

PARCO EOLICO "KERSONESUS"

COMUNE DI TEULADA

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

ELABORAZIONI SIA

Relazione geotecnica

Codice elaborato:

TL_SIA_A011

Data: Marzo 2023

Il committente: Sardeolica s.r.l.

Coordinamento: FAD SYSTEM SRL - Società di ingegneria

Dott. Ing. Ivano Distinto

Dott. Ing. Carlo Foddis

Elaborazione SIA:

BIA s.r.l.

Società di ingegneria

Elaborato a cura di:

Dott.ssa geol. Cosima Atzori

rev.	data	descrizione revisione	rev.	data	descrizione revisione
00	16/03/2023	Emissione per procedura VIA			

SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
1. PREMESSA	5
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
3. STUDI ED INDAGINI DI RIFERIMENTO	6
4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE.....	6
5. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA	12
6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO	15
6.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento	15
6.2. Successione pre-Ordoviciano medio della Zona esterna	16
6.2.1. Micascisti ad andalusite ("Scisti di M.Settibalas" Auct.)	16
6.2.2. Formazione di Bithia	17
6.2.3. Formazione di Nebida	17
6.2.4. Formazione di gonnese	19
6.2.5. Formazione di Cabitza.....	20
6.3. Complesso plutonico del Carbonifero superiore-Permiano	22
6.3.1. Leucograniti equigranulari e leucograniti a granato	22
6.4. Corteo filoniano.....	22
6.5. Depositi Quaternari dell'area continentale.....	23
7. ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO	27
8. INDAGINI GEOGNOSTICHE.....	28
15.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione	30
10.1.1. Caratteristiche delle stese sismiche	31
10.1.2. Caratteristiche della Strumentazione impiegata.....	31
10.1.3. Elaborazione dei dati.....	31
10.2. Indagini sismiche: MASW	32
10.2.1. Specifiche delle indagini svolte	33
10.2.2. Caratteristiche della strumentazione impiegata	34

10.2.1.	Elaborazione dei dati.....	34
10.2.2.	Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018)	34
10.3.	15.4. Risultati delle indagini del sito TL_SISM_01-TURBINA TL02.....	37
10.3.1.	M1-TL_SISM_01-TL02: MASW.....	37
10.3.2.	R1-TL_SISM_01-TL02: Sismica a rifrazione in onde P	38
10.4.	RISULTATI DELLE INDAGINI SITO TL_SISM_02-TURBINA TL05.....	40
10.4.1.	M2- TL_SISM_02-TL05: MASW	40
10.4.2.	R2-TL_SISM_02-TL05: Sismica a rifrazione in onde P	41
10.5.	15.6. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_03-TURBINA TL07	43
10.5.1.	M3-TL_SISM_03-TL07: MASW.....	43
10.5.2.	R3-TL_SISM_03-TL07: Sismica a rifrazione in onde P	44
10.6.	Indicazioni per la determinazioni dei parametri geomeccanici	45
9.	MODELLAZIONE GEOLOGICA.....	48
16.1	Caratterizzazione geostrutturale degli ammassi rocciosi.....	48
11.2.	Modello Geologico di sito.....	54
11.2.1.	Modello Geologico 01 – TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08	55
11.2.2.	Modello Geologico 02 –TL_07.....	57
10.	DESCRIZIONE DELL'OPERA DI FONDAZIONE DEGLI AEROGENERATORI.....	59
11.	AZIONI E RESISTENZE NELLE VERIFICHE AGLI STATI LIMITE.....	60
12.	VERIFICHE DI SICUREZZA (§C6.4.2)	61
11.3.	Verifiche di sicurezza agli SLU di tipo geotecnico (GEO) (§C6.4.2.1)	61
11.4.	Verifiche di esercizio (SLE) (§C6.4.2.2)	63
13.	CONDIZIONI DI CARICO DELLE FONDAZIONI DEGLI AEROGENERATORI.....	63
11.5.	CARICHI PERMANENTI	63
14.	MODELLI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE.....	65
14.1.	Modello Geotecnico 01 - TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08	65
14.1.	Modello Geotecnico 02 - TL_07	68

15. FRONTI DI SCAVO (§C6.8.6)	70
-------------------------------------	----

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Localizzazione del progetto	7
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.....	8
Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000	9
Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Nord	10
Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Sud	11
Figura 7 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 6,2MW	13
Figura 8 Schema tettonico-strutturale della Sardegna.....	16
Figura 9 Affioramento roccioso del Membro di Mattoppa (NEB1) a SE della TL_02.....	18
Figura 10 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnese. GNN2	19
Figura 11 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnese.....	20
Figura 12 Affioramento degli Scisti di Cabitza.	21
Figura 13 Leucograniti dell'unita Intrusiva di Villacidro.....	22
Figura 14 Affioramento di porfidi granitici nei pressi della TL_07	23
Figura 15 Depositi di versante, alla base granitoida alterato (VLD).....	24
Figura 16 Coltri eluvio-colluviali, alla base Membro di Mattoppa (NEB)	25
Figura 17 Stralcio carta geologica (Fonte RAS).....	26
Figura 18 tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione	27
Figura 19 A sinistra Scivolamento di un cuneo su taglio stradale, a destra scarpata dissestata su probabile vecchia cava....	28
Figura 20 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m	31
Figura 21 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	38
Figura 22 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	41
Figura 23 Base Sismica RM-1 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E	42
Figura 24 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche	44
Figura 25 Base Sismica RM-2 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E	45
Figura 26 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia.....	49
Figura 27 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso	49
Figura 28 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia	50
Figura 29 Correlazione fra valori di mi, s, indice RMR, ed il tipo di roccia.....	51
Figura 30 Schema generale della fondazione	59

1. PREMESSA

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

- 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 **08/11/2022** nella zona di interesse.

4. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE

Teulada è un comune del basso Sulcis che si affaccia nella costa più a Sud dell'Isola, comprende per esempio le cale di *capo Malfatano*, sovrastato da una torre spagnola e con uno stagno alle spalle, e *Cala Zafferano*, mentre a nord-ovest si trova la spiaggia *Is Arenas Biancas*, parte meridionale della località *Porto Pino* (per buona parte in territorio di Sant'Anna Arresi), le cui dune sono accessibili da una strada dentro il poligono militare. Alle spalle della costa, situato sul fondo di una valle tra i rilievi coperti da foreste di lecci e sughere si trova il centro abitato.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: **565 sez. III** "Santadi"; **573 sez. IV** "Teulada"

Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Foglio: **565130** "Is Carillus"; **565140** "Punta Sebera"; **573010** "Case Culurgioni"; **573020** "Teulada".



Figura 1 Localizzazione del progetto



Figura 2 Panoramica dal lato occidentale dell'area di studio

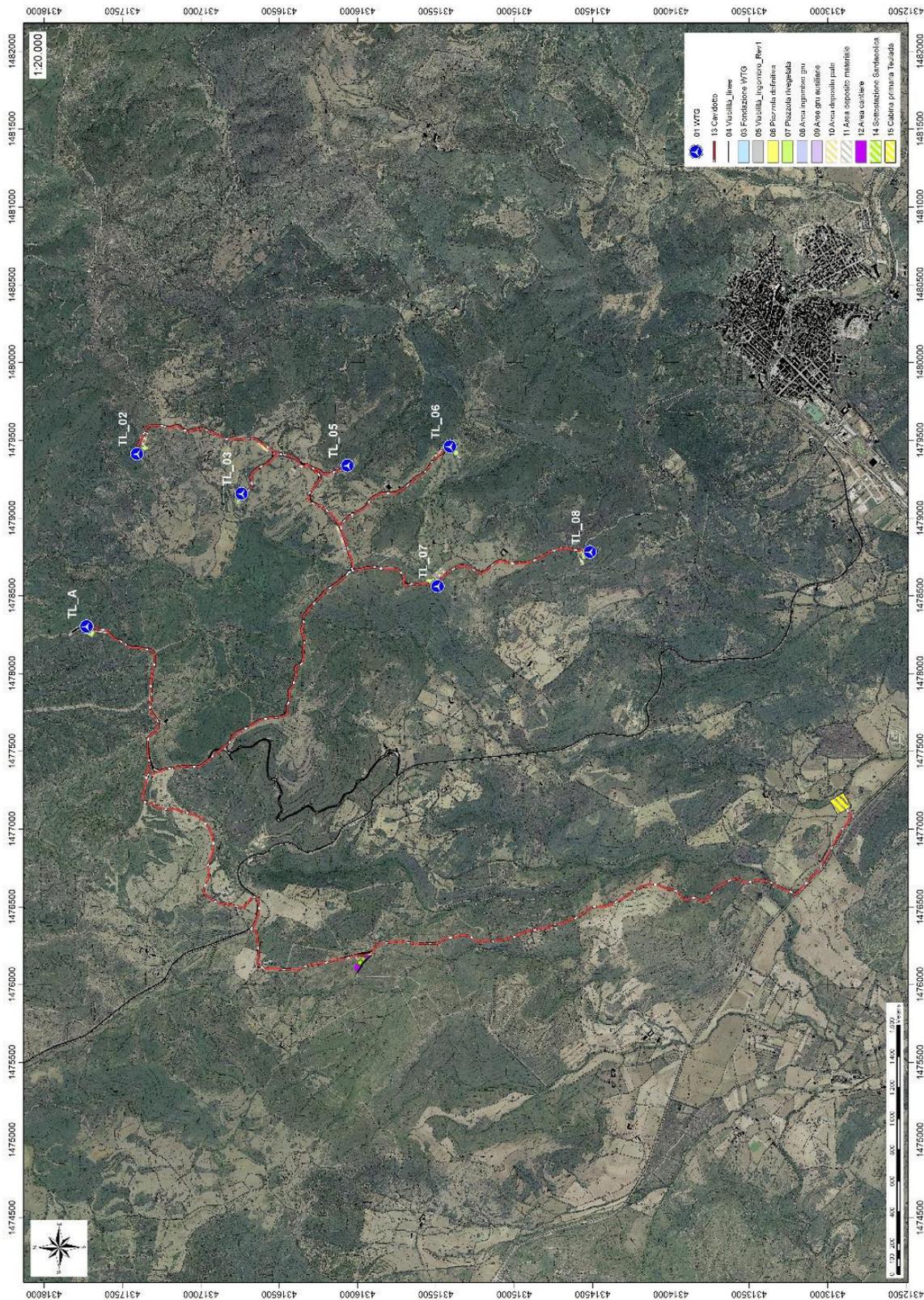


Figura 3 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.

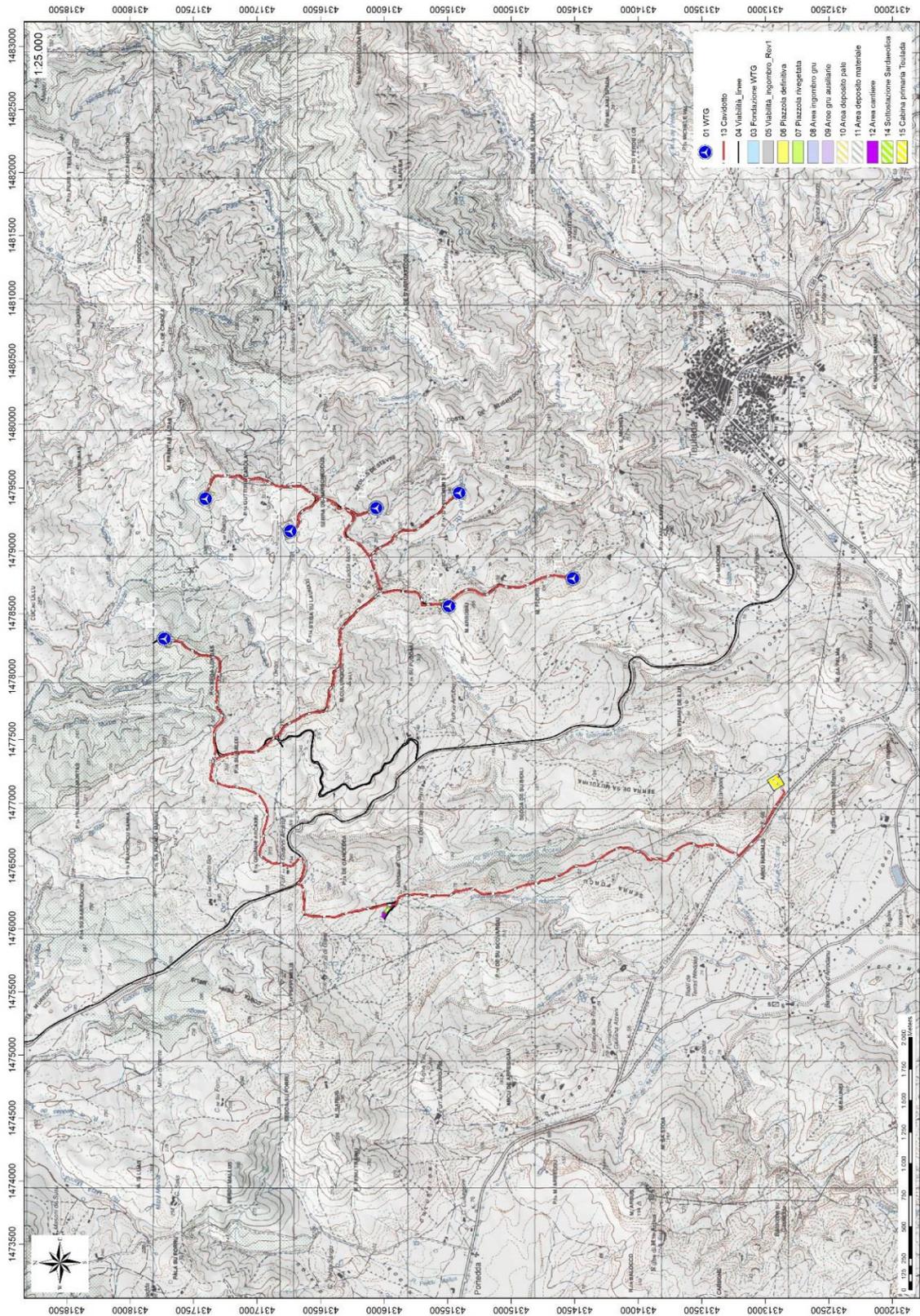


Figura 4 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

Dott.ssa Geol.

