



**PROGETTO:** Progetto Definitivo per il parco eolico da 48,0 MW "Energia Is Coris" costituito da n.9 aerogeneratori

Elaborato:

Relazione Geotecnica

Codice Elaborato

PD - R08

Scala

Formato elaborato

A4

PROPONENTE



**Fred. Olsen Renewables**

Timbro e firma



*Cosima Atzori*

Timbro e firma

REDATTORI

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori

COORDINAMENTO

BIA s.r.l.

Piazza dell'Annunziata 7  
Cagliari (CA) - 09123  
P.IVA 03983480926  
energhiabia@pec.it



Rev.	Data	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato
02					
01					
00	06/2022	Emissione per validazione			

## 1. SOMMARIO

1.	SOMMARIO.....	2
1.	PREMESSA.....	5
2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	5
3.	STUDI ED INDAGINI DI RIFERIMENTO.....	5
4.	INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE.....	6
5.	CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA.....	11
6.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	13
6.1	Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento.....	13
7.	ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	15
8.	INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	17
15.1.	Generalità sul metodo sismico a rifrazione.....	18
15.1.2.	Caratteristiche delle stese sismiche.....	19
15.1.3.	Caratteristiche della Strumentazione impiegata.....	19
15.1.4.	Elaborazione dei dati.....	20
15.2.	Indagini sismiche: MASW.....	20
15.2.1.	Specifiche delle indagini svolte.....	21
15.2.2.	Caratteristiche della strumentazione impiegata.....	21
15.2.3.	Caratteristiche della strumentazione impiegata.....	22
15.2.4.	Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018).....	22
15.3.	Tomografia elettrica.....	23
15.3.1.	Tecnica e parametri utilizzati.....	23
15.3.2.	Geometria delle acquisizioni.....	24
15.3.4.	Strumentazione e attrezzatura utilizzata.....	24
15.3.5.	Elaborazione dei dati e software.....	24
15.4.	Risultati delle indagini del sito TRM-1.....	25
15.4.1.	Masw TRM-1.....	25
15.4.2.	Rifrazione TRM-1 e Tomografia elettrica TRM-1.....	26
15.5.	Risultati delle indagini del sito RM-1.....	28
15.5.1.	Masw RM-1.....	28
15.5.2.	Rifrazione RM-1.....	29
15.6.	Risultati delle indagini del sito RM-1.....	31
15.6.1.	Masw RM-2.....	31

15.6.2. Rifrazione RM-2 .....	32
15.7. Risultati delle indagini del sito TRM-2 .....	34
15.7.1. Masw TRM-2 .....	34
15.7.2. Rifrazione TRM-2 e Tomografia elettrica TRM-2 .....	35
15.8. Indicazioni per la determinazioni dei parametri geomeccanici .....	37
15.8. Indicazioni per la determinazioni dei parametri geomeccanici .....	38
9. MODELLAZIONE GEOLOGICA.....	42
16.1 Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi .....	42
16.2 Modello Geologico di sito .....	48
Modello Geologico 01 – T01, T02, T08, T09 .....	49
Modello Geologico 02 – T05, T06, T07 .....	50
Modello Geotecnico 03 – T03, T04 e Viabilità .....	51
10. DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE DEGLI AEROGENERATORI .....	52
11. AZIONI E RESISTENZE NELLE VERIFICHE AGLI STATI LIMITE .....	54
12. VERIFICHE DI SICUREZZA (§C6.4.2) .....	55
Verifiche di sicurezza agli SLU di tipo geotecnico (GEO) (§C6.4.2.1) .....	55
Verifiche di esercizio (SLE) (§C6.4.2.2) .....	56
13. CONDIZIONI DI CARICO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI.....	56
14. MODELLI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE .....	56
Modello geotecnico 03.....	57
15. FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6) .....	60
16. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	61

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Localizzazione del progetto .....	6
Figura 2 Panoramica dal lato occidentale dell'area di studio .....	7
Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.....	7
Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000.....	8
Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000 – settore W .....	9
Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000 – settore E.....	10
Figura 7 Schema tettonico-strutturale della Sardegna .....	14
Figura 8 Schema geologico-strutturale del basamento varisco del Sulcis-Iglesiente (Carmignani et al., 1982a; Funedda et al., 2009) .....	15
Figura 22 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione .....	16
Figura 55 - Ubicazione delle indagini geofisiche .....	18

Figura 56 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m .....	19
Figura 57 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	26
Figura 58 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	29
Figura 59 Base Sismica RM-1 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E.....	30
Figura 60 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	32
Figura 61 Base Sismica RM-2 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E.....	33
Figura 62 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	35
Figura 63 Stendimento di tomografia elettrica: TRM-2-Lungh: 93,0 m - Orientazione: W-E .....	36
Figura 23 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia .....	43
Figura 24 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso .....	43
Figura 25 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia .....	44
Figura 26 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.....	45
Figura 27 Schema generale della fondazione .....	53

## 1. PREMESSA

Nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "**Energia Is Coris**" dislocato nel territorio comunale di **Villamassargia** e di **Narcao** - Provincia del Sud Sardegna, al fine di avere un quadro completo del contesto geologico e geotecnico è stata redatta la presente **Relazione Geologica**, 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:

- Analisi dell'assetto geologico e geomorfologico e definizione del modello geologico di sito;
- 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 in data 28/01/2022 nella zona di interesse.

## 4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE

**Villamassargia** è un Comune italiano di 3 490 abitanti della provincia del Sud Sardegna, situato nella sub-provincia del Sulcis-Iglesiente, nel bordo meridionale del bacino del Cixerri, a Sud rispetto a Domusnovas (situata al bordo settentrionale dello stesso bacino) e a SE rispetto a Iglesias.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 –Fogli: 555 "Villamassargia" sez. II, 556 "Monte Rosas" sez. III.
- Carta Tecnica Regionale in scala 1:10000 sezione 555160 "Terraseo", 555150 "Barbusi", 556130 "Monte Rosas" e 555120 "Villamassargia".

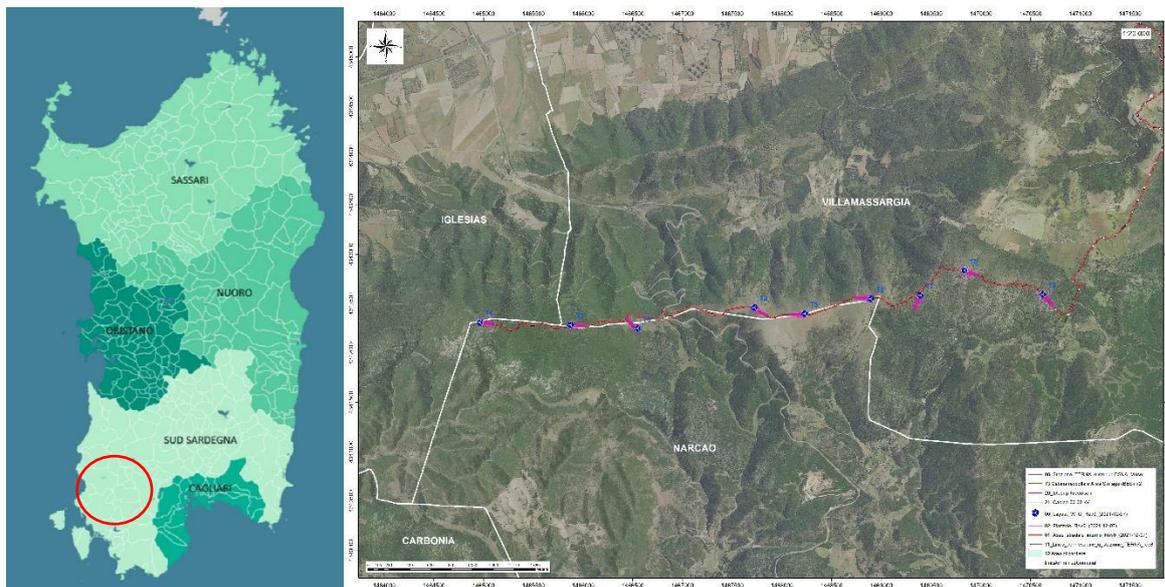


Figura 1 Localizzazione del progetto



Figura 2 Panoramica dal lato occidentale dell'area di studio

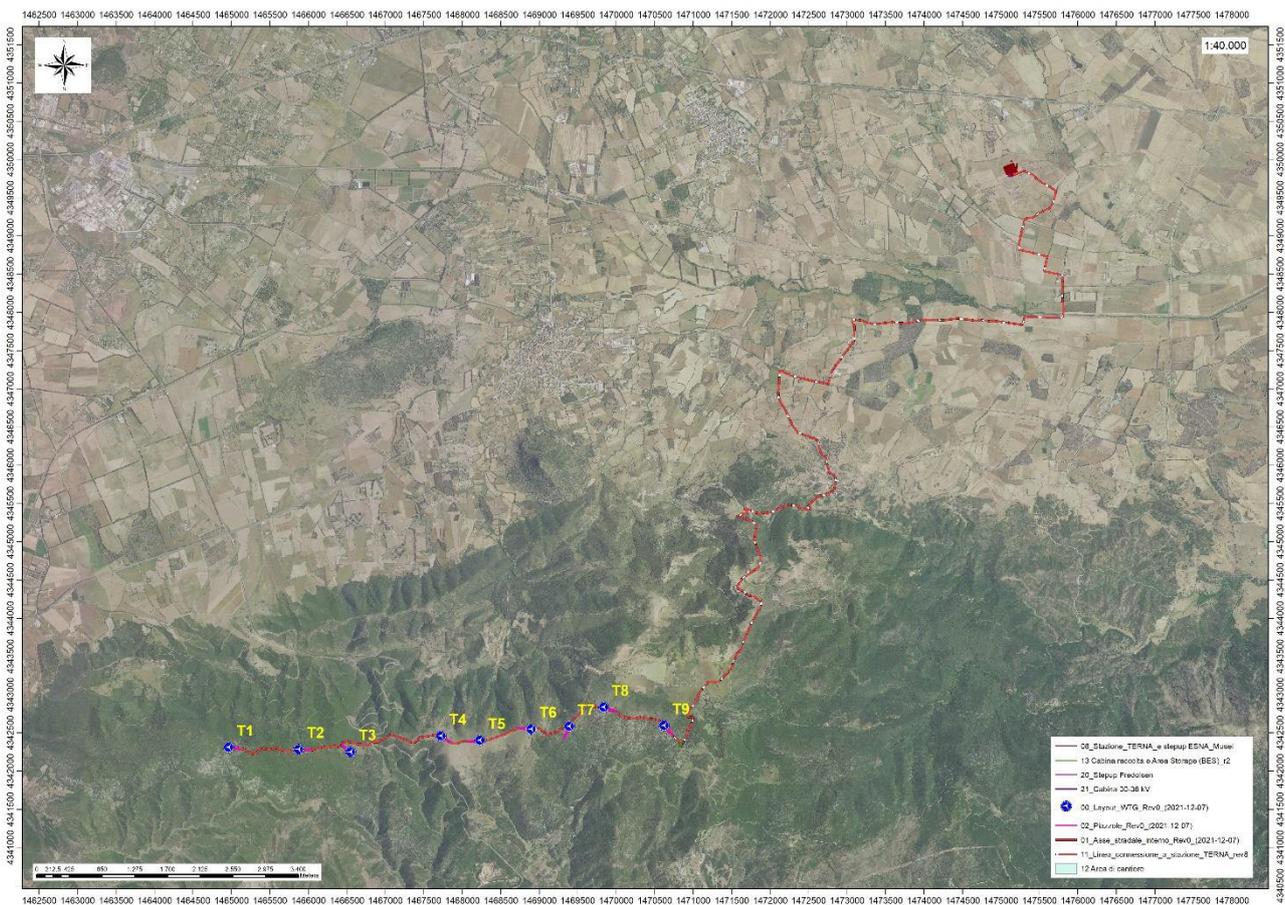


Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.

