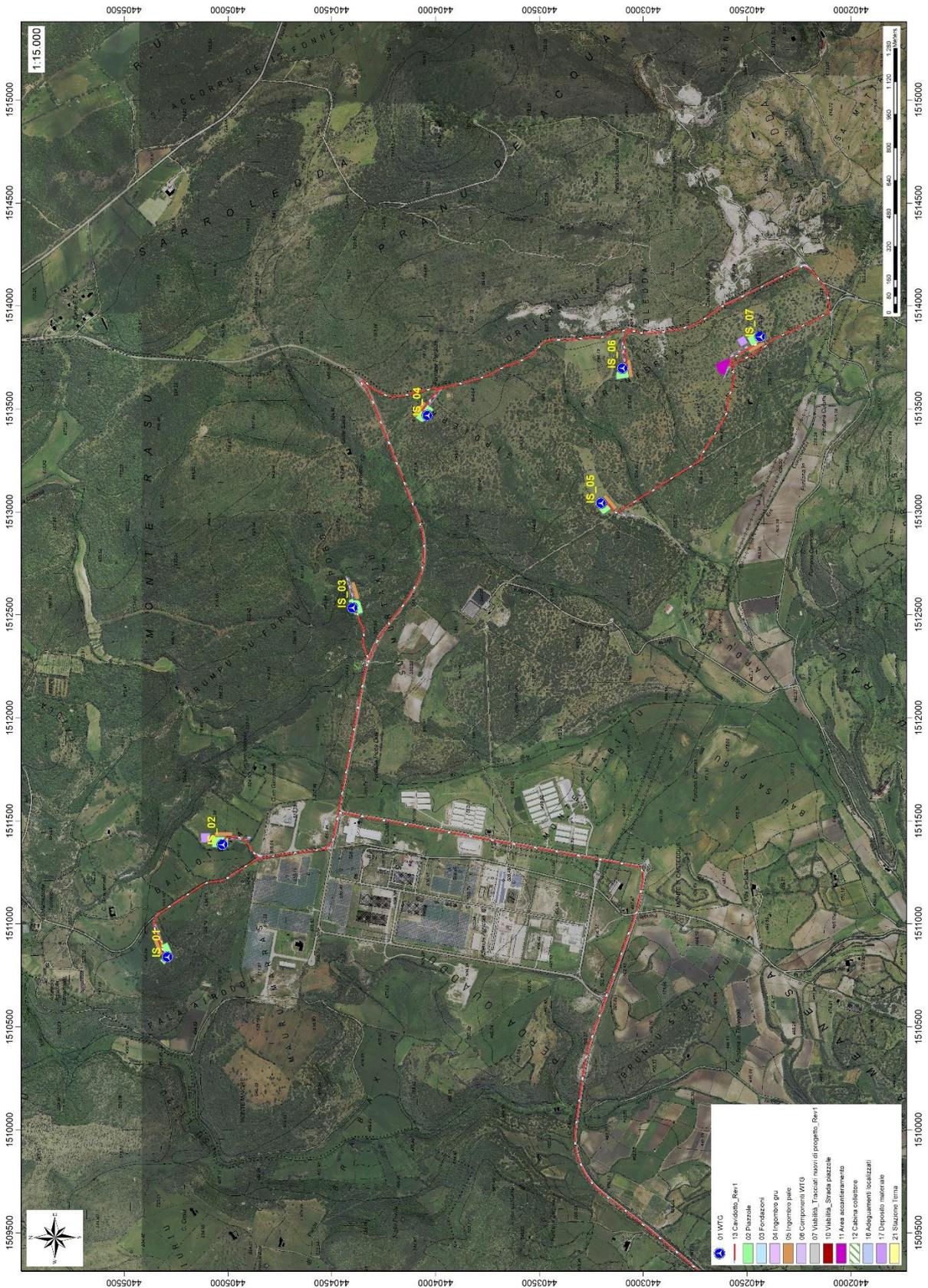


Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto

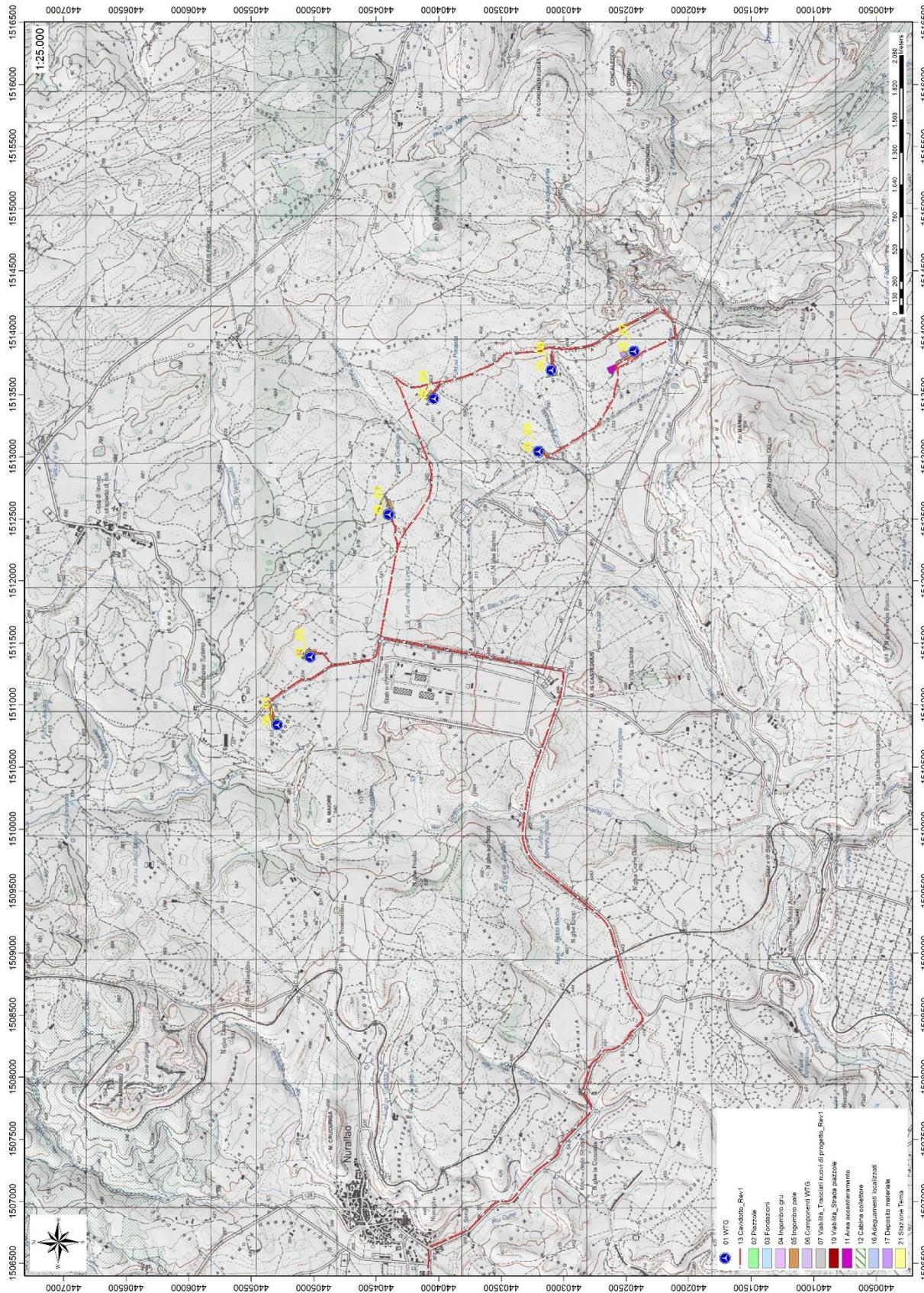


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

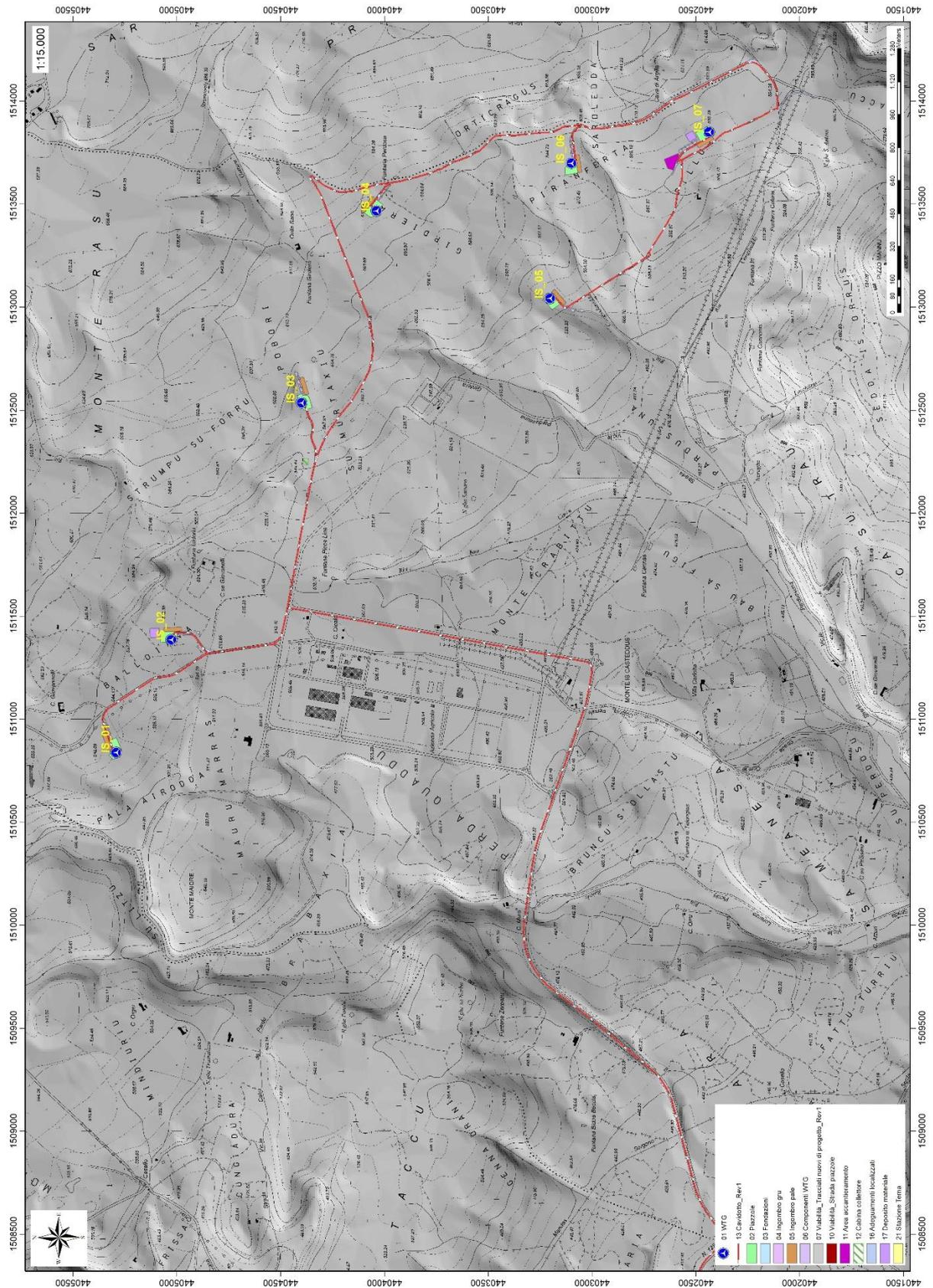


Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Est - impianto

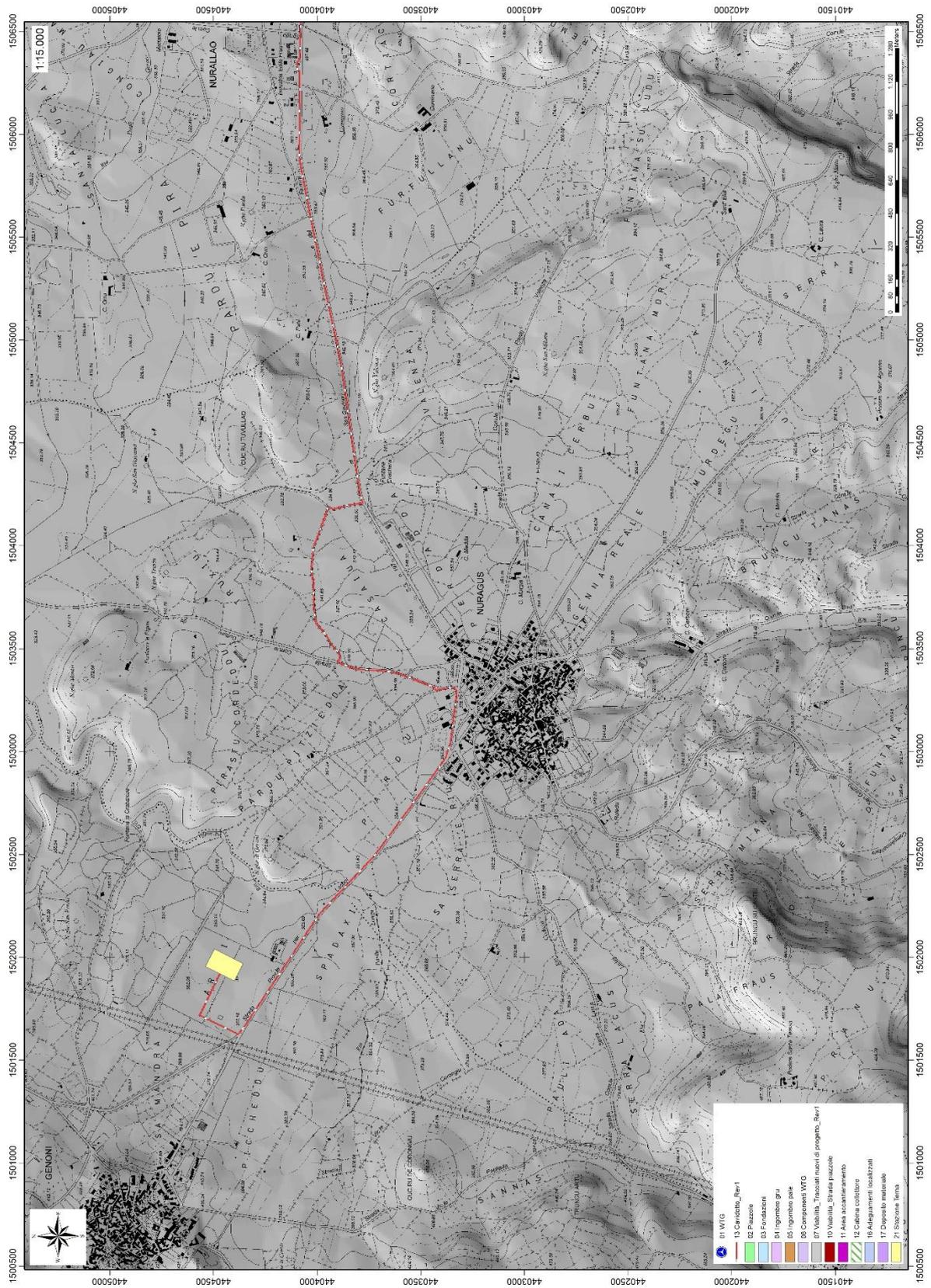


Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore ovest - sottostazione

## 5. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA

L'impianto sarà costituito dai 7 aerogeneratori da 7,2 MW ciascuno. L'energia elettrica prodotta dagli aerogeneratori verrà convogliata, attraverso una rete a 36 kV realizzata con cavo interrato, alla sezione 36 kV della Stazione di nuova realizzazione del Gestore Della Rete, sita nel comune di Genoni, mediante un collegamento in antenna.

Il Parco eolico si sviluppa su un paesaggio di tipo collinare e i settori di ubicazione degli aerogeneratori presentano valori di pendenza ricadenti in classe 0-15%, il contesto è caratterizzato dalla presenza di appezzamenti di terreno di medie dimensioni adibiti prevalentemente a pascolo. L'energia prodotta dalla centrale eolica verrà fornita alla rete elettrica nazionale mediante la realizzazione di una connessione a 36 kV alla sezione 36kV della stazione elettrica Terna di nuova realizzazione. Il collegamento elettrico tra gli aerogeneratori e la Cabina Collettore avverrà mediante un elettrodotto interrato che seguirà in gran parte il tracciato delle strade esistenti e in piccola parte di quello delle strade di nuova realizzazione necessarie per l'accesso ad alcune piazzole.

Il collegamento tra la Cabina Collettore e stazione elettrica Terna sarà realizzato attraverso la costruzione di un raccordo di lunghezza pari a circa 14700 m in cavo MT interrato.