COSIMA ATZORI

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA
Sezione A n°656



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

info@gaiaconsulting.eu
posta-certificata@pec.gaiacconsulting.eu

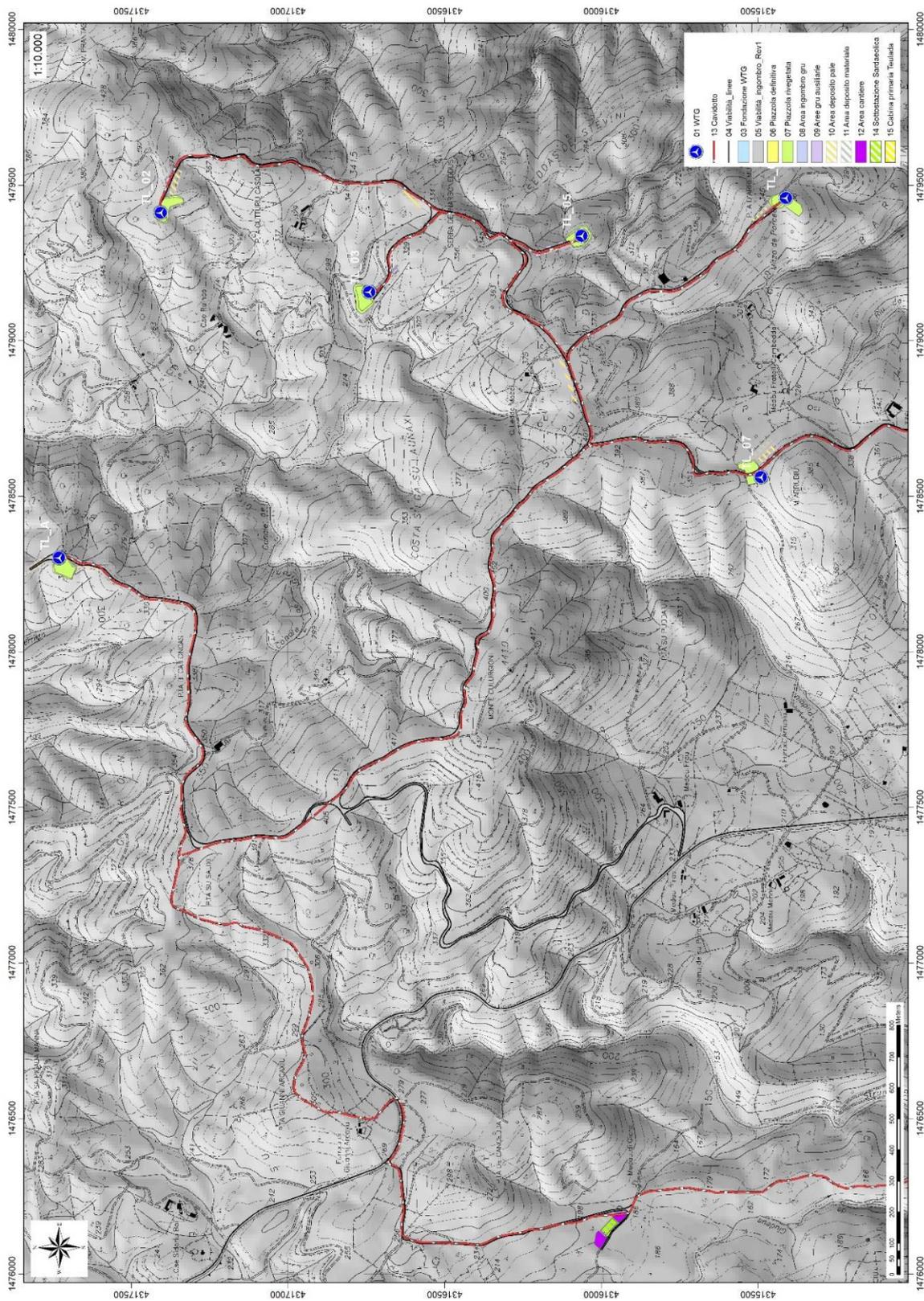


Figura 5 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Nord

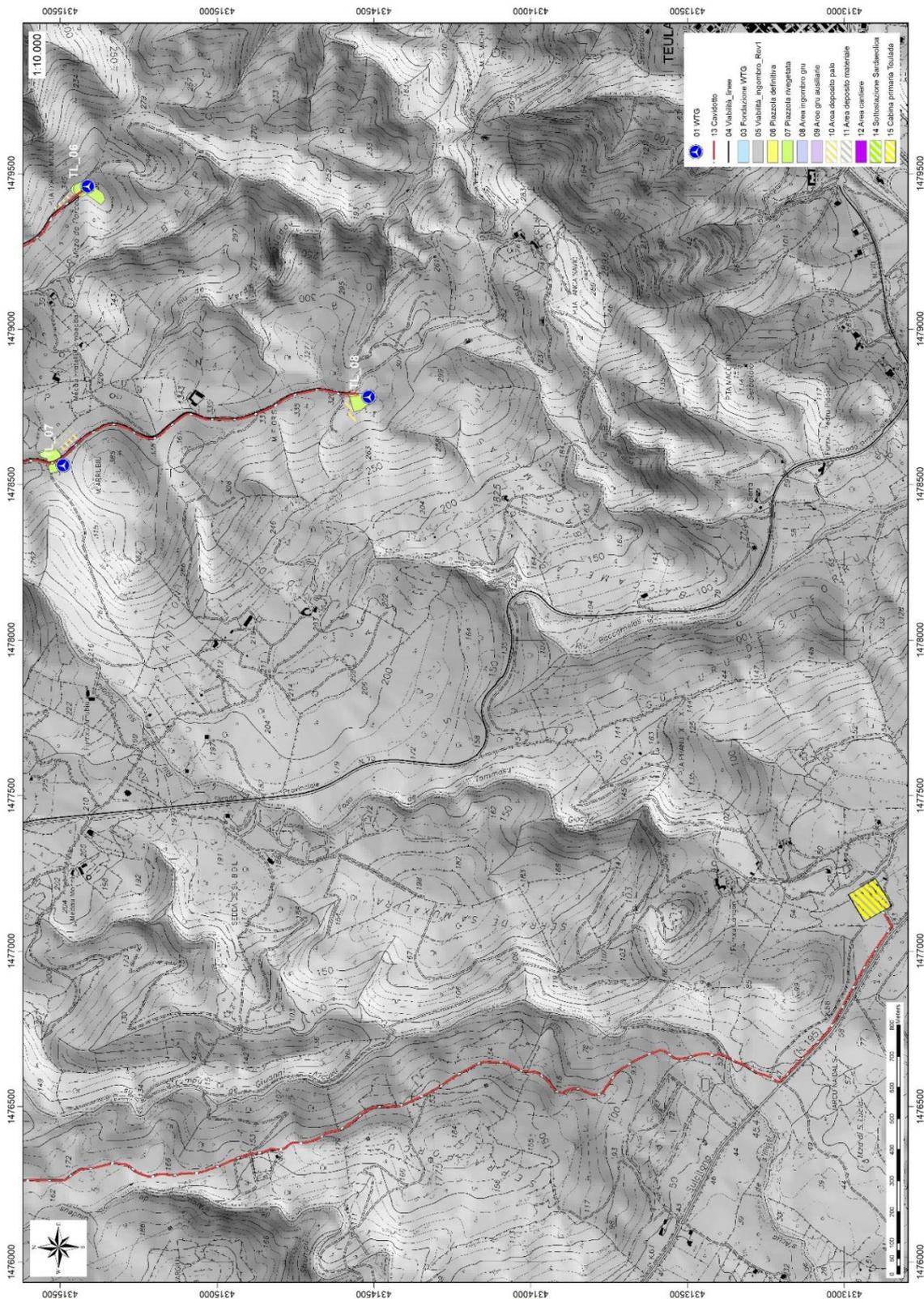


Figura 6 Inquadratura topografica su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Sud

5. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA

L'impianto costituito dai 7 aerogeneratori funzionerà in parallelo con attraverso una rete a 30 kV realizzata con cavo interrato, alla sottostazione 30/150 kW An=60 MVA sita nel territorio comunale di Teulada e poi immessa sulla rete a 150 kV del Gestore Della Rete mediante la Cabina Primaria di proprietà di e-distribuzione denominata Teulada. La sottostazione produttore verrà connessa ad uno stallo (di nuova realizzazione) nella Cabina Primaria esistente, attraverso un collegamento in antenna con cavo interrato AT con tensione nominale 150 kV di lunghezza di circa 3,7 km.

COORDINATE AEROGENERATORI IN PROGETTO

WTG	Italy GAUSS-BOAGA		Geografiche WGS84		QUOTA base torre m s.l.m.	ALTEZZA HUB torre m
	EST	NORD	EST	NORD		
TL_02	1479411,8019	4317406,7489	8°45'42.98"	39° 0'19.36"	364,50	125
TL_03	1479156,3318	4316740,7624	8°45'32.43"	38°59'57.73"	308,50	125
TL_05	1479336,719	4316063,8585	8°45'40.01"	38°59'35.79"	327,00	125
TL_06	1479459,1141	4315411,7354	8°45'45.16"	38°59'14.65"	335,60	125
TL_07	1478560,9985	4315490,7254	8°45'7.83"	38°59'17.13"	344,50	125
TL_08	1478781,5063	4314516,1509	8°45'17.10"	38°58'45.53"	322,50	125
TL_A	1478302,5314	4317730,8268	8°44'56.82"	39° 0'29.78"	300,00	125

Gli aerogeneratori individuati per la realizzazione del parco eolico hanno potenza nominale di 6200 kW e sono posti in cima a torri tronco coniche in acciaio con un'altezza massima fuori terra, misurata al mozzo, di 125 m; il generatore è azionato da elica tripala con diametro di 162 m (vedi tav. TL_PC_T009).

L'aerogeneratore è essenzialmente costituito da:

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

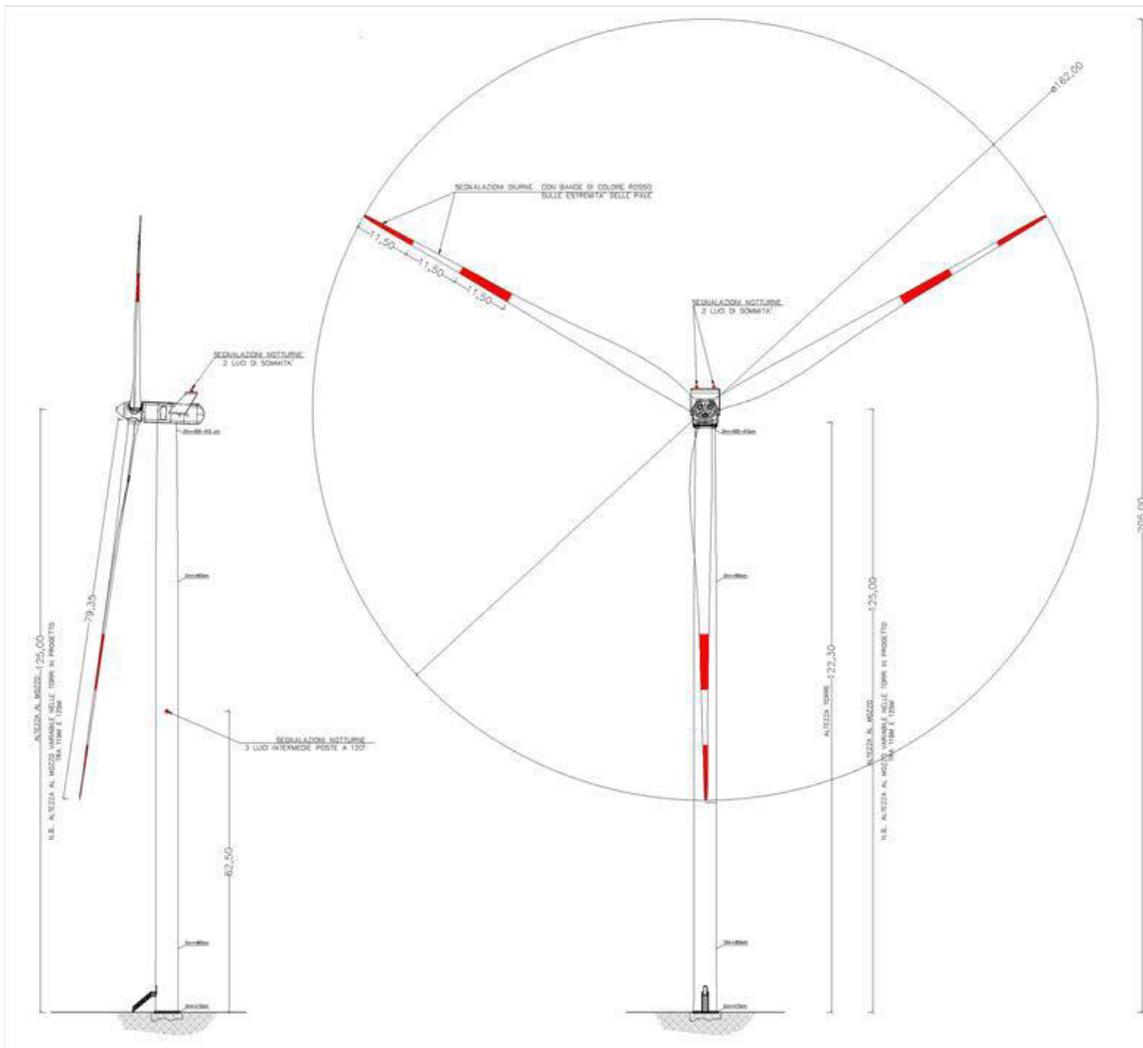


Figura 7 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 6,2MW

DATI TIPOLOGICI E DIMENSIONALI AEROGENERATORI	
NUMERO TOTALE AEROGENERATORI IN PROGETTO	7
POTENZA GENERATORE	6200 KW
ALTEZZA MASSIMA HUB	125 m
DIAMETRO ROTORE	162 m
ALTEZZA MASSIMA RAGGIUNGIBILE	206 m
AREA SPAZZATA DAL ROTORE	20611 mq
NUMERO PALE	3
LUNGHEZZA PALE	79,35 m

Dati tecnici:

Dott.ssa Geol.