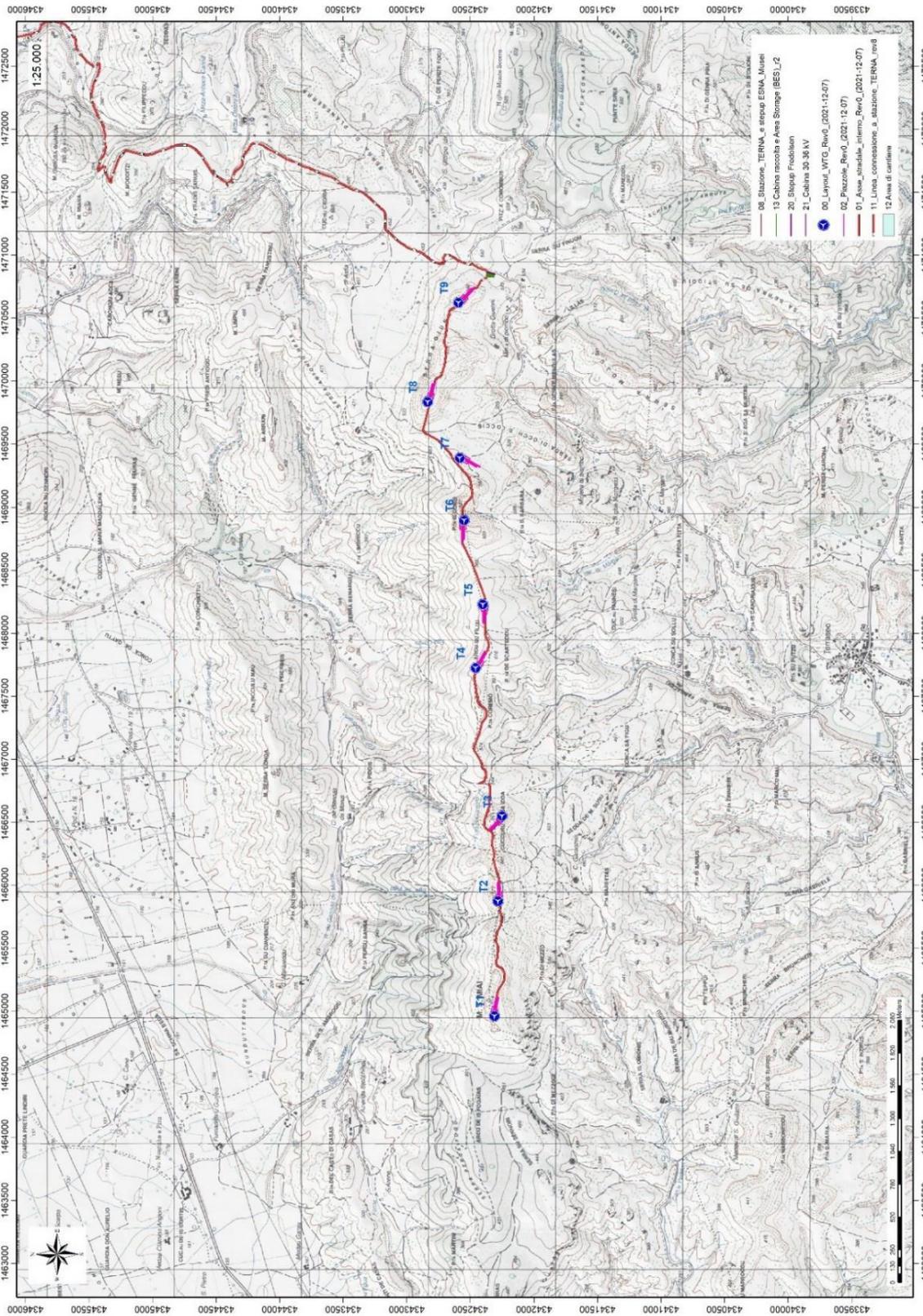


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

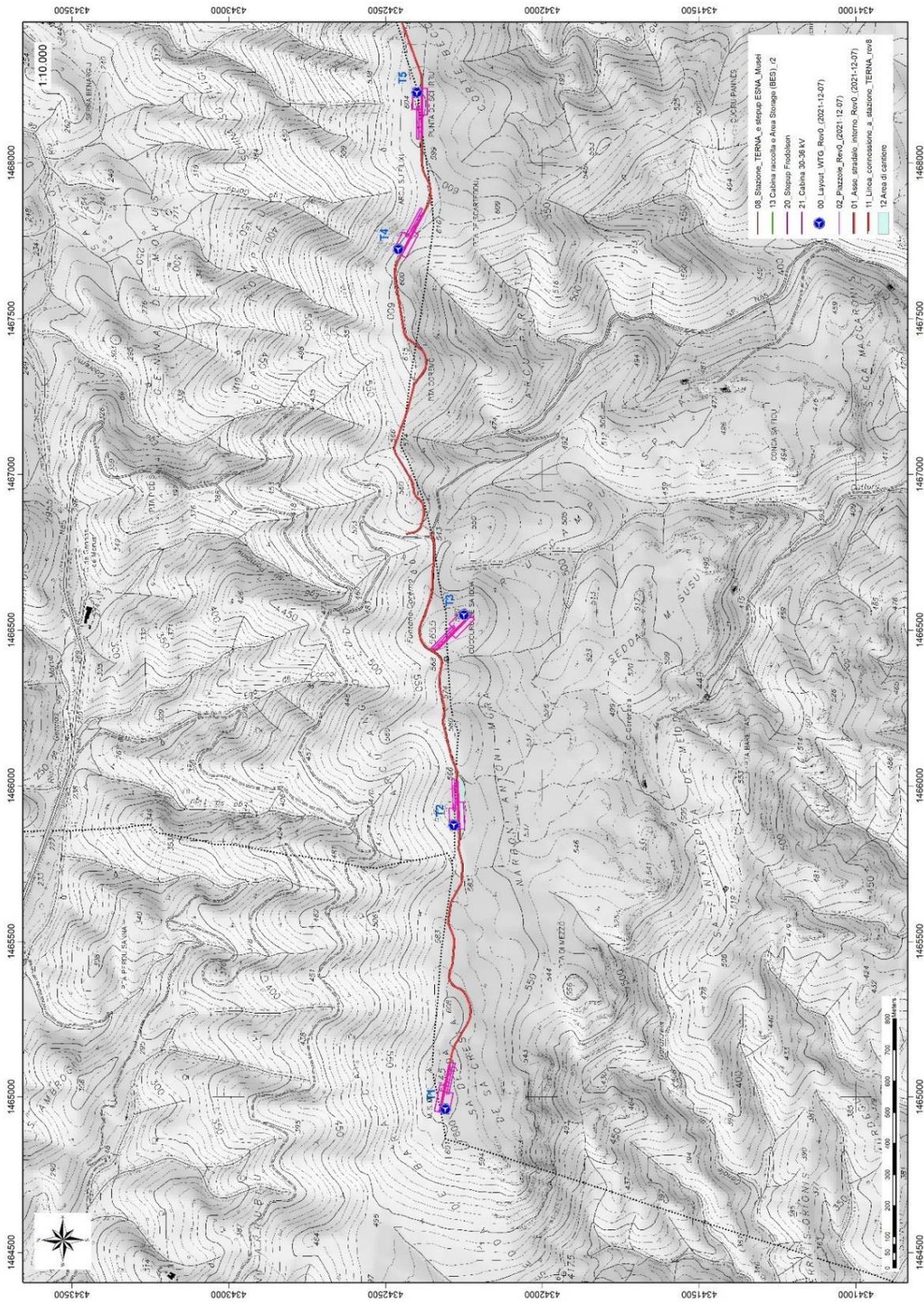


Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000 – settore W

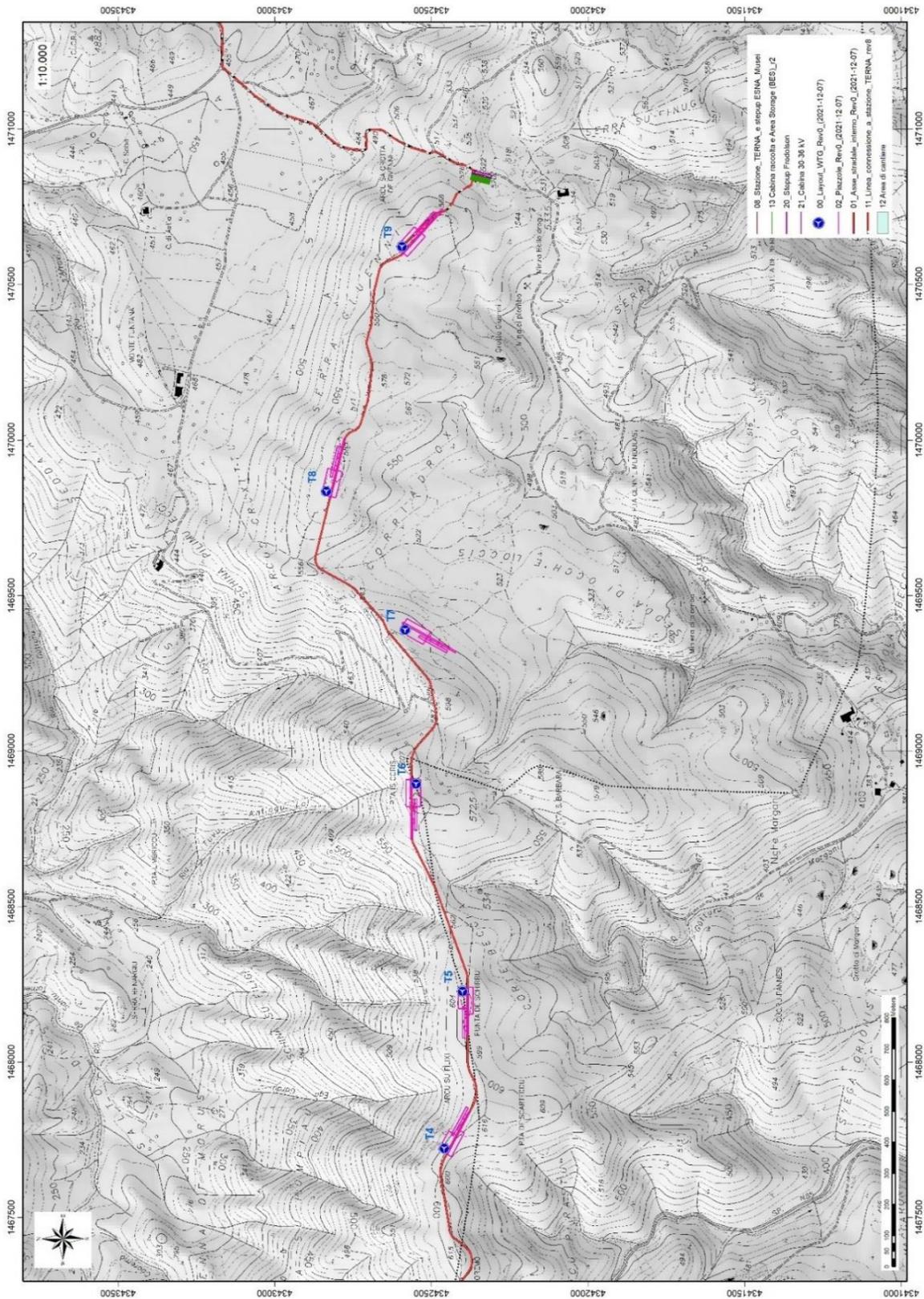


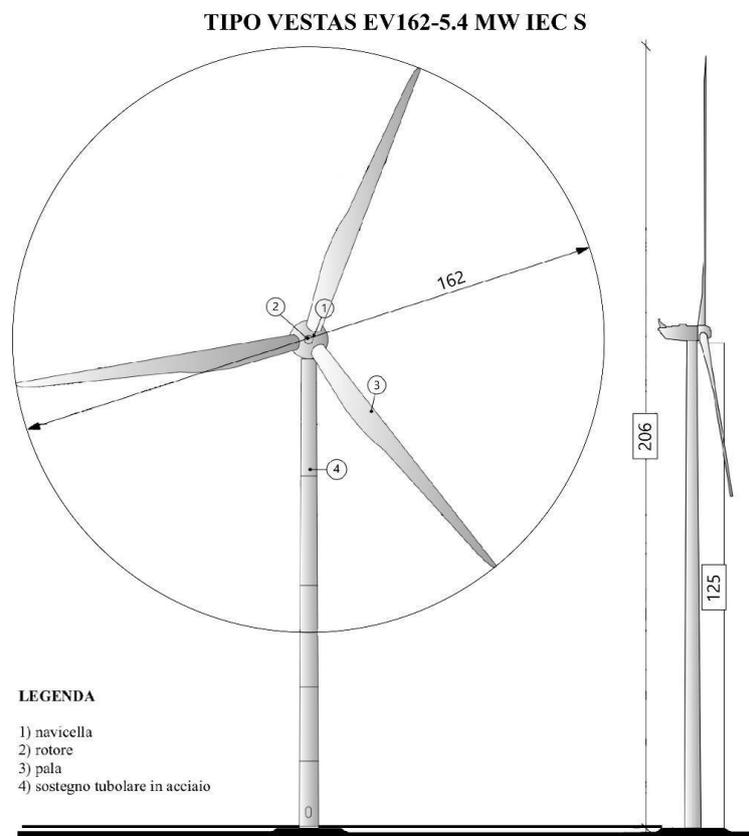
Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000 – settore E

## 5. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica, di potenza nominale pari a 48'000kW, da localizzarsi su terreni ricadenti nel Comune di Villamassargia, Narcao e Musei (SU).

L'impianto sarà costituito da n. 9 aerogeneratori tripala, ad asse orizzontale, aventi ciascuno una potenza nominale di 5,4 MW per una potenza complessiva di 48,6 MW.

Le dimensioni degli aerogeneratori prevedono un'altezza al mozzo di 125 metri, diametro del rotore di 162 metri, ed un'altezza complessiva massima, fuori terra, di 206 metri, con un'area spazzata di 20612 m<sup>2</sup>. La fondazione di tipo diretto (superficiale), costituita da un plinto in calcestruzzo, viene calcolata per sopportare, oltre al carico dell'aerogeneratore (torre, cabina di trasformazione e rotore) anche le sollecitazioni prodotte delle pale in movimento.



L'impianto sarà del tipo grid-connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale. La connessione alla rete di trasmissione in Alta Tensione a 150 kV avverrà mediante cabina di trasformazione MT/AT (cabina di "step-up" o Sottostazione Elettrica Utente) di competenza del proponente, collegata in antenna alla nuova Stazione Elettrica (SE) della RTN a 150 kV da inserire in entra-esce alla linea RTN a 150 kV "Iglesias 2 - Siliqua", previo potenziamento/rifacimento della linea RTN 150 kV "Villacidro - Serramanna".

## Dati tecnici:

- Potenza nominale: 6000 kW e tensione nominale di 800 volt;
- Potenza unitaria: 6250 kW;
- Frequenza: 0 – 138 Hz;
- Numero pale: 3;
- Lunghezza pale: 79,35 m;
- Raggio del rotore: 81 m;
- Area spazzata: 20612 m<sup>2</sup>;
- Tipo di sostegno: tubolare metallico;
- Altezza da terra del rotore: max 125 m;
- Fondazioni: piastra in C.A. dimensioni di 25m di diametro completamente interrata ad una profondità massima di 6,71 m;

La sottostazione elettrica produttore in progetto avrà un'estensione di circa 4000mq.

Il collegamento elettrico tra gli aerogeneratori e la sottostazione avverrà mediante un elettrodotto interrato che seguirà in gran parte il tracciato delle strade esistenti e in piccola parte di quelle di nuova realizzazione necessarie per l'accesso ad alcune piazzole.

La viabilità prevista per 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 si imbotcheranno per il raggiungimento delle piazzole strade vicinali sterrate esistenti che verranno preventivamente adeguate, in alcuni tratti verranno realizzati nuovi brevi tratti di pista.

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 di fondazione, agli scavi ed ai riporti necessari per la realizzazione del sistema di fondazione e delle sue potenziali interazioni con le condizioni al contorno (dinamica geomorfologica, circolazione idrica superficiale e sotterranea, rapporti fra le componenti litologiche interessate) attraverso:

- 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 rinvencono principalmente nel nord della Gran Bretagna e nella Scandinavia occidentale, fu causata dalla progressiva chiusura dell'oceano Giapeto, a seguito della collisione dei continenti Laurentia, Baltica e Avalonia, dando così origine al super continente Laurussia.

La successiva fase dell'orogenesi Hercinica (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 si inquadra in un contesto geologico complesso, caratterizzato dalla presenza di successioni sedimentarie di età paleozoica di basso grado metamorfico dove i caratteri petrografici e sedimentologici dei protoliti sono quasi sempre ben riconoscibili. Queste metamorfiti sono intruse da rocce granitoidi permocarbonifere, alle quali seguono successioni sedimentarie, di età compresa tra il Permo-Carbonifero e l'OligoMiocene e depositi vulcanici oligo-miocenici. Sono variamente diffuse le coperture quaternarie antiche e recenti, con depositi alluvionali, marini ed eolici sabbiosi in cui sono stati trovati resti di cervidi e di elefante nano. Il basamento metamorfico dell'Iglesiente in cui ricade il **Parco Eolico** appartiene alla "zona esterna" del segmento sardo della catena varisca. La successione metamorfica paleozoica è divisa da una discordanza angolare di età ordoviciana media ("discordanza sarda") ed inizia con sedimenti prevalentemente arenacei di età cambriana inferiore (fm. di Nebida), seguiti da depositi carbonatici (fm. di Gonnese, "Metallifero" Auct.), carbonatico-terrigeni (fm. di Campo Pisano) e da depositi silico-clastici di età Cambriano medio-Ordoviciano inferiore (fm. di Cabitza). Al di sopra della discordanza ordoviciana poggia una successione trasgressiva composta da depositi di ambiente continentale (fm. di M. Argentu, "Puddinga" Auct.), transizionale e marino di età compresa tra l'Ordoviciano medio-superiore ed il Devoniano (f.ni di M.te Orri, Portixeddu, Domusnovas, Genna Muxerru, Fluminimaggiore).

Le litologie sulle quali pogeranno le turbine appartengono alla successione sedimentaria pre-discordanza Sarda. Il termine più antico della Successione è costituito dal Membro di Mattoppa della Formazione di Nebida. Si tratta di metaquarzoareniti, metarose a grana fine, metagrovacche, con intercalazioni di metasiltiti grigio-chiare, in strati decimetrici e metrici. Verso l'alto il grado di maturità diminuisce progressivamente e le intercalazioni arenacee divengono più frequenti e di maggiore potenza, fino a passare a metarenarie quarzoso-micacee e metagrovacche con matrice carbonatica. La parte alta della successione del Membro di Mattoppa è caratterizzata dalla presenza di livelli e lenti di calcari ad archeociati (NEB1a). Il Membro di Mattoppa è poi ricoperto in concordanza dal Membro di Punta Manna (NEB2), che inizia con un orizzonte pressochè continuo di calcari oolitici (NEB2a).

A seguire verso l'alto stratigrafico è poi presente la Formazione di Gonnese, questa si divide a sua volta in "Dolomia Rigata" alla base e "Calcare Ceroide" al tetto, in quest'ultimo si distinguono poi due litofacies, ovvero quella delle "Dolomie Grigie" e quella delle "Dolomie Gialle".