Il trasporto degli aerogeneratori dal porto di sbarco al sito di installazione seguirà le viabilità statale, provinciale e comunale asfaltata, all'interno del sito produttivo per il raggiungimento delle piazzole verranno utilizzate strade comunali e vicinali sterrate esistenti che saranno preventivamente adeguate, in alcuni tratti verranno realizzati nuovi brevi tratti di pista per l'accesso alle piazzole di montaggio.

Le coordinate relative ai punti di installazione degli aerogeneratori sono riportate nella tabella di seguito:

WTG	Italy GAUSS-BOAGA		Geografiche WGS84		QUOTA base torre m s.l.m.	ALTEZZA HUB torre m
	EST	NORD	EST	NORD		
IS_01	1510838,5884	4405292,3730	9° 7'34.70"	39°47'50.83"	545,00	119
IS_02	1511385,4236	4405026,8102	9° 7'57.68"	39°47'42.19"	529,80	119
IS_03	1512535,2218	4404399,9238	9° 8'45.98"	39°47'21.79"	581,00	119
IS_04	1513468,2286	4404039,2015	9° 9'25.19"	39°47'10.04"	616,50	119
IS_05	1513043,2758	4403203,4088	9° 9'7.26"	39°46'42.96"	527,80	119
IS_06	1513698,5387	4403100,2010	9° 9'34.80"	39°46'39.57"	588,00	119
IS_07	1513850,7936	4402437,4188	9° 9'41.15"	39°46'18.07"	584,60	119

Gli aerogeneratori individuati per la realizzazione del parco eolico hanno potenza nominale di 7200 kW e sono posti in cima a torri tronco coniche in acciaio con un'altezza massima fuori terra, misurata al mozzo, di 119 m; il generatore è azionato da elica tripala con diametro di 162 m (vedi tav. IS\_PC\_T009).

L'aerogeneratore è essenzialmente costituito da:

- rotore a tre pale che capta l'energia del vento, avente il mozzo collegato ad una navicella in cui avviene il processo di trasformazione dell'energia cinetica del vento in energia elettrica;
- torre o sostegno che ha il compito di sostenere l'apparato di produzione (navicella+rotore) alla quota individuata come ideale attraverso le simulazioni di produttività.

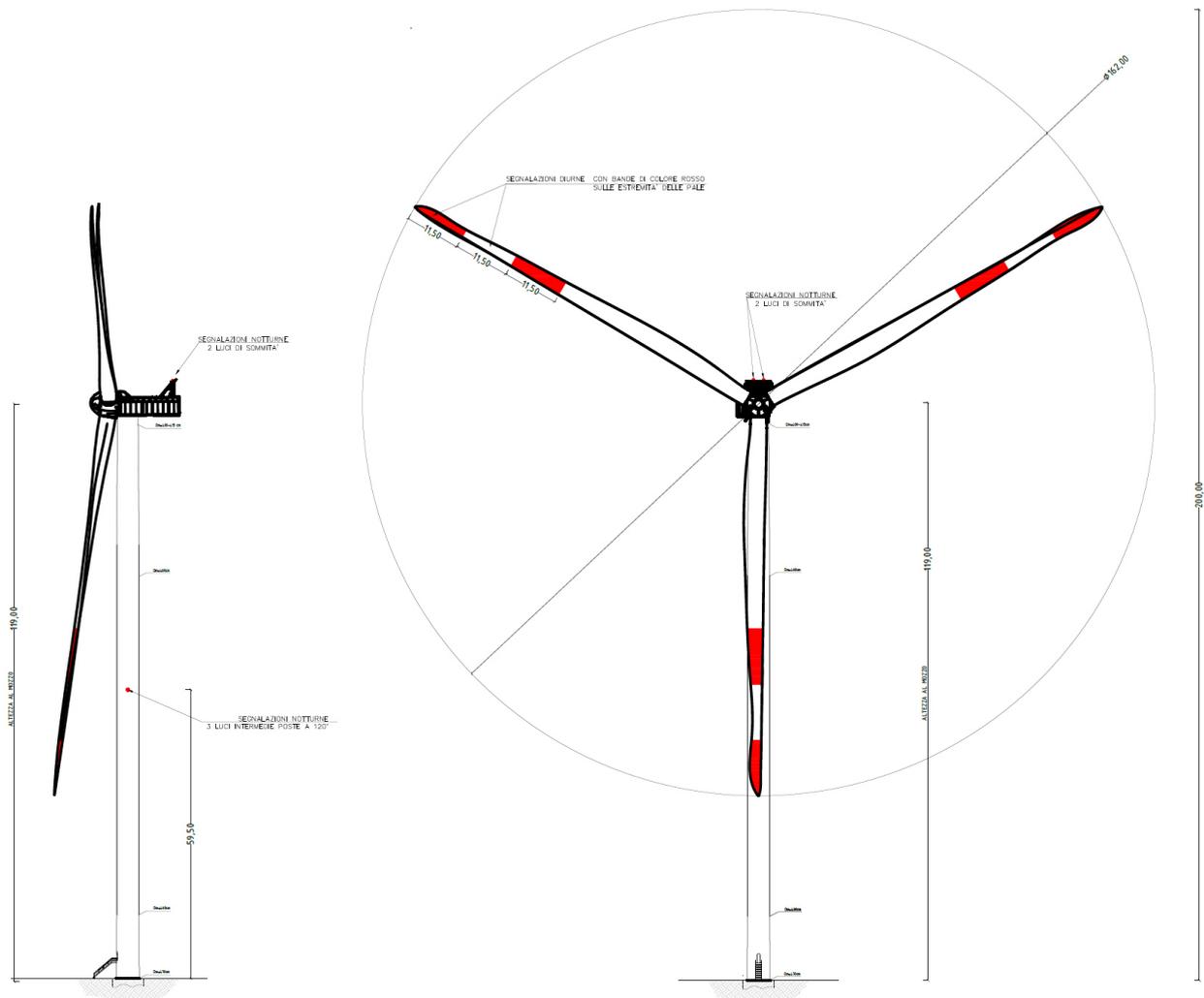


Figura 7 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 7,2MW

L'aerogeneratore ipotizzato per le valutazioni progettuali è stato scelto tra quelli maggiormente efficienti e sofisticati presenti attualmente sul mercato, tuttavia in fase di installazione si potranno

vere variazioni tipologiche con macchine simili per caratteristiche dimensionali e tecnico-produttive, ferme restando le caratteristiche dimensionali massime dell'aerogeneratore.

<b>DATI TIPOLOGICI E DIMENSIONALI AEROGENERATORI</b>	
NUMERO TOTALE AEROGENERATORI IN PROGETTO	<b>7</b>
POTENZA GENERATORE	<b>7200 KW</b>
ALTEZZA MASSIMA HUB	<b>119 m</b>
DIAMETRO ROTORE	<b>162 m</b>
ALTEZZA MASSIMA RAGGIUNGIBILE	<b>200 m</b>
AREA SPAZZATA DAL ROTORE	<b>20611 mq</b>
NUMERO PALE	<b>3</b>
LUNGHEZZA PALE	<b>79,35 m</b>

#### **Dati tecnici:**

-Dati tecnici:

- Potenza nominale: 7200 kW e tensione nominale di 800 volt;
- Potenza unitaria generatore: 7600 kW;
- Frequenza: 0 – 126 Hz;
- Numero pale: 3;
- Lunghezza pale: 79,35 m;
- Raggio del rotore: 81 m;
- Area spazzata: 20611 m<sup>2</sup>;
- Tipo di sostegno: tubolare metallico;
- Altezza da terra del rotore: max 119 m;
- Fondazioni: piastra in C.A. dimensioni di circa 26 m di diametro; completamente interrata ad una profondità massima di 4,11 m;
- Piazzola di servizio: circa 3300 m<sup>2</sup> (variabile da 3300 a 4133 m<sup>2</sup>);
- Superficie impronta fondazione 530,93 m<sup>2</sup>;
- Ingombro scavo fondazione: circa 849,09 m<sup>2</sup>.

La realizzazione della cabina collettore è prevista lungo la strada comunale in località "Perde Quaddu" vicino all'aerogeneratore IS\_03, per accedere alla cabina occorre imboccare dalla SP52 la strada in località "Perde Quaddu" percorrere per circa 4.0 km direzione area industriale di Isili sino al raggiungimento della strada in adeguamento denominata in progetto "Stradello CAB\_COL\_A.

L'area della cabina si colloca ad una quota di 550,50 m s.l.m, il piazzale ospitante la cabina collettore avrà una superficie sistemata in piano di 770 mq, l'area delimitata da apposita perimetrazione avrà una superficie inferiore pari a di 750 mq.

Per il collegamento di tutti i 7 aerogeneratori e per la connessione alla sottostazione sarà necessario realizzare circa 23 km di elettrodotti interrati. I cavi per tutto il tracciato seguiranno la viabilità esistente e di progetto.

**Per ulteriori specifiche si rimanda agli elaborati tecnici di progetto.**

## 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, 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:

- Definizione dell'assetto geologico-strutturale e idrogeologico di area vasta e dell'area geomorfologicamente significativa;
- Definizione dell'assetto stratigrafico dell'area di sedime delle opere;
- 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 rinvengono principalmente nel nord della Gran Bretagna e nella Scandinavia occidentale, fu causata dalla progressiva chiusura dell'oceano Giapeto, a seguito della collisione dei continenti Laurentia, Baltica e Avalonia, dando così origine al super continente Laurussia.

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

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

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

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

L'area di studio ricade nella zona a Falde Esterne del basamento varisico sardo; principalmente è costituita dalle metamorfiti di basso grado, appartenenti all'Unità Tettonica del Gerrei, dalle metamorfiti dell'Unità tettonica di Meana Sardo e da quelle dell'unità di Riu Gruppa, dalle coperture sedimentarie eoceniche, dalle rocce della successione vulcano-sedimentaria Miocenica, e dai depositi quaternari.

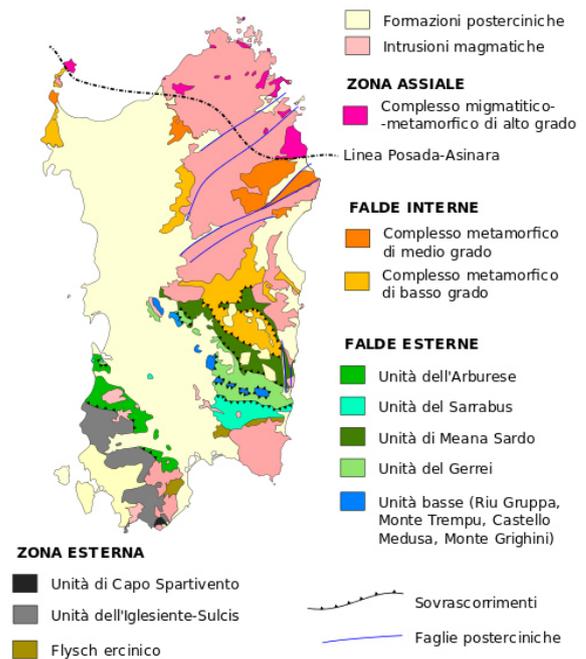
Le Unità Tettoniche affioranti sono costituite da originarie successioni sedimentarie e vulcaniche di età compresa tra il Cambriano e il Carbonifero inferiore.

L'impilamento tettonico delle Falde esterne, nell'area di studio, vede alla base l'Unità tettonica di Riu Gruppa, su cui sovrascorre l'Unità del Gerrei a sua volta sovrascorsa dall'Unità di Meana Sardo. Queste tre unità tettoniche sono caratterizzate da significative differenze nella successione stratigrafica, soprattutto nella successione vulcanica dell'Ordoviciano medio.

L'Unità tettonica del Gerrei è divisa in due sottounità: la Sottounità di Arcu de su Bentu e la Sottounità di M. Lora. Le due sottounità si caratterizzano per la presenza dei Porfiroidi nella sottounità di Arcu de su Bentu e delle Vulcaniti di Monte Santa Vittoria in quella di Monte Lora.

Le unità tettoniche sono interessate da una serie di fasi plicative compressive, tardo compressive e distensive che generano sistemi di pieghe e una foliazione pervasiva di piano assiale. Tra le strutture plicative maggiori che interessano il settore di studio vi è l'Antiforme del Flumendosa al cui nucleo affiora l'unità tettonica di Riu Gruppa.

Il basamento varisico è stato interessato da più fasi di emersione a partire dal Permiano; nel Cretaceo si ha nuovamente emersione, che sembra aver interessato tutta l'isola, che ha generato una lacuna che comprende quasi tutto il Paleocene, ricoperta dai depositi trasgressivi dell'Eocene inferiore e del Miocene, dai prodotti dell'attività vulcanica Pliocenica, e dalle coperture dei depositi quaternari costituiti da depositi di versante coltri eluvio colluviali e depositi alluvionali.



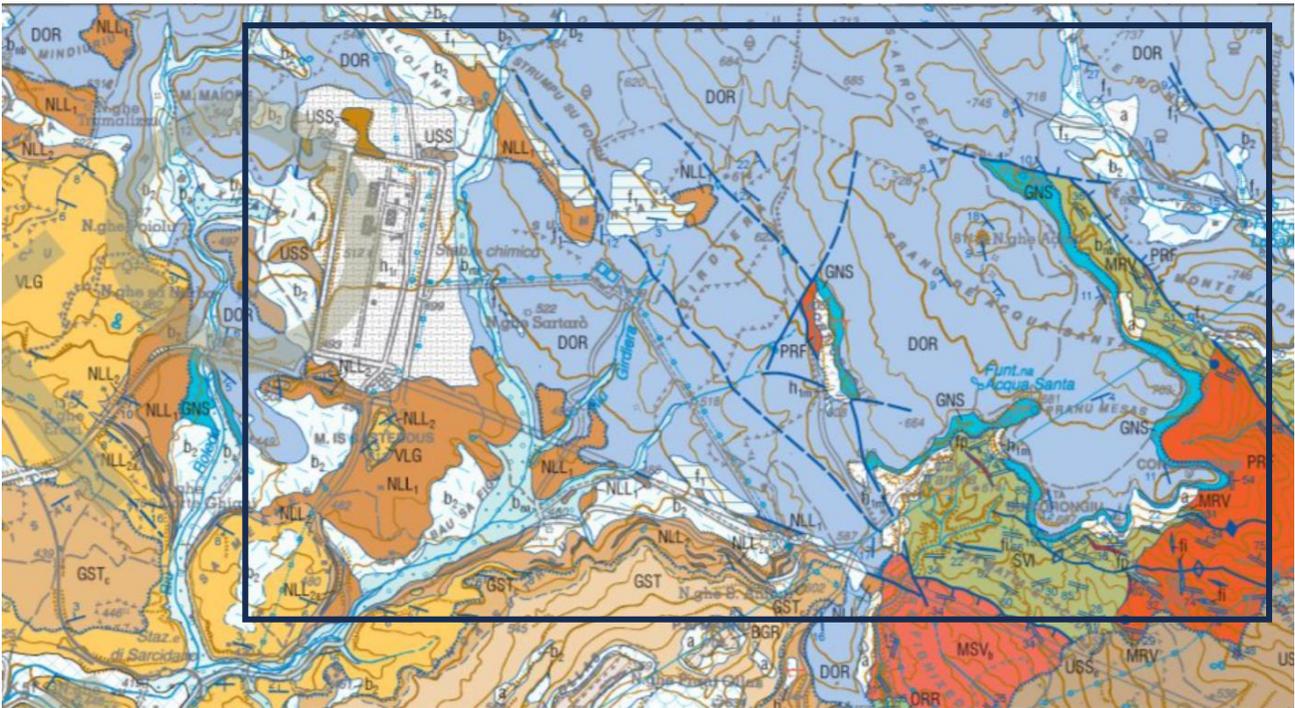


Figura 8 – Stralcio della Carta Geologica d'Italia, 1:50.000 – Foglio 540 “Mandas”. Nel riquadro l’area di progetto