COSIMA ATZORI

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA
Sezione A n°656



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

info@gaiac consulting.eu
posta-certificata@pec.gaiac consulting.eu

- Potenza nominale: 6200 kW e tensione nominale di 800 volt;
- Potenza unitaria generatore: 6250 kW;
- Frequenza: 0 – 138 Hz;
- Numero pale: 3;
- Lunghezza pale: 79,35 m;
- Raggio del rotore: 81 m;
- Area spazzata: 20612 m²;
- Tipo di sostegno: tubolare metallico;
- Altezza da terra del rotore: max 125 m;
- Fondazioni: piastra in C.A. dimensioni di circa 30 m di diametro; completamente interrata ad una profondità massima di 4,11 m;
- Piazzola di servizio: circa 3200 m² (variabile da 3241 a 4056 m²);
- Superficie impronta fondazione 706,90 m²;
- Ingombro scavo fondazione: circa 1075,00 m².

La sottostazione elettrica produttore in progetto si colloca ad una quota di 190m s.l.m, il piazzale ospitante la sottostazione elettrica produttore avrà una superficie sistemata in piano di 1715 mq, oltre ad un'area d'accesso pavimentata di 170 mq, l'area della sottostazione delimitata da apposita perimetrazione avrà una superficie di 1280 mq.

Per il collegamento di tutti i 7 aerogeneratori e per la connessione alla sottostazione sarà necessario realizzare circa 18.946 m di elettrodotti interrati. I cavi per tutto il tracciato seguiranno la viabilità esistente e di progetto.

Per ulteriori specifiche si rimanda agli elaborati tecnici di progetto.

6. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

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

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

6.1. DESCRIZIONE DEL CONTESTO GEOLOGICO DELL'AREA VASTA OGGETTO DI INTERVENTO

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

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

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

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

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

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

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

L'area di studio ricade nel **Complesso metamorfico ercinico in facies degli scisti verdi e anchimetamorfico, nella Successione pre-Ordoviciano medio della Zona esterna.**

Questa successione testimonia il passaggio da una piattaforma terrigena cambriana inferiore (Formazione di Bithia, Formazione di Nebida con intercalazioni di vulcaniti basiche e intermedie probabilmente legate ad una concomitante fase di *rifting*, ad un ambiente lagunare con barre oolitiche (tetto della Formazione di Nebida).

I sedimenti prevalentemente terrigeni della Formazione di Nebida sono seguiti verso l'alto dalla potente successione carbonatica della Formazione di Gonnese, costituita da dolomie e calcari di piana tidale, frammentata a più riprese in bacini e zone di alto strutturale in seguito a fasi tettoniche distensive. Si passa quindi alla Formazione di Cabitza, che marca l'annegamento della piattaforma carbonatica.

Nella zona di Capo Spartivento affiorano dei micascisti ad andalusite ("Scisti di M. Settiballas" Auct.), i cui rapporti originari con la precedente successione rimangono incerti e che sono stati dubitativamente attribuiti al Precambriano.

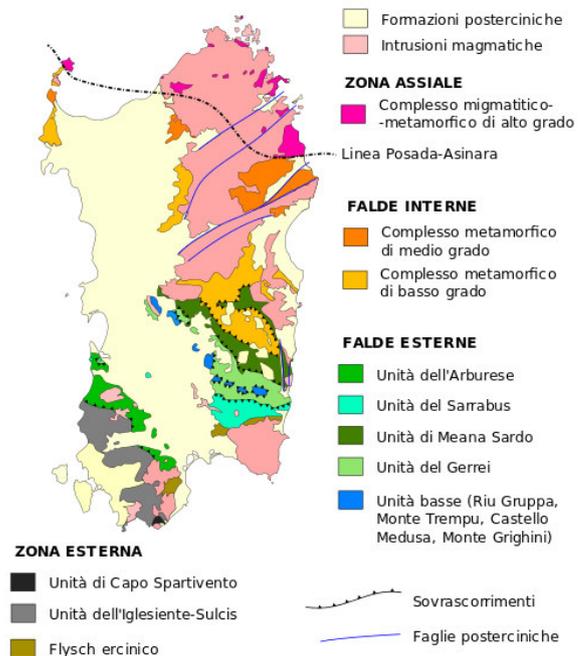


Figura 8 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

6.2. SUCCESSIONE PRE-ORDOVICIANO MEDIO DELLA ZONA ESTERNA

6.2.1. MICASCISTI AD ANDALUSITE ("SCISTI DI M. SETTIBALLAS" AUCT.)

Si tratta di micascisti gneissici, caratterizzati da uno sviluppato layering composizionale definito dall'alternanza di livelli millimetrici granoblastici e lepidoblastici, che costituiscono alcuni affioramenti di limitata estensione presso Capo Spartivento. Gli effetti della ricristallizzazione metamorfica sono intensi e denotano un'evoluzione metamorfica polifasica. Si distinguono infatti almeno due eventi metamorfici: uno più antico, di medio grado e di alto gradiente termico, testimoniato da relitti deformati di andalusite, muscovite, biotite, granato e cordierite, ed uno più recente, relativo allo sviluppo della foliazione principale, che comporta la blastesi di biotite e muscovite. Sia l'età che i

rapporti con il resto della successione cambriana sono incerti. Questi micascisti sono intrusi dai granitoidi ordoviciani; essi vengono considerati come i termini più antichi della successione e riferiti da alcuni Autori al Precambriano.

6.2.2. FORMAZIONE DI BITHIA

La Formazione di Bithia affiora esclusivamente in quest'area dell'Isola, lungo una stretta fascia attorno agli Ortogneiss di Capo Spartivento. Lo spessore reale non è valutabile a causa dell'intensa tettonizzazione, mentre lo spessore apparente supera i 600 m. Si tratta di una successione silicoclastica, prevalentemente costituita da filladi, metaquarzoareniti e metarenarie quarzitiche, a cui si intercalano metagrovacche, metaconglomerati e marmi. Sono inoltre presenti intercalazioni di metavulcaniti basiche e intermedie attribuite ad una fase di rifting precambriana.

I metaconglomerati affiorano in diverse località, ma sempre con spessori modesti (fino a qualche metro). Si tratta di originari conglomerati poligenici poco selezionati. I clasti, molto deformati e immersi in una matrice arenitica quarzoso-feldspatica, sono principalmente costituiti da frammenti di quarziti sia grigie che nere (liditi), da quarzo di vena, e in subordine da elementi di originarie rocce vulcaniche e carbonatiche. I marmi affiorano in livelli che possono arrivare a 15-20 m di spessore; hanno colore grigio chiaro, contengono intercalazioni di calcescisti e sono spesso affetti da una intensa dolomitizzazione secondaria. La parte alta della successione è caratterizzata da metapeliti alternate a metarenarie quarzose, talora con stratificazione incrociata. La Formazione di Bithia viene interpretata come una successione terrigena, con tendenza regressiva, evolutasi su un margine. La Formazione di Bithia poggia sull'Ortogneiss di Capo Spartivento con contatto tettonico. I due complessi hanno, infatti, un diverso grado metamorfico: la deformazione del granitoide ordoviciano è avvenuta in condizioni anfibolitiche, mentre il metamorfismo principale della Formazione di Bithia si è sviluppato a temperature relativamente basse ed è associato ad un'intensa deformazione cataclastico-milonitica. La natura e la posizione del contatto della Formazione di Bithia con la sovrastante Formazione di Nebida è incerto. Sia per la sua posizione stratigrafica sottostante alla Formazione infracambriana di Nebida, sia per correlazioni con formazioni precambriane europee, la Formazione di Bithia è stata riferita al Precambriano superiore.

6.2.3. FORMAZIONE DI NEBIDA

Questa formazione è in prevalenza costituita da sedimenti terrigeni affetti da metamorfismo ercinico di grado molto basso ed affiora estesamente in tutto l'Iglesiente-Sulcis. Nell'Iglesiente e nel Sulcis settentrionale costituisce il termine più antico della successione affiorante, mentre nel Sulcis meridionale essa sormonta la Formazione di Bithia. La Formazione di Nebida è tradizionalmente suddivisa in due membri che sono, dal basso verso l'alto, il Membro di Matoppa ed il Membro di P.ta

Manna. Il Membro di Matoppa è costituito da originarie siltiti grigio chiare con intercalazioni di arenarie, arenarie quarzose, quarzo-areniti ed arcosi a grana fine, in livelli di alcuni dm (1 m al massimo) di spessore. Verso l'alto il grado di maturità diminuisce progressivamente, le diffuse intercalazioni arenitiche divengono più frequenti e di maggiore potenza, fino a passare a metarenarie quarzoso-micacee grigie, rossastre e verdi a grana grossa, alternate a metaquarzoareniti micacee e subordinati livelli di metasiltiti; la successione termina con metarenarie quarzoso-feldspatiche alternate a metarenarie quarzoso-micacee e metagrovacche con matrice carbonatica. In bibliografia sono state descritte numerose strutture sedimentarie, come stratificazioni e laminazioni parallele ed incrociate, gradazioni, bioturbazioni, *ripple mark*, *slumping*. Direttamente sui depositi terrigeni e solo localmente sulle lenti calcaree si rinviene, seppure in modo discontinuo, un caratteristico orizzonte di calcari oolitici che costituisce la base del Membro di P.ta Manna.



Figura 9 Affioramento roccioso del Membro di Matoppa (NEB1) a SE della TL_02

Il Membro di P.ta Manna è costituito da un'alternanza ritmica di metareniti, metasiltiti e metargilliti a cemento carbonatico e di metacalcari. Nelle metareniti sono diffuse strutture sedimentarie quali stratificazione incrociata, *ripple mark* asimmetrici e bioturbazioni. I livelli carbonatici sono costituiti da metacalcari grigi biocostruiti, metacalcari oolitici e oncolitici, metacalcari nodulari variegati, metacalcari neri a ooidi e metacalcari grigi a incrociata. Nella parte alta della successione le intercalazioni carbonatiche divengono prevalentemente dolomitiche, con strutture da disseccamento (*mudcrack*) e tappeti algali (stromatoliti) che preannunciano i caratteri della sovrastante Dolomia rigata. Verso la sommità del Membro di P.ta Manna aumentano le

intercalazioni carbonatiche e sono costituite generalmente da metadolomie, mentre i livelli silicoclastici sono principalmente costituiti da metargilliti e quarziti.

6.2.4. FORMAZIONE DI GONNESA



Figura 10 Membro del Calcare Ceroide,
Formazione di Gonnese. GNN2

La fine della deposizione silicoclastica e l'inizio di quella prevalentemente carbonatica marca il passaggio dalla Formazione di Nebida alla Formazione di Gonnese. Lo spessore della Formazione di Gonnese è estremamente variabile: da 180 a 480 m. La Dolomia rigata è costituita da metadolomie primarie e metacalcri ben stratificati, caratterizzati da ripetizioni cicliche di facies costituite da originari:

a) fanghi carbonatici stratificati; b) stromatoliti laminati; c) stromatoliti laminati con pseudomorfi di gesso o anidride; d) pisoliti vadose e/o brecce da disseccamento; localmente sono presenti livelli oolitici o a pellets, anche silicizzati, e noduli di selce. L'ambiente di deposizione della Dolomia rigata corrisponde ad una piana di marea che si instaura su una morfologia piana o poco accidentata, in condizioni di clima caldo e arido. La distribuzione delle litofacies testimonia un graduale approfondimento del bacino di sedimentazione da N verso S. La parte del bacino nell'area di studio della Dolomia rigata si trovava

infatti in condizioni prevalentemente subtidali, come suggerito dalla sostituzione della dolomia con calcari algali laminati.

Il Calcare ceroide è costituito da metacalcri massicci di colore grigio, generalmente mal stratificati. Presenta quattro facies fondamentali: a) mudstone-wackestone con bioclasti; b) grainstone con ooliti e/o oncoliti, echinodermi e resti di trilobiti; c) boundstone criptoalgali, localmente boundstone scheletoalgali con archeociati; d) pisoliti vadose. Tali facies indicano ambienti che variano da supratidale a subtidale. La loro distribuzione rivela una morfologia a piattaforme e bacini connessa con una tettonica distensiva sin-sedimentaria. Il Calcare ceroide è ritenuto paleontologicamente pressoché sterile; i rari resti fossili rinvenuti sono placche di echinodermi e frammenti di trilobiti. L'interruzione degli apporti terrigeni da E avrebbe determinato il prevalere della sedimentazione

carbonatica. La presenza di archeociati nella parte alta della Dolomia rigata e del Calcarea ceroide permette di riferire l'intera Formazione di Gonnese al Cambriano inferiore.



Figura 11 Membro del Calcarea Ceroide, Formazione di Gonnese.

6.2.5. FORMAZIONE DI CABITZA

Questa formazione affiora nell'Iglesiente-Sulcis ed è stata suddivisa in due membri che dal basso sono: a) Calcarea nodulare; b) Scisti di Cabitza. Nella recente proposta di questa formazione è stata poi denominata dal Prof. paleontologo Pillola "Gruppo di Iglesias", a sua volta suddiviso in Formazione di Campo Pisano e Formazione di Cabitza. Il Membro del Calcarea nodulare poggia con contatto netto sul Calcarea ceroide, localmente tramite una breccia ad elementi di Calcarea ceroide o depositi argillitici vari. È costituito da una fitta alternanza di sottili livelli di metargilliti più o meno siltosi rossi e verdi, più raramente neri, metacalcarei grigi e rosati con struttura nodulare e marne giallastre. Gandin all'interno di questo membro distingue tre litofacies: a) metacalcarei massivi, ben stratificati con porzioni a lamine (prevalentemente *wackestone-packstone*); b) metacalcarei nodulari più o meno marnosi e ricchi di resti fossili; c) alternanze di metacalcarei ed originarie marne.