Il membro della Dolomia rigata (GNN1) è costituito da dolomie primarie grigio chiaro ben stratificate e laminate, stromatoliti laminate con pseudomorfi su gesso o anidrite e pisoliti vadose e/o brecce di disseccamento. Il membro di Calcare Ceroide (GNN2) è costituito da calcari massivi di colore grigio, quasi puri, generalmente mal stratificati, spesso intensamente dolomitizzati. Questo membro è localmente interessato da un'intensa dolomitizzazione diagenetica tardiva che dà origine alla cosiddetta "Dolomia grigia" (GNN2a); è poi presente una varietà gialla (Dolomia gialla GNN2b), in questa l'andamento della dolomitizzazione, la sua genesi e l'età non sono completamente chiare.

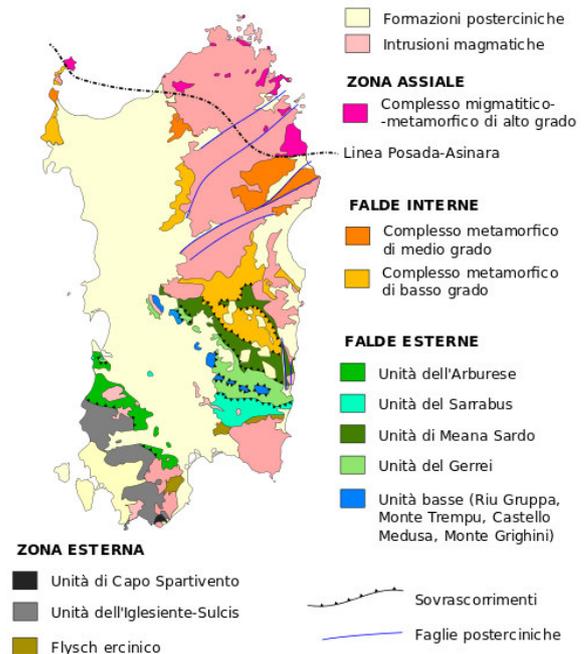


Figura 7 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

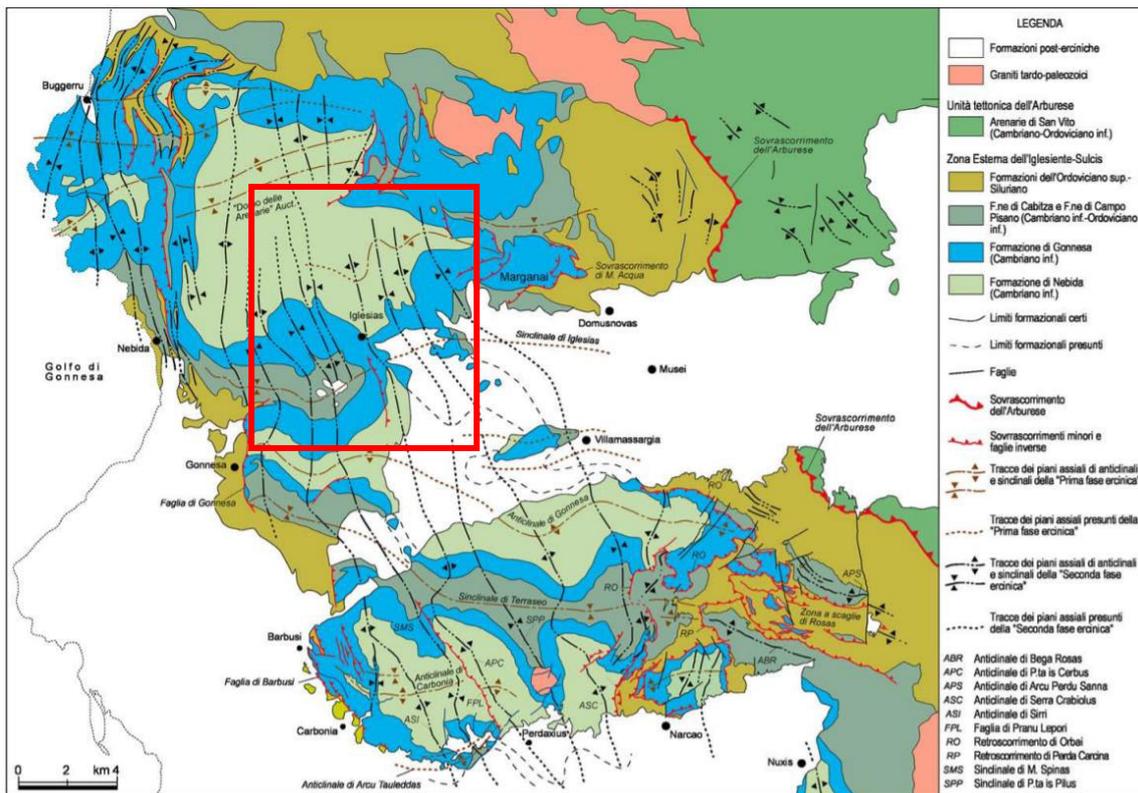


Figura 8 Schema geologico-strutturale del basamento varisco del Sulcis-Iglesiente (Carmignani et al., 1982a; Funedda et al., 2009).

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

L'area di studio è caratterizzata dall'affioramento del basamento paleozoico ricadente nella "Zona esterna" costituito, a partire dai termini più antichi, da depositi clastici con intercalazioni di rocce carbonatiche (Nebida Fm.) ai quali seguono sedimenti carbonatici (Gonnese Fm.), carbonatico-terrigeni (Cabitza Fm.). Il metamorfismo regionale che ha interessato questa successione è di grado molto basso, ovvero al limite tra l'anchizona e facies a scisti verdi inferiore). Nelle rocce pelitiche è sempre presente una foliazione metamorfica con una debole ricristallizzazione di sericite.

La distribuzione delle pale nel parco segue una linea orientata W-E, lungo un'anticlinale situata tra la sinclinale del Cixerri a Nord e la sinclinale di Narcao a Sud, le turbine poggiano sui rilievi il cui involuppo descrive una paleosuperficie blandamente piegata. Con orientazione Nord-Sud e circa in corrispondenza della Turbina T5, è presente un'anticlinale probabilmente dovuta alla seconda Fase Ercinica. L'intersezione di queste pieghe sub-perpendicolari tra loro ha create delle strutture a "domi e bacini". La stratificazione della GNN2 immerge sia Sud nei pressi della T1, mentre immerge a Nord la stratificazione rovesciata nella GNN1 e NEB2 in corrispondenza della T2 e T3. Nei pressi della T4, T5, T6 e T7 la stratificazione risulta normale e immergente a Sud a W dell'anticlinale, mentre risulta rovesciata e immergente a NE a E della stessa. In corrispondenza della T8 la stratificazione immerge a Est mentre nei pressi della T9 immerge a Sud. Le inclinazioni delle immersioni hanno in tutta l'area valori di 70° di media.

Alla scala dell'affioramento gli ammassi rocciosi presentano nette discontinuità subverticali dovute alla stratificazione nei termini terrigeni (Nebida Fm.), mentre si presentano più massivi nei termini carbonatici (Gonnese Fm.).

L'intensa fratturazione e la presenza di scistosità descritti nei precedenti capitoli 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 geostrukturali lo permettono (piani a franapoggio o intersezione di piani con direttrice a franapoggio):

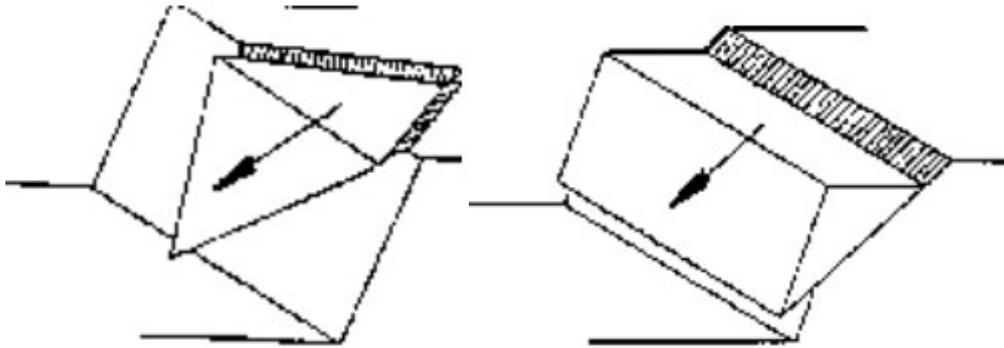


Figura 9 Tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

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

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

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

Alla piccola scala laddove il materiale originario è costituito da granulometrie fini e a forte componente siltoso-argillosa, sono più frequenti fenomeni di sfaldamento e distacco di lamine da centimetriche a decimetriche. Queste ultime divengono più simili a piccoli blocchi se la componente sabbiosa aumenta (metasiltiti, metarenarie). Nel caso invece degli ammassi rocciosi appartenenti alla formazione di Gonnese la presenza di famiglie di giunti con maggiori spaziature e con assetto geometrico più regolare determina la formazione di blocchi più grandi, nell'ordine del metro cubo e più.

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

Di fatto quindi, non potendo generalizzare alla piccola scala è sempre d'obbligo un rilievo puntuale sugli affioramenti ove possibile. Il materiale distaccato si raccoglie ai piedi del pendio, in accumuli più o meno estesi in funzione della pendenza. Sono presenti famiglie di giunti semiaperti quasi ortogonali tra loro a formare isolati blocchi pseudo cubici delle dimensioni variabili fino al metro cubo. I fenomeni di instabilità sono per lo più legati al crollo di codesti blocchi quando il piano di appoggio si trova a inclinazione maggiore di quella del pendio.

## 8. INDAGINI GEOGNOSTICHE

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

L'obiettivo delle indagini realizzate è stato:

- 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 geoelettrica** (27 e 28 Gennaio 2022), **4 stendimenti di sismica** con tecnica **MASW e rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni, mentre solo nei siti identificati come TRM-1 e TRM-2 (vedasi fig.55) si sono eseguiti i **2 stendimenti geoelettrici**, i quali hanno il medesimo centro degli allineamenti sismici ma sono leggermente più lunghi (93,0 m).

E' stato inoltre eseguito il Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica.

Sono stati infine elaborati i dati ottenuti tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

Stendimento	Metodo di indagine	Orientamento	Lunghezza (m)
TRM-1	MASW	SW-NE	69,0
TRM-1	Sismica a rifrazione in onde P	SW-NE	69,0
TRM-1	Geoelettrica	SW-NE	93,0
RM-1	MASW	W-E	69,0
RM-1	Sismica a rifrazione in onde P	W-E	69,0
RM-2	MASW	W-E	69,0
RM-2	Sismica a rifrazione in onde P	W-E	69,0
TRM-2	MASW	W-E	69,0
TRM-2	Sismica a rifrazione in onde P	W-E	69,0
TRM-2	Geoelettrica	W-E	93,0

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

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

Base sismica	Orientamento	Interdistanza geofonica (m)	Lunghezza(m)
R1	SE-NW	3	69.00
R2	NE-SW	3	69.00
R3	SW-NE	3	69.00
M1	SE-NW	3	69.00
M2	NE-SW	3	69.00
M3	SW-NE	3	69.00



Figura 10 - Ubicazione delle indagini geofisiche

*15.1. 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.

### 15.1.2. 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.

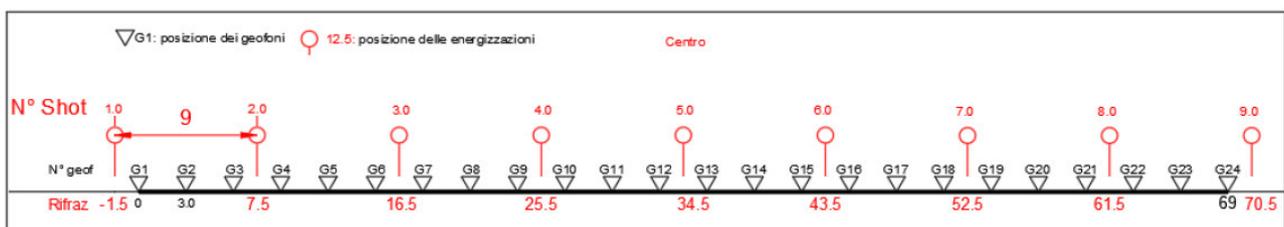


Figura 11 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

### 15.1.3. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Per l'esecuzione delle indagini è stato impiegato un sismografo GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 5.000 Hz (Rifrazione) e 1500 Hz (MASW) per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysical con frequenza propria di 4,5 Hz per un numero di canali pari a n° 24. Per

l'energizzazione è stata impiegata una mazza battente da 10 kg impattante verticalmente su piastra di battuta in duralluminio, diametro 18 cm, spessore 4 cm, peso 2 kg. La quota relativa di ciascun geofono-shot è stata rilevata tramite una livella digitale e GPS differenziale marca Stonex in modo da poter ricostruire la morfologia del terreno e utilizzarla in fase di elaborazione dei dati acquisiti.

#### 15.1.4. ELABORAZIONE DEI DATI

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

#### 15.2. INDAGINI SISMICHE: MASW

##### **Metodologia**

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

##### **Moto del segnale sismico**

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

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

##### **Onde di Rayleigh – "R"**

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

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

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

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

### Modellizzazione

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

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

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

### 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

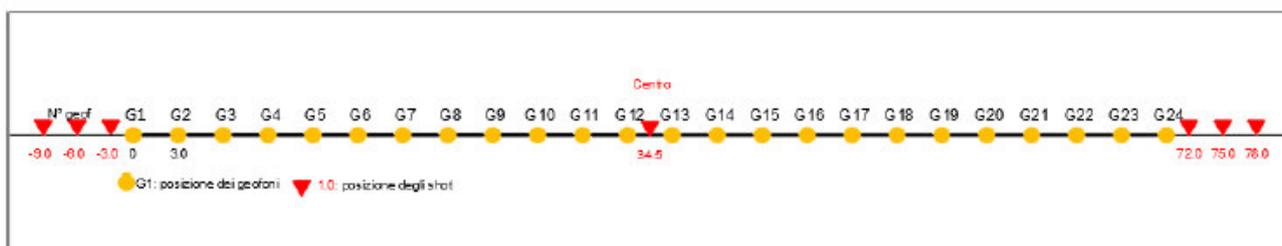
Le onde di Rayleigh decadono a profondità circa uguali alla lunghezza d'onda. Piccole lunghezze d'onda (alte frequenze) consentono di indagare zone superficiali mentre grandi lunghezze d'onda (basse frequenze) consentono indagini a maggiore profondità.

#### 15.2.1. 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 3,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in "andata" e in "ritorno" con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema), oltre che una battuta al centro della base sismica.

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

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



#### 15.2.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

Per l'esecuzione del cantiere d'interesse, è stata impiegata una strumentazione di acquisizione modello GEA24, prodotto dalla PASI Geophysics, con frequenza di campionamento 1500 Hz per ognuno dei canali registrati, ciascuno attrezzato

con geofoni verticali e orizzontali della PASI Geophysic con frequenza propria di 4,5 Hz. Il numero di canali è risultato pari a n° 24 canali.

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

#### 15.2.3. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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.

#### 15.2.4. CATEGORIE DI SOTTOSUOLO - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica. 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.