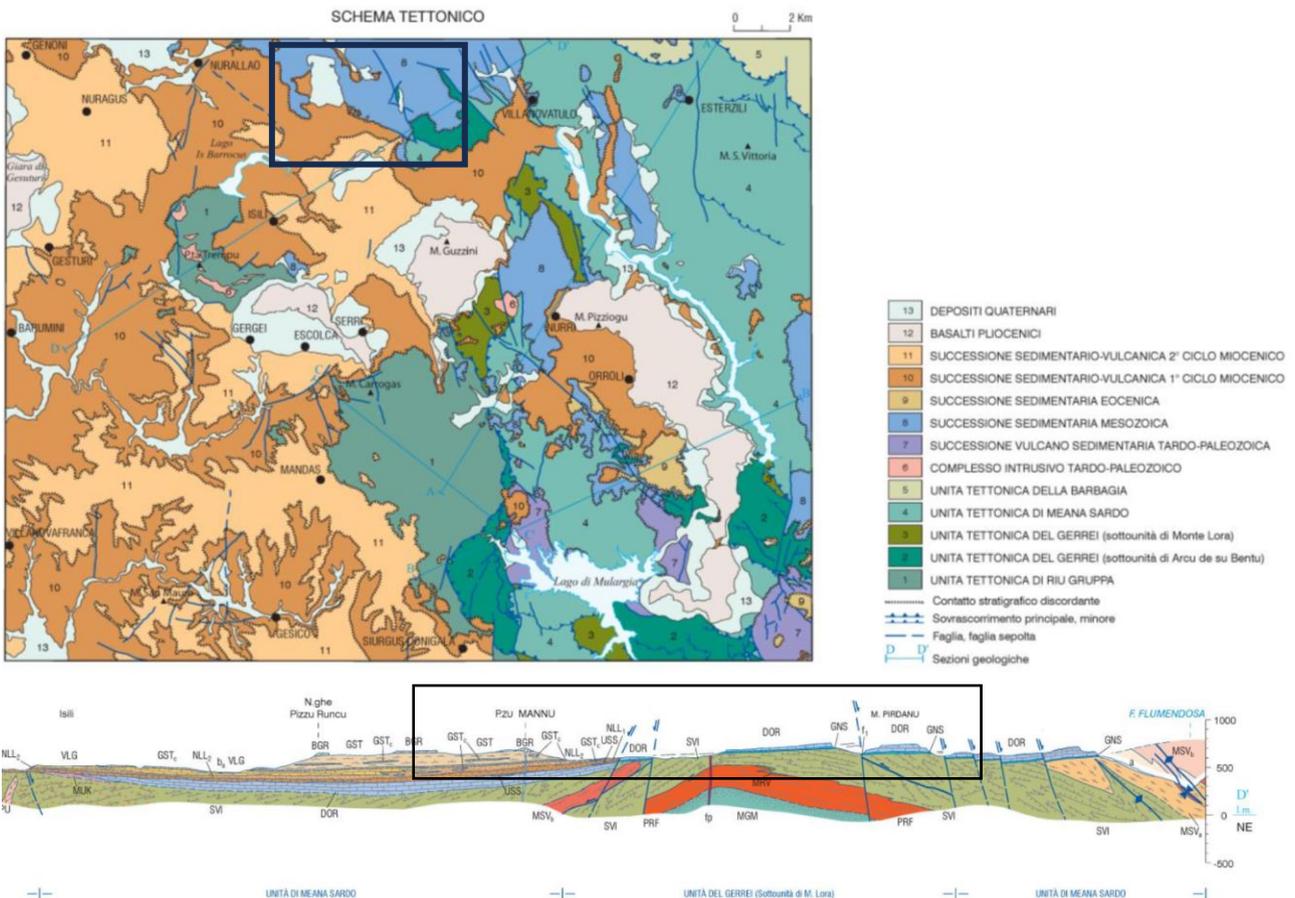


Figura 9 – Schema Tettonico dell’area di studio (tratto da Funedda et al., 2013. Note Illustrative Foglio CARG Mandas)

L'ossatura geologica del territorio di Isili è quindi rappresentata dalle litologie metamorfiche paleozoiche che affiorano sia nel settore Nord che sud del territorio. Tutto il settore centrale del territorio è invece occupato dai depositi sedimentari mesozoici e terziari a cui si sovrappongono prodotti vulcanici delle Giare e tutti i depositi quaternari dei fondi valle (depositi alluvionali) e delle pendici (corpi di frana antichi, depositi detritici, pluvio colluviali) derivati dall'erosione dei rilievi e che si sono depositati nella piana antistante. E proprio nel settore centrale si configura l'area in cui sorgerà l'impianto proposto. Nello specifico, la successione litologica riscontrata nel territorio e uniformata con la nomenclatura ufficiale, può essere così riassunta come segue, dal più recente al più antico:

### **Depositi quaternari dell'area continentale**

- **h1m**, Depositi antropici - Discariche minerarie, Olocene
- **b2**, Coltri pluvio colluviali. Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti arricchiti in frazione organica, Olocene
- **ba**, Unità: Depositi alluvionali. Ghiaie da grossolane a medie. OLOCENE,
- **bnA**, Unità: Depositi alluvionali terrazzati. Ghiaie con subordinate sabbie. Olocene
- **bnb**, Unità: Depositi alluvionali terrazzati. sabbie, Olocene
- **f1**, Unità: Travertini, depositi carbonatici travertinosi, ben cementati, fitoermali, fitostromali e fitoclastici con tracce di resti vegetali e gusci di gasteropodi, Olocene
- **PVM2a**, Unità: Litofacies nel Subsistema di Portoscuso (SINTEMA DI PORTOVESME). Ghiaie alluvionali terrazzate da medie a grossolane, con subordinate sabbie, Pleistocene sup.

### **Successioni vulcano sedimentarie oligo - mioceniche**

- **GSTc**, Unità: Litofacies nelle Marne di Gesturi. Generalmente alla base della Formazione, arenarie grossolane e conglomerati. Burdigaliano sup. – Langhiano Medio
- **VLG**, Unità: Calcari di Villagreca. Calcari bioclastici e biocostruiti (Bioerme a coralli e briozoi e biostromi ad alghe e molluschi). Aquitaniano inf.
- **NLL2**, Unità: Arenarie di Serra Longa (Formazione di Nurallao). Arenarie da grossolane a microconglomeratiche, con intercalazioni di arenarie siltose. Oligocene sup.- Burdigaliano?
- **NLL2a**, Unità: Litofacies nelle Arenarie di Serra Longa (Formazione di Nurallao). Bancate metriche di arenarie fossilifere e biocalcareniti. Oligocene sup.- Burdigaliano?
- **NLL1**, Unità: Conglomerato di Duidduru (Formazione di Nurallao). Conglomerati poligenici eterometrici e sabbie con locali livelli di biocalcareniti, talora con componente vulcanica. Oligocene sup.- Burdigaliano?
- **USS**, Unità: Formazione di Ussana. Conglomerati e brecce grossolani, eterometrici, prevalentemente a spese di basamento cristallino paleozoico, carbonati giurassici, vulcaniti oligomioceniche e livelli

argilloso – arenacei rossastri talora prevalenti nella base e rari lenti carbonatiche intercalate. Oligocene sup.- Aquitaniano inf.

### **Successioni sedimentarie mesozoiche e tardo paleozoiche**

- **DOR**, Unità: Formazione di Dorgali. Dolomie, dolomie arenacee, calcari dolomitici da litorali a circalitorali con foraminiferi e alghe calcaree. Dogger - Malm.

- **GNS**, Unità: Formazione di Genna Selole. Conglomerati quarzosi molto maturi, con alla base livelli carboniosi e argille. Dogger.

### **Basamento metamorfico paleozoico**

- **SVI**, Unità: Arenarie di San Vito (Unità tettonica di Meana Sardo). Alternanze irregolari da decimetriche a metriche, di metarenarie micacee, quarziti e metasiltiti, e livelli di metaconglomerati minuti quarzosi nella parte alta. Cambiano medio – Ordoviciano Inf.

- **PRF**, Unità: Porfiroidi auct. Metarioliti e metariodaciti con struttura occhiatina, metaepiclastiti. Ordoviciano ? medio.

- **SVI**, Unità: Arenarie di San Vito (Unità Tettonica del Gerrei). Alternanze irregolari di metaquarzoareniti, metarenarie micacee e metapeliti. Livelli di metaconglomerati minuti quarzosi e rari livelli carbonatici intercalati nella parte alta. Cambiano medio – Ordoviciano Inf.

## 7. ANALISI DELLE CONDIZIONI GEOSTRUTTURALI GENERALI

L'area di studio è caratterizzata dall'affioramento del complesso calcareo dolomitico che caratterizza la serie dei "Tacchi" ben rappresentata in tutta l'area vasta. In generale si presenta con giacitura sub-orizzontale o debolmente inclinata in serie di piccoli altopiani tabulari.

La parte basale è costituita da calcari marnosi e da marne da giallastre a grigi, con locali intercalazioni arenacee o siltitiche-argillitiche grigio-verdastre. Seguono dolomie e calcari dolomitici di colore da bianca a nocciola a rossastri fossiliferi in bancate da decimetriche a metriche.

La formazione ricopre in concordanza quella di Genna Selole (GNS). Il limite superiore è erosivo, con differenti trasgressioni da parte delle successioni cenozoiche: formazione di Ussana, formazione di Nurallao e basalti delle Giare.

Lo spessore della formazione è di 50 m, l'ambiente deposizionale è di piattaforma neritica. Le datazioni radiometriche li collocano al Giurassico Medio-superiore (Dogger-Malm).

È la litologia sulla quale si sviluppa l'intero parco eolico.

L'area vasta è caratterizzata da faglie con direzione principale WNW – ESE, talora normali, e da sovrascorrimenti, e piegamenti sovrapposti (a direzione NNW-SSE e E-W) nella zona di interesse.

Di queste strutture tettoniche presenti, le faglie determinano il controllo tettonico delle principali valli incise. La giacitura dei piani è variabile. Nei diversi siti di installazione la dinamica metamorfica e geostrutturale ha creato piani di scistosità e fratturazione a diversa scala. I movimenti tettonici hanno ripiegato i materiali più coesivi (metapeliti e metargilliti) e fratturato quelli più coerenti (metasiltiti, metarenarie, metaconglomerati, metaconglomerati, calcari e dolomie).

Tutte le turbine eoliche sono posizionate sull'altopiano calcareo- dolomitico.

## 8. ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO

La fratturazione e il grado di alterazione producono 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:

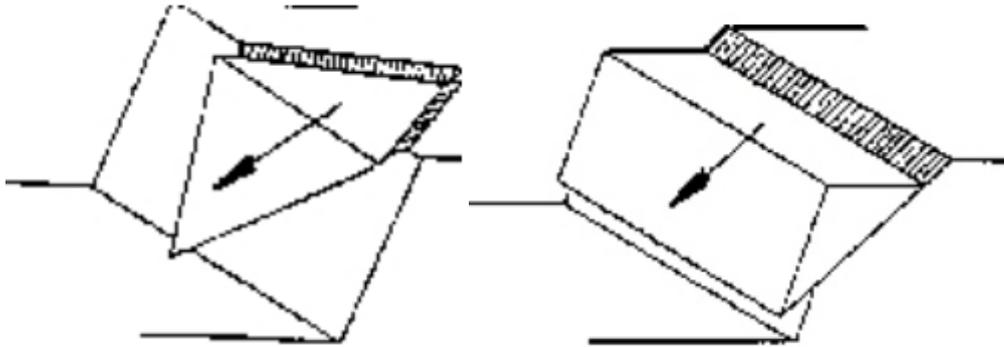


Figura 10 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

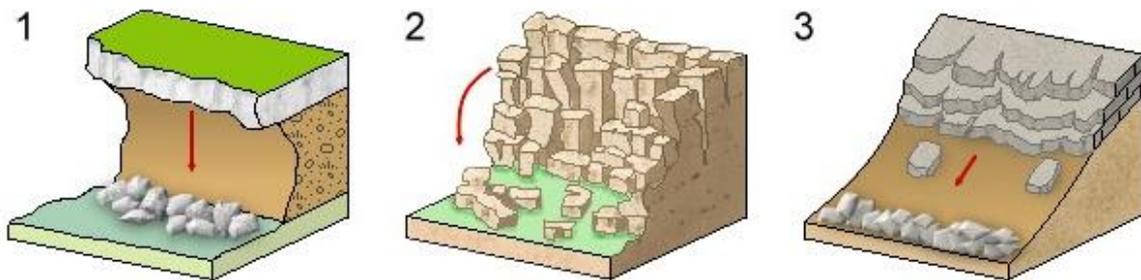


Figura 11 Tipologia di frana: 1. Crollo; 2. Ribaltamento; 3. Scivolamento

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 ribaltamento, 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 crollo distinti in relazione al dominio di famiglie di giunti.

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.

## 9. 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:

$\sigma'_1$  e  $\sigma'_3$  = sforzi efficaci principali rispettivamente massimo e minimo a rottura;

$mb$  = costante d'ammasso

$s$  ed  $a$  = costanti d'ammasso

$\sigma_{ci}$  = 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  $mi$  (Funzione del tipo di roccia): i valori delle costanti caratteristiche della roccia ( $\sigma_{ci}$  e  $mi$ ) 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  $mi$  per diversi tipi di roccia.

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:

$$\sigma'_1 = (2c' \cos \varphi' / 1 - \sin \varphi') + (1 + \sin \varphi' / 1 - \sin \varphi') \sigma'_3$$

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

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 12 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

DESCRIZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO PER LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	CONDIZIONI SUPERFICIALI					INDICE GEOLOGICO DI RESISTENZA GSI (Geological Strength Index)
<p>Sulla base dell'apparenza della roccia, scegliere la categoria che si pensa dia la migliore descrizione delle condizioni "medie" dell'ammasso indisturbato presente in sito. Da notare che la superficie visibile della roccia ottenuta da una volta con esplosivo può dare una impressione fuorviante sulla qualità della roccia sottostante. Occorre pertanto correre opportunamente 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 carotaggio continuo con corona diametrata o l'osservazione della superficie creata da uno scavo realizzato con tecniche di abbattimento controllato. È inoltre importante ricordare che il criterio di rottura di Hoek-Brown dovrebbe essere applicato dove la dimensione del "volume unitario" di ammasso roccioso risulta piccola in confronto alle dimensioni dello scavo in considerazione.</p>	<p>MOLTO BUONE - Superfici molto lisute, sane, non alterate.                  BUONE - Superfici lisce, leggermente alterate, ossidate.                  DISCRETE - Superfici lisce, moderatamente alterate.                  SCADENTE - Superfici molto alterate, (calcinate), compatte o costituite da frammenti angolari.                  MOLTO SCADENTE - Superfici di faglia lucida (pseudoselenite), superfici molto alterate con materiale di riempimento costituito da argille tenere.</p>					<p>Dalle sigle determinate con la tabella riportata precedentemente, che descrivono la struttura e le condizioni superficiali dell'ammasso roccioso, selezionare l'appropriata casella della presente tabella. Stimare il valore medio di GSI delle linee di uguali valore di GSI che attraversano la casella di riferimento. A quest'ultimo riguardo non è importante essere troppo precisi; indicare per GSI un valore compreso tra 35 e 42 è molto più realistico che indicare GSI=35.</p>
STRUTTURA	CONDIZIONI SUPERFICIALI					STRUTTURA
<p>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.</p>	B/VG	B/G	B/F	B/P	B/VP	<p>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.</p>
<p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disturbato con blocchi angolari, mutualmente incastrati, con più sfaccettature formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p>	VB/VG	VB/G	VB/F	VB/P	VB/VP	<p>CON MOLTI BLOCCHI - Ammasso roccioso parzialmente disturbato con blocchi angolari, mutualmente incastrati, con più sfaccettature formate da quattro o più famiglie di discontinuità.</p>
<p>A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p>	BD/VG	BD/G	BD/F	BD/P	BD/VP	<p>A BLOCCHI/DISTURBATA - Ammasso roccioso con blocchi angolari formati dall'intersezione di molte famiglie di discontinuità.</p>
<p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.</p>	D/VG	D/G	D/F	D/P	D/VP	<p>DISINTEGRATA - Ammasso roccioso molto fratturato e con basso grado di mutuo incastro formato da un insieme di blocchi rocciosi angolari e arrotondati.</p>
DIMINUIZIONE DEL GRADO DI MUTUO INCASTRO DELL'AMMASSO ROCCIOSO						DIMINUIZIONE DELLA QUALITÀ SUPERFICIALE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

Figura 13 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

TIPO DI ROCCIA	CLASSE	GRUPPO	TESSITURA			
			GROSSOLANA	MEDIA	FINE	MOLTO FINE
SEDIMENTARIE	Clastiche		Conglomerato (22)	Arenaria 19	Siltite 9	Argillite 4
				Grovacche (18)		
	Non clastiche	Organogene			Calcare bianco (7)	
		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)
			Granodiorite (30)		Dacite (17)	
			Diorite (28)		Andesite 19	
	Scure		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 14 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia

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 delle principali 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”.

Si tratta di valori stimati in base a indagini indirette e a osservazioni su campo, pertanto da confermare puntualmente in fase di progettazione esecutiva.

<p>Criterio di rottura empirico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{mK_{u(r)}\sigma_3 + 8\sigma_{u(r)}^2}$ <p><math>\sigma_1</math> = tensione efficace principale massima  <math>\sigma_3</math> = tensione efficace principale minima  <math>\sigma_{u(r)}</math> = 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, diabasi, gabbro e riolite</p>	<p>ROCCIE IGNEE A GRANA GROSSOLANA E ROCCIE CRISTALLINE METAMORFICHE</p> <p>Amfiboite, gabbro, gneiss, norite, quarzo-diorite</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>	m s	7.00 1.00	10.00 1.00	15.00 1.00	17.00 1.00	25.00 1.00
<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 = 85</p> <p>Indice NGI: Q = 100</p>	m s	2.40 0.082	3.43 0.082	5.14 0.082	5.82 0.082	8.56 0.082
<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>	m s	0.575 0.00293	0.821 0.00293	1.231 0.00293	1.395 0.00293	2.052 0.00293
<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>	m s	0.128 0.00009	0.183 0.00009	0.275 0.00009	0.311 0.00009	0.458 0.00009
<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>	m s	0.029 0.000003	0.041 0.000003	0.061 0.000003	0.069 0.000003	0.102 0.000003
<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>	m s	0.007 0.0000001	0.010 0.0000001	0.015 0.0000001	0.017 0.0000001	0.025 0.0000001

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

Figura 15 Correlazione fra valori di m, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.