I metacalcarei nodulari sono il litotipo più rappresentato e contengono abbondanti resti di echinodermi, trilobiti, *Chancelloria*, brachiopodi, spicole di spugne e hyolithidi. L'associazione di trilobiti indica la parte bassa del Cambriano medio. L'ambiente di deposizione del Calcarea nodulare corrisponde ad un mare epicontinentale poco profondo e poco ossigenato, con apporti ritmici di materiale terrigeno fine. Questo tipo di sedimentazione testimonia l'inizio dell'annegamento della piattaforma carbonatica in conseguenza dell'attività tettonica distensiva all'inizio del Cambriano medio. Lo spessore di questo membro è variabile, da 20 a 60. Verso l'alto il Calcarea nodulare passa agli Scisti di Cabitza. Si tratta di una caratteristica successione formata da ritmiche alternanze

centimetriche e millimetriche di metargilliti e metasiltiti varicolori, raramente carbonatiche, con subordinati livelli di metarenarie, generalmente fini; la parte sommitale è localmente costituita da metarenarie fini e quarziti con frequenti laminazioni incrociate. Gli Scisti di Cabitza sono ricoperti in discordanza dai sedimenti clastici ordoviciani ("Puddinga" *Auct.*) che marcano la cosiddetta *Discordanza Sarda*. Il loro limite superiore è quindi erosivo. Gli Scisti di Cabitza sono stati suddivisi da Gandin e Pillola (1985) in due intervalli: a) un intervallo inferiore, costituito principalmente da metasiltiti, metargilliti e metarenarie a grana fine, con strutture sedimentarie tipo laminazioni parallele e convolute, *ripple mark*, *flute cast* e piste riferibili a *Cruziana*, *Planolites* e *Helmitopsis*. Raramente, verso la base del membro affiorano lenti di metacalcari di colore vinaccia o verdolini; b) un intervallo superiore, costituito da originarie laminiti argilloso siltose con intercalazioni di quarzo-areniti micacee e metareniti. I caratteri sedimentologici dei due intervalli segnano un'evoluzione dell'ambiente da neritico a pelagico non molto profondo, con la deposizione del Calcarea nodulare si ha la frammentazione e l'annegamento della piattaforma carbonatica, a cui segue la deposizione degli Scisti di Cabitza, che segnano la fine della sedimentazione carbonatica e l'instaurarsi di una sedimentazione terrigena pelagica più profonda.



Figura 12 Affioramento degli Scisti di Cabitza.

Nella parte bassa della successione sono da tempo noti fossili del Cambriano medio: trilobiti, rari brachiopodi, carpoidi sia interi che in placche. Il rinvenimento di resti fossili nella parte medio-alta della formazione ha permesso di documentare con trilobiti il Cambriano superiore e l'Ordoviciano inferiore. Questa datazione è di particolare importanza poiché consente di precisare meglio l'età della *Discordanza sarda* dell'Iglesiente, che risulta così compresa tra l'Ordoviciano inferiore e l'Ordoviciano superiore (età dei primi livelli paleontologicamente datati trasgressivi sui depositi

continentali della "Puddinga" *Auct.*) e di correlarla con la Discordanza sarrabese della Sardegna sud-orientale.

6.3. COMPLESSO PLUTONICO DEL CARBONIFERO SUPERIORE-PERMIANO

6.3.1. LEUCOGRANITI EQUIGRANULARI E LEUCOGRANITI A GRANATO

I leucograniti affiorano diffusamente in tutti i settori del basamento sardo. Si contraddistinguono per l'omogeneità compositiva e per le tessiture debolmente orientate o quasi isotrope. Il trend generale delle intrusioni è generalmente discordante rispetto a quello delle rocce incassanti e a quello delle intrusioni precedenti. La direzione dominante varia da N-S a NE-SW. Le età radiometriche disponibili variano da 289 ± 1 Ma a 274 ± 9 Ma. Si tratta di granitoidi a tendenza leucocrata inequigranulare, a cui il quarzo globulare conferisce un aspetto tendenzialmente porfirico. Nella massa di fondo microcristallina spiccano inoltre fenocristalli subedrali di K-feldspato. La biotite cristallizzata in individui isolati di taglia attorno a 3 mm è in proporzioni modali non superiori a 5%.

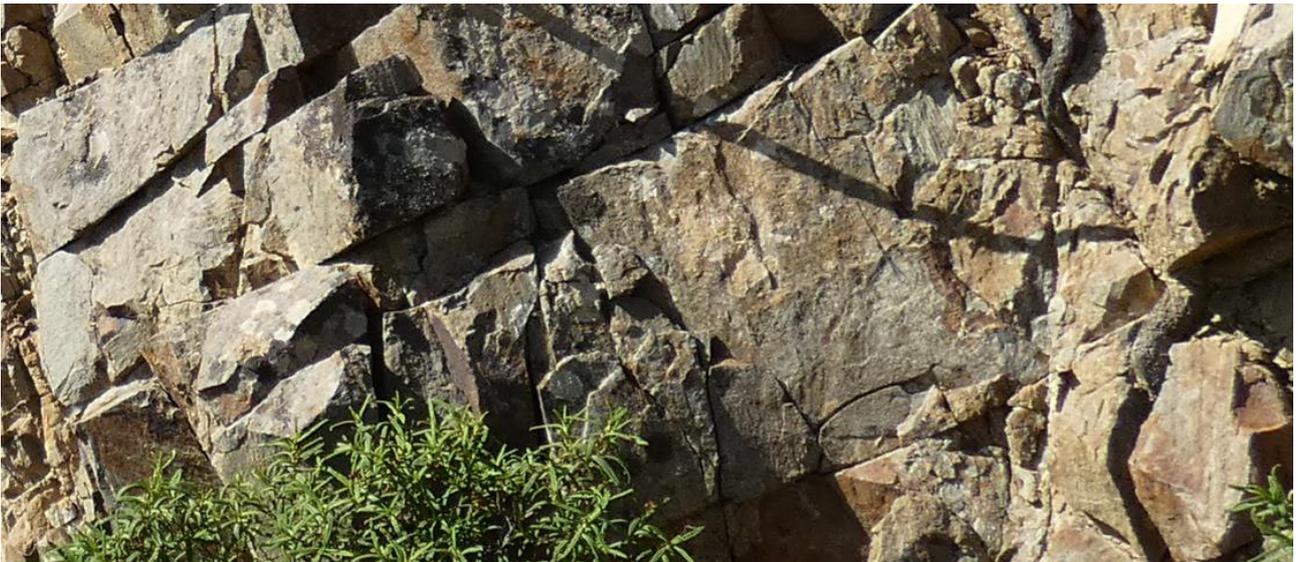


Figura 13 Leucograniti dell'unità Intrusiva di Villacidro

Sono caratterizzati da una grana media equigranulare, con K-feldspato equidimensionale di taglia sub-centimetrica, cristallizzato in individui policristallini che conferiscono alla roccia la caratteristica colorazione rosata. La biotite, di taglia non superiore a 2 mm, è in proporzioni modali non superiori al 7%. Le facies affioranti nel Sarrabus si differenziano dalle precedenti per la grana fine, per la tendenza oleucocrata derivante dalla quasi totale assenza della biotite e per la tessitura in genere isotropa, ma talvolta anche orientata.

6.4. CORTEO FILONIANO

(fp) Filoni ed ammassi di porfidi granitici:

sono costituiti da filoni con spessori generalmente non superiori a qualche decina di metri; hanno colore tipicamente rosso mattone o ocraceo. La struttura varia da afirica a porfirica per la presenza di fenocristalli di quarzo, feldspato potassico, oligoclasio e subordinata biotite immersi in una massa di fondo quarzoso-feldspatica. La struttura è isotropa, e solo localmente orientata in corrispondenza delle salbande; l'età è riferibile al Carbonifero superiore - Permiano.



Figura 14 Affioramento di porfidi granitici nei pressi della TL_07

(fi) Filoni intermedio-basici: corpi filoniani dell'ordine di qualche metro, di colore bruno-verdastro e struttura subafirica, debolmente porfirica o microcristallina, con cristalli di plagioclasio e feldspati alterati. Carbonifero superiore – Permiano.

(fq) Filoni idrotermali: sono costituiti da corpi filoniani di esiguo spessore (qualche metro) caratterizzati da quarzo, fluorite, barite, calcite e solfuri metallici (galena).

6.5. DEPOSITI QUATERNARI DELL'AREA CONTINENTALE

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

(bna) Depositi alluvionali terrazzati: si tratta di sedimenti alluvionali a tessitura grossolana, come sabbie grossolane e ghiaie. I depositi difficilmente raggiungono spessori superiori ai 5 m, di ambiente di conoide o piana alluvionale e situati in prossimità dei corsi d'acqua. Olocene.

(a) Depositi di versante: sono costituiti da depositi monogenici, eterometrici e con clasti spigolosi e a varia granulometria accumulati essenzialmente per gravità alla base dei versanti rocciosi più ripidi. Gli affioramenti più estesi si rinvengono alla base dei versanti, oppure in corrispondenza dei compluvi

dove formano delle falde di detrito piuttosto estese. Lo spessore di questi depositi solitamente è variabile ma non supera i 5 m. Olocene.



Figura 15 Depositi di versante, alla base granitoide alterato (VLD)

(b2) Coltri eluvio-colluviali: Si tratta di materiali derivati dal disfacimento in situ delle rocce in seguito mobilizzate da processi di versante, costituiti da depositi con percentuali variabili di sedimenti fini (sabbia e silt) più o meno pedogenizzati e arricchiti in frazione organica, con clasti eterometrici di varia litologia. Sono mescolati con sedimenti più grossolani, sempre subordinati. Lo spessore di questi depositi solitamente è abbastanza esiguo (nell'ordine massimo di qualche metro in prossimità dei compluvi). Olocene.



Figura 16 Coltri eluvio-colluviali, alla base Membro di Mattoppa (NEB)

(b) Depositi alluvionali: Si tratta di materiali che si rinvengono nei letti dei fiumi attualmente soggetti a processi di erosione, trasporto e rideposizione periodica. Sono costituiti da ghiaie poligeniche eterometriche, talora in matrice sabbiosa con lenti sabbiose e sabbioso-ghiaiose poco continue. Sono tipici sedimenti di barra, sia longitudinale che laterale o mediana, non cementati. Olocene.

Nel caso specifico, turbine TL_A, TL_2, TL_3, TL_5, TL_6 e TL_8 andranno a poggiare nella formazione del Membro di Mattoppa (NEB), mentre la TL_7 andrà a poggiare sui granitoidi (VLD).

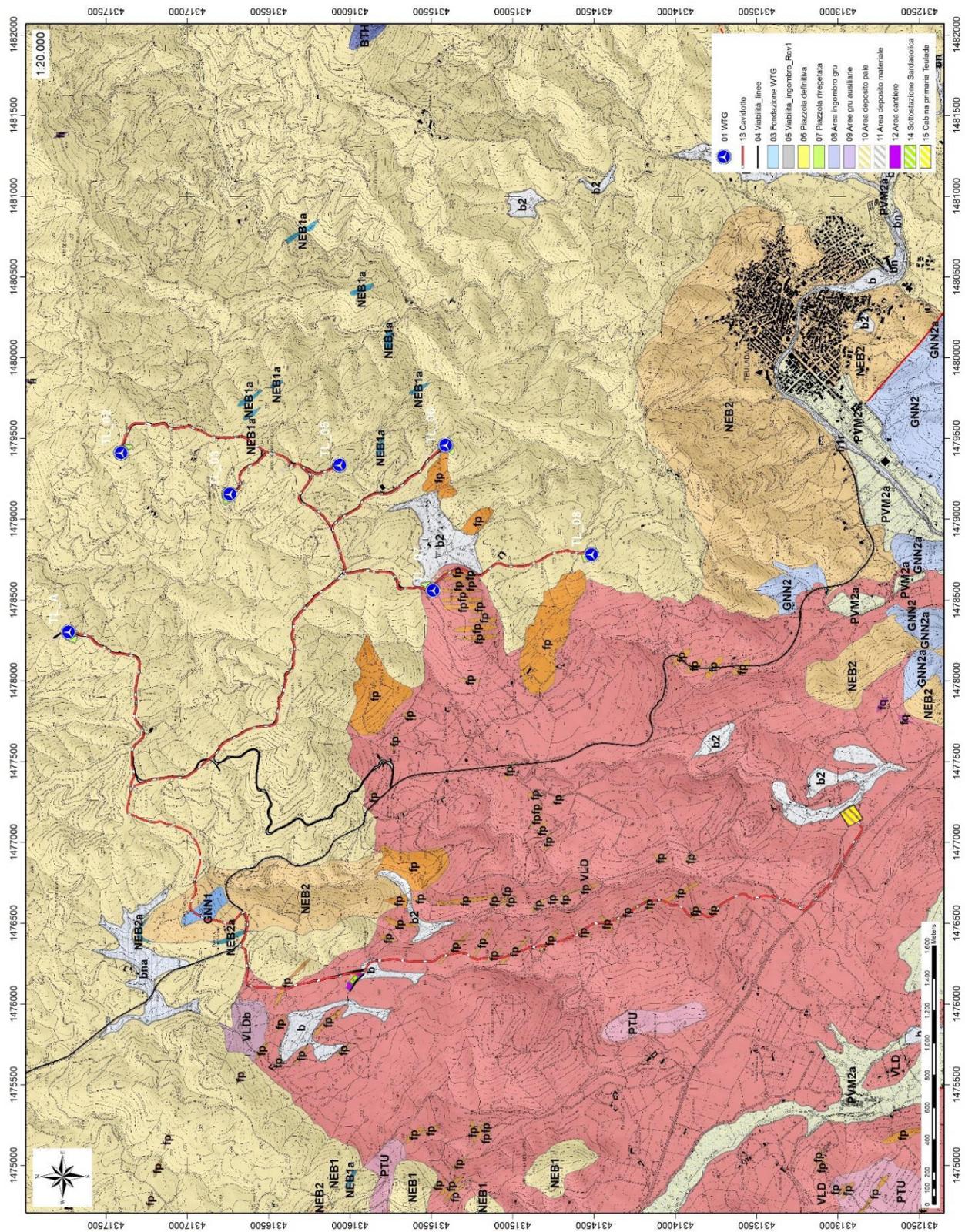


Figura 17 Stralcio carta geologica (Fonte RAS)

Dott.ssa Geol.