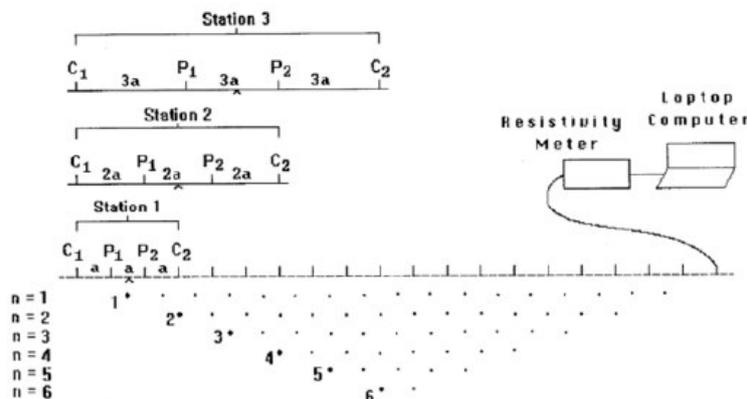
**Tabella 3.2.II. Categorie di sottosuolo (Fonte NTC 2018)**

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>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.</i>

15.3. TOMOGRAFIA ELETTRICA

15.3.1. TECNICA E PARAMETRI UTILIZZATI

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



L'utilizzo appropriato dei programmi d'inversione consente l'elaborazione delle sezioni di resistività in grado di riprodurre accuratamente le variazioni del parametro fisico. La resistività rappresenta una proprietà fisica molto importante, poiché

dipende da vari fattori quali, la natura dei terreni e delle rocce, la saturazione dell'acqua, la porosità della roccia, e tutte le anomalie locali generate da strutture localizzate come cavità, corpi di discarica, tracce di dispersione d'inquinanti, etc.. La **profondità d'esplorazione** è variabile secondo il dispositivo e della risoluzione richiesta; mediamente è pari a circa 1/5 della lunghezza dello stendimento.

#### 15.3.2. GEOMETRIA DELLE ACQUISIZIONI

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

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

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

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

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

#### 15.3.4. STRUMENTAZIONE E ATTREZZATURA UTILIZZATA

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

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

#### 15.3.5. ELABORAZIONE DEI DATI E SOFTWARE

L'**elaborazione tomografica** consiste, nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle secondo uno schema definito con riferimento alla distribuzione e alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle è calcolata la resistività apparente che soddisfa 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.

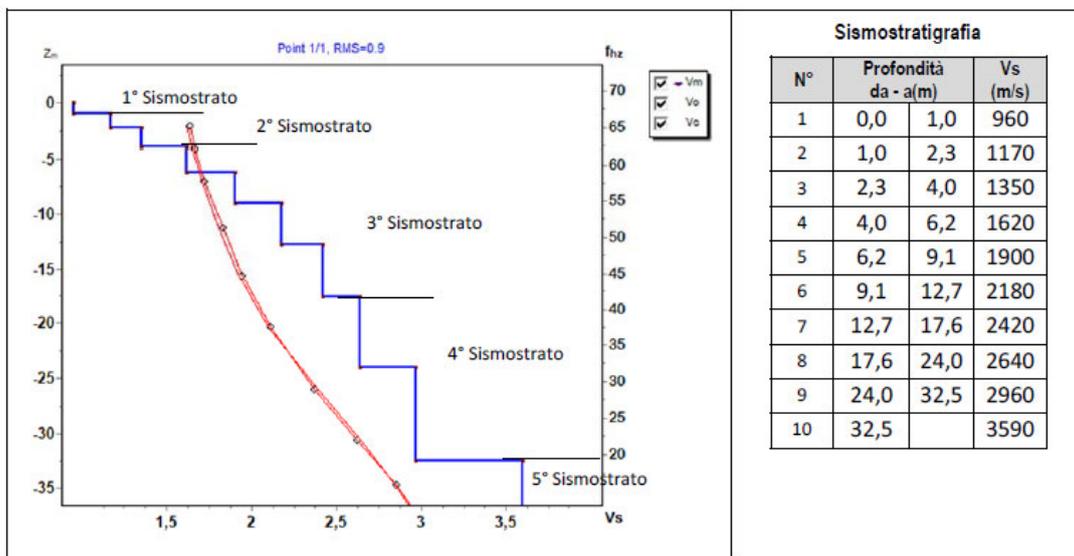
15.4. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TRM-1

15.4.1. MASW TRM-1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento TRM-1, 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 – 1,0	1° sismostrato con Vs di 960 m/s, Substrato roccioso fratturato
1,0 – 4,0	2° sismostrato con Vs tra 1170 e 1350 m/s, Substrato roccioso debolmente fratturato
4,0 – 17,6	3° sismostrato con Vs tra 1620 e 2420 m/s, Substrato roccioso sano
17,6 – 32,5	4° sismostrato con Vs tra 2640 e 2960 m/s, Substrato roccioso sano
>32,5	5° sismostrato con Vs di 3590 m/s, Substrato roccioso sano

MASW TRM-1 - 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, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

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

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 1,0 m (Vs>800 m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,0	10%	2.000	1.920	960	0,33	4.913	491	1.844	4.913
2	1,0-4,0	15%	2.100	2.520	1.260	0,33	8.895	1.334	3.334	8.895
3	4,0-17,6	20%	2.200	4.040	2.020	0,33	23.938	4.788	8.973	23.938
4	17,6-32,5	25%	2.300	5.600	2.800	0,33	48.083	12.021	18.035	48.083
5	>32,5	40%	2.400	7.180	3.590	0,33	82.485	32.994	30.931	82.485

Figura 12 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.

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

#### 15.4.2. RIFRAZIONE TRM-1 E TOMOGRAFIA ELETTRICA TRM-1

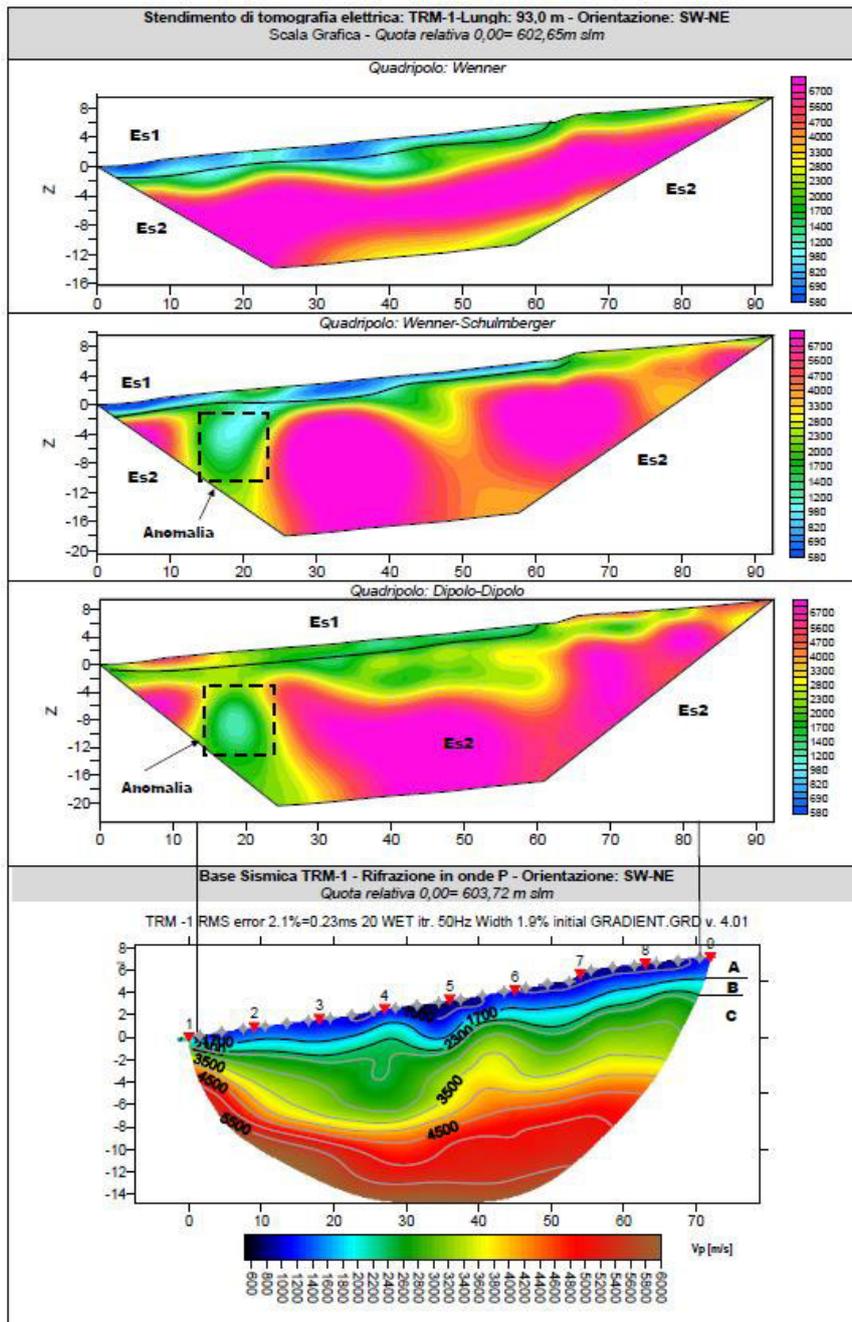
Nella sezione di sismica a rifrazione **TRM-1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento TRM-1	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
<b>Sismostrati</b>		
A: Unità delle terre di copertura e rocce fratturate (rippabili)	Da 0,0 a 0,5/3,0	500-1700
B: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 0,5/3,0 a 2,0/4,5	1700-2300
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili)	Da 2,0/4,5 a 20,0	2300-6000

Dall'esame della sezione si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 500 m/s ai 6000 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (tra 0,5 e 3,0 metri da p.c.) e un andamento quasi parallelo al piano campagna. Il sismostrato B (limite dei materiali rippabili) presenta anch'esso delle leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 2,0 e 4,5 m dal p.c. Il sismostrato C (materiali non rippabili) si osserva invece fino alla profondità di circa 20,0 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 Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 0,5 e 3,0 m dal p.c. i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre in alcune zone della sezione, già a 2,0 m dal p.c. si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Le sezioni di tomografia elettrica **TRM-1**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, mettono in luce la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 2 m riconducibile alla coltre di terreni/rocce superficiali caratterizzati da resistività media, con valori tra 600 e 1000  $\Omega \cdot m$ , ben distinguibile con le acquisizioni Wenner e Wenner -Schulmberger; segue un secondo elettrostrato (ES2) caratterizzato da valori da elevati a molto elevati di resistività (mediamente 5000  $\Omega \cdot m$ ) riconducibile alla presenza del substrato dolomitico litoide.

All'interno dell'elettrostrato Es2 con le geometrie WS e DD, è stata individuata un'anomalia tra le progressive 12,0 e 25,0 m a profondità comprese tra 3,0 e 12,0 m dal piano campana. Si tratta di un'anomalia con valori di resistività inferiori rispetto alle zone circostanti che nel contesto in esame potrebbe essere interpretata come un settore leggermente più fratturato interessato da circolazione idrica e/o da una cavità di origine carsica con presenza d'acqua. Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione che in corrispondenza della suddetta anomalia vede comunque velocità elevate farebbe propendere più per la prima ipotesi, tuttavia considerato il contesto geologico in esame in fase di progettazione esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).



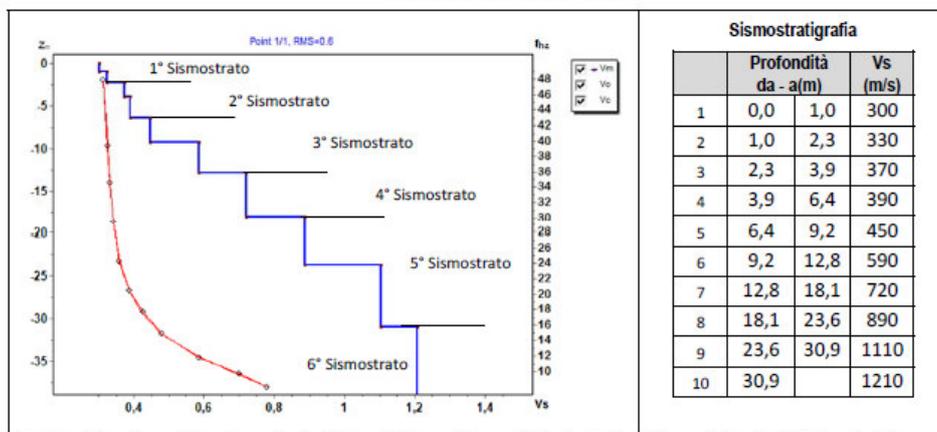
15.5. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO RM-1

15.5.1. MASW RM-1

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento RM-1, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 – 2,3	1° sismostrato con Vs tra 300 e 330 m/s, Terre mediamente addensate
2,3 – 6,4	2° sismostrato con Vs tra 370 e 390 m/s, Terre molto addensate e/o roccia intensamente fratturata
6,4 – 12,8	3° sismostrato con Vs tra 450 e 590 m/s, Roccia intensamente fratturata
12,8 – 18,1	4° sismostrato con Vs di 720 m/s, Roccia intensamente fratturata
18,1 – 30,9	5° sismostrato con Vs tra 890 e 1110 m/s, Substrato roccioso intensamente fratturato
>30,9	6° sismostrato con Vs di 1210 m/s, Substrato roccioso fratturato

MASW RM-1 - 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, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

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

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 18,1 m (Vs>800 m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 18,1 m di profondità dal p.c. è pari a: Vs eq = 18,1/0,037681=480 m/s.

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

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 $E_d$	Modulo di Young statico $E_d$	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,3	terre	1.600	630	315	0,33	422	51	157	422
2	2,3-6,4	terre	1.700	760	380	0,33	657	79	245	657
3	6,4-12,8	10%	1.800	1.040	520	0,33	1.294	129	490	1.294
4	12,8-18,1	10%	1.800	1.440	720	0,33	2.491	249	932	2.491
5	18,1-30,9	20%	2.000	2.000	1.000	0,33	5.335	1.067	2.001	5.335
6	>30,9	20%	2.000	2.420	1.210	0,33	7.806	1.561	2.932	7.806

Figura 13 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.

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

#### 15.5.2. RIFRAZIONE RM-1

Nella sezione di sismica a rifrazione **RM-1** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento RM-1	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura e rocce intensamente fratturate (rippabili)	Da 0,0 a 0,5/6,0	500-800
B: Unità delle rocce molto fratturate (rippabili)	Da 0,5/6,0 a 12,0	800-1000

Dall'esame della sezione si riconoscono 2 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 500 m/s ai 1000 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto variabili, infatti si può osservare che nella parte sinistra, tra le progressive 0,0 m e 20,0 m, raggiunge uno spessore massimo di 6,0 m dal p.c, mentre tra le progressive 20,0 m e 69,0 m è caratterizzato da spessori notevolmente inferiori. Il sismostrato B presenta anch'esso delle variazioni di spessore e si rileva fino alla massima profondità raggiunta con le indagini, pari a circa 12,0 m dal p.c. In tale sezione si osservano una variazione di velocità di modesto carattere tra le progressive 30,0 e 55,0 m e profondità comprese tra 1,5 m 4,0 m dal p.c, dovuta a un leggero miglioramento delle condizioni fisico-meccaniche dei materiali.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che i terreni presenti in tale sezione sono tutti rippabili fino alla profondità di circa 12,0 m dal p.c, infatti, a differenza delle altre sezioni sismiche non si rileva il sismostrato caratterizzato da materiali non rippabili.