**(DOR) Formazione di Dorgali**

Standard ISRM = R5 Un campione richiede molti colpi di martello geologico per essere fratturato

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo, per crollo

Ammasso roccioso= da fratturato a molto fratturato

Struttura= massiva

Alterazione= da poco a debolmente alterata

Pareti – poco alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – da asciutta a umida

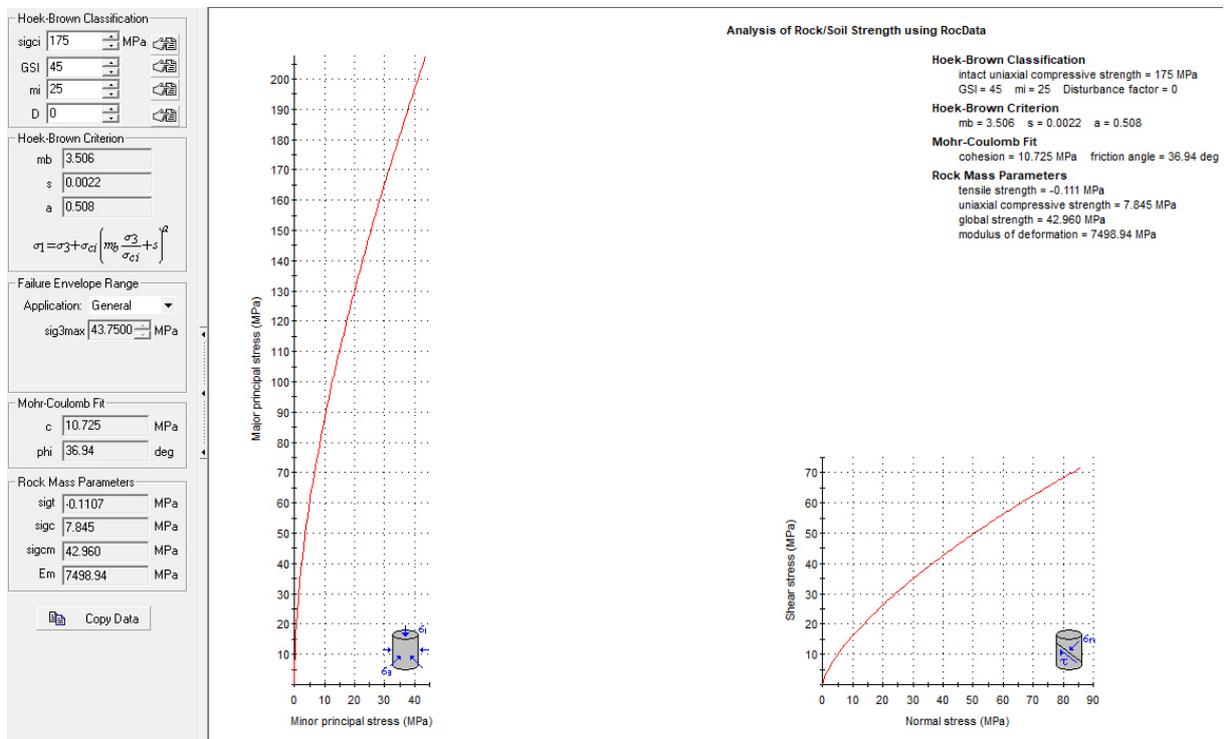


Figura 16 Valori di Coesione e angolo di attrito interno ottenuti per la formazione dei calcari di Dorgali

### 9.1. SCHEMA DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SUPERFICIALE E SOTTERRANEA

Il reticolo idrografico sulle litologie affioranti è impostato su un sistema di valli e compluvi, ed è caratterizzato da una ramificazione ben sviluppata in tutta l'area vasta che include le zone di interesse per il progetto. I principali corsi d'acqua in prossimità dell'impianto partendo da Ovest sono il **Riu Turbino** che diventa **Riu Roledu** che scorre da Nord verso Sud a Occidente dell'intero parco, il **Riu Bau 'E Carru** che attraversa il parco le turbine IS02 e IS03 nelle parte centrale, il **Riu Gutturu Strunconis** tra le IS03 e la IS04 e che confluisce insieme al **Riu Congiuedda** e al **Bau 'e Carru** nel **Riu Congiaduredda** con direzione Sud Ovest e il **Riu Carrulo** scorre poi verso sud a oriente rispetto alla **IS07**.

Lo sviluppo del reticolo idrografico è strettamente connesso alle caratteristiche chimico-fisiche delle rocce costituenti il substrato, e al controllo tettonico che si manifesta molto evidente su alcune linee di deflusso. Gli impluvi costituiscono essenzialmente le aste tributarie di primo e secondo ordine dei torrenti che scorrono più a valle: essi presentano carattere essenzialmente torrentizio con deflussi stagionali legati strettamente alle precipitazioni. Lungo i versanti a maggiore pendenza i corsi d'acqua assumono un elevato potere erosivo, mentre solamente a valle, in corrispondenza di aste di ordine intermedio sono evidenti fenomeni di deposizione di coltri alluvionali di spessore molto modesto. Il progetto prevede l'installazione delle torri eoliche sugli alti topografici, e i corsi d'acqua presenti scorrono allontanandosi da queste aree. Ne consegue che, le aree in studio si collocano in concomitanza con gli spartiacque dei bacini idrografici dei fiumi che interessano la zona.

### 9.2. CARATTERISTICHE E DINAMICHE 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.

Il basamento paleozoico è costituito principalmente da litologie impermeabili e di conseguenza nel complesso sfavorevoli alla ritenzione delle acque meteoriche. A causa dell'acclività dei versanti, i suoli mancano quasi del tutto su molti rilievi, questo è particolarmente evidente in corrispondenza del basamento Paleozoico. L'impermeabilità del bacino, l'acclività dei versanti con la concentrazione stagionale delle precipitazioni, possono determinare deflussi unitari fra i maggiori di tutti i corsi d'acqua della Sardegna soprattutto in corrispondenza degli eventi alluvionali, che interessano con una certa cadenza, gran parte della Sardegna orientale.

Le litologie che interessano l'area di progetto presentano una permeabilità secondaria o anche detta per fessurazione, acquisita dalla roccia a seguito della sua formazione o per successivi episodi geodinamici.

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 spaziatore, 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.

UNITA'	FORMAZIONE GEOLOGICA	DESCRIZIONE
Detritico carbonatica quaternaria	traverzini, detriti di falda	Permeabilità alta per porosità
Alluvioni plio quaternarie	Alluvioni antiche, alluvioni recenti, alluvioni attuali, depositi fluvio lacustri. Sistema di Fortovesme	Permeabilità per porosità complessiva medio bassa, localmente medio alta nei livelli a matrice più grossolana
Vulcaniti plio quaternarie	Basalti delle Giare	Permeabilità complessiva per fratturazione da medio-bassa a bassa, localmente in corrispondenza di facies fratturate e cavernose permeabilità per fratturazione e subord. per porosità medio alta
Detritica pliocenica	Conglomerati, arenarie, argille di sistema alluvionale	Permeabilità per porosità complessivamente bassa localmente media in corrispondenza dei livelli a matrice più grossolana
Detritico carbonatica miocenica superiore	calcarei, calcareniti, arenarie marnose con subordinate marne e siltiti, conglomerati arenarie	Permeabilità complessiva medio alta, da medio bassa a medio alta per porosità nei termini detritici, medio alta per fratturazione e/o cavitazioni nei termini carbonatici
	marni, marne arenacee e siltose, conglomerati a matrice argillosa con subordinate arenarie, calcareniti e sabbie con locali intercalazioni tufacee	Permeabilità complessiva medio bassa per porosità alta, localmente medio alta per porosità nei termini sabbioso-arenacei
Detritica carbonatica oligo miocenica inferiore	Conglomerati e arenarie con matrice generalmente argillosa siltite e argille con locali intercalazioni di tuffi di ambiente continentale	Permeabilità per porosità bassa
Vulcaniti oligomioceniche	vulcaniti calcalkaline	Permeabilità per fratturazione complessiva medio bassa
carbonatica mesozoica	calcarei, calcari dolomitici, dolomie, calcari oolitici, calcari bioclastici, calcari marnosi, marne calcareniti, calcari soliferi, arenarie, calcari micritici, dolomie, marnose, marne e gessi e argille di ambiente transizionale e marino	Permeabilità complessiva medio alta per fratturazione e carsismo nei termini carbonatici, e per porosità nei termini arenacei, localmente bassa nei termini marnoso e argillosi
detritico permio carbonifero e triassica	argille, siltiti, arenarie e conglomerati, talora con intercalazioni di calcari silticizzati, di calcari con solet lacustri di ambiente continentale	Permeabilità per fratturazione complessiva medio bassa, localmente media in corrispondenza delle aree con sistemi di fratturazione sviluppati
Magmatica paleozoica	complesso filoniano, complesso vulcanico	Permeabilità complessiva bassa per fratturazione localmente media in corrispondenza delle aree con sistemi di fratturazione sviluppati
Metamorfica superiore paleozoica	complesso metamorfico scissoso	Permeabilità complessiva bassa per fratturazione, localmente in corrispondenza delle lenti carbonatiche medio alta per fratturazione e carsismo

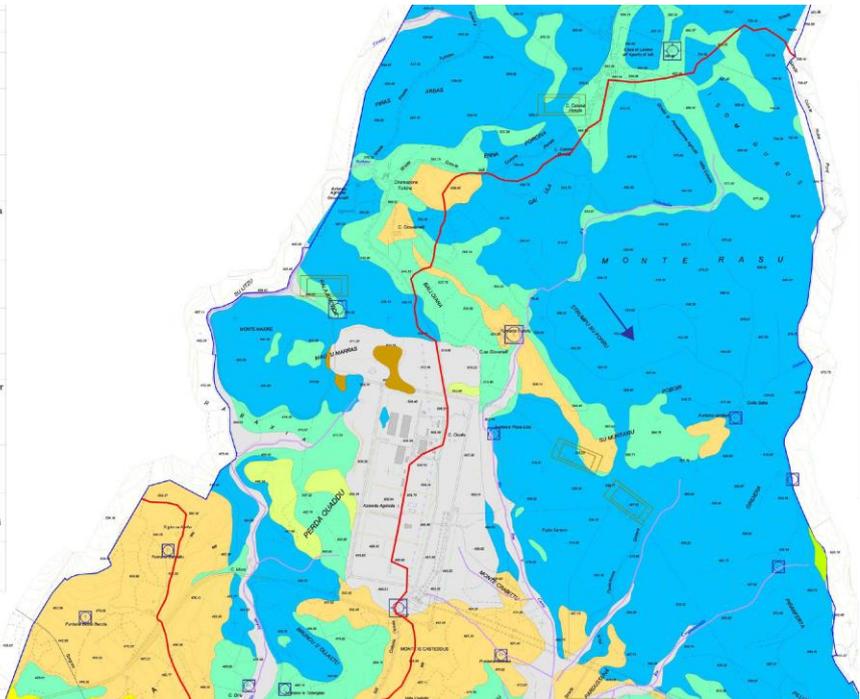


Figura 18 stralciop della Carta Idrogeologica del PUC Isili, 2015

Di seguito viene illustrato in uno schema il processo di infiltrazione accumulo e circolazione legato al regime delle piogge e caratterizzante in analoga misura sia le litologie metamorfiche che quelle intrusive 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 filtra nel terreno e nella roccia sottostante scorrendo lungo le fratturazioni in maniera più o meno efficace in funzione del grado di apertura delle stesse.

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.

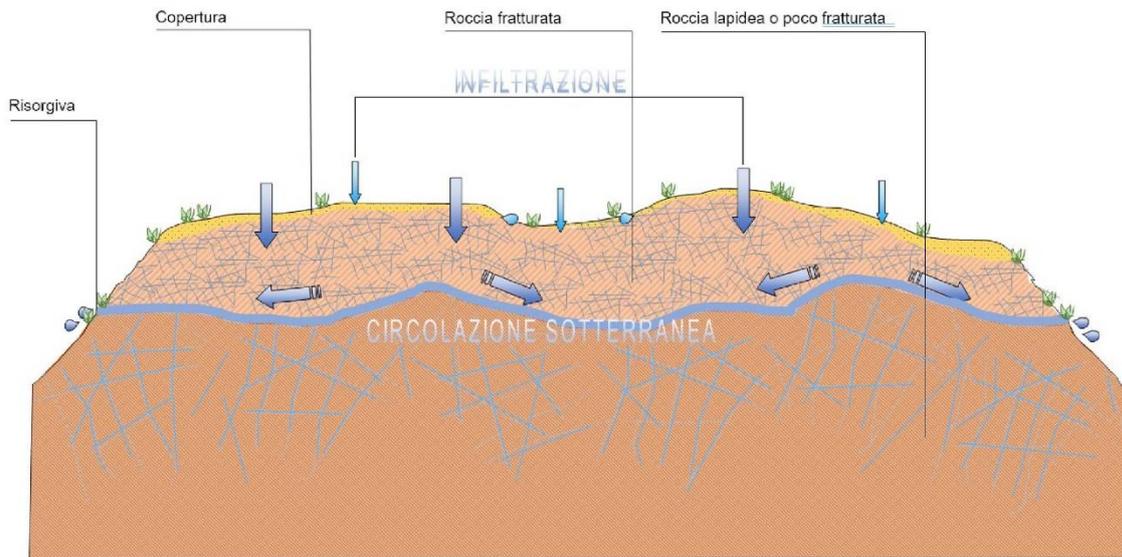


Figura 19 Schema esemplificativo, non in scala, dei processi di infiltrazione e deflusso sotterraneo

Dalla carta della permeabilità dei suoli, resa disponibile Geoportale della Regione Autonoma della Sardegna, si evince che l'area di studio presenta, nel complesso, una **permeabilità medio-alta per carsismo e fratturazione e medio alta per porosità per i terreni mesozoici e terziari**, eccetto che per le aree in cui affiorano le litologie paleozoiche, che presentano **permeabilità medio-bassa per fratturazione**.

**Nelle aree che interessano direttamente le fondazioni delle turbine il substrato presenta una permeabilità alta per carsismo e fratturazione.**

Per quanto riguarda gli acquiferi e le loro caratteristiche nell'area di Perd'e Cuaddu i calcari dolomitici, a tetto di faglie dirette, vanno ad immergersi sotto i tufi bentonizzati, le arenarie e i calcari miocenici, dando così luogo ad un acquifero in pressione. La struttura idrogeologica, verificata da alcuni sondaggi è però limitata non essendo stata individuata né verso Isili né verso Nuragus.

Nella successione miocenica l'acquifero più produttivo è principalmente costituito dalle arenarie conglomeratiche della formazione di Nurallao poggianti sul basamento paleozoico. Il loro spessore (200m) e la loro estensione sono fattori favorevoli per un buon immagazzinamento. (fonte Progetto CARG)

Nell'area di interesse sono state individuate diverse risorgenze per lo più con portate sotto il litro al secondo (Funtana Picca Linna, Funtana Giridiera, Funtana Perdosa) tranne Funtana Isidoriu la cui portata è compresa tra 1 l/sec e i 5l/sec. (fonte PUC Isili, 2015).

### 9.3. 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 nei pressi delle turbine e alle quote di realizzazione delle opere che prevedono gli scavi più profondi (fondazioni degli aerogeneratori, piazzole e aree di deposito temporaneo). Nel caso specifico la sorgente di Fontana Perdosa si trova lungo una linea di faglia che determina una soglia idraulica su cui si manifesta più a nord anche la sorgente Fontana Girdiera. Il limite d'emergenza di queste sorgenti il cui acquifero è rappresentato dalla formazione dei calcari di Dorgali è la sottostante e meno permeabile formazione di Genna Selole. Dalle informazioni geologiche la profondità dell'acquifero è tale che quest'ultimo non venga influenzato dalle opere in progetto e con il normale deflusso delle acque sotterranee. Sarà comunque opportuno in fase di progettazione esecutiva approfondire con un monitoraggio accurato le portate di tali sorgenti al fine di minimizzare eventuali interferenze attualmente non individuabili.

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.