COSIMA ATZORI

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA
Sezione A n°656



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

info@gaiaconsulting.eu
posta-certificata@pec.gaiacconsulting.eu

7. ANALISI QUALITATIVA DI STABILITÀ DELL'AMMASSO ROCCIOSO

L'intensa fratturazione e il grado di metamorfismo, ampiamente 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):

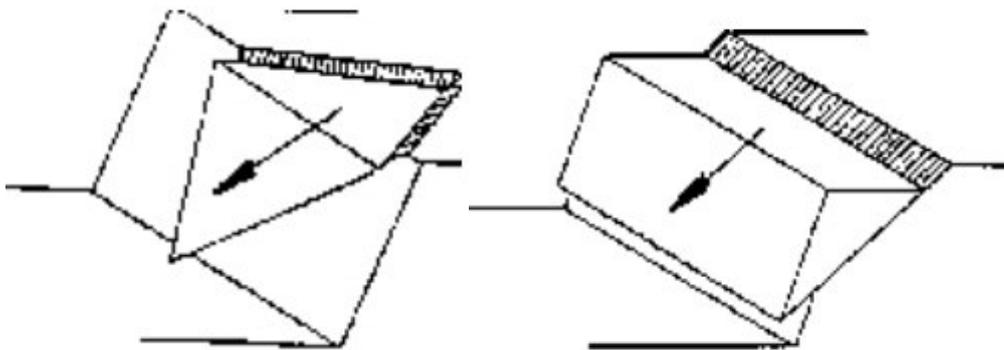


Figura 18 tipologie di scivolamento di blocchi rocciosi lungo piani di fratturazione

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 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 meno fratturati, 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 spazature sono maggiori, anche di qualche 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.

Relativamente ai dissesti, nell'area di studio si osservano fundamentalmente due caratteri distintivi d'insieme:

Dissesti di origine naturale

Piccoli dissesti localizzati di origine antropica

Nell'area, pertanto, non si rilevano dissesti diffusi su vaste aree ma legati a locali condizioni geomorfologiche e di utilizzo del territorio.



Figura 19 A sinistra Scivolamento di un cuneo su taglio stradale, a destra scarpata dissestata su probabile vecchia cava.

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°3 **stendimenti di sismica** con tecnica **MASW** e n°3 **stendimenti di sismica a rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni.

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)
M1-TL_SISM_01-TL02	MASW	ESE-WNW	69,0
R1-TL_SISM_01-TL02	Sismica a rifrazione in onde P	ESE-WNW	69,0
M2-TL_SISM_02-TL05	MASW	NW-SE	69,0
R2-TL_SISM_02-TL05	Sismica a rifrazione in onde P	NW-SE	69,0
M3-TL_SISM_03-TL07	MASW	SE-NW	69,0

R3-TL_SISM_03-TL07	Sismica a rifrazione in onde P	SE-NW	69,0
---------------------------	-----------------------------------	-------	------

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

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 RAYFRAC vers 4.01), che stima le velocità sismiche compatibili con ogni singolo elemento affinché i tempi di percorso dei vari fronti d'onda, generati nei punti di tiro disposti lungo il profilo, risultino il più possibile simili ai tempi misurati e letti sui sismogrammi. Il risultato che si ottiene è una griglia di valori di velocità dalla superficie fino alle massime profondità di indagine che caratterizzano i vari elementi in cui è stato suddiviso il sottosuolo.

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

10.1.1. CARATTERISTICHE DELLE STESE SISMICHE

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

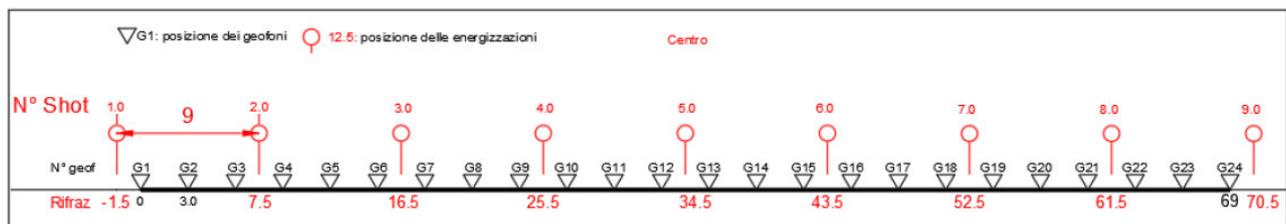


Figura 20 Stendimento di sismica a rifrazione in onde P con 24 geofoni, interdistanza di 3,0 m, lunghezza complessiva 69,0 m

10.1.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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

10.1.3. ELABORAZIONE DEI DATI

I dati delle prospezioni sono costituiti dalla geometria d'acquisizione (posizioni e quote relative dei punti scoppio e dei geofoni) e dai tempi di primo arrivo delle onde elastiche di compressione (onde P), determinati manualmente sulle registrazioni riprodotte a schermo (picking dei primi arrivi). La

qualità dei dati è risultata nel complesso buona e il picking è stato realizzato facilmente per tutte le basi sismiche. Nelle figure che seguono si riportano alcune schermate delle operazioni eseguite.

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

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

10.2. INDAGINI SISMICHE: MASW

Metodologia

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

Moto del segnale sismico

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

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

Onde di Rayleigh – "R"

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

Analisi del segnale con tecnica MASW

Secondo l'ipotesi fondamentale della fisica lineare (Teorema di Fourier) i segnali possono essere rappresentati come la somma di segnali indipendenti, dette armoniche del segnale. Tali armoniche, per analisi monodimensionali, sono funzioni trigonometriche seno e coseno, e si comportano in modo indipendente non interagendo tra di loro. Concentrando l'attenzione su ciascuna componente armonica il risultato finale in analisi lineare risulterà equivalente alla somma dei comportamenti

parziali corrispondenti alle singole armoniche. L'analisi di Fourier (analisi spettrale FFT) è lo strumento fondamentale per la caratterizzazione spettrale del segnale. L'analisi delle onde di Rayleigh, mediante tecnica MASW, viene eseguita con la trattazione spettrale del segnale nel dominio trasformato dove è possibile, in modo abbastanza agevole, identificare il segnale relativo alle onde di Rayleigh rispetto ad altri tipi di segnali, osservando, inoltre, che le onde di Rayleigh si propagano con velocità che è funzione della frequenza. Il legame velocità frequenza è detto spettro di dispersione. La curva di dispersione individuata nel dominio f-k è detta curva di dispersione sperimentale, e rappresenta in tale dominio le massime ampiezze dello spettro.

Modellizzazione

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

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

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

Modi di vibrazione

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

Profondità di indagine

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

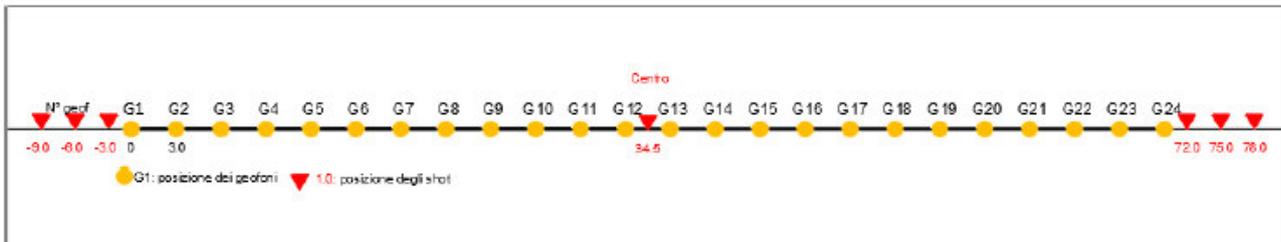
10.2.1. SPECIFICHE DELLE INDAGINI SVOLTE

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

pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema), oltre che una battuta al centro della base sismica.

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

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



10.2.2. CARATTERISTICHE DELLA STRUMENTAZIONE IMPIEGATA

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

10.2.1. ELABORAZIONE DEI DATI

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

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

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

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

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

Le "Norme Tecniche per le Costruzioni" – Decreto del 19/01/2018 definiscono le regole per progettare l'opera sia in zona sismica che in zona non sismica. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione

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

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato H è riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali è riferita alla testa dei pali. Nel caso di opere di sostegno di terreni naturali, la profondità è riferita alla testa dell'opera. Per muri di sostegno di terrapieni, la profondità è riferita al piano di imposta della fondazione.

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

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

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

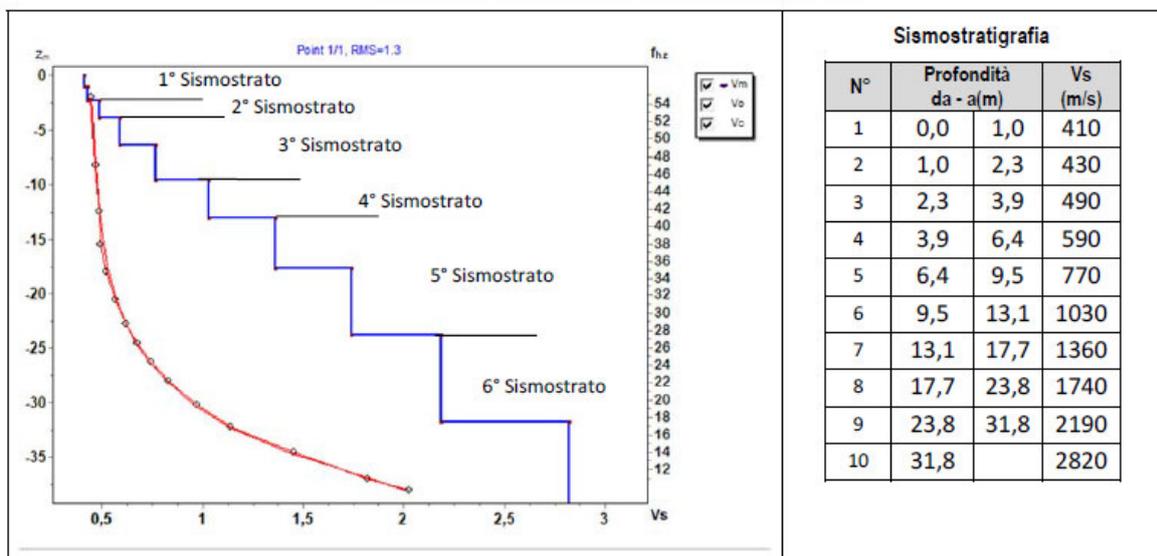
10.3. 15.4. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_01-TURBINA TL02

10.3.1. M1-TL_SISM_01-TL02: MASW

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali V_s dello stendimento M1-TL_SISM_01-TL02, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio V_s .

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 2,3	1° sismostrato con V_s tra 410 e 430 m/s , Terre mediamente addensate
2,3 – 3,9	2° sismostrato con V_s di 490 m/s , Terre molto addensate e/o rocce intensamente fratturate
3,9 – 9,5	3° sismostrato con V_s tra 590 e 770 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
9,5 – 13,1	4° sismostrato con V_s di 1030 m/s , Substrato roccioso debolmente fratturato
13,1 – 23,8	5° sismostrato con V_s tra 1360 e 1740 m/s , Substrato roccioso sano
23,8–31,8	6° sismostrato con V_s tra 2190 e 2820 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M1-TL_SISM_01-TL02 - PROFILO V_s



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

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

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle V_s si pone come profondità del substrato **9,5 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,5 m** di profondità dal p.c. è pari a: **$V_{s,eq} = 9,5/0,0171 = 557$ 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 γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,3	terre	1.600	840	420	0,33	755	91	284	755
2	2,3-3,9	10%	1.700	980	490	0,33	1.089	109	412	1.089
3	3,9-9,5	10%	1.800	1.360	680	0,33	2.216	222	834	2.216
4	9,5-13,1	15%	2.000	2.060	1.030	0,33	5.659	849	2.118	5.659
5	13,1-23,8	20%	2.100	3.100	1.550	0,33	13.455	2.691	5.041	13.455
6	23,8-31,8	30%	2.200	5.010	2.505	0,33	36.815	11.044	13.808	36.815