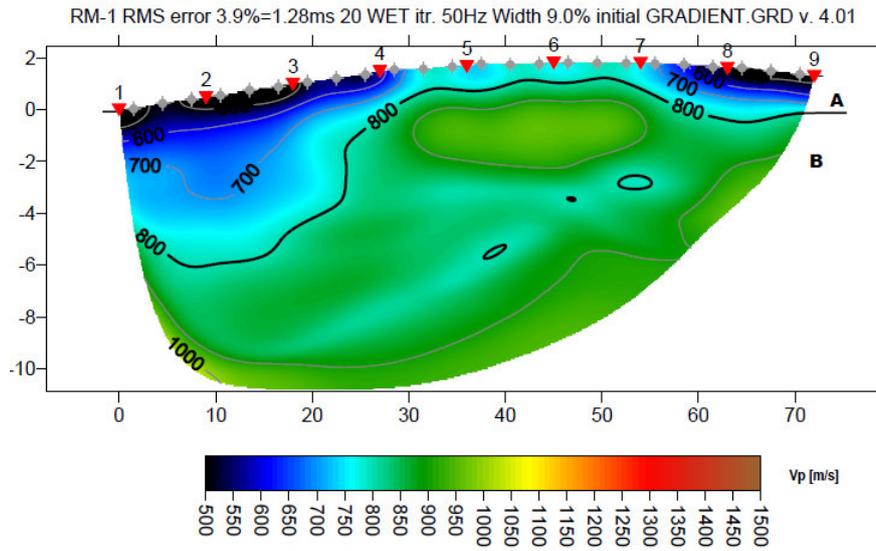


Figura 14 Base Sismica RM-1 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E

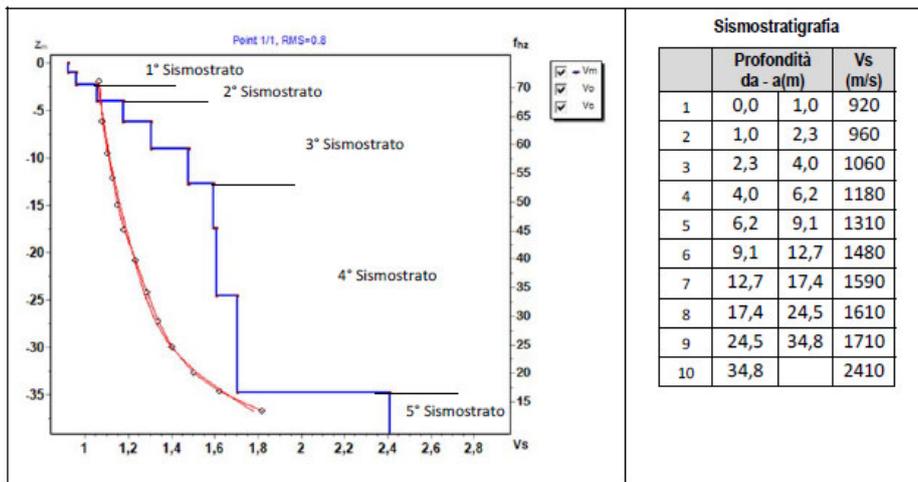
15.6. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO RM-1

15.6.1. MASW RM-2

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento RM-2, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0,0 – 2,3	1° sismostrato con Vs tra 920 e 960 m/s, Substrato roccioso fratturato
2,3 – 4,0	2° sismostrato con Vs di 1060 m/s, Substrato roccioso debolmente fratturato
4,0 – 12,7	3° sismostrato con Vs tra 1180 e 1480 m/s, Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
12,7 – 34,8	4° sismostrato con Vs tra 1590 e 1710 m/s, Substrato roccioso sano
>34,8	5° sismostrato con Vs di 2410 m/s, Substrato roccioso sano

MASW RM-2 - 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, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

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

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 1,0 m (Vs>800 m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio $G_0$	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-2,3	10%	2.000	1.880	940	0,33	4.717	472	1.765	4.717
2	2,3-4,0	15%	2.100	2.120	1.060	0,33	6.296	944	2.363	6.296
3	4,0-12,7	15%	2.100	2.660	1.330	0,33	9.905	1.486	3.717	9.905
4	12,7-34,8	20%	2.200	3.300	1.650	0,33	15.975	3.195	5.992	15.975
5	>34,8	30%	2.300	4.820	2.410	0,33	35.628	10.688	13.357	35.628

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

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

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

#### 15.6.2. RIFRAZIONE RM-2

Nella sezione di sismica a rifrazione **RM-2** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento RM-2	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura e rocce fratturate (rippabili)	Da 0,0 a 0,0/3,0	500-1700
B: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 0,0/3,0 a 0,0/4,5	1700-2300
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili)	Da 0,0/4,5 a 20,0	2300-4500

Dall'esame della sezione si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 500 m/s ai 4500 m/s. Il sismostrato A presenta spessori molto ridotti (tra 0,5 e 3,0 metri da p.c) e un andamento quasi parallelo al piano campagna anche se la sua continuità viene interrotta da affioramenti di rocce più consistenti che caratterizzano il sismostrato B (limite dei materiali rippabili). Quest'ultimo presenta spessori leggermente variabili lungo la sezione e si osserva a partire dal piano campagna in alcune zone della sezione fino a una profondità massima di 4,5 m dal p.c. Il sismostrato C (materiali non rippabili) si osserva prevalentemente a partire da circa 4,5 m di profondità dal p.c fino a circa 20,0 m. Tuttavia anch'esso si presenta in affioramento tra le progressive 57,0 m e 63,0 m. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che in quasi tutta la sezione il limite dei materiali rippabili si trova a circa 4,5 m di profondità, ad esclusione della zona tra le progressive 57,0 m e 63,0 m, dove affiora sul piano campagna.

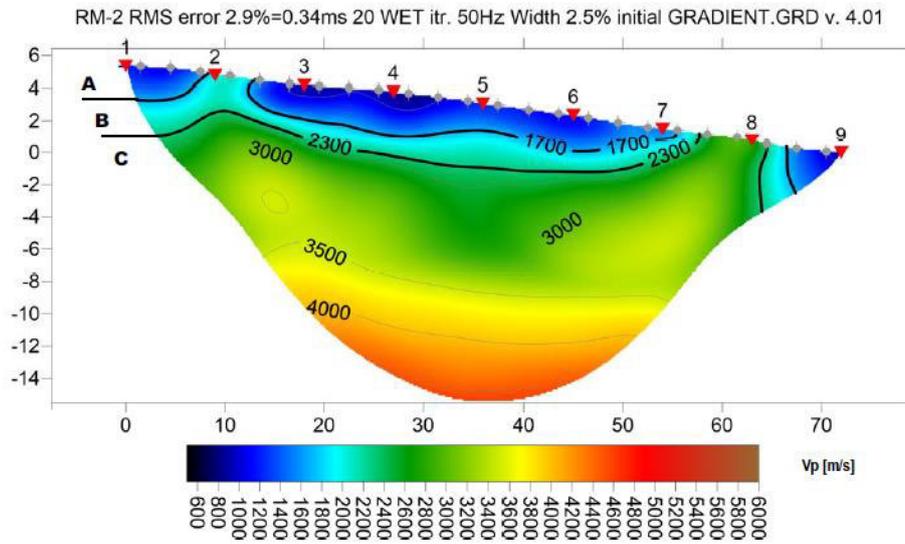


Figura 16 Base Sismica RM-2 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E

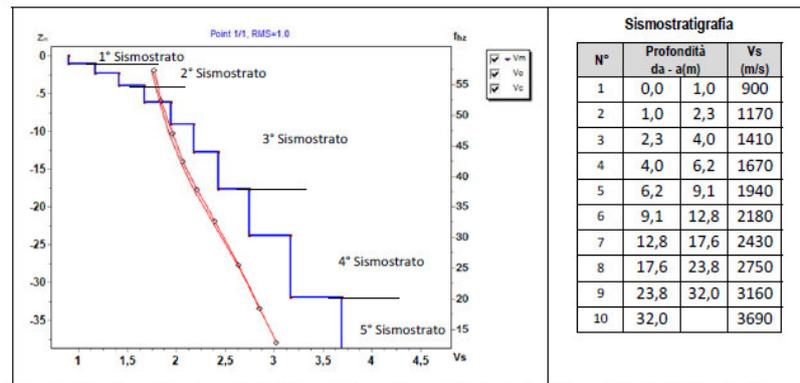
15.7. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TRM-2

15.7.1. MASW TRM-2

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento TRM-2, 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 – 1,0	1° sismostrato con Vs di 900 m/s, Substrato roccioso fratturato
1,0 – 4,0	2° sismostrato con Vs tra 1170 e 1410 m/s, Substrato roccioso debolmente fratturato
4,0 – 17,6	3° sismostrato con Vs tra 1670 e 2430 m/s, Substrato roccioso sano
17,6 – 32,0	4° sismostrato con Vs tra 2750 e 3160 m/s, Substrato roccioso sano
>32,0	5° sismostrato con Vs di 3690 m/s, Substrato roccioso sano

MASW TRM-2 - 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, Vs,eq (in m/s), definita dall'espressione

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

con:

hi spessore dell'i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 1,0 m (Vs>800 m/s), che dà luogo ad una Categoria A di sottosuolo, ossia:

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità $\gamma$	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson $\nu$	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G <sub>0</sub>	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m <sup>3</sup> ]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,0	10%	2.000	1.800	900	0,33	4.325	432	1.618	4.325
2	1,0-4,0	15%	2.100	2.580	1.290	0,33	9.316	1.397	3.491	9.316
3	4,0-17,6	20%	2.200	4.100	2.050	0,33	24.654	4.931	9.248	24.654
4	17,6-32,0	25%	2.300	5.910	2.955	0,33	53.555	13.389	20.084	53.555
5	>32,0	40%	2.400	7.380	3.690	0,33	87.143	34.857	32.676	87.143

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

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

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

#### 15.7.2. RIFRAZIONE TRM-2 E TOMOGRAFIA ELETTRICA TRM-2

Nella sezione di sismica a rifrazione **TRM-2** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento TRM-2	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura e rocce fratturate (rippabili)	Da 0,0 a 0,0/3,0	500-1700
B: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 0,0/3,0 a 2,0/4,0	1700-2300
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili)	Da 2,0/4,0 a 20,0	2300-6000

Dall'esame della sezione si riconoscono 3 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 500 m/s ai 6000 m/s. Il sismostrato A presenta spessori leggermente variabili e molto ridotti (massimo 3,0 metri da p.c) con un andamento leggermente ondulato rispetto al piano campagna. Il sismostrato B (limite dei materiali rippabili) presenta anch'esso un andamento leggermente ondulato rispetto al piano campagna e delle leggere variazioni di spessore. Si rileva fino a una profondità di circa 4,0 m oltre che ad alcuni affioramenti sul piano campagna. Il sismostrato C (materiali non rippabili) si osserva invece da profondità comprese tra 2,0 e 4,0 m dal p.c fino alla profondità di circa 20,0 m e rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con leggere variazioni generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso.

In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 0,0 e 3,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre in alcune zone della sezione, già a 2,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile. Le sezioni di tomografia elettrica **TRM-2**, realizzate con le tre differenti geometrie di acquisizione, mettono in luce la presenza di un primo elettrostrato (ES1) di spessore pari a circa 1-2 m riconducibile alla coltre di terreni/rocce superficiali caratterizzati da resistività media, con valori tra 600 e 1000  $\Omega \cdot m$ , ben distinguibile con le acquisizioni Wenner e Wenner -Schulmberger; segue un secondo elettrostrato (Es2) caratterizzato da valori da elevati a molto elevati di resistività (mediamente 5000  $\Omega \cdot m$ ) riconducibile alla presenza del substrato dolomitico litoide.

All'interno dell'elettrostrato Es2 grazie alle geometrie WS e DD, sono state individuate tre anomalie (An1, An2, An3) con valori di resistività inferiori rispetto al resto della sezione che nel contesto in esame potrebbero essere interpretate come settori leggermente più fratturati e interessati da circolazione idrica e/o cavità di origine carsica con presenza d'acqua. Il confronto con il grafico della sismica a rifrazione in corrispondenza delle anomalie An1 e An3 vede comunque velocità

elevate e farebbe propendere più per la prima ipotesi, mentre in An2 si rileva un contestuale abbassamento di velocità che potrebbe essere legato proprio alla presenza di una cavità.

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

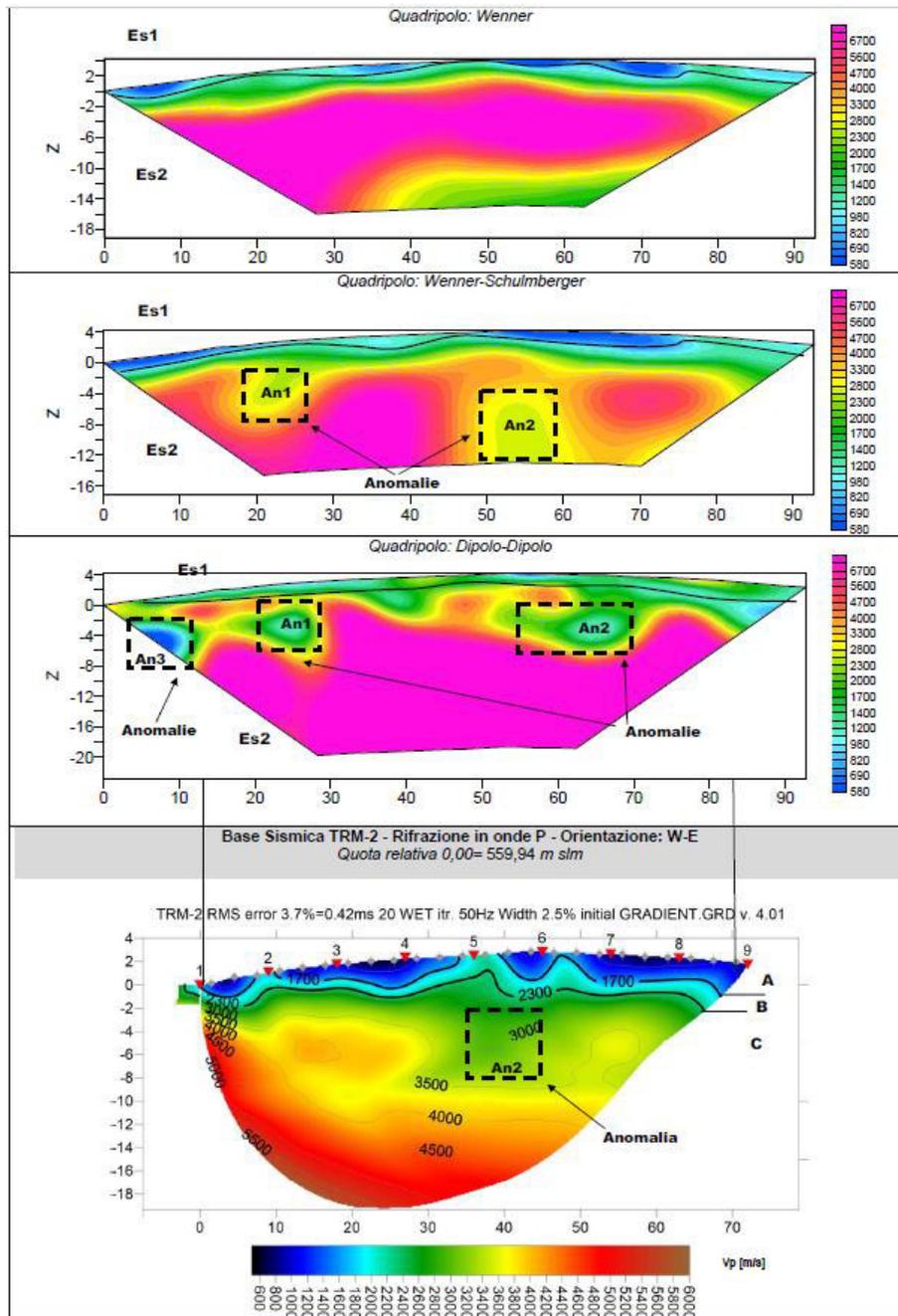
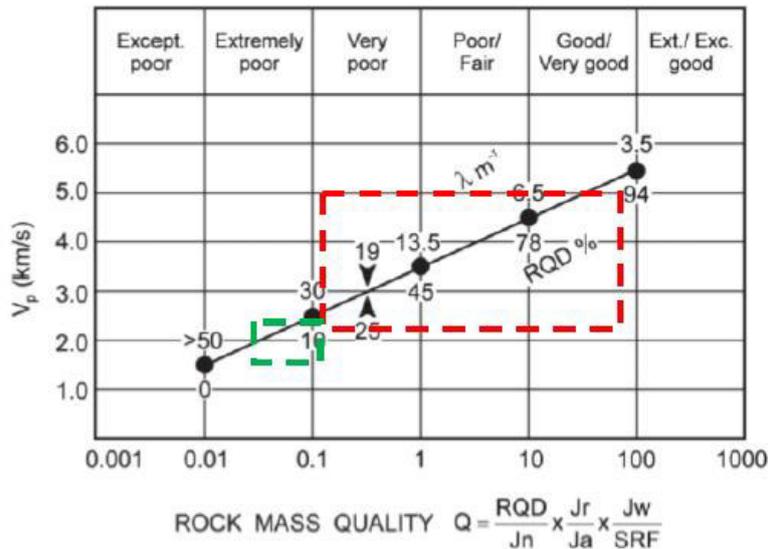


Figura 18 Stendimento di tomografia elettrica: TRM-2-Lungh: 93,0 m - Orientazione: W-E

15.8. 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 Vp con RQD e λ (fratture per metro) e il relativo indici di qualità dell’ammasso roccioso di Barton (Q).