## 10. 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:

- Definire la stratigrafia ed i rapporti tra le formazioni geologiche interessate dagli interventi;
- Definire le caratteristiche fisico-meccaniche degli ammassi rocciosi coinvolti nelle opere in progetto;
- 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°2 **stendimenti di sismica** con tecnica **MASW** e n°4 **stendimenti di sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni. È 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	Metodologie	Orientamento	Geofoni/ Picchetti	Interdistanza	Lunghezza(m)
R/M 1 (SMT01)	Rifrazione/Masw	SO-NE	24	3,0	69,0
R2 (ST02)	Rifrazione	SSE-NNO	24	3,0	69,0
R3 (ST03)	Rifrazione	ONO-ESE	24	3,0	69,0
R/M 4 (SMT04)	Rifrazione/Masw	NNO-SSE	24	3,0	69,0
T1 (SMT01)	Tomografia Elettrica	SO-NE	32	3,0	93,0
T2 (ST02)	Tomografia Elettrica	SSE-NNO	32	3,0	93,0
T3 (ST03)	Tomografia Elettrica	ONO-ESE	32	3,0	93,0
T4 (SMT04)	Tomografia Elettrica	NNO-SSE	32	3,0	93,0

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

### 10.1. 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.

#### 10.1.1. CARATTERISTICHE DELLE STESE SISMICHE

Per tutte le basi sismiche sono state eseguite 9 energizzazioni intervallate ogni 3 geofoni secondo lo schema di acquisizione definito dalle specifiche tecniche.

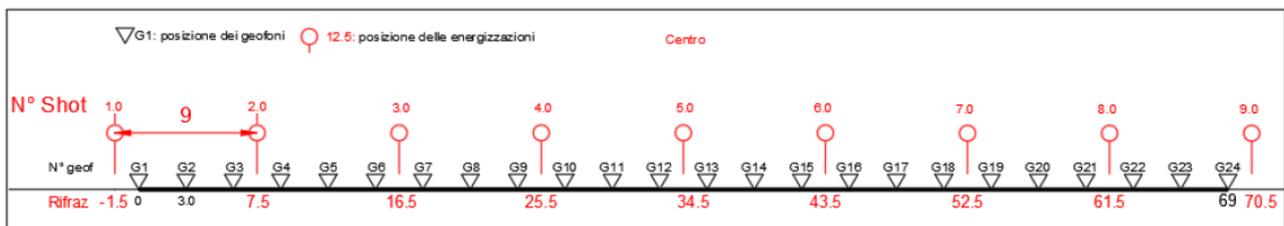


Figura 20 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

#### 10.1.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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

#### 10.1.3. 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. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

L'inversione dei dati è stata eseguita secondo i criteri della tomografia sismica, mediante apposito software specialistico basato su tecniche di ottimizzazione non lineare. La sovrapposizione tra dromocrone sperimentali e calcolate ha portato a valori ottimi con valori dell'RMS <5%.

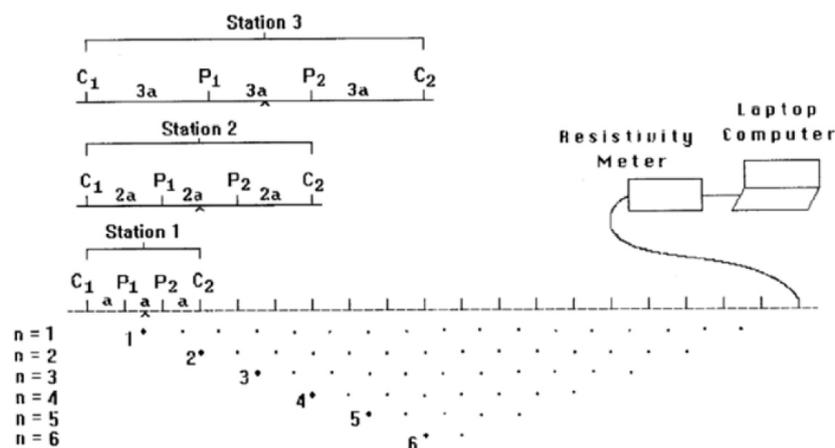
In particolare, l'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione è stata eseguita secondo il metodo tomografico impiegando il software Rayfract 4.01, che parte da un modello iniziale generato con la tecnica Deltat-V. Successivamente viene effettuata l'inversione iterativa del modello con la tecnica WET (WavepathEikonalTraveltime tomography processing) che analizza la propagazione dei vari fronti d'onda generati nei punti di tiro fino ad ogni geofono.

## 10.2. INDAGINI SISMICHE: TOMOGRAFIA ELETTRICA

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 48 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.

#### 10.2.1. CARATTERISTICHE DELLE STESE SISMICHE

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.

#### 10.2.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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

#### 10.2.3. ELABORAZIONE DEI DATI

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.

### 10.3. 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.

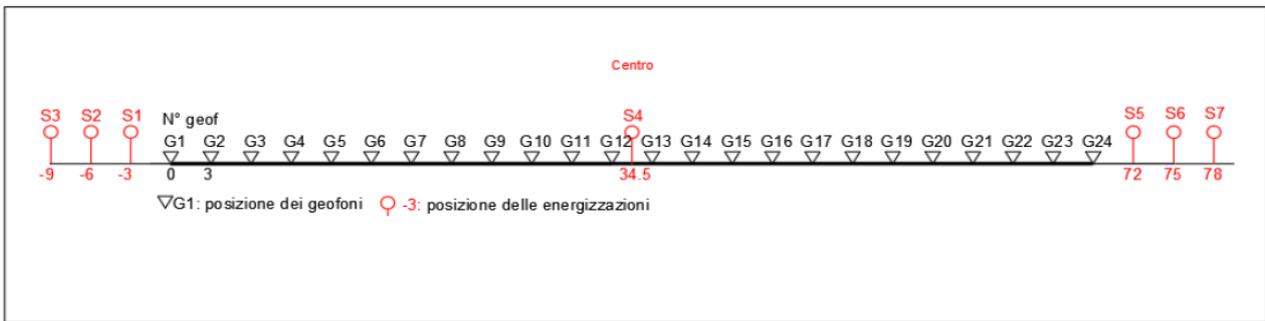
### **Profondità di indagine**

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.

#### *10.3.1. 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 2,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in "andata" e in "ritorno" con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema), 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.



### 10.3.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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

### 10.3.1. ELABORAZIONE DEI DATI

Il metodo interpretativo della M.A.S.W. si compone dei seguenti passaggi di analisi dei segnali acquisiti:

- individuazione della variazione del segnale acquisito nel tempo
- analisi di Fourier con definizione dei contenuti spettrali acquisiti nei segnali
- stacking dello spostamento di fase con definizione delle velocità di rotazione retrograda compatibile con il campo di frequenza definita.

A posteriori dell'analisi matematica del segnale acquisito, definito un modello stratigrafico compatibile con la geologia locale, si provvede all'inversione della curva di dispersione ottenendo la sismo-stratigrafia.

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

### 10.3.2. 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.

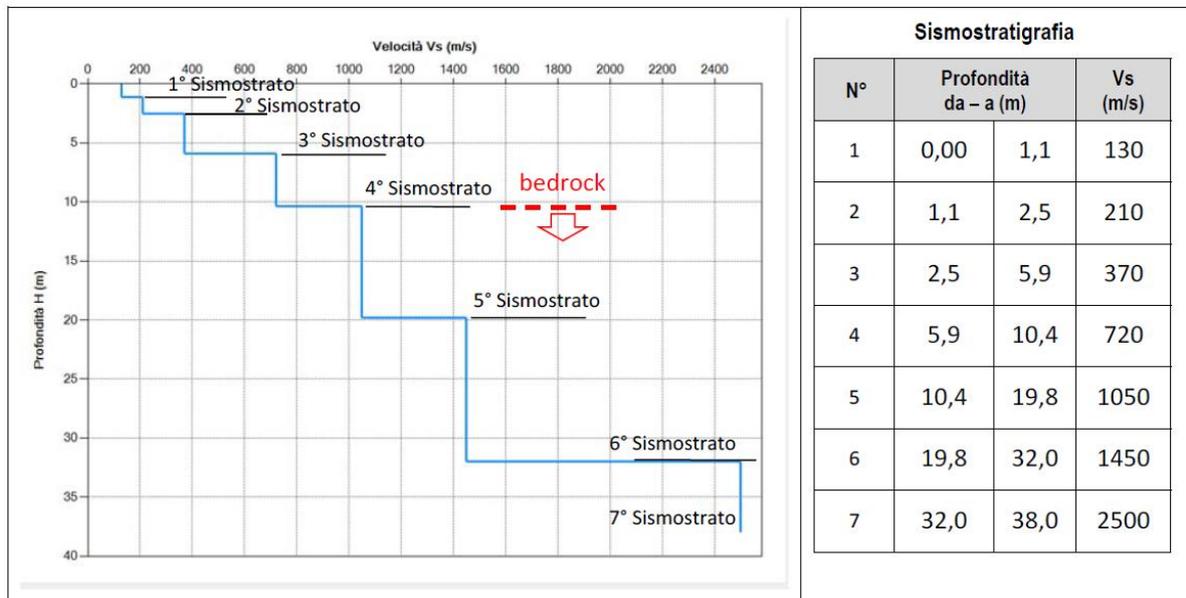
## 10.4. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO SMT01-TURBINA IS02

### 10.4.1. SMT01-IS02: MASW M1

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

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0-1,1	1° sismostrato con $V_s$ di <b>130 m/s</b> , Terre poco addensate
1,1-2,5	2° sismostrato con $V_s$ di <b>210 m/s</b> , Terre mediamente addensate
2,5-5,9	3° sismostrato con $V_s$ di <b>370 m/s</b> , Terre addensate
5,9-10,4	4° sismostrato con $V_s$ di <b>720 m/s</b> , Substrato roccioso intensamente fratturato
10,4-19,8	5° sismostrato con $V_s$ di <b>1050 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
19,8-32,0	6° sismostrato con $V_s$ di <b>1450 m/s</b> , Substrato roccioso da fratturato a sano
32,0-38,0	7° sismostrato con $V_s$ di <b>2500 m/s</b> , Substrato roccioso sano

MASW M1 - 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 **10,4 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **10,4 m** di profondità dal p.c. è pari a:  $V_{s,eq} = 10,4 / 0,0305 = 340,23$  m/s che dà luogo ad una categoria E, ossia:

**Categoria E:** terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

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 $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,1	terre	1.800	260	130	0,33	78	10	29	78
2	1,1-2,5	terre	2.000	420	210	0,33	235	28	88	235
3	2,5-5,9	terre	2.100	740	370	0,33	765	92	284	765
4	5,9-10,4	12%	2.200	1.440	720	0,33	3.040	365	1.138	3.040
5	10,4-19,8	15%	2.350	2.100	1050	0,33	6.914	1.037	2.589	6.914
6	19,8-32,0	22%	2.400	2.900	1450	0,33	13.455	2.960	5.051	13.455
7	>32,0	25%	2.450	5.000	2500	0,33	40.836	10.209	15.308	40.836

Figura 21 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<sub>spt</sub>, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

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

#### 10.4.2. R1-SMT01-IS02: SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P E TOMOGRAFIA ELETTRICA

Nella sezione di sismica a rifrazione **R1-SMT01-IS02** 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 2,5/8,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,5/8,0 a 13,0/17,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 13,0/17,5 a 18,0/20,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 18,0/20,0 a 30,0-35,0	2400-4800

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 compresi tra 2,5 e 8,0 metri da p.c e un andamento leggermente irregolare rispetto 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 13,0 e 17,5 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 18,0 e 20,0 m di profondità dal p.c.

Il **sismostrato D** rappresenta invece un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità medio-alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine comprese tra 30,0/35,0 m dal p.c.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle  $V_p$  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 13,0 e 17,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 18,0 e 20,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

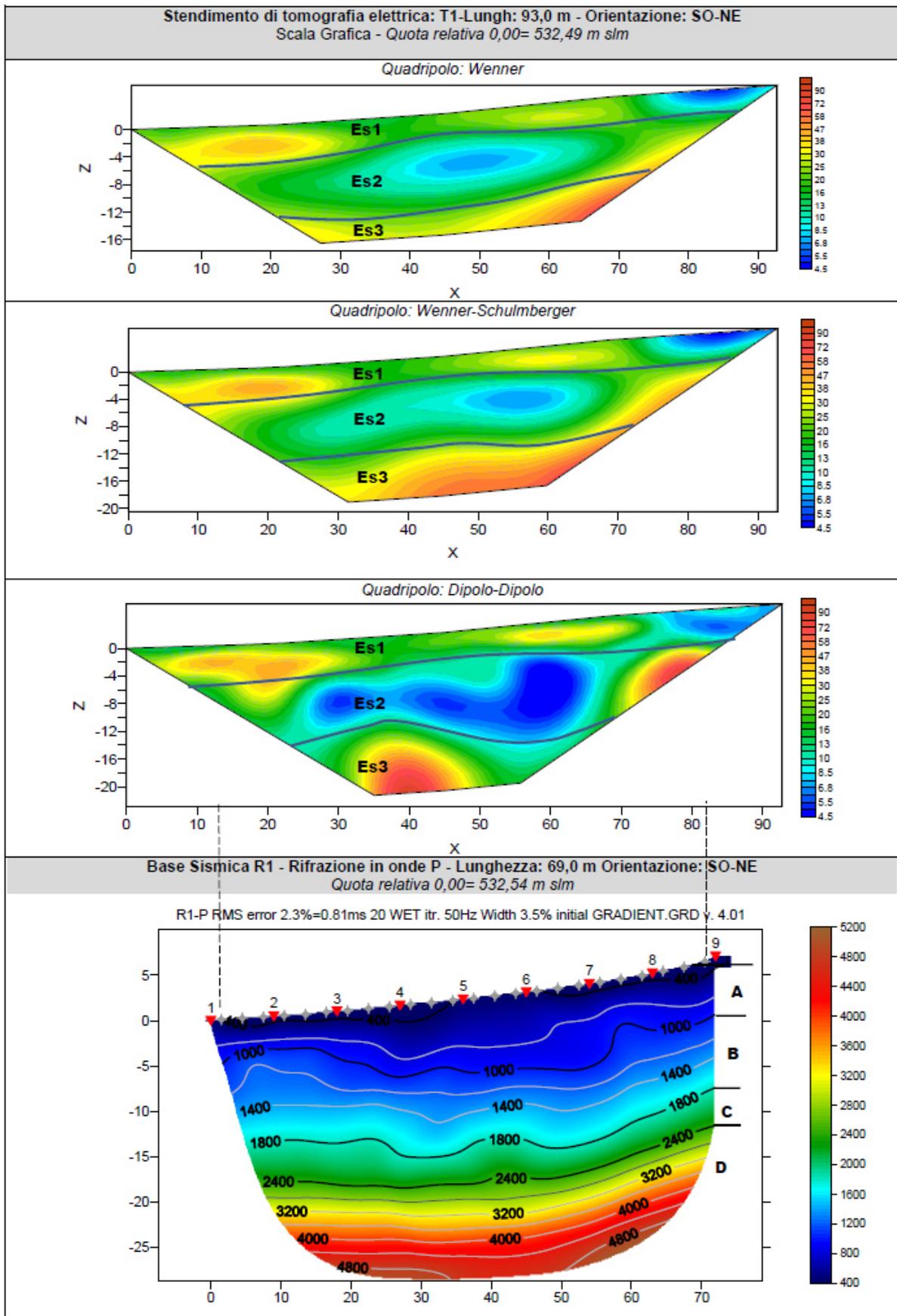
La sezione di tomografia elettrica T1, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività basse; nello specifico si rileva:

un primo elettrostrato (ES1) con spessori pari a circa 4,0/7,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali, caratterizzati da resistività bassa con range di valori compreso tra 4,5 e 40  $\Omega \cdot m$  con i valori più bassi rilevati tra le progressive 78-80 m;

segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da uno spessore maggiore rispetto agli elettrostrati adiacenti e valori bassi di resistività (tra 6 e 30  $\Omega \cdot m$ ) rilevabili soprattutto nella zona centrale della sezione, tra le progressive 40-60 m, situazione dovuta probabilmente alla presenza di una falda idrica;

il terzo elettrostrato (Es3) mostra dei valori di resistività leggermente maggiori, compresi tra 25 e 70  $\Omega \cdot m$ .

**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).**



## 10.5. RISULTATI DELLE INDAGINI SITO SMT02-TURBINA IS03

### 10.5.1. R2-SMT02-IS03: SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P E TOMOGRAFIA ELETTRICA

Nella sezione di sismica a rifrazione **R2-SMT02-IS03** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,5/2,5	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,5/2,5 a 3,0/4,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 3,0/4,5 a 5,0/7,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/7,0 a 16,0/18,0	2400-4800

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 da terre di copertura (facilmente rippabile) presenta spessori molto ridotti compresi tra 1,5 e 2,5 metri da p.c e un andamento pressoché 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 4,5 m dal p.c.