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

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

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

10.3.2. R1-TL_SISM_01-TL02: SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P

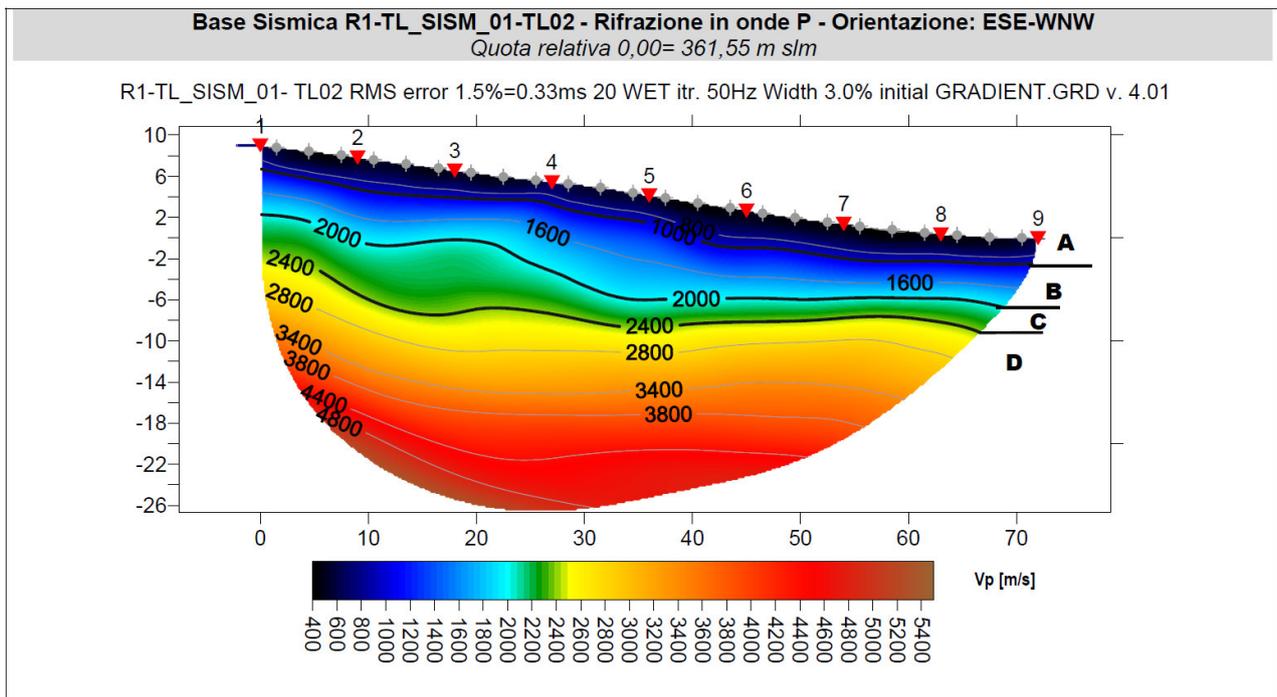
Nella sezione di sismica a rifrazione **R1-TL_SISM_01-TL02** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R1-TL_SISM_01-TL02	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 2,5/4,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,5/4,0 a 6,0/10,0	1000-2000
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 6,0/10,0 a 8,0/14,0	2000-2400
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 8,0/14,0 a 26,0-32,0	2400-4800

Dall'esame della sezione sismica si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 4800 m/s. Il sismostrato A, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta

spessori compresi tra 2,5 e 4,0 metri da p.c e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta anch'esso un andamento circa parallelo al piano campagna e alcune variazioni di spessore, si rileva fino a profondità comprese tra 6,0 e 10,0 m dal p.c. Il sismostrato C, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) presenta maggiori variazioni di spessore rispetto ai precedenti, infatti si osservano maggior spessori nella parte sinistra della sezione rispetto alla parte destra dove si assottiglia notevolmente. Questo sismostrato si osserva fino a profondità comprese tra 8,0 e 14,0 dal p.c. Il sismostrato D, caratterizzato da rocce debolmente fratturate e sane (non rippabili) si osserva invece fino alla massima profondità di indagine, circa 26,0/32,0 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 alcune variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 6,0 e 10,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 8,0 e 14,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.



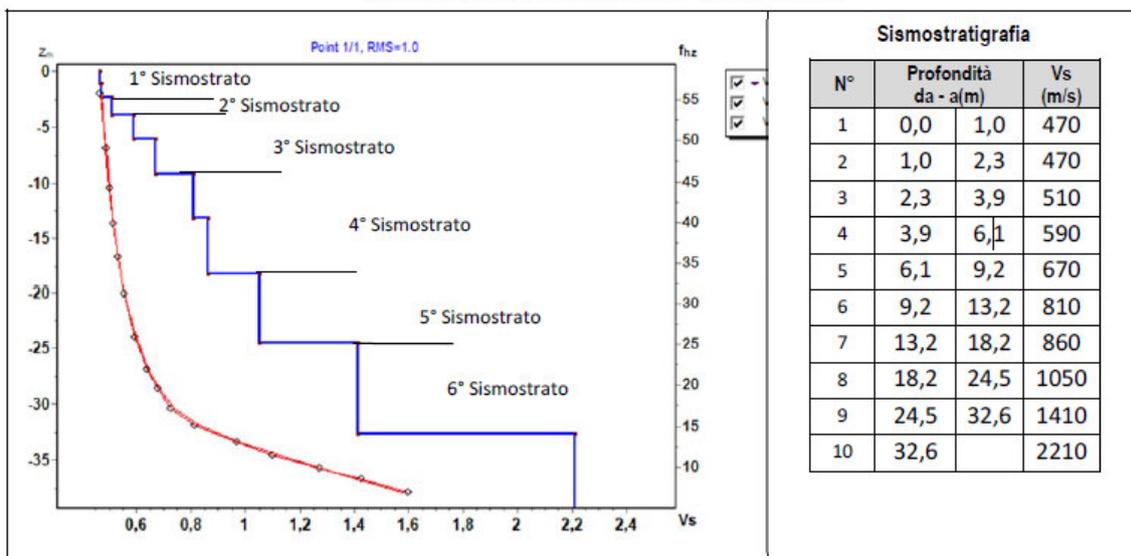
10.4. RISULTATI DELLE INDAGINI SITO TL_SISM_02-TURBINA TL05

10.4.1. M2- TL_SISM_02-TL05: MASW

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M2- TL_SISM_02-TL05, 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 – 2,3	1° sismostrato con Vs di 470 m/s , Terre mediamente addensate
2,3 – 3,9	2° sismostrato con Vs di 510 m/s , Terre molto addensate e/o roccia intensamente fratturata
3,9 – 9,2	3° sismostrato con Vs tra 590 e 670 m/s , Roccia tenera e/o intensamente fratturata
9,2 – 18,2	4° sismostrato con Vs di 860 m/s , Substrato roccioso fratturato
18,2 – 24,5	5° sismostrato con Vs di 1050 m/s , Substrato roccioso debolmente fratturato
24,5 – 32,6	6° sismostrato con Vs tra 1410 e 2210 m/s , Substrato roccioso sano

MASW M2- TL_SISM_02-TL05 - PROFILO Vs



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

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

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **9,2 m** ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,2 m** di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 9,2/0,0164 = 561$ 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 γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G ₀	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,3	terre	1.600	940	470	0,33	941	114	353	941
2	2,3-3,9	10%	1.700	1.020	510	0,33	1.177	118	441	1.177
3	3,9-9,2	10%	1.800	1.260	630	0,33	1.903	190	716	1.903
4	9,2-18,2	15%	1.900	1.720	860	0,33	3.746	562	1.402	3.746
5	18,2-24,5	20%	2.000	2.100	1.050	0,33	5.884	1.177	2.207	5.884
6	24,5-32,6	25%	2.100	3.620	1.810	0,33	18.349	4.587	6.884	18.349

Figura 22 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

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

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

10.4.2. R2-TL_SISM_02-TL05: SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P

Nella sezione di sismica a rifrazione **R2-TL_SISM_02-TL05** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R2-TL_SISM_02-TL05	ONDE P	
	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
Sismostrati		
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 2,5/3,0	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,5/3,0 a 5,0/12,0	1000-2000
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 5,0/12,0 a 14,0/18,0	2000-2400
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 14,0/18,0 a 22,0-27,0	2400-3400

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3400 m/s. Il sismostrato A, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta spessori compresi tra 2,5 e 3,0 metri da p.c e un andamento parallelo al piano campagna. Il

sismostrato B caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta notevoli variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 5,0 e 12,0 m dal p.c. Il sismostrato C, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) presenta anch'esso importanti variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 14,0 e 18,0 dal p.c. Il sismostrato D, caratterizzato da rocce debolmente fratturate e sane (non rippabili) si osserva invece fino alla massima profondità di indagine, tra 22,0 e 27,0 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 generale dei valori delle Vp con diverse variazioni di spessore nei sismostrati B e C generate dalla maggiore o minore densità locale del materiale roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 5,0 e 12,0 m dal p.c i terreni risultano già difficilmente rippabili, mentre già a profondità comprese tra 14,0 e 18,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

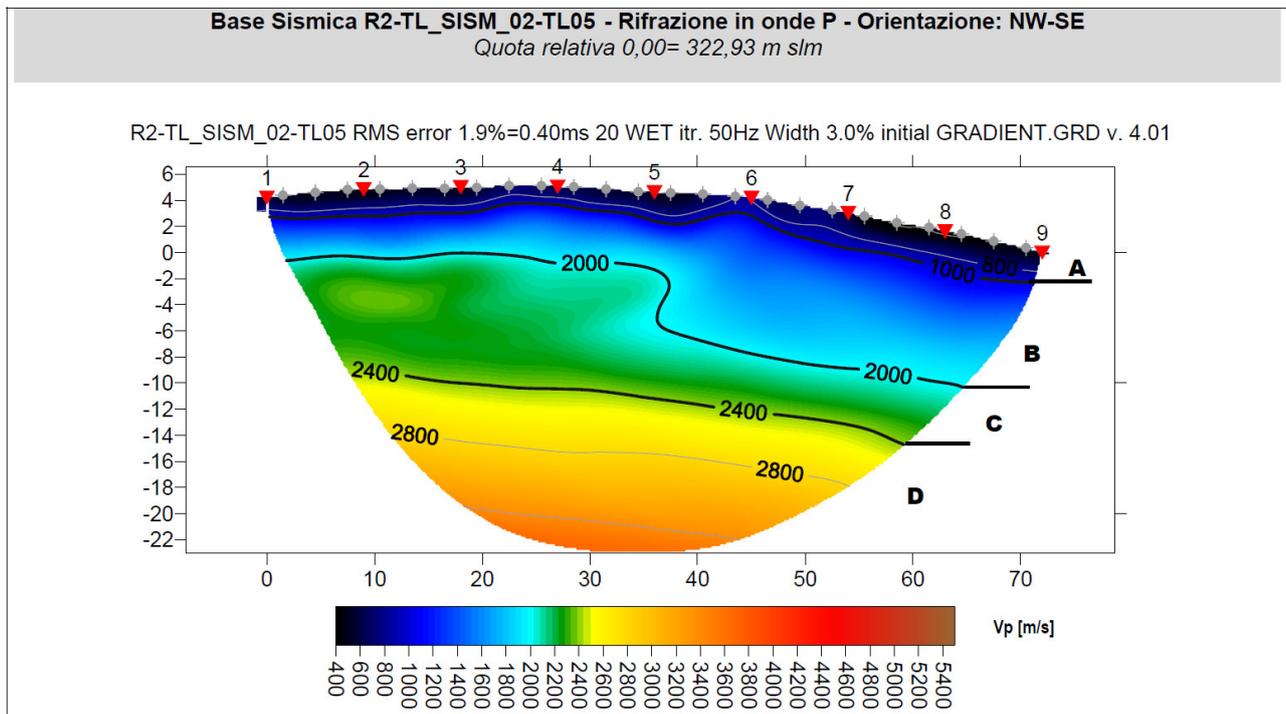


Figura 23 Base Sismica RM-1 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E

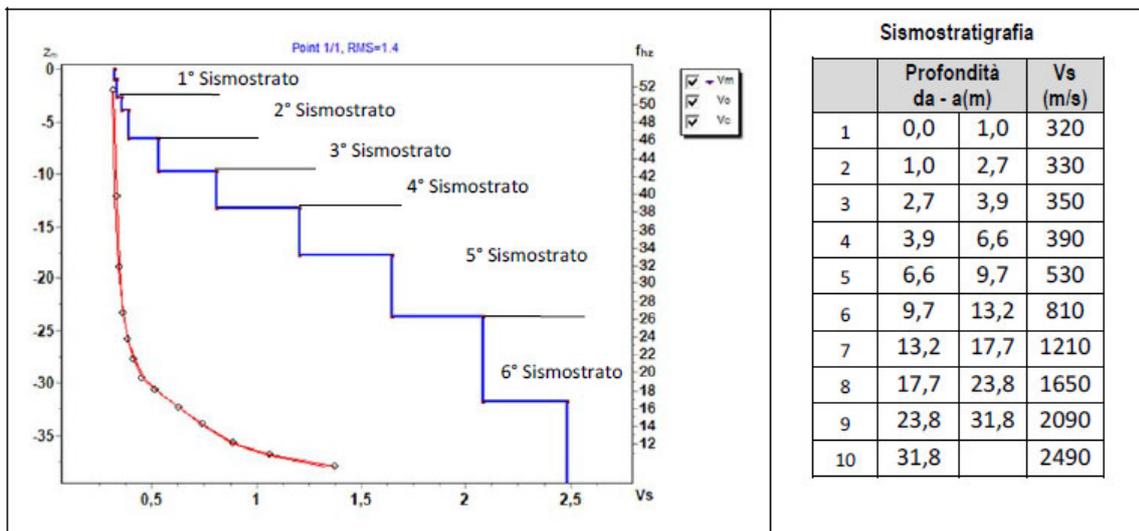
10.5. 15.6. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_03-TURBINA TL07

10.5.1. M3-TL_SISM_03-TL07: MASW

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M3-TL_SISM_03-TL07, 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 – 2,7	1° sismostrato con Vs tra 320 e 330 m/s, Terre mediamente addensate
2,7– 3,9	2° sismostrato con Vs di 350 m/s, Terre mediamente addensate
3,9 – 9,7	3° sismostrato con Vs tra 390 e 530 m/s, Roccia tenera e/o intensamente fratturata
9,7 – 13,2	4° sismostrato con Vs di 810 m/s, Substrato roccioso fratturato
13,2 – 23,8	5° sismostrato con Vs tra 1210 e 1650 m/s, Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
23,8 – 31,8	6° sismostrato con Vs tra 2090 e 2490 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M3-TL_SISM_03-TL03 - 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:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 9,7 m ($V_s > 800$ m/s)