Sulla base dei litotipi individuati dai sondaggi si può applicare la correlazione ai sismostrati B e C. Il rettangolo verde indica il settore del sismostrato B, con un RQD compreso tra 0 e 7, un numero di fratture per metro che varia tra 50 e 36 e un indice di qualità Q tra 0,01 e 0,06 (ammasso roccioso estremamente scadente); il rettangolo rosso rappresenta il sismostrato C che ha valori di RQD compresi tra 7 e 85, un numero di fratture per metro compreso tra 36 e 5,0 e un valore dell'indice Q tra 0,06 e 35 (ammasso roccioso da estremamente scadente a scadente/discreto).

Da quanto sopra le 2 unità sismostratigrafiche possono essere classificate come segue:

Sismostrati	Vp (m/s)	RQD (%)	λ (1/m)	Q
B: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	1700-2300	0-7	50-36	0.01-0.06
C: Unità delle rocce da poco fratturate a sane (non rippabili)	2300-5000	7-85	36-5	0.06-35

L’indice Q può essere correlato all’indice RMR della classificazione di Bieniawski con la relazione:

$$RMR=9\ln Q+44$$

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

La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche. Per quanto riguarda le MASW, lungo gli stendimenti si evince la presenza di sismostrati con velocità  $V_s$  crescente con la profondità sino ad incontrare il bed rock con andamenti e spessori indicati nei precedenti paragrafi. La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per i differenti siti di indagine, che si ricorda sarà anche funzione del piano di posa delle fondazioni è riportata nel seguente schema riassuntivo:

Sigla Stendimento	Profondità substrato [m]	$V_{seq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo (NTC2018)
TRM-1	1,0	>800	A
RM-1	18,1	480	B
RM-2	1,0	>800	A
TRM-2	1,0	>800	A

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 a partire da profondità comprese tra 2,0 e 4,5 m dal p.c. per TRM-1, RM-2 e TRM-2, mentre lungo lo stendimento RM-1 si riscontrano materiali rippabili fino alla massima profondità indagata (12,0 m dal p.c). In particolare come si osserva anche dalla tabella dei dati MASW e dalle sezioni di sismica a rifrazione il bed rock si incontrerà a profondità maggiori lungo lo stendimento sismico RM-1. Le prospezioni geofisiche in rifrazione sono state utilizzate anche per la definizione spaziale di alcuni elementi degli ammassi rocciosi (fratture, RQD, etc) e per la definizione per l'indice di qualità di Barton Q: si tratta chiaramente di correlazioni da impiegare con le dovute approssimazioni ma comunque utili in determinate situazioni nelle quali è difficile ottenere dei parametri di caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare negli stendimenti TRM-1 e TRM-2 delle anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto delle sezioni, che nel contesto in esame potrebbero essere interpretati come settori leggermente più fratturati e interessati da circolazione idrica e/o presenza di cavità di origine carsica con presenza d'acqua. Il confronto con i grafici della sismica a rifrazione in alcuni casi farebbe propendere più per la prima ipotesi, mentre in altri per la seconda.

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

**Tavola 1 : INQUADRAMENTO GENERALE DELL'AREA DI INDAGINE**

Progetto: Parco eolico Villamassargia-Narcao (SU)

Scala 1:25.000

**Legenda**

○ AREA DI INDAGINE



**Tavola 2 : PLANIMETRIA DI DETTAGLIO UBICAZIONE INDAGINI GEOFISICHE TRM-1**

Progetto: Parco eolico Villamassargia-Narcao (SU)

Scala 1:500

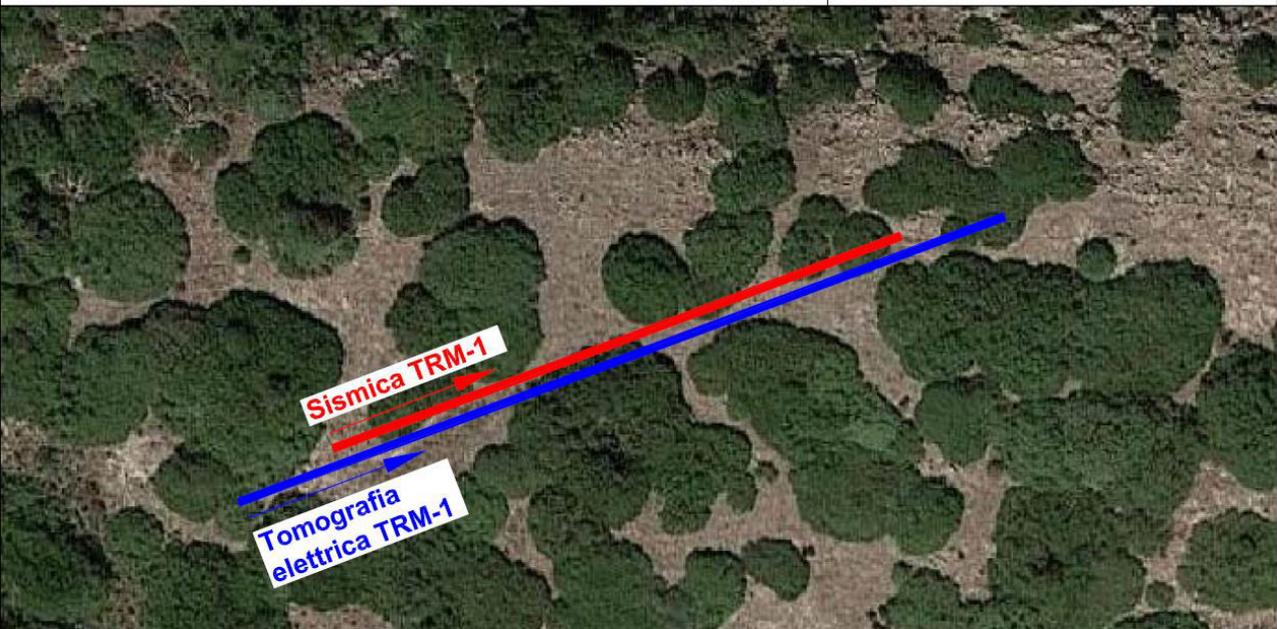
**Legenda**

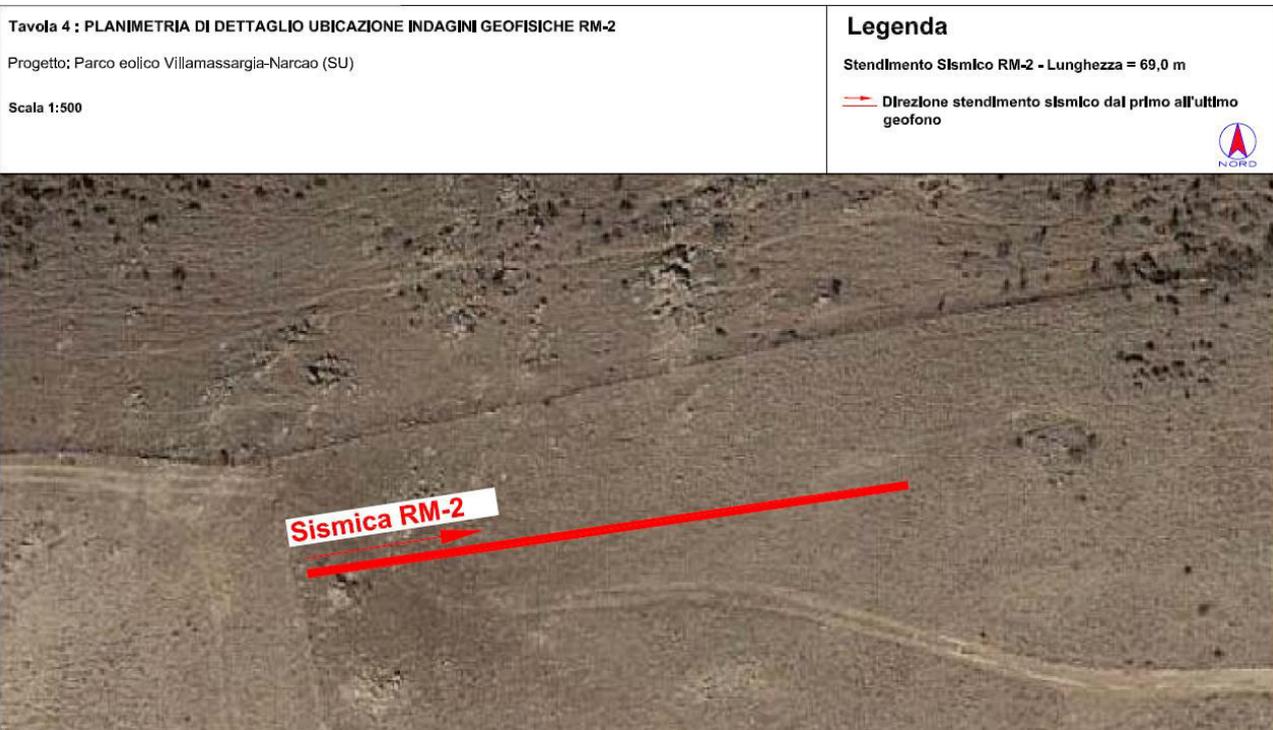
Stendimento Sismico TRM-1 - Lunghezza = 69,0 m

Stendimento Geoelettrico TRM-1 - Lunghezza = 93,0 m

— Direzione stendimento sismico dal primo all'ultimo geofono

— Direzione stendimento geoelettrico dal primo all'ultimo elettrodo







## 9. MODELLAZIONE GEOLOGICA

### 16.1 CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

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

- *Resistenza a compressione monoassiale (Intact Uniaxial Compressive Strength – IUCS)* stimata su base empirica (Fig.64) e su valori di Point Load.
- *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. 65) o sulla base di un controllo diretto con l'indice RMR della classificazione di Bieniawski.
- *Determinazione della costante  $m_i$  (Funzione del tipo di roccia):* i valori delle costanti caratteristiche della roccia ( $\sigma_{ci}$  e  $m_i$ ) vengono generalmente definiti sulla base di apposite prove di laboratorio, ma in assenza delle suddette, è possibile fare riferimento alla tabella di Fig.66, che riassume i valori della costante  $m_i$  per diversi tipi di roccia.

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

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

Figura 19 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

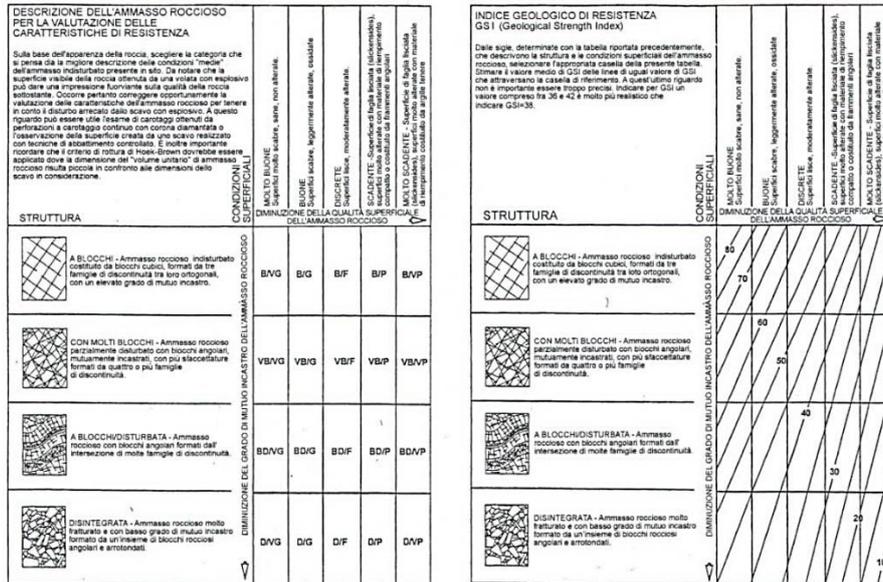


Figura 20 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

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

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

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

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

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

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

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

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

TIPO DI ROCCIA	CLASSE	GRUPPO	TESSITURA			
			GROSSOLANA	MEDIA	FINE	MOLTO FINE
SEDIMENTARIE	Clastiche		Conglomerato (22)	Arenaria 19	Siltite 9	Argillite 4
	Non clastiche	Organogene	Grovacche (18)			
			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  $m_i$  sarà sensibilmente inferiore se la rottura avviene lungo un piano di debolezza

Figura 21 Valori della costante  $m_i$  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 di **nr.3 tipologie** tra le litologie che caratterizzano le formazioni presenti, due delle quali appartenenti alla **Formazione di Nebida**, e una appartenente alla **Formazione di Gonnese**.

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.

<p>Criterio di rottura empirico</p> $\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_{u(r)}\sigma_3 + s\sigma_{u(r)}^2}$ <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>Argille, siltite, scisti argillosi con clivaggio ben marcato.</p>	<p>ROCCIE ARENACEE CON ELEVATA CRISTALLIZZAZIONE E LIMITATO SVILUPPO DI CLIVAGGIO PER CRISTALLIZZAZIONE</p> <p>Arenaria 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>Amfibolite, gabbro, gneiss, novite, quarzo-clonite</p>
<p><b>CAMPIONI DI ROCCIA INTATTA</b></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><b>AMMASSO ROCCIOSO DI OTTIMA QUALITÀ</b></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><b>AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ</b></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><b>AMMASSO ROCCIOSO DI DISCRETA QUALITÀ</b></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><b>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ SCADENTE</b></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><b>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ MOLTO SCADENTE</b></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 22 Correlazione fra valori di m, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.