Il **sismostrato C** costituito da rocce poco fratturate e/o sane (rippabili con difficoltà) si osserva fino a profondità comprese tra 5,0 e 7,0 m di rispetto al p.c.

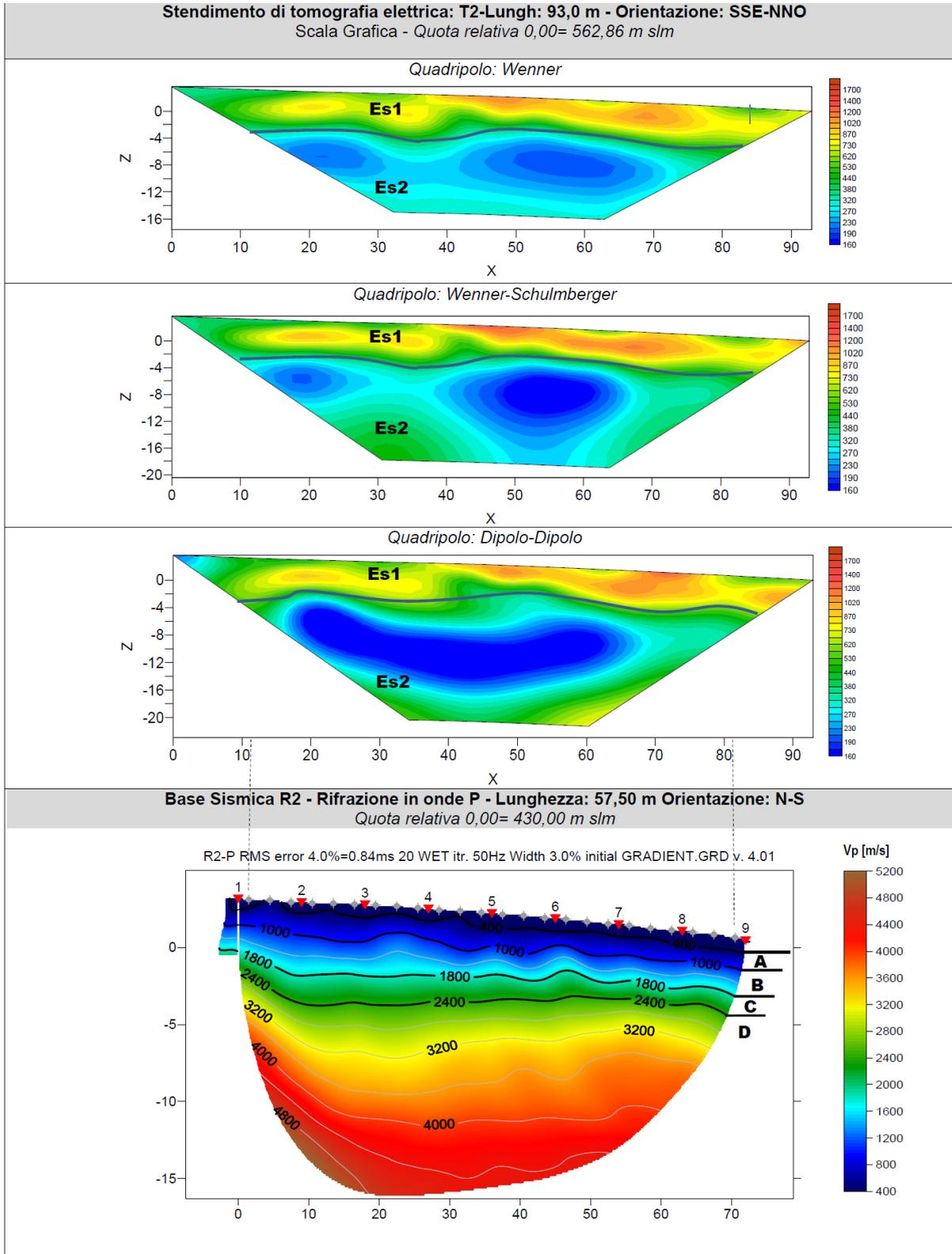
Il **sismostrato D** rappresenta il substrato lapideo non rippabile, caratterizzato da velocità di propagazione delle onde elastiche alte e si riscontra fino alle massime profondità di indagine.

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 investigato.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 3,0 e 4,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a partire dalle profondità comprese tra 5,0 e 7,0 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 medio-alte rispetto alle sezioni precedenti; nello specifico si rileva la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 4,0/6,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali e facies sedimentarie, con valori compresi nel range da 400 a 1200  $\Omega \cdot m$ ; segue un secondo elettrostrato (Es2) sino alla massima profondità rappresentata in sezione, caratterizzato da valori inferiori di resistività (valori compresi tra 160 e 530  $\Omega \cdot m$ ) riconducibile alla presenza di rocce tenere/fratturate e/o la probabile presenza di una o più falde idriche lungo tutta la sezione

investigate. 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).



## 10.6. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO SMT03-TURBINA IS04

### 10.6.1. M3-SMT03-IS04: SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P E TOMOGRAFIA ELETTRICA

Nella sezione di sismica a rifrazione **R3-SMT03-IS04** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R3	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/2,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/2,0 a 2,5/5,5	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,5/5,5 a 4,0/10,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 4,0/10,0 a 20,0/24,0	2400-4800

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 4800 m/s; nello specifico il settore laterale sinistro della sezione (progressive da 10 a 30 m) presenta valori di velocità maggiori a parità di profondità, fatto correlabile alla presenza di un substrato litoide poco fratturato.

Il **sismostrato A** caratterizzato da terre di copertura (facilmente rippabile) presenta un esiguo spessore compreso tra 1,0 e 2,0 metri da p.c. e un andamento sub-parallelo rispetto al piano campagna.

Il **sismostrato B** caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta un andamento leggermente irregolare rispetto al piano campagna con piccole variazioni di spessore, esso si rileva fino a profondità comprese tra 2,5 e 5,5 m dal p.c.

Il **sismostrato C** costituito da rocce poco fratturate e sane (rippabili con difficoltà) si riscontra fino a profondità comprese tra 3,5 e 10,0 m rispetto al piano campagna, presentando un aumento laterale di spessore.

Il **sismostrato D**, costituito da rocce sane (non rippabili) lo si riscontra a partire da 3,5 e 10,0 m rispetto al p.c. sino alle massime profondità rilevabili in sezione.

Dalla sezione sismica si osservano nel complesso valori di Vp medio-alti, in particolare si riscontra una riduzione laterale delle velocità dalla progressiva 40 alla progressiva 65 m verosimilmente dovuto a una minore densità del materiale investigato a causa di una maggiore grado di fratturazione/alterazione rispetto al materiale circostante.

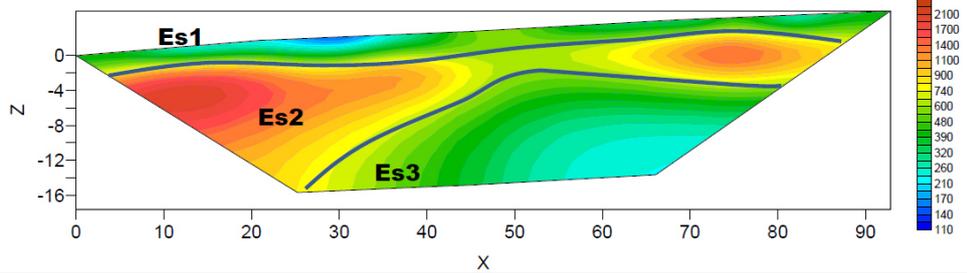
In termini di grado di rippabilità si evidenzia che già a partire da profondità comprese tra 2,5 e 5,5 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 3,5 e 10,0 si riscontra la presenza di materiale non rippabile. La sezione di tomografia elettrica T3, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività medio-alta; nello specifico si distingue un primo

elettrostrato (ES1) di esiguo spessore pari a circa 1,0 a 2,0 m riconducibile alla coltre di terreni superficiali con valori di resistività compresi tra 180 e 550  $\Omega\cdot m$ , segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori di resistività tra 550 e 2100  $\Omega\cdot m$  riconducibile alla presenza di un substrato roccioso maggiormente resistivo; chiude la sequenza un terzo elettrostrato (ES3) ben individuabile nella configurazione Dipolo-Dipolo caratterizzato da valori decrescenti di resistività riconducibile a materiale alterato/fratturato.

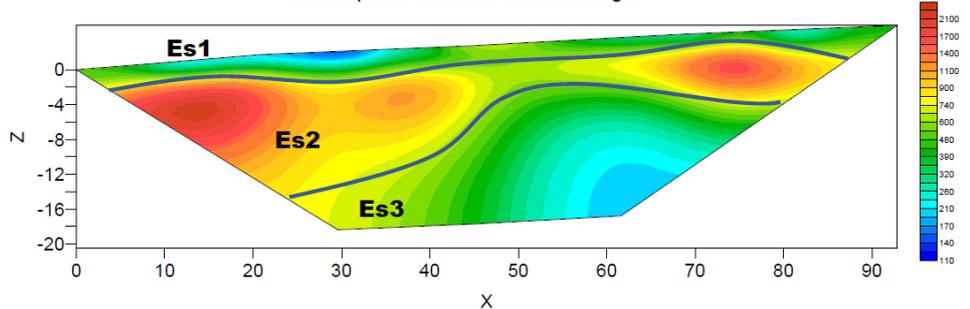
**Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione mette in luce che non si rilevano anomalie riconducibili a cavità/vuoti o valori critici (v. anomalie di elevatissima resistività e/o bassissima velocità).**

**Stendimento di tomografia elettrica: T3-Lungh: 93,0 m - Orientazione: ONO-ESE**  
 Scala Grafica - Quota relativa 0,00= 612,57 m slm

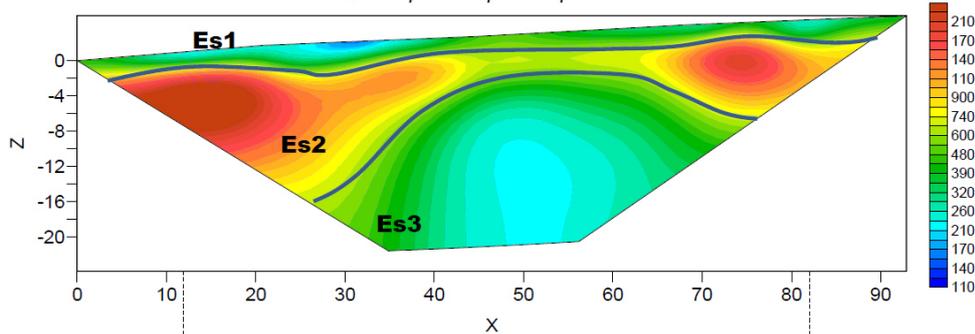
Quadripolo: Wenner



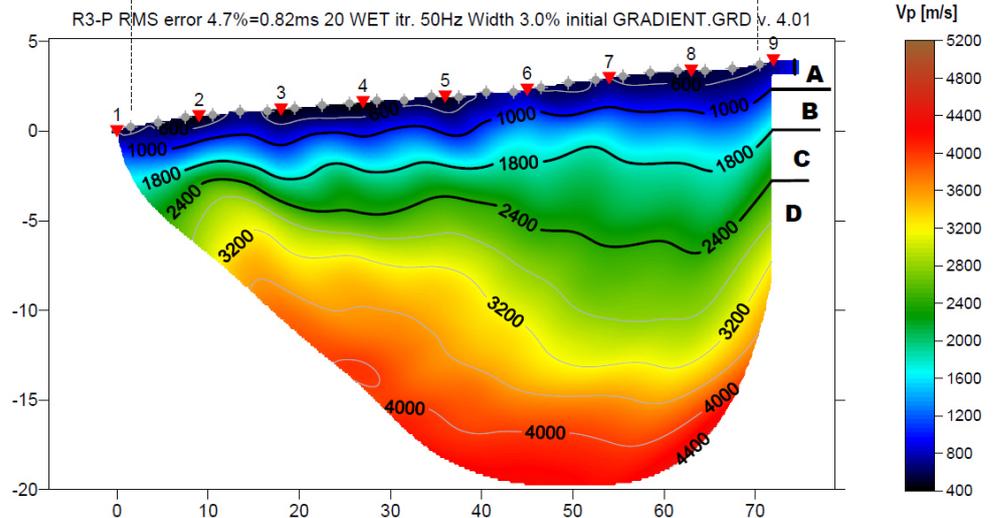
Quadripolo: Wenner-Schulmberger



Quadripolo: Dipolo-Dipolo



**Base Sismica R3 - Rifrazione in onde P – Lunghezza: 69,0 m - Orientazione: ONO-ESE**  
 Quota relativa 0,00= 613,40 m slm



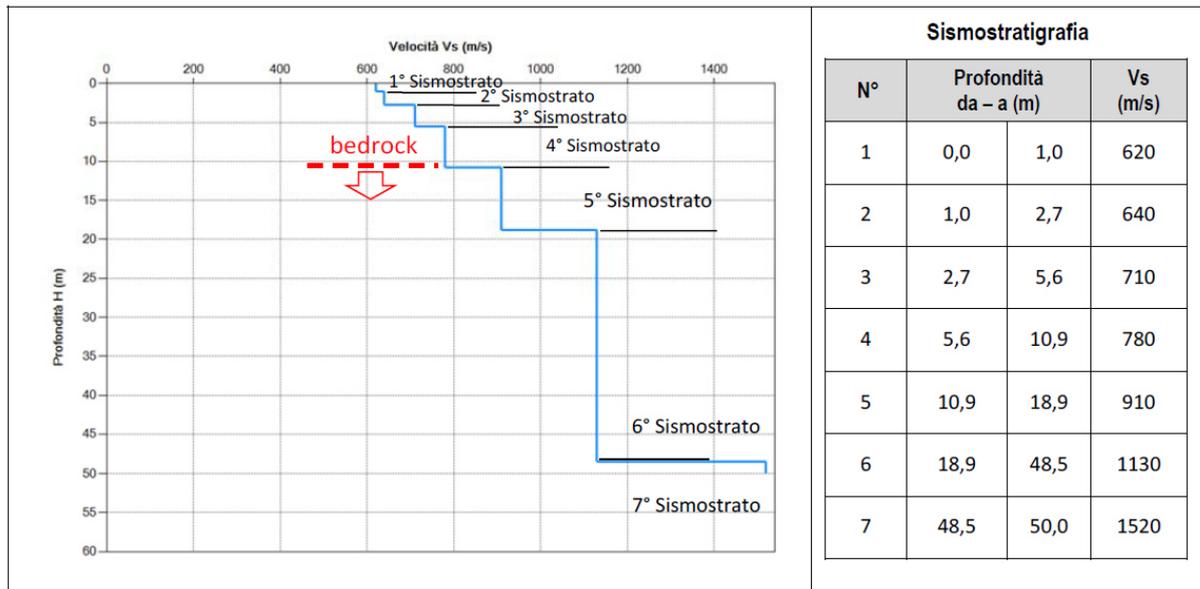
## 10.7. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO SMT04-TURBINA IS07

### 10.7.1. SMT04-IS07: MASW M4

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M4, 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
0,0-1,0	1° sismostrato con Vs di <b>620 m/s</b> , Terre addensate
1,0-2,7	2° sismostrato con Vs di <b>640 m/s</b> , Terre mediamente addensate
2,7-5,6	3° sismostrato con Vs di <b>710 m/s</b> , Terre molto addensate
5,6-10,9	4° sismostrato con Vs di <b>780 m/s</b> , Substrato roccioso intensamente fratturato
10,9-18,9	5° sismostrato con Vs di <b>910 m/s</b> , Substrato roccioso fratturato
18,9-48,5	6° sismostrato con Vs di <b>1130 m/s</b> , Substrato roccioso da fratturato a sano
48,5-50,0	7° sismostrato con Vs di <b>1520 m/s</b> , Substrato roccioso sano

### MASW M4 - 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 **10,8 m** ( $V_s > 800$  m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **10,8 m** di profondità dal p.c. è pari a:  $V_{s,eq} = 10,8/0,01501 = 719,63$  m/s che dà luogo ad una categoria B, ovvero:

**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 $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]	[adim]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,0	terre	1.800	1.240	620	0,33	1.844	222	696	696
2	1,0-2,7	terre	2.000	1.280	640	0,33	2.187	264	824	824
3	2,7-5,6	terre	2.100	1.420	710	0,33	2.824	340	1.059	1.059
4	5,6-10,9	12%	2.200	1.560	780	0,33	3.570	428	1.334	1.334
5	10,9-18,9	15%	2.350	1.820	910	0,33	5.188	778	1.942	1.942
6	18,9-48,5	22%	2.400	2.260	1130	0,33	8.169	1.797	3.060	3.060
7	>48,5	25%	2.450	3.040	1520	0,33	15.093	3.773	5.659	5.659

Figura 22 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<sub>SPT</sub>, i parametri di resistenza al taglio e di deformazione. Nel caso in esame trattandosi di materiali a granulometria grossolana si consiglia di impiegare la correlazione di Imai (1977) di seguito indicata.