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 9,7 m di profondità dal p.c. è pari a: $V_{s,eq} = 9,7/0,0244 = 398$ 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 γ	Vp	Vs	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico Ed	Modulo di Young statico Ed	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0-2,7	terre	1.600	650	325	0,33	451	54	167	451
2	2,7-3,9	terre	1.700	700	350	0,33	559	68	206	559
3	3,9-9,7	5%	1.800	920	460	0,33	1.020	51	382	1.020
4	9,7-13,2	15%	1.900	1.620	810	0,33	3.325	499	1.245	3.325
5	13,2-23,8	20%	2.000	2.860	1.430	0,33	10.905	2.181	4.089	10.905
6	23,8-31,8	25%	2.100	4.580	2.290	0,33	29.371	7.343	11.013	29.371

Figura 24 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

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

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

10.5.2. R3-TL_SISM_03-TL07: SISMICA A RIFRAZIONE IN ONDE P

Nella sezione di sismica a rifrazione **R3-TL_SISM_03-TL07** è possibile distinguere i seguenti sismostrati:

Stendimento R3-TL_SISM_03-TL07	ONDE P	
Sismostrati	Profondità da pc (m)	Velocità in m/s
A: Unità delle terre di copertura (facilmente rippabili)	Da 0,0 a 2,5/4,5	400-1000
B: Unità delle rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili)	Da 2,5/4,5 a 13,0/15,0	1000-2000
C: Unità delle rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà)	Da 13,0/15,0 a 16,0/18,0	2000-2400
D: Unità delle rocce da debolmente fratturate a sane (non rippabili)	Da 16,0/18,0 a 22,0	2400-3200

Dall'esame della sezione si riconoscono 4 unità sismostratigrafiche principali caratterizzate da velocità crescente delle onde P all'aumentare della profondità, con un range che varia dai 400 m/s ai 3200 m/s. Il sismostrato A, caratterizzato dalle terre di copertura (facilmente rippabili), presenta spessori compresi tra 2,5 e 4,5 metri e un andamento parallelo al piano campagna. Il sismostrato B, caratterizzato da rocce tenere e/o intensamente fratturate (rippabili) presenta anch'esso un

andamento parallelo al piano campagna e leggere variazioni di spessore, si rileva fino a profondità comprese tra 13,0 e 15,0 m dal p.c. Il sismostrato C, caratterizzato da rocce debolmente fratturate (rippabili con difficoltà) presenta anch'esso leggere variazioni di spessore e si rileva fino a profondità comprese tra 16,0 e 18,0 dal p.c. Il sismostrato D, caratterizzato da rocce debolmente fratturate e sane (non rippabili) si osserva invece fino alla massima profondità di indagine, ovvero 22,0 m di profondità dal p.c e rappresenta un substrato lapideo non rippabile caratterizzato da velocità alte. Dall'osservazione della sezione sismica si può notare un aumento abbastanza graduale delle Vp con alcune variazioni di equidistanza generate dalla maggiore o minore densità del materiale roccioso. In termini di grado di rippabilità si evidenzia che a partire da profondità comprese tra 13,0 e 15,0 m dal p.c i terreni risultano difficilmente rippabili, mentre a profondità comprese tra 16,0 e 18,0 m dal p.c si riscontra la presenza di materiale non rippabile.

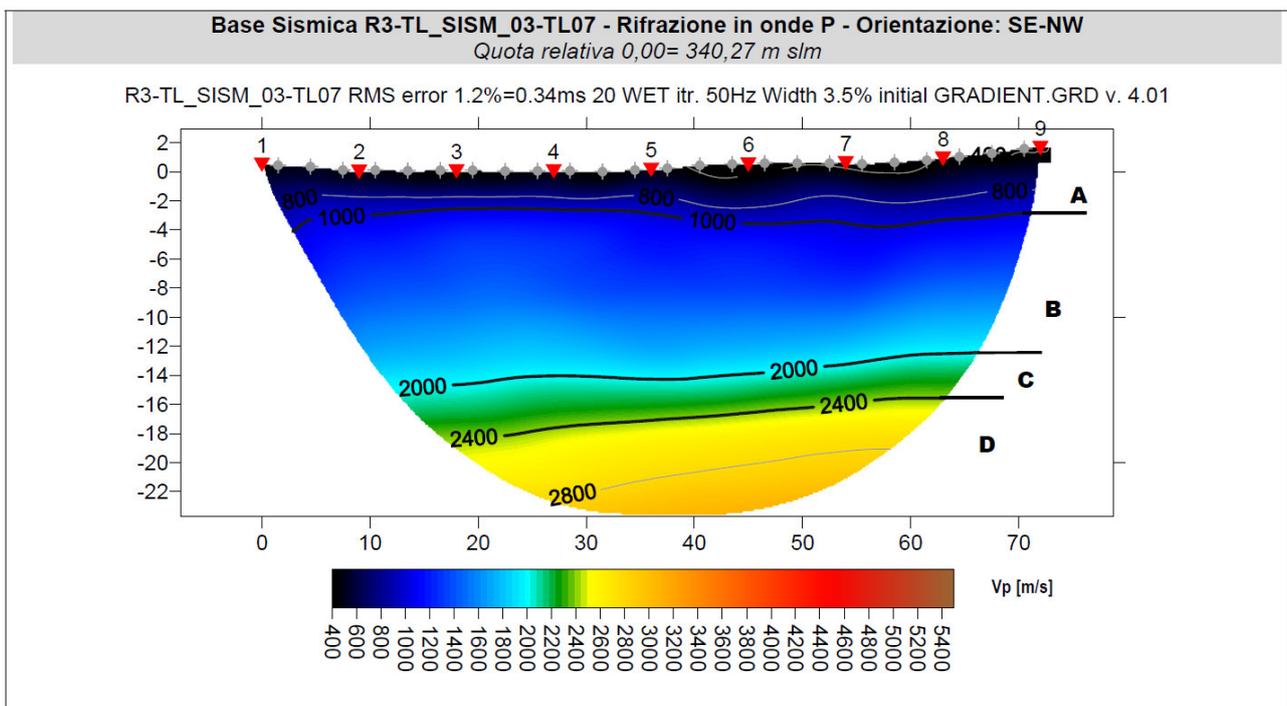


Figura 25 Base Sismica RM-2 - Rifrazione in onde P - Orientazione: W-E

10.6. INDICAZIONI PER LA DETERMINAZIONI DEI PARAMETRI GEOMECCANICI

Dott.ssa Geol.

COSIMA ATZORI

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA
Sezione A n°656



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

info@gaiac consulting.eu
posta-certificata@pec.gaiac consulting.eu

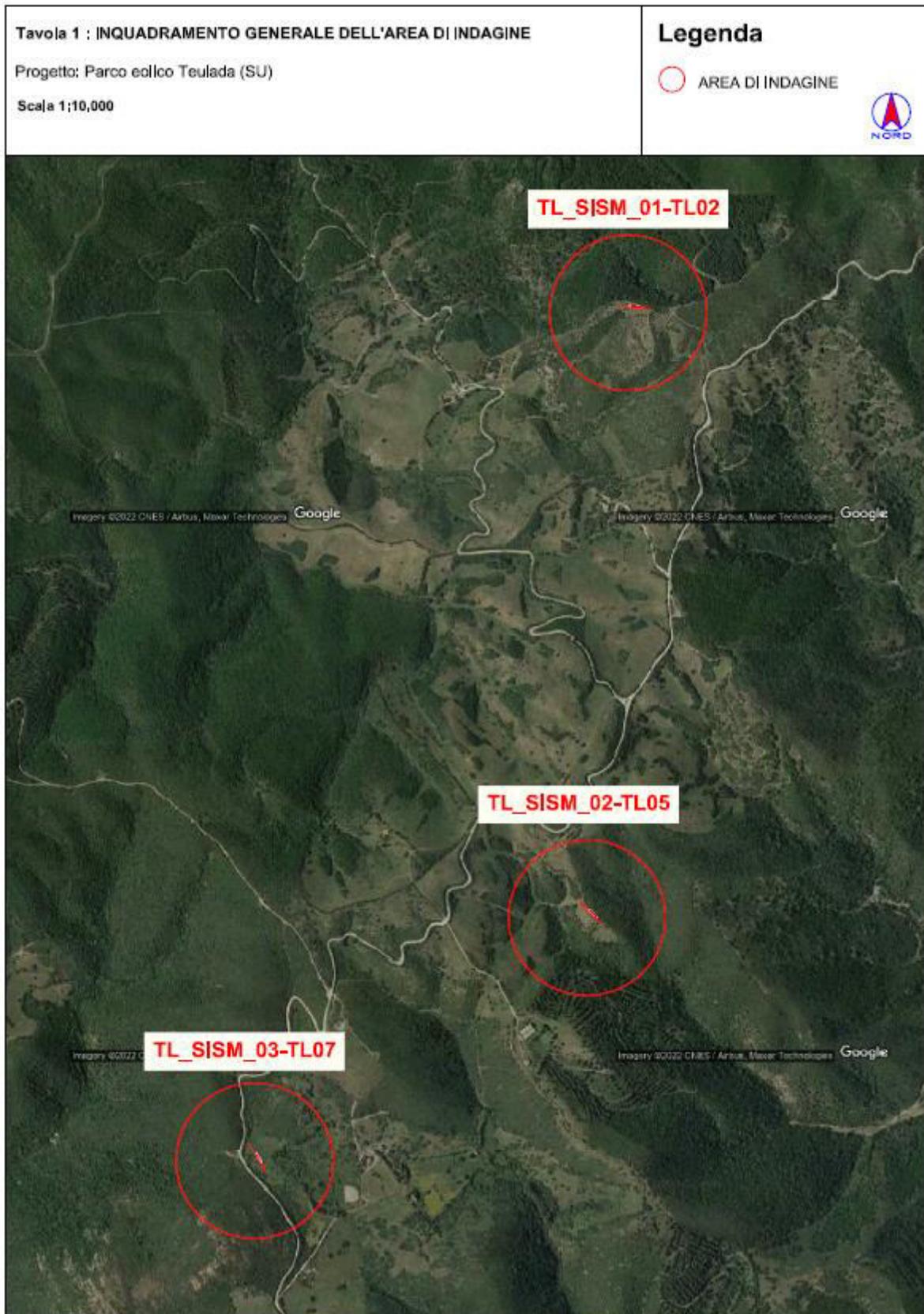
La prospezione geofisica attraverso l'impiego delle tecniche MASW, sismica a rifrazione in onde P e tomografia elettrica ha permesso di ricostruire con un buon grado di precisione l'assetto lito-stratigrafico dell'area in esame e dedurre le caratteristiche sismiche. Per quanto riguarda le MASW, lungo 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)
M1-TL_SISM_01-TL02	9,5	557	B
M2-TL_SISM_02-TL05	9,2	561	B
M3-TL_SISM_03-TL07	9,7	398	B

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

L'elaborazione dei dati di sismica a rifrazione in onde P 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 e i suoi differenti gradi di fratturazione.

Di seguito vengono riportati gli schemi riassuntivi dei gradi di rippabilità e relative profondità in m dal p.c dei diversi sismostrati identificati in ogni sito di indagine.



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:

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

mb = costante d'ammasso

s ed a = costanti d'ammasso

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

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

- Resistenza a compressione monoassiale (*Intact Uniaxial Compressive Strength – IUCS*) stimata su base empirica (Fig.56) 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. 57) 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 (σ_{ci} e m_i) vengono generalmente definiti sulla base di apposite prove di laboratorio, ma in assenza delle suddette, è possibile fare riferimento alla tabella di Fig.58, 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, grandiorite calcare, marna riolite, tufi
R4	Resistenza elevata	50-100	2-4	Un campione richiede più di un martello geologico per essere fratturato	Calcarea, 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	Calcarea bianco, saigemma
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 26 - Resistenza a compressione monoassiale per diversi tipi di roccia

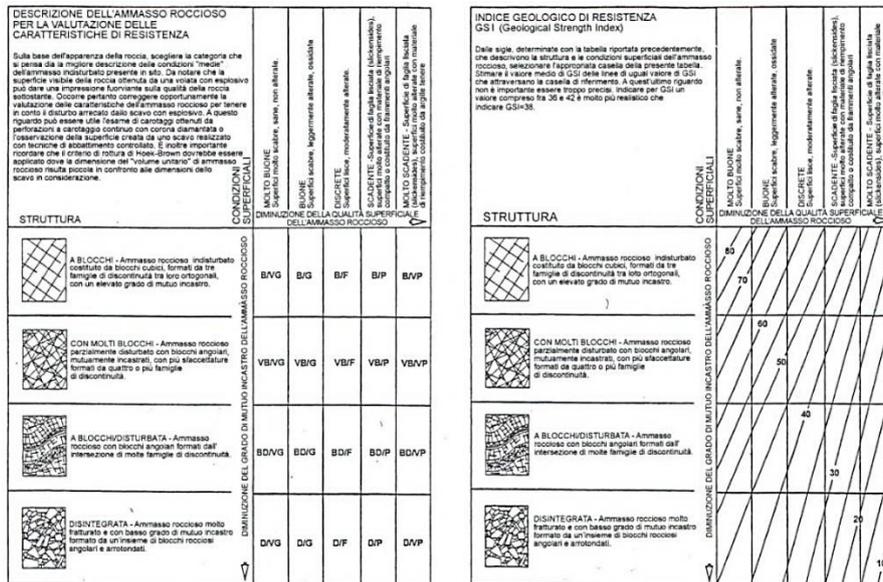


Figura 27 Abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali dell'ammasso

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

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

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

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

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

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

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

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

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)			
		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)	
	Scure		Diorite (28)		Andesite 19	
			Gabbro 27	Dolerite (19)	Basalto (17)	
Effusive piroclastiche		Norite 22				
			Agglomerato (20)	Breccia (18)	Tufo (15)	
Questi valori sono validi per campioni di roccia intatta portati a rottura applicando il carico normale alla stratificazione o scistosità. Il valore di m, sarà sensibilmente inferiore se la rottura avviene lungo un piano di debolezza						