Di seguito si riportano gli schemi di analisi degli ammassi rocciosi e i relativi diagrammi di Mohr -Coulomb:

### Formazione di Nebida

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

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= da mediamente fratturato a molto fratturato

Struttura= scistosa

Alterazione= mediamente alterata

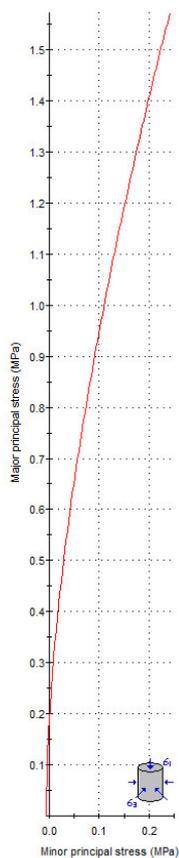
Spaziatura totale delle discontinuità (s)=0,1 m

Lunghezza media del giunto = >3 m

Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – asciutta

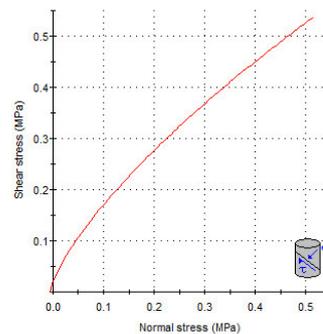


**Hoek-Brown Classification**  
 intact uniaxial compressive strength = 138 MPa  
 GSI = 25    mi = 19    Disturbance factor = 1

**Hoek-Brown Criterion**  
 mb = 0.090    s = 3.73e-6    a = 0.531

**Mohr-Coulomb Fit**  
 cohesion = 0.075 MPa    friction angle = 43.52 deg

**Rock Mass Parameters**  
 tensile strength = -0.006 MPa  
 uniaxial compressive strength = 0.180 MPa  
 global strength = 4.438 MPa  
 modulus of deformation = 1185.69 MPa



### Formazione di Nebida (alterata)

Standard ISRM = La punta lascia dei buchi, lastre sottili si rompono con forti pressioni delle mani

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= molto fratturato e alterato

Struttura= scistosa

Alterazione= spinta

Spaziatura totale delle discontinuità (s)= >0,1 m

Lunghezza media del giunto = >3 m

Pareti – molto alterate  
 Riempimento – sciolto  
 Roccia – umida

Hoek-Brown Classification

sigci 36 MPa  
 GSI 19  
 mi 16  
 D 1

Hoek-Brown Criterion

mb 0.049  
 s 1.37e-6  
 a 0.547

Failure Envelope Range

Application: Slopes  
 sig3max 0.2069 MPa  
 Unit Weight 0.026 MN/m3  
 Slope Height 10 m

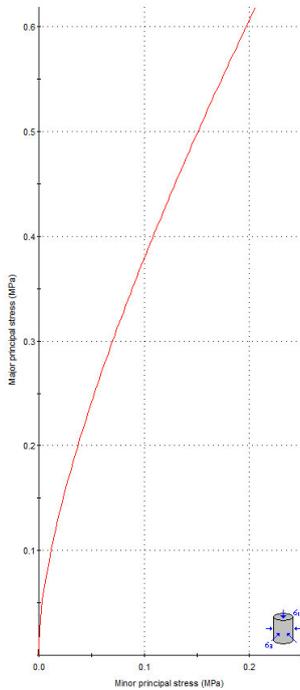
Mohr-Coulomb Fit

c 0.030 MPa  
 phi 26.99 deg

Rock Mass Parameters

sigt -0.0010 MPa  
 sigc 0.022 MPa  
 sigcm 0.748 MPa  
 Em 503.64 MPa

Copy Data



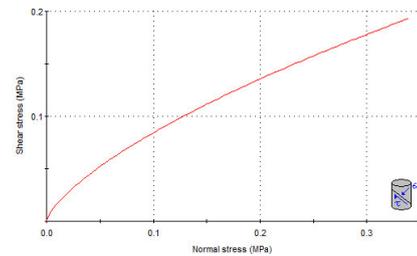
Analysis of Rock/Soil Strength using RocData

Hoek-Brown Classification  
 intact uniaxial compressive strength = 36 MPa  
 GSI = 19 m = 16 Disturbance factor = 1

Hoek-Brown Criterion  
 mb = 0.049 a = 1.37e-6 a = 0.547

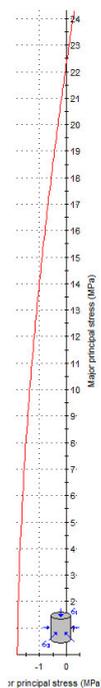
Mohr-Coulomb Fit  
 cohesion = 0.030 MPa friction angle = 26.99 deg

Rock Mass Parameters  
 tensile strength = -0.001 MPa  
 uniaxial compressive strength = 0.022 MPa  
 global strength = 0.748 MPa  
 modulus of deformation = 503.64 MPa



**Formazione di Gonnese**

- Standard ISRM = R5 il campione richiede molti colpi di martello per essere fratturato
- Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo
- Ammasso roccioso= irregolare
- Struttura= massiccia
- Alterazione= mediamente alterata
- Spaziatura totale delle discontinuità (s)=0,5m
- Lunghezza media del giunto = 1,0 m
- Apertura del giunto = 1 - 40mm
- Giunto – rugoso ondulato classe IV
- Pareti – mediamente alterate
- Riempimento – sciolto/ assente
- Roccia – asciutta

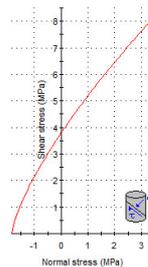


**Hoek-Brown Classification**  
 intact uniaxial compressive strength = 180 MPa  
 GSI = 75    m = 9    Disturbance factor = 1

**Hoek-Brown Criterion**  
 $m_b = 1.509$      $s = 0.0155$      $a = 0.501$

**Mohr-Coulomb Fit**  
 cohesion = 3.640 MPa    friction angle = 54.89 deg

**Rock Mass Parameters**  
 tensile strength = -1.549 MPa  
 uniaxial compressive strength = 22.328 MPa  
 global strength = 33.535 MPa  
 modulus of deformation = 21084.83 MPa



## 16.2 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.

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 **3 modelli geologici rappresentativi** descritti di seguito:

## MODELLO GEOLOGICO 01 – T01, T02, T08, T09

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati degli stendimenti geofisici TRM-1 e TRM-2 e i dati dei rilievi geomeccanici "Scanline-1" e "Scanline-3".

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di suolo di circa 0,15m si incontra un livello superficiale di roccia alterata dallo spessore di circa 1m, il sottostante substrato litoide costituito da uno spessore di circa 6 m di dolomie alterate della Formazione di Gonnese.

Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta massiva, e, per quanto resistente, è debolmente affetta da alterazione fisica. La spaziatura massima tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 1 m, la minima è 0,1m. Risulta complesso distinguere le diverse famiglie di giunti, è evidente però quando queste, talvolta subortogonali tra loro, intersecandosi tendano a dividere l'ammasso in blocchi dalle dimensioni talvolta metriche.

L'impiego congiunto della tecnica della tomografia elettrica lungo il medesimo allineamento della sismica a rifrazione ha permesso di identificare negli stendimenti TRM-1 e TRM-2 delle anomalie caratterizzate da valori di resistività inferiori rispetto al resto delle sezioni, che nel contesto in esame potrebbero essere interpretati come settori leggermente più fratturati e interessati da circolazione idrica e/o presenza di cavità di origine carsica con presenza d'acqua. Il confronto con i grafici della sismica a rifrazione in alcuni casi farebbe propendere più per la prima ipotesi, mentre in altri per la seconda.

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

00.00m - 1.00m	Suolo/ Dolomia fratturata e alterata
01.00m - 4.00m	Dolomia mediamente fratturata
04.00m - 17.60m	Dolomia poco fratturata.
17.60m - in poi	Dolomia sana

**Villamassargia - MODELLO GEOTECNICO 01  
(T01, T02, T08, T09)**

Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1- Suolo/ Dolomia fratturata e alterata	S2 – Dolomia mediamente fratturata	S3 – Dolomia poco fratturata	S4- Dolomia sana
Descrizione					
Peso di volume	[kg/mc]	2000	2100	2200	2300
Peso di volume saturo	[kg/mc]	2100	2200	2300	2400
Angolo di attrito interno	[°]	30,66	35,09	39,2	43,21
Coesione	[Mpa]	0,016	6,825	12,823	25,453
Dati Parametri Deformabilità					
Modulo elastico	[Mpa]	4600	9100	24250	50000
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	1700	3410	9100	19500
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	930	1275	2035	2872

## MODELLO GEOLOGICO 02 – T05, T06, T07.

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico **RM-2** e i dati dei rilievi geomeccanici **"Scanline-2"** e **"Scanline-4"**.

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di suolo di circa 0,20m si incontra un livello superficiale di roccia alterata dallo spessore di circa 2,3m, il sottostante substrato litoide costituito da uno spessore di circa 12 m di metarenarie fratturate e alterate della Formazione di Nebida.

Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta stratificata, e, per quanto resistente, è da debolmente a mediamente affetta da alterazione fisica. La spaziatura massima tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,3 m, la minima è <0,1m. Risulta complesso distinguere le diverse famiglie di giunti, è alta la probabilità che l'intersezione tra queste e la stratificazione causi scivolamenti planari o a cuneo.

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

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.

Dall'analisi giaciturale delle discontinuità, in questo caso particolare, se si dovessero preservare le condizioni dell'ammasso roccioso rilevato, si dovrebbe tener conto delle criticità elencate all'inizio del capitolo, nelle pareti poste a W e a S per quanto riguarda scivolamenti planari e crolli/ribaltamenti.

0.00m – 2.30m	Metarenaria molto fratturata e alterata
2.30m – 6.40m	Metarenaria fratturata e alterata
6.40m – 12.80m	Metarenaria mediamente fratturata.
12.80m – 30.00	Metarenaria poco fratturata

Villamassargia - MODELLO GEOTECNICO 02		(T05, T06, T07)			
Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1- Metarenaria molto fratturata e alterata	S2 – Metarenaria fratturata e alterata	S3 – Metarenaria mediamente fratturata	S4- Metarenaria poco fratturata
Descrizione					
Peso di volume	[kg/mc]	2000	2100	2100	2200
Peso di volume saturo	[kg/mc]	2100	2200	2200	2300
Angolo di attrito interno	[°]	29,65	32,48	35,25	38,42
Coesione	[Mpa]	4,377	6,439	7,295	8,688
Dati Parametri Deformabilità					
Modulo elastico	[Mpa]	4717	6296	9905	15975
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	1765	2363	3717	5992
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	940	1060	1330	1650

## MODELLO GEOTECNICO 03 – T03, T04 E VIABILITÀ.

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico **RM-1** e i dati dei rilievi geomeccanici "Scanline-2" e "Scanline-4".

Questo modello rappresenta una situazione del substrato che si potrebbe incontrare durante la costruzione delle strade e durante la messa in posto dei cavidotti, laddove la roccia è più fratturata e pedogenizzata, per esempio per via del passaggio di una faglia, che favorisce il passaggio dell'acqua e quindi l'alterazione chimica della roccia.

In questi casi lo spessore di roccia molto fratturata/suolo/terre può raggiungere i 6m, e localmente fino a circa 18,00m. Tale orizzonte è costituito da rocce tenere e/o depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine molto consistenti. Il sottostante substrato litoide costituito da uno spessore di circa 12 m di metarenarie fratturate della Formazione di Nebida.

Per quanto riguarda l'analisi dell'ammasso roccioso affiorante nei pressi dello stendimento **RM-1**, le condizioni della roccia si presentano simili a quelle della "scanline 4", eseguita nei pressi dell'**RM-2**; la roccia è stratificata, la spaziatura massima tra le discontinuità che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,3 m, la minima è <0,1m. Risulta complesso distinguere le diverse famiglie di giunti, è alta la probabilità che l'intersezione tra queste e la stratificazione causi scivolamenti planari o a cuneo, dove l'alterazione chimica è spinta e la struttura della roccia madre è obliterata si possono verificare inoltre scivolamenti rotazionali.

Allo stesso modo come per gli altri casi, in fase di progettazione esecutiva si consiglia di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

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.

Dall'analisi giacitura delle discontinuità, in questo caso particolare, se si dovessero preservare le condizioni dell'ammasso roccioso rilevato, si dovrebbe tener conto delle criticità elencate all'inizio del capitolo, nelle pareti poste a W e a S per quanto riguarda scivolamenti planari e crolli/ribaltamenti.

0.00m – 2.30m	Terre mediamente addensate
2.30m – 6.40m	Terre molto addensate e/o rocce molto fratturate
6.40m – 18.10m	Roccia intensamente fratturata.
18.10m – 30.00m	Substrato roccioso intensamente fratturato.

Villamassargia - MODELLO GEOTECNICO 03		(T03, T04, viabilità)			
Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1- Suolo/Terre mediamente addensate	S2 – Terre molto addensate e/o rocce molto fratturate	S3 – Roccia intensamente fratturata.	S4- Substrato roccioso intensamente fratturato.
Descrizione					
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1800	2000
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	1900	2100
Angolo di attrito interno	[°]	21,60	25,45	29,00	32,00
Coesione	[Mpa]	0,020	0,027	1,699	3,528
Dati Parametri Deformabilità					

<b>Modulo elastico</b>	[Mpa]	422	657	1900	5335
<b>Coefficiente di Poisson</b>	[]	0,33	0,33	0,33	0,33
<b>Modulo di taglio (G)</b>	[Mpa]	157	245	710	2001
<b>Velocità onde di taglio Vs</b>	[m/sec]	315	380	620	1000

## 10. DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE DEGLI AEROGENERATORI

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

In questa fase si prevede la realizzazione di opere di fondazione di tipo diretto costituite da un plinto con forma tronco-conica, con pianta circolare avente diametro massimo pari a 25,00 m ed una sezione trapezia avente altezza minima al bordo esterno pari a 1,00m, altezza di 2,50m nel profilo della connessione della parte tronco-conica con il colletto centrale dove raggiunge i 4m d'altezza.

Volume plinto:  $V_p = 1.065,78 \text{ m}^3$

Peso proprio plinto:  $W_p = 26.111,61 \text{ kN}$

Volume netto terreno riportato di ricoprimento:  $V_t = 897,7 \text{ m}^3$

Peso proprio netto terreno riportato di ricoprimento:  $W_t = 14.004,12 \text{ kN}$

In corrispondenza del colletto centrale, punto di connessione tra il plinto e la torre eolica, è prevista l'installazione di una doppia flangia ("anchor cage"). Quella inferiore, rialzata rispetto al piano di posa del plinto di fondazione, viene collegata dai tirafondi, aventi una lunghezza di 4000 millimetri, con la piastra superiore su cui si inserisce la flangia di giunzione della torre eolica.

Sia la piastra inferiore, che quella superiore sono dotate di due file di fori disposte radialmente rispetto al centro della base circolare della torre; sono disposti 120 fori su 2 file su cui andranno inserite 240 barre filettate ancorate sulla piastra inferiore e annegate in opera per il collegamento della flangia della torre eolica.

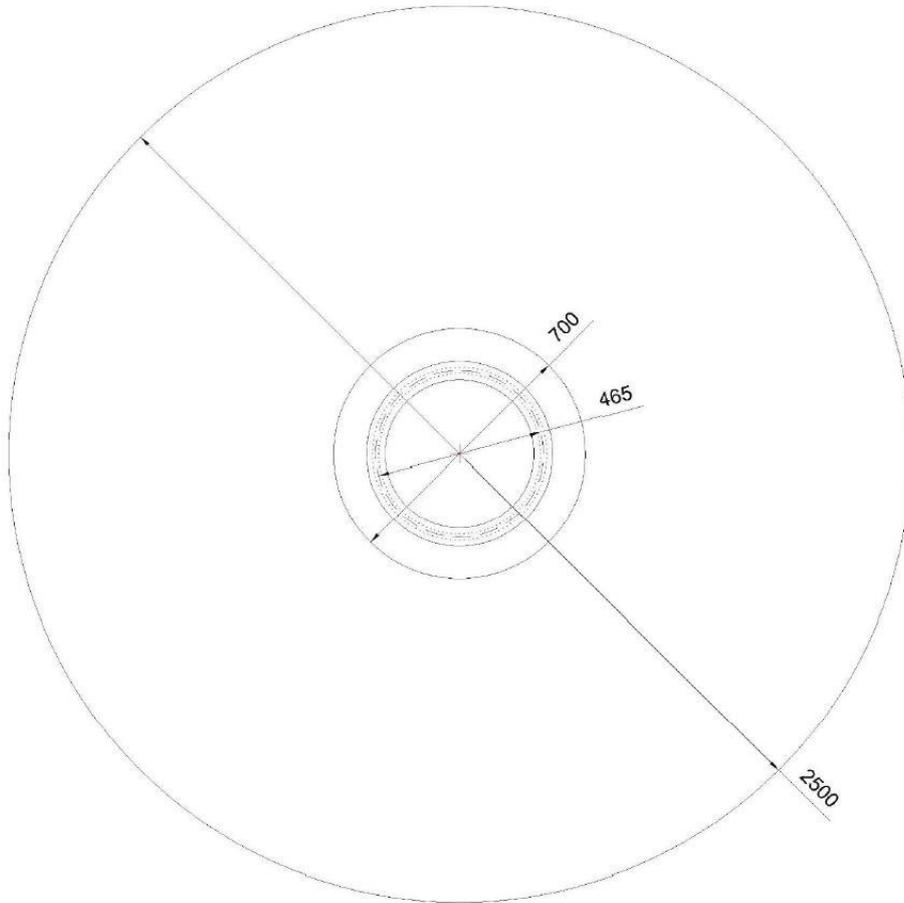
In aderenza al plinto di fondazione dovrà essere previsto opportuno drenaggio per l'allontanamento delle acque dalla fondazione.

### CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Le caratteristiche dei materiali adottati per il predimensionamento delle fondazioni in calcestruzzo armato sono le seguenti:

- Acciaio: B450C
- Calcestruzzo per il sottofondo: C16/20
- Calcestruzzo per il plinto: C35/45
- Calcestruzzo per il colletto: C50/60
- Malta fibrorinforzata per sigillatura "anchor cage": C90/105

PIANTA MODELLO PLINTO AEROGENERATORE D.25,0 m.



SEZIONE MODELLO PLINTO AEROGENERATORE D.25,0 m.

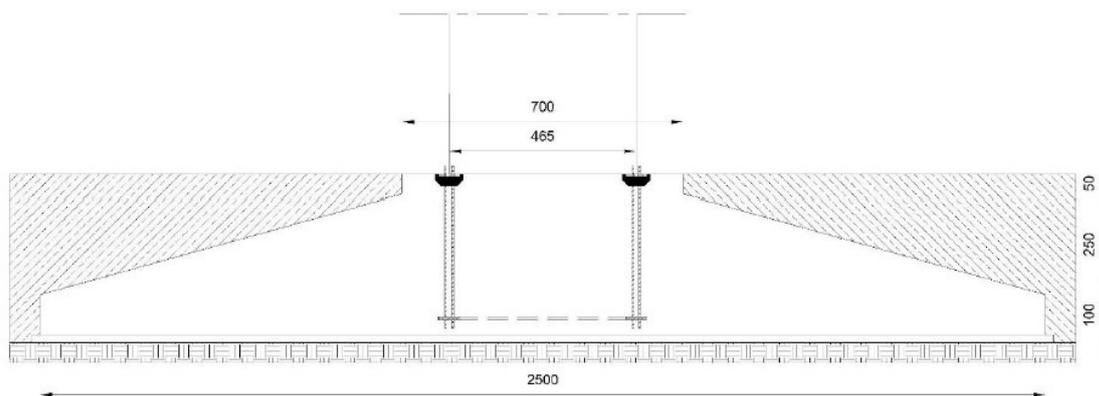


Figura 23 Schema generale della fondazione

## 11.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 Cap. 2.

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

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali <sup>(1)</sup>	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	$\gamma_{Qi}$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

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

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

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

Il valore di progetto della resistenza  $R_d$  può essere determinato:

- in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale  $\gamma_M$  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;
- 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;
- 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.

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

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

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

- devono essere stabiliti i limiti di accettabilità dei valori di alcune grandezze rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno;
- si deve dimostrare che la soluzione prescelta è accettabile in rapporto a tali limiti;
- devono essere previste soluzioni alternative, congruenti con il progetto, e definiti i relativi oneri economici;
- 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.

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

### 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:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
  - collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno
  - collasso per scorrimento sul piano di posa
  - stabilità globale
  - SLU di tipo strutturale (STR)
  - raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali,
- accertando che la condizione (6.2.1) sia soddisfatta per ogni stato limite considerato.

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

- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

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

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  $g_R$  non deve essere portato in conto.

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

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

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

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

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

Analogamente, forma, dimensioni e rigidezza della struttura di fondazione devono essere stabilite nel rispetto dei summenzionati 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.

## 13.CONDIZIONI DI CARICO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI

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

### Extreme loads EV162-5.4 MW-H 125

Load case	Load factor	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	Mz (kNm)
Production loads	1,35	1.317,34	-7.079,00	147.900,00	-16.545,64

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

## 14.MODELLI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE

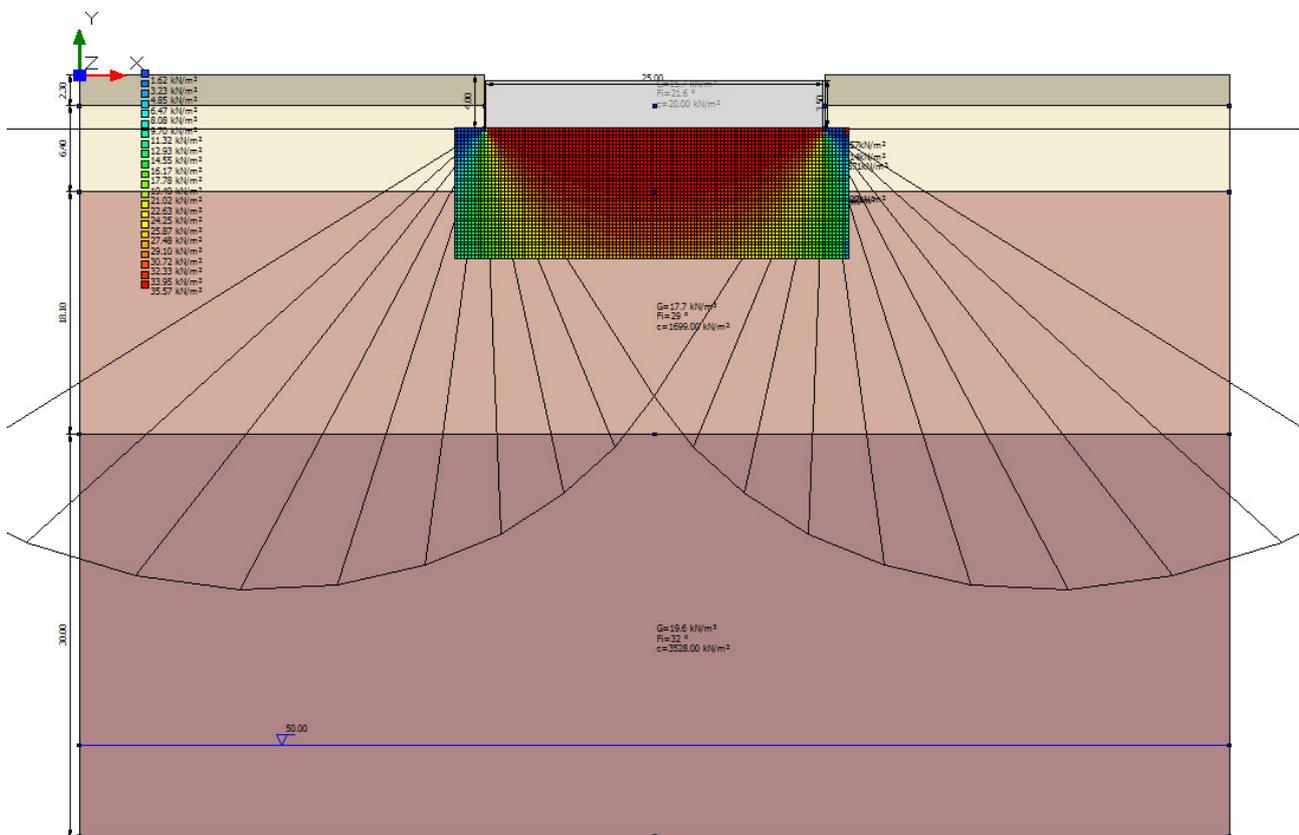
Le verifiche sono state eseguite sul modello geotecnico 3 maggiormente cautelativo in quanto caratterizzato da parametri geotecnici più scadenti, utilizzato anche per il predimensionamento della fondazione.

È stato utilizzato il software Loadcap 2022 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. In tutte le casistiche analizzate 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.

**MODELLO GEOTECNICO 03**



**DATI GENERALI**

```

=====
Normativa   NTC_2018
Zona        villamassargia
Lat./ Long. [WGS84]  39.2775840759277/8.6426305770874
Diametro della fondazione  25.0      m
Profondità piano di posa   4.0       m
Profondità falda           50.0
Sottofondazione...Sporgenza, Altezza  0.1/0.1   m
=====
    
```

**SISMA**

=====

Accelerazione massima (amax/g)      0.038  
 Effetto sismico secondo      NTC 2018

=====

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

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

**Parametri sismici su sito di riferimento**

Categoria sottosuolo:            B  
 Categoria topografica:            T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s <sup>2</sup> ]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30.0	0.249	2.685	0.3
S.L.D.	50.0	0.307	2.73	0.307
S.L.V.	475.0	0.587	2.976	0.371
S.L.C.	975.0	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**

Spesso re strato [m]	Peso unità di volume [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso unità di volume saturo [kN/m <sup>3</sup> ]	Angolo di attrito [°]	Coesio ne [kN/m <sup>2</sup> ]	Coesio ne non drenat a [kN/m <sup>2</sup> ]	Modul o Elastico [kN/m <sup>2</sup> ]	Modul o Edome trico [kN/m <sup>2</sup> ]	Poisson	Coeff. consoli daz. primari a [cmq/s ]	Coeff. consoli dazion e second aria	Descriz ione
2.3	15.69	19.61	21.6	20.0	0.0	422022 .0	0.0	0.33	0.0	0.0	S1
6.4	16.67	17.65	25.45	27.0	0.0	657002 .0	0.0	0.33	0.0	0.0	S2
18.1	17.65	18.63	29.0	1699.0	0.0	190000 7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S3

30.0	19.61	20.59	32.0	3528.0	0.0	533502 0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	S4
------	-------	-------	------	--------	-----	---------------	-----	-----	-----	-----	----

## Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazioni	Pressione normale di progetto [kN/m <sup>2</sup> ]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A2+M2+R2	92.00	7079.00	16545.64	147900.00	1317.34	0.00	Progetto
2	Sisma	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	92.00	7079.00	16545.64	147900.00	1317.34	0.00	Servizio
4	A(1)+M(2)+R(2)	92.00	7079.00	16545.64	147900.00	1317.34	0.00	Progetto

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

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

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

Autore: Brinch - Hansen 1970

Carico limite [Qult]	180.1	kN/m <sup>2</sup>
Resistenza di progetto [Rd]	100.05	kN/m <sup>2</sup>
Tensione [Ed]	92.0	kN/m <sup>2</sup>
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	1.96	
<b>Condizione di verifica [Ed&lt;=Rd]</b>		<b>Verificata</b>

## COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

Costante di Winkler 7203.85 kN/m<sup>3</sup>

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

Adesione terreno fondazione	19.9	kN/m <sup>2</sup>
Angolo di attrito terreno fondazione	0	°
Frazione spinta passiva	0	%
Resistenza di progetto	10109.84	kN
Sollecitazione di progetto	1317.34	kN

Condizione di verifica [Ed&lt;=Rd] Verificata

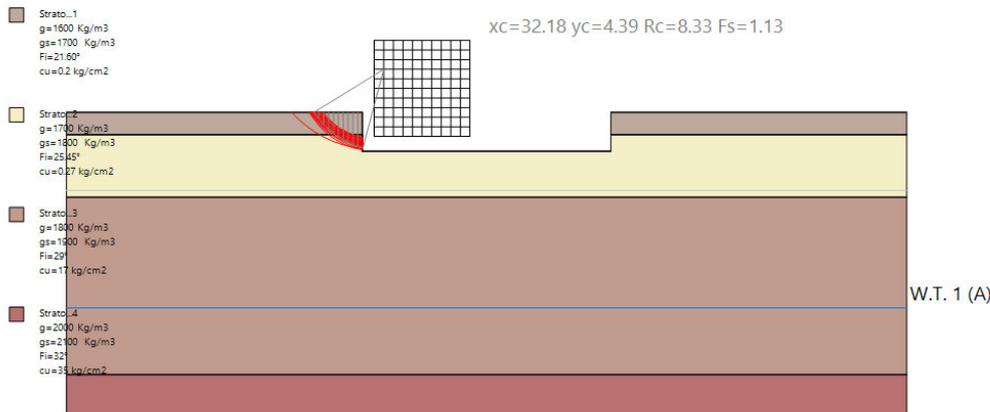
## CEDIMENTI ELASTICI

Pressione normale di progetto	92.0	kN/m <sup>2</sup>
Spessore strato	5.0	m

Profondità substrato roccioso	5.0	m
Modulo Elastico	2108000.0	kN/m <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0.33	
=====		
Coefficiente di influenza I1	0.02	
Coefficiente di influenza I2	0.06	
Coefficiente di influenza Is	0.05	
=====		
Cedimento al centro della fondazione	0.02	mm
=====		
Coefficiente di influenza I1	0.01	
Coefficiente di influenza I2	0.04	
Coefficiente di influenza Is	0.02	
Cedimento al bordo	0.0	mm

## 15. 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 03.



In generale si hanno da localmente scarse a 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. L'analisi restituisce infatti la probabilità che si verifichi franamento in corrispondenza dell'interfaccia tra primo e secondo orizzonte.

Di conseguenza, 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.

## 16. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio ha evidenziato che le aree direttamente interessate dallo sviluppo degli aerogeneratori sono delle superfici pianeggianti e subpianeggianti, in cui affiorano le rocce paleozoiche arenacee e pelitiche, interessate da metamorfismo di basso grado che ne ha modificato l'assetto strutturale e successivamente fratturate, localmente ricoperte da un debole strato pedogenizzato.

L'areale su cui andrà posizionata la sottostazione in progetto è caratterizzato da depositi alluvionali antichi affioranti in prevalenza fin dal piano campagna; dove si ha la presenza di suolo, esso si sviluppa essenzialmente lungo il substrato di alterazione della roccia madre, con spessori esigui. Non sono previste fondazioni profonde pertanto non si rilevano particolari criticità salvo il controllo del deflusso delle acque superficiali essendo posizionata alle pendici di un versante.

Lo studio condotto di cui alla presente, ha permesso di:

- Identificare **n.03 modelli geotecnici rappresentativi** dei siti di imposta degli aerogeneratori;
- Ricavare i **parametri geotecnici** delle formazioni interessate;
- Valutare con buona approssimazione la circolazione idrica sotterranea nel volume significativo di terreno;
- Valutare preliminarmente la capacità portante dei terreni interessati e i cedimenti;
- Valutare qualitativamente la capacità di autosostegno delle pareti di scavo delle fondazioni.

In fase esecutiva sarà opportuno prevedere una campagna di indagini dirette mediante la realizzazione di sondaggi geognostici a carotaggio continuo, prove in sito e in laboratorio finalizzate alla determinazione diretta dei parametri geotecnici della formazione, alle varie profondità interessate dagli sforzi indotti dalle opere previste.

In particolare, dallo studio è emerso quanto segue:

- nell'ambito dell'area esaminata non sono stati rilevati movimenti gravitativi importanti che possano coinvolgere estese porzioni di territorio; localmente sono stati rilevati processi legati alla dinamica dei versanti, nei settori più acclivi, con fenomeni gravitativi e smottamenti interessanti le coperture detritiche di modesto spessore.
- la localizzazione degli aerogeneratori e della sottostazione in progetto non interferiscono con processi geomorfologici connessi alle dinamiche fluviali e di versante, l'area indagata non evidenzia segni di dissesto profondo tanto che nel suo insieme può essere considerata stabile.
- la tipologia di intervento in progetto, non invasiva, non comporta alterazioni nell'attuale assetto idrologico del territorio, tuttavia dovrà essere curato il drenaggio delle acque superficiali, in particolare nelle piste e nelle strade di accesso, per scongiurare i fenomeni di erosione;
- il progetto non prevede modificazioni morfologiche significative rispetto all'assetto attuale, anche l'apertura della viabilità di servizio non comporta modifiche profonde allo stato dei luoghi in quanto segue per buona parte, ridefinendola e adattandola, la viabilità esistente.

Allegato 1 – Relazione di calcolo