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

#### 10.7.2. R3-SMT04-TL07: TOMOGRAFIA ELETTRICA E SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P

Nella sezione di sismica a rifrazione **R3-SMT04-IS07** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R4	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 1,0/3,5	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 1,0/3,5 a 2,5/9,0	1000-1800
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	Da 2,5/9,0 a 5,0/14,0	1800-2400
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	Da 5,0/14,0 a 25,0/26,0	2400-4800

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 3200 m/s.

Il **sismostrato A**, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta spessori compresi tra 2,5 e 4,5 metri 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 leggere variazioni di spessore, si rileva fino a profondità comprese tra 13,0 e 15,0 m dal p.c.

Il **sismostrato C**, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) presenta anch'esso leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 16,0 e 18,0 dal p.c.

Il **sismostrato D**, caratterizzato da rocce debolmente fratturate e sane (non rippabili) si osserva invece fino alla massima profondità di indagine, ovvero 22,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte.

Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle  $V_p$  con alcune 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 13,0 e 15,0 m dal p.c i terreni risultano difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 16,0 e 18,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

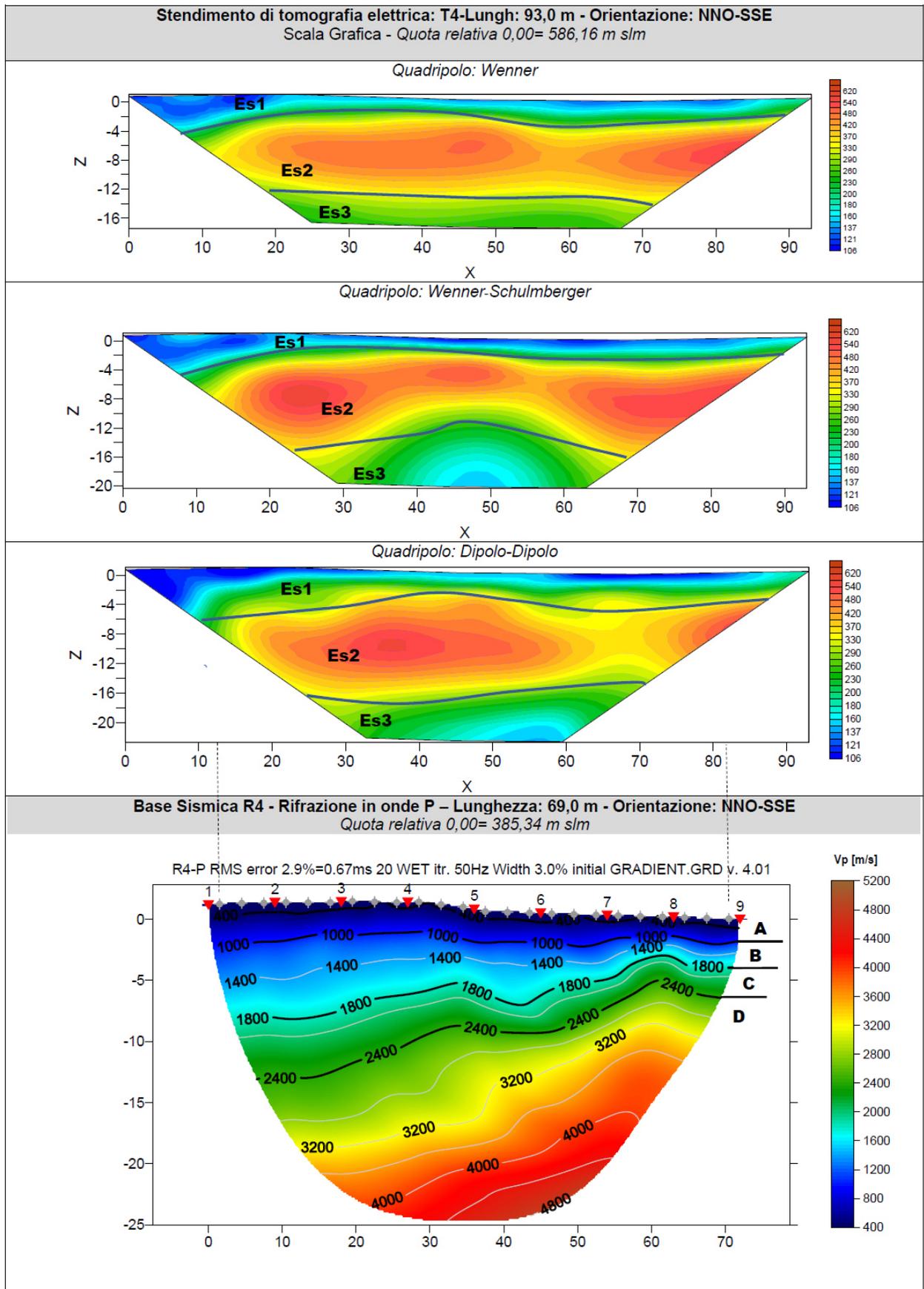
La sezione di tomografia elettrica T4, realizzata con 3 differenti geometrie di acquisizione (Wenner, Wenner Schulmberger e Dipolo Dipolo) mette in luce la presenza di terreni caratterizzati da resistività media; nello specifico si rileva

un primo elettrostrato (ES1) di spessore variabile e compreso tra 2,0 e 4,0 m riconducibile sia alla coltre di terreni superficiali con valori di resistività compresi tra 100 e 250  $\Omega \cdot m$ , segue

un secondo elettrostrato (Es2) con variazioni di resistività nella zona centrale della sezione presumibilmente legate alla presenza di zone più competenti dunque maggiormente resistive, con valori compresi tra 250 e 600  $\Omega \cdot m$ ;

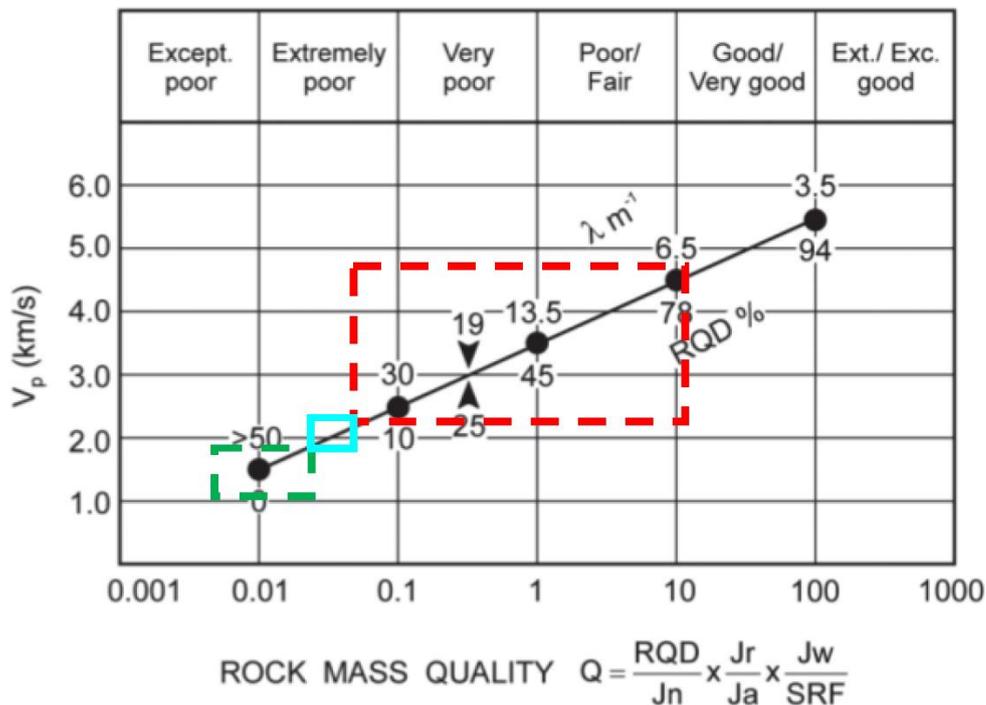
il terzo elettrostrato (Es3) presenta resistività inferiori rispetto al soprastante, con valori compresi tra 150 e 250  $\Omega \cdot m$ , dovuto verosimilmente ad una alterazione spinta dei materiali presenti.

**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).**



### 10.8. INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONI DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

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



Sulla base dei litotipi individuati dalla sismica in via preliminare e previa successiva conferma tramite esecuzione di sondaggi geognostici si può applicare la correlazione ai sismostrati B, C e D. Il rettangolo verde indica il settore del sismostrato B, con un RQD compreso tra 0 e 3, un numero di fratture per metro che varia tra 50 e 45 e un indice di qualità Q medio di 0,01 (ammasso roccioso estremamente scadente); il rettangolo celeste rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 3 e 8, un numero di fratture per metro compreso tra 40 e 35 e un valore dell'indice Q medio di 0,04 (ammasso roccioso da estremamente scadente a scadente/discreto); infine il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato D che ha valori di RQD compresi tra 8 e 80, un numero di fratture per metro compreso tra 35 e 6,5 e un valore dell'indice Q tra min 0,035 e max 10. Da quanto sopra le 3 unità sismostratigrafiche possono essere classificate come segue:

Sismostrati	Vp (m/s)	RQD (%)	$\lambda$ (1/m)	Q*
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	1000-1800	0-3	50-40	0.01-0.04
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (rippabili con difficoltà)	1800-2400	3-8	40-35	0.04-0.08
D: Unità delle rocce sane (non rippabili)	2400-4800	8-80	35-6.5	0.08-10

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

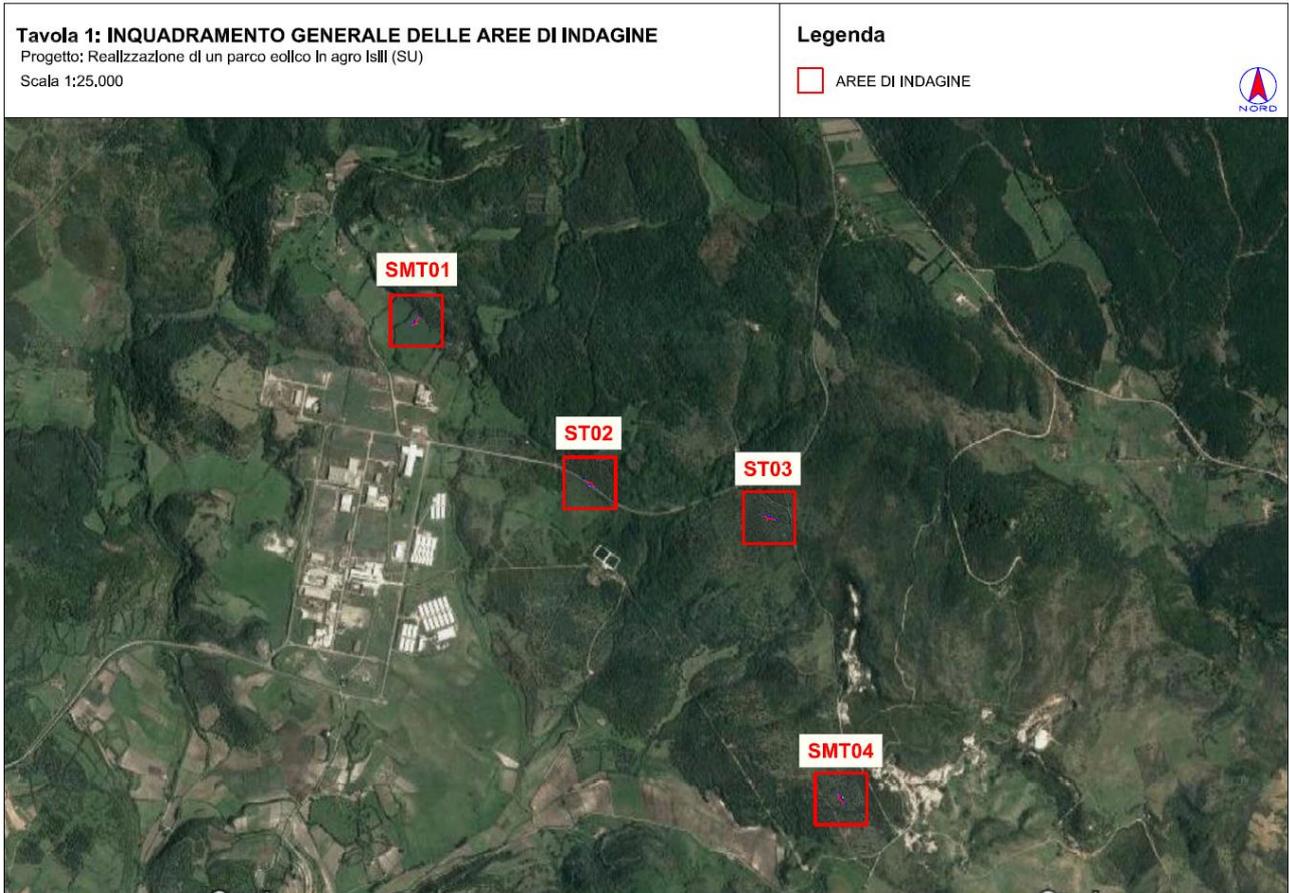
La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto litotratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche ed elettriche. Lungo la verticale indagata si evince la presenza di sismostrati con velocità Vp e Vs 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 Vs 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:

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	V <sub>seq</sub> [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
M1 (SMT01)	10,40	340,23	E
M4 (SMT04)	10,80	719,63	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.



## 11. MODELLAZIONE GEOLOGICA

### 11.1. 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:

- 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 metamorfiti 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.
- 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, sono stati individuati **2 modelli geologici rappresentativi** descritti di seguito per gruppi di turbine.

#### 11.1.1. MODELLO GEOLOGICO 01

#### **Turbine IS\_01 – IS\_02 – IS\_03:**

da 0,00 a 2,5m – depositi colluviali/eluviali/suoli

da 2,5m a 6m – conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate

da 6,00m a 20,00m – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a fratturati

da 20,00m a 32m - dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani

FALDA: a partire dalla quota di 6m da p.c. (su IS\_02) e 4,00m da p.c. (su IS\_03 si riscontra presenza di falda. Nell'area è presente una risorgenza denominata Funtana Isidoriu nei pressi della IS\_01.

#### 11.1.2. MODELLO GEOLOGICO 02

##### **Turbine IS\_04 – IS\_05 – IS\_06 – IS\_07:**

da 0,00 a 1,00m – depositi colluviali/eluviali/suoli

da 1,00m a 11mm – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a fratturati

da 11,00m a 50m - dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani

FALDA: non riscontrata

**Per quanto concerne la parametrizzazione, stante le risultanze, si ritiene di adottare come modello geologico del sito quello maggiormente cautelativo e perciò a caratteristiche geotecniche peggiori e condizioni di falda presente.**

##### **Pertanto, la stratigrafia di riferimento è la seguente:**

da 0,00 a 2,5m – depositi colluviali/eluviali/suoli **(S1)**

da 2,5m a 6m – conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate **(S2)**

da 6,00m a 10,00m – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a molto fratturati **(S3)**

da 10,00m a 20m - dolomie e calcari dolomitici da molto fratturati a fratturati **(S4)**

da 20,00m a 32m - dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani **(S5)**

**FALDA: a partire dalla quota di 4m da p.c.**

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico SMT01.

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di suolo di circa 2,5m si incontra un livello superficiale di conglomerati e sabbie dello spessore di circa 3,5m, al di sotto il substrato, costituito da calcari e dolomie si presenta intensamente fratturato a fratturato per uno spessore di 14m, con grado di fratturazione che diminuisce all'aumentare della profondità. A partire dai 20m da piano campagna il grado di fratturazione diminuisce per passare al litotipo maggiormente massivo.

Si suggerisce in fase di progettazione esecutiva 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).

Per il calcolo di c e phi è stato utilizzato il software RocData, nel quale i valori dei parametri inseriti sono stati ricavati in parte da prove geofisiche e in parte dall'osservazione in campo.

Di seguito i parametri geotecnici:

MODELLO GEOLOGICO						
Dati Parametri Resistenza						
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4	S5
<b>Descrizione</b>		Depositi eluvio-colluviali/	conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate	Substrato roccioso da fratturato a poco fratturato	Substrato roccioso da fratturato a sano	Substrato roccioso sano
<b>Peso di volume**</b>	[kg/mc]	1.800	2.000	2.100	2.350	2.400
<b>Peso di volume saturo**</b>	[kg/mc]	1.900	2.100	2.100	2.350	2.400
<b>Angolo di attrito* interno</b>	[°]	26,12	32,50	35,15	38,25	45
<b>Coesione*</b>	[Mpa]	0.5	0,00	0,288	3,54	14
Dati Parametri Deformabilità						
<b>Modulo elastico **</b>	[Mpa]	28	92	365	1037	2960
<b>Coefficiente di Poisson**</b>	[]	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
<b>Modulo di taglio (G)**</b>	[Mpa]	88	284	1138	2589	5051
<b>Velocità onde di taglio Vs**</b>	[m/sec]	210	370	720	1050	1450

\*Valori ricavati da interpolazioni su ROCDATA da confermare con indagini dirette e puntuali

\*\* Valori ricavati da dati derivati dalle indagini geofisiche da confermare con indagini dirette e puntuali

## 12. 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.

Il plinto di fondazione ha pianta circolare con raggio di 13,00 m; è composto da una parte inferiore cilindrica ( $h = 1,00$  m), una intermedia troncoconica ( $h = 1,65$  m), ed una superiore cilindrica di altezza 1,33 m che sporge dal piano campagna di circa 30 cm. La fondazione ha un'altezza complessiva di 3,98 m.

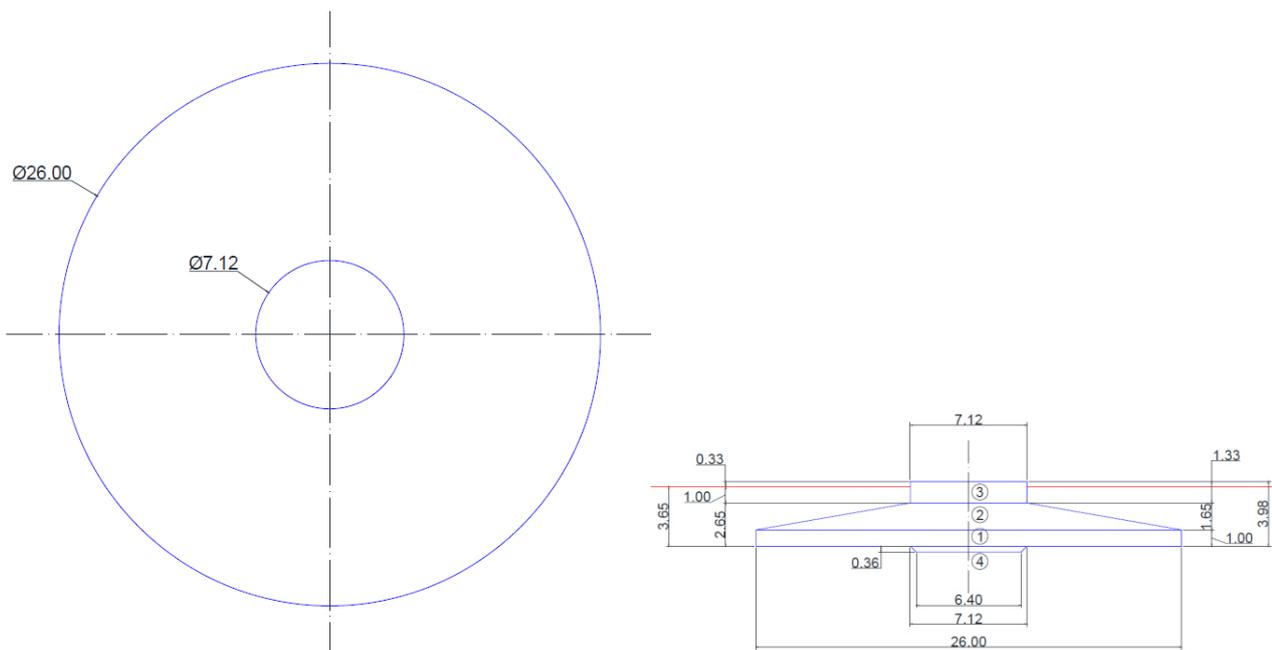


Figura 23 Caratteristiche geometriche della fondazione

### 13. AZIONI E RESISTENZE NELLE VERIFICHE AGLI STATI LIMITE

La nuova normativa sulle costruzioni prevede i coefficienti parziali  $\gamma_F$  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 rigidità.

Nella valutazione della combinazione delle azioni i coefficienti di combinazione  $\psi_{ij}$  devono essere assunti come specificato nel tab.2.5.1 delle NTC2018.

**Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione**

Categoria/Azione variabile	$\Psi_{0j}$	$\Psi_{1j}$	$\Psi_{2j}$
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso $\leq 30$ kN)	0,7	0,7	0,6

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

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

Nel caso specifico di fondazioni superficiali come quella in progetto [§6.4.2 NTC 2018] "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.

La normativa NTC 2018 specifica come il valore di progetto della resistenza  $R_d$  può essere determinata:

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

**Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

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 [§6.2.5 NTC 2018] 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:

1. devono essere stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
2. 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.

## 14. VERIFICHE DI SICUREZZA (§C6.4.2)

### 14.1. VERIFICHE DI SICUREZZA AGLI SLU DI TIPO GEOTECNICO (GEO)(§C6.4.2.1)

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 NTC2018) sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

Per ogni stato limite ultimo che preveda il raggiungimento della resistenza di un elemento strutturale (STR) o del terreno (GEO), come definiti al § 2.6.1, deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d \quad [6.2.1]$$

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.

Le 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 gR non deve essere portato in conto.

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

**Tab. 6.4.I** – Coefficienti parziali  $\gamma_R$  per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

#### 14.2. 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 NTC2018).

Per ciascun stato limite di esercizio deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq C_d \quad [6.2.7]$$

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.

## 15.CONDIZIONI DI CARICO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI

Nella fase di predimensionamento si utilizzano i carichi sulle fondazioni calcolati in accordo alla norma IEC 61400-1 Ed.4 e definiti per un aerogeneratore di riferimento; in questo caso verranno adottati i carichi di progetto dichiarati per il modello EnVentus EV162-7,2 MW-H119 prodotto dalla società Vestas Wind Systems A/S.

Si riportano qui di seguito i valori contenuti nel documento ufficiale [0121-6940] VER01 della Società Vestas Wind; si rimanda alla fase di progettazione esecutiva il dimensionamento sui dati relativi al fornitore scelto.

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	14Ecdvraa00(fam97)	1.35	Abs	<b>138700</b>	-1670	1148	-6852	[2]
Mzt	23NTMHWO100(fam224)	1.35	Abs	39600	<b>-15950</b>	311.0	-6656	[3]
FndFr	23NTMvra00(fam221)	1.35	Abs	123100	-852.4	<b>1322</b>	-6878	[3]
Fzt	12lceUHWO100(fam76)	1.35	Abs	74190	1811	654.5	<b>-7044</b>	[3]

Table 2-1 Characteristic Extreme (excl. PLF). Load cases sorted with PLF.

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

Includono il comportamento dinamico della struttura e corrispondono al caso più sfavorevole alla base dell'aerogeneratore tra i diversi casi di carico, secondo la norma IEC 61400-1.

Pertanto, i carichi forniti da Vestas come "Extreme loads" sono i carichi di progetto della fondazione e non devono essere divisi o combinati con altri carichi.

## 16. MODELLI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE

Le verifiche sono state eseguite sul modello geotecnico maggiormente cautelativo e rappresentativo. Il **piano di appoggio del basamento** di fondazione è stato ipotizzato sullo **Strato n. 02, conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate (S2)**, a quota pari a circa **3,65 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.

### MODELLO GEOLOGICO UNICO PER TUTTE LE TURBINE

da 0,00 a 2,5m – depositi colluviali/eluviali/suoli (S1)

da 2,5m a 6m – conglomerati poligenici e sabbie alterate, debolmente consolidate (S2)

da 6,00m a 10,00m – dolomie e calcari dolomitici da intensamente fratturati a molto fratturati (S3)

da 10,00m a 20m - dolomie e calcari dolomitici da molto fratturati a fratturati (S4)

da 20,00m a 32m - dolomie e calcari dolomitici da fratturati a sani (S5)

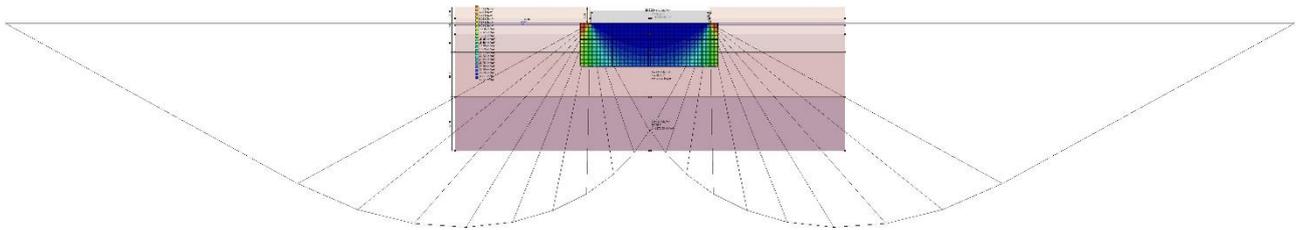
**FALDA: a partire dalla quota di 4m da p.c.**

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.

**DATI GENERALI**

=====  
 Normativa NTC\_2018  
 Zona ISILI  
 Lat./ Long. [WGS84] 39.7421875/9.10581302642822  
 Diametro della fondazione 26.0 m  
 Profondità piano di posa 3.65 m  
 Profondità falda 4.0  
 Sottofondazione...Sporgenza, Altezza 0.1/0.1 m  
 Correzione parametri  
 =====

**SISMA**

=====  
 Accelerazione massima (amax/g) 0.05  
 Effetto sismico secondo NTC 2018  
 =====

**Coefficienti sismici [N.T.C.]****Dati generali**

Tipo opera: 2 - Opere ordinarie  
 Classe d'uso: Classe III  
 Vita nominale: 50.0 [anni]  
 Vita di riferimento: 75.0 [anni]

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo: E  
 Categoria topografica: T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	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 <sup>2</sup> ]	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 strato [m]	Peso unità di volume [kN/m³]	Peso unità di volume saturo [kN/m³]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m²]	Coesione non drenata [kN/m²]	Modulo Elastico [kN/m²]	Modulo Edometrico [kN/m²]	Poisson	Coeff. consolidaz. primaria [cmq/s]	Coeff. consolidazione secondaria	Descrizione
2.5	17.65	18.63	26.12	50.0	0.0	28000.0	0.0	0.33	0.0	0.0	S1
3.5	19.61	20.59	32.5	0.0	0.0	92000.0	0.0	0.33	0.0	0.0	S2
4.0	20.59	20.59	35.15	86.0	0.0	365000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S3
10.0	23.04	23.04	38.25	347.0	0.0	103700.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S4
12.0	23.54	23.54	45.0	1372.0	0.0	296000.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S5

**Carichi di progetto agenti sulla fondazione**

Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A2+M2+R2	100.00	26111.00	147900.00	16545.64	-7079.00	1317.34	Progetto
2	Sisma	100.00	26111.00	147900.00	16545.64	-7079.00	1317.34	Progetto
3	S.L.E.	100.00	26111.00	147900.00	16545.64	-7079.00	1317.34	Servizio
4	A(1)+M(2)+R(2)	100.00	26111.00	147900.00	16545.64	-7079.00	1317.34	Progetto

**Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze**

Nr	Correzione e 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
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: Meyerhof and Hanna (1978) (Condizione non drenata)

Strato 1 sopra, strato 2 sotto

Fattori di capacità portante strato 1

Fattore [Nq] 13.21  
 Fattore [Nc] 23.95  
 Fattore [Ng] 2.93

Fattori di capacità portante strato 2

Fattore [Nq] 33.92  
 Fattore [Nc] 46.76

Fattore [Ng] 10.43

Carico limite strato 2 (qb) 12011.11 kN/m<sup>2</sup>  
 Carico limite strato 1 (qt) 1276.43 kN/m<sup>2</sup>

Incremento carico limite strato 1 21.52 kN/m<sup>2</sup>  
 Coefficiente di punzonamento (ks) 4.49  
 Rapporto (q1/q2) 13.32

=====  
 Carico limite 1276.43 kN/m<sup>2</sup>  
 Resistenza di progetto 709.13 kN/m<sup>2</sup>

Condizione di verifica [Ed<=Rd] Verificata  
 =====

### COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler 1803.07 kN/m<sup>3</sup>

### VERIFICA A SCORRIMENTO (A2+M2+R2)

=====  
 Adesione terreno fondazione 19.9 kN/m<sup>2</sup>  
 Angolo di attrito terreno fondazione 0 °  
 Frazione spinta passiva 0 %  
 Resistenza di progetto 8870.23 kN  
 Sollecitazione di progetto 7166.98 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<sup>2</sup>  
 Cedimento dopo T anni 7.0  
 Distanza 7.63 m  
 Angolo 253.51 °  
 Cedimento totale 0 cm

Z: Profondità media dello strato; Dp: Incremento di tensione; Wc: Cedimento consolidazione; Ws: Cedimento secondario; Wt: Cedimento totale.

Strato	Z (m)	Tensione (kN/m <sup>2</sup> )	Dp (kN/m <sup>2</sup> )	Metodo	Wc (cm)	Ws (cm)	Wt (cm)
2	4.8	0	0	Schmertman n	0	--	0
3	8.05	0	0	Schmertman n	0	--	0
4	20	0	0	Schmertman n	0	--	0

### CEDIMENTI ELASTICI

=====  
 Pressione normale di progetto 92.0 kN/m<sup>2</sup>  
 Spessore strato 6.0 m  
 Profondità substrato roccioso 10.0 m  
 Modulo Elastico 203500.0 kN/m<sup>2</sup>  
 Coefficiente di Poisson 0.3  
 =====

Coefficiente di influenza I1	0.04
Coefficiente di influenza I2	0.07
Coefficiente di influenza Is	0.09

=====

Cedimento al centro della fondazione	0.46	mm
--------------------------------------	------	----

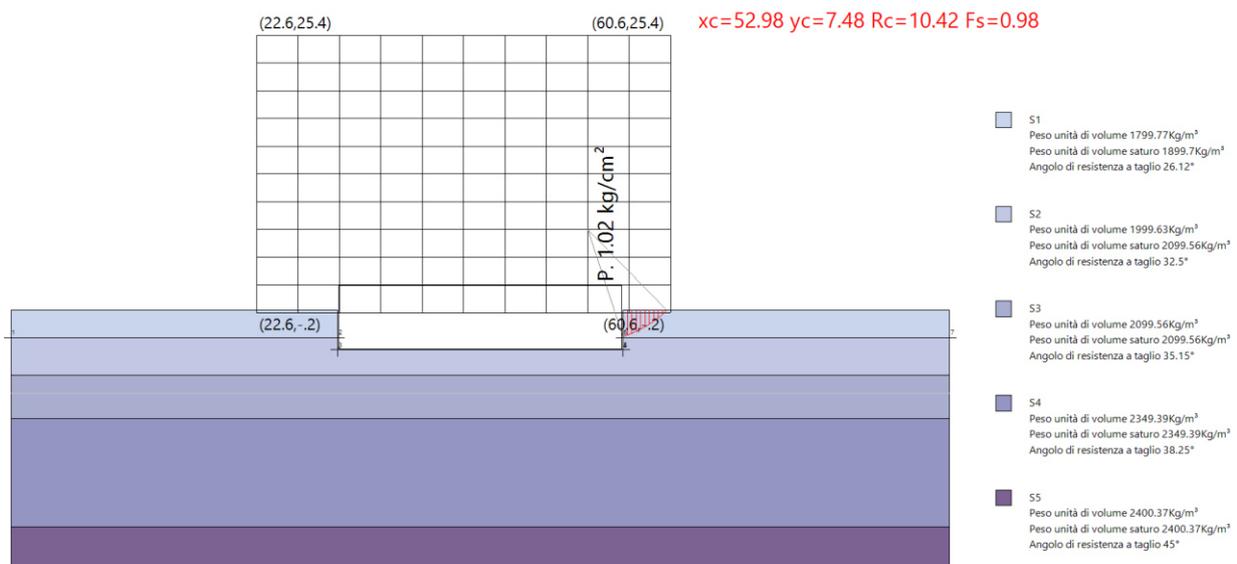
=====

Coefficiente di influenza I1	0.01	
Coefficiente di influenza I2	0.05	
Coefficiente di influenza Is	0.04	
Cedimento al bordo	0.1	mm

=====

## 17.FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6)

È stata eseguita una verifica di stabilità dei fronti di scavo della fondazione in ordine all'altezza di scavo prevista e alla tipologia di materiale attraversato considerando il modello geotecnico 01 e annullando la coesione e simulando in questo modo gli effetti dello scavo ipotizzando altresì il terreno totalmente saturo.



In generale si hanno da localmente medie proprietà di autosostegno. Dato il grado di fratturazione presenti alle profondità investigate non si escludono fenomeni di detensionamento in fase di scavo con il possibile innesco di fenomeni gravitativi localizzati.

In fase esecutiva sarà opportuno verificare con indagini dirette le caratteristiche proprie dei terreni e valutare quindi l'opportunità di realizzare pareti di scavo inclinate e/o gradonate.