Figura 28 Valori della costante mi per diversi tipi di roccia

L'analisi delle caratteristiche geomeccaniche in sito degli ammassi rocciosi interessati dal progetto e l'applicazione del metodo di Hoek-Brown per la definizione dei parametri geotecnici del substrato roccioso ha portato alla classificazione 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>σ_1 = tensione efficace principale massima σ_3 = tensione efficace principale minima $\sigma_{u(r)}$ = resistenza a compressione monoassiale m ed s: costanti empiriche</p>	COSTANTI DEL MATERIALE: m, s	ROCCIE CARBONATICHE CON CLIVAGGIO CRISTALLINO BEN SVILUPPATO <i>Dolomite, calcare e marmo.</i>	ROCCIE ARGILLOSE LITIFICATE <i>Argille, siltite, scisti argillosi con clivaggio ben marcato.</i>	ROCCIE ARENACEE CON ELEVATA CRISTALLIZZAZIONE E LIMITATO SVILUPPO DI CLIVAGGIO PER CRISTALLIZZAZIONE <i>Arenaria e quarzite</i>	ROCCIE CRISTALLINE IGNEE E GRANA FINE <i>Andesite, dolerite, diabase e riolite</i>	ROCCIE IGNEE A GRANA GROSSOLANA E ROCCIE CRISTALLINE METAMORFICHE <i>Amfiboite, gabbro, gneiss, norite, quarzo-diorite</i>
<p>CAMPIONI DI ROCCIA INTATTA <i>Campioni di laboratorio senza discontinuità (matrice rocciosa)</i> Indice CSIR: RMR = 100 Indice NGI: Q = 500</p>	m s	7.00 1.00	10.00 1.00	15.00 1.00	17.00 1.00	25.00 1.00
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI OTTIMA QUALITÀ <i>Ammasso roccioso indisturbato con giunti non alterati di spaziatura compresa fra 1 e 3 m</i> Indice CSIR: RMR = 85 Indice NGI: Q = 100</p>	m s	2.40 0.082	3.43 0.082	5.14 0.082	5.82 0.082	8.56 0.082
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ <i>Roccia sana o leggermente alterata, leggermente disturbato con giunti di spaziatura compresa fra 1 e 3 m.</i> Indice CSIR: RMR = 65 Indice NGI: Q = 10</p>	m s	0.575 0.00293	0.821 0.00293	1.231 0.00293	1.395 0.00293	2.052 0.00293
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI DISCRETA QUALITÀ <i>Numerose famiglie di giunti moderatamente alterati, con spaziature comprese fra 0.3 e 1 m.</i> Indice CSIR: RMR = 44 Indice NGI: Q = 1</p>	m s	0.128 0.00009	0.183 0.00009	0.275 0.00009	0.311 0.00009	0.458 0.00009
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ SCADENTE <i>Numerosi giunti alterati con spaziatura compresa fra 30 e 500 mm, alcuni con riempimento. Detrito di roccia pulita compattata.</i> Indice CSIR: RMR = 23 Indice NGI: Q = 0.1</p>	m s	0.029 0.000003	0.041 0.000003	0.061 0.000003	0.069 0.000003	0.102 0.000003
<p>AMMASSO ROCCIOSO DI QUALITÀ MOLTO SCADENTE <i>Numerosi giunti molto alterati con spaziatura inferiore a 50 mm e con riempimento. Detrito di roccia con materiale fine.</i> Indice CSIR: RMR = 3 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 29 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

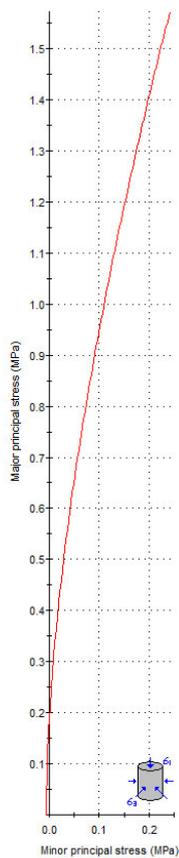
Spaziatura totale delle discontinuità (s)=0,1 m

Lunghezza media del giunto = >3 m

Pareti – mediamente alterate

Riempimento – sciolto

Roccia – asciutta

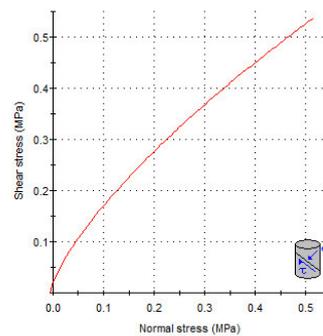


Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial compressive strength = 138 MPa
 GSI = 25 m = 19 Disturbance factor = 1

Hoek-Brown Criterion
 $m_b = 0.090$ $s = 3.73e-6$ $a = 0.531$

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)

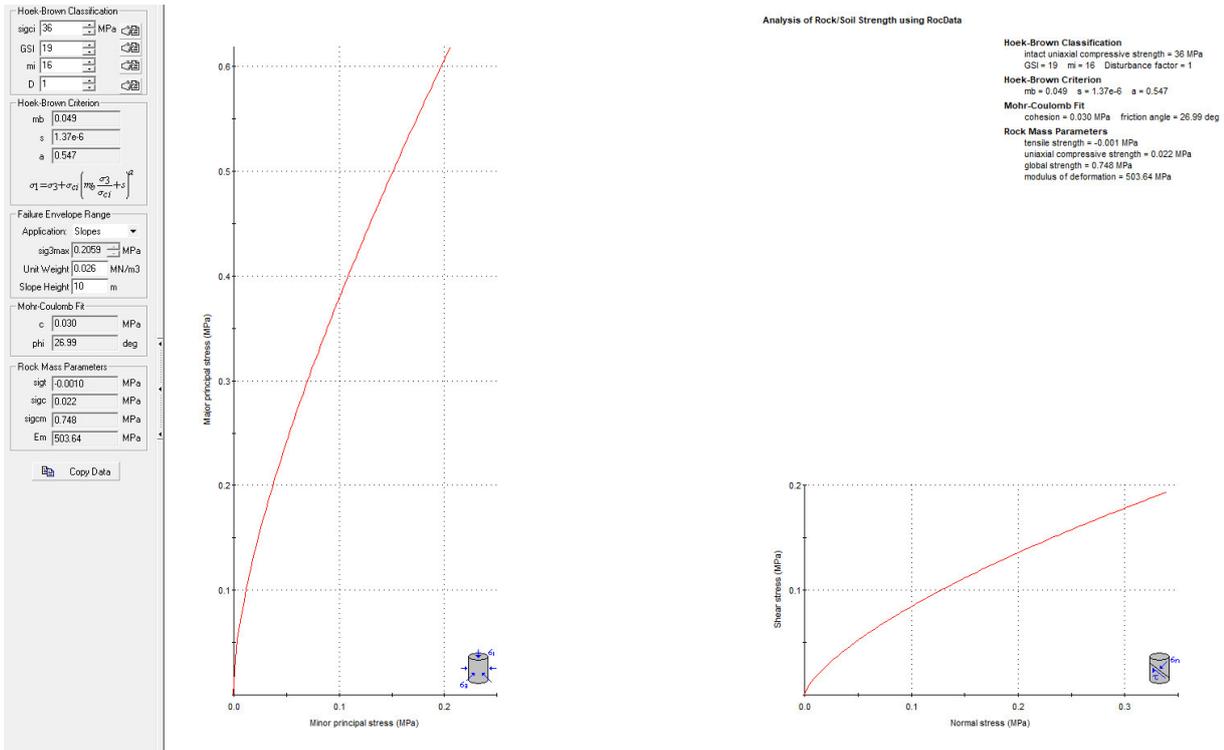
Standard ISRM = La punta lascia dei buchi, lastre sottili si rompono con forti pressioni delle mani

Instabilità= scivolamenti planari e a cuneo

Ammasso roccioso= molto fratturato e alterato

Struttura= scistosa

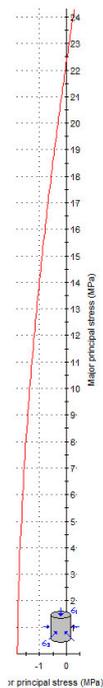
- Alterazione= spinta
- Spaziatura totale delle discontinuità (s)= >0,1 m
- Lunghezza media del giunto = >3 m
- Pareti – molto alterate
- Riempimento – sciolto
- Roccia – umida



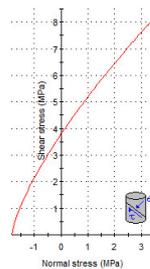
Formazione di Gonnese

- 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 = 100 MPa
 GSI = 75 m = 9 Disturbance factor = 1
Hoek-Brown Criterion
 mb = 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 = -1.849 MPa
 uniaxial compressive strength = 22.328 MPa
 global strength = 33.535 MPa
 modulus of deformation = 21084.83 MPa



11.2. 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. In tal caso, in fase esecutiva, sarà opportuno provvedere a mantenere lo scavo asciutto mediante l'installazione di pompe adeguatamente dimensionate per la portata da emungere.

L'analisi ha permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, sono stati individuati **2 modelli geologici rappresentativi** descritti di seguito:

11.2.1. MODELLO GEOLOGICO 01 – TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08

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

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di suolo di circa 2,5m si incontra un livello superficiale di roccia alterata dallo spessore di circa 1,5m, il sottostante substrato litoide costituito da

uno spessore di circa 5 m di siltiti con intercalazioni di arenarie, arenarie quarzose, quarzo-areniti ed arcosi a grana fine alterate della Formazione di Nebida.

Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta fratturata. La spaziatura massima tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 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.

Si suggerisce in fase di progettazione esecutiva di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

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

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.

00.00m - 2.50m	S1 - Terre di copertura (suolo/depositi eluvio-colluviali)
02.50m - 4.00m	S2 - Alternanze di metamorfiti: Siltiti, arenarie, arenarie quarzose alterate e molto alterate
04.00m - 9,00m	S3 - Alternanze di metamorfiti: Siltiti, arenarie, arenarie quarzose alterate alterate e molto fratturate
09,00m - 18,00m	S4 - Substrato roccioso da debolmente a fratturato
18,00m - 24,00m	S5 - Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano
24,00m - 32,00m	S6 - Substrato roccioso sano

Teulada - MODELLO GEOLOGICO 01 (TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08)							
Dati Parametri Resistenza							
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Descrizione							
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1800	1950	2000	2100
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	1900	1950	2000	2100
Angolo di attrito interno*	[°]	24	26	28	35	40	45
Coesione*	[Mpa]	0,016	0.030	4.52	6.68	12.30	16.87
Dati Parametri Deformabilità							
Modulo elastico	[Mpa]	91	109	190	562	1177	4587
Coefficiente di Poisson	[]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	284	412	716	1402	2207	6884
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	420	490	630	860	1050	1810

*Valori ottenuti per via empirica variando i parametri su RocData in relazione alla profondità e ai parametri misurati con l'indagine geofisica.

11.2.2. MODELLO GEOLOGICO 02 – TL_07.

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati dello stendimento geofisico M-3 e i dati dei rilievi geomeccanici "Scanline-3"

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di suolo di circa 2,7m si incontra un livello superficiale di roccia alterata dallo spessore di circa 2m, il sottostante substrato litoide costituito da leucograniti fratturati, con grado di fratturazione che diminuisce all'aumentare della profondità della Formazione di Villacidro.

Dall'analisi dell'ammasso in situ, la roccia si presenta fratturata. La spaziatura massima tra le fratture che pervadono l'ammasso roccioso è di 0,1-0.5m. 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.

Si suggerisce in fase di progettazione esecutiva di eseguire delle indagini geognostiche e geofisiche di maggiore dettaglio (in es. sondaggi a carotaggio e geofisica eseguita con stendimenti ubicati a raggiera rispetto al centro della torre eolica).

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

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.

00.00m - 2.70m S1 - Terre di copertura (suolo/depositi eluvio-colluviali/alterazione dei graniti-sabbione)

02.70m - 4.50m S2 - Substrato roccioso molto alterato

04.50m - 13.00m S3 - Substrato roccioso alterato e molto fratturato

13.00m - 18.00m S4 - Substrato roccioso da debolmente a fratturato

18.00m - 32.00m S5 - Substrato roccioso da debolmente fratturato a sano

24.00m - 32.00m S6 - Substrato roccioso sano

Teulada - MODELLO GEOLOGICO 02 (TL_07)							
		Dati Parametri Resistenza					
Tipo di Terreno		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Descrizione							
Peso di volume	[kg/mc]	1600	1700	1800	1950	2000	2100
Peso di volume saturo	[kg/mc]	1700	1800	1900	1950	2000	2100
Angolo di attrito interno*	[°]	24	26	28	40	45	50
Coesione*	[Mpa]	0,008	0.015	3.51	5.48	8.42	9.44
Dati Parametri Deformabilità							
Modulo elastico	[Mpa]	54	68	51	499	2181	7343
Coefficiente di Poisson	[]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	167	206	382	1245	4089	11.013
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	325	350	460	810	1430	2290

*Valori ottenuti per via empirica variando i parametri su RocData in relazione alla profondità e ai parametri misurati con l'indagine geofisica.

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 raggio di 15,00 m; è composto da una parte inferiore cilindrica ($h = 1,20$ m), una intermedia troncoconica ($h = 1,45$ m), ed una superiore cilindrica di altezza 1,33 m che sporge dal piano di campagna di circa 30 cm. La fondazione ha un'altezza complessiva di 3,98 m.

Il collegamento della torre alla fondazione è ottenuto attraverso un doppio anello di tirafondi (120+120) tipo M42 CL 10.9 ad alta resistenza collegati inferiormente con una flangia circolare in acciaio S355J2 annegata nel calcestruzzo della fondazione. I tirafondi nella parte superiore del plinto sono collegati alla flangia del primo concio della torre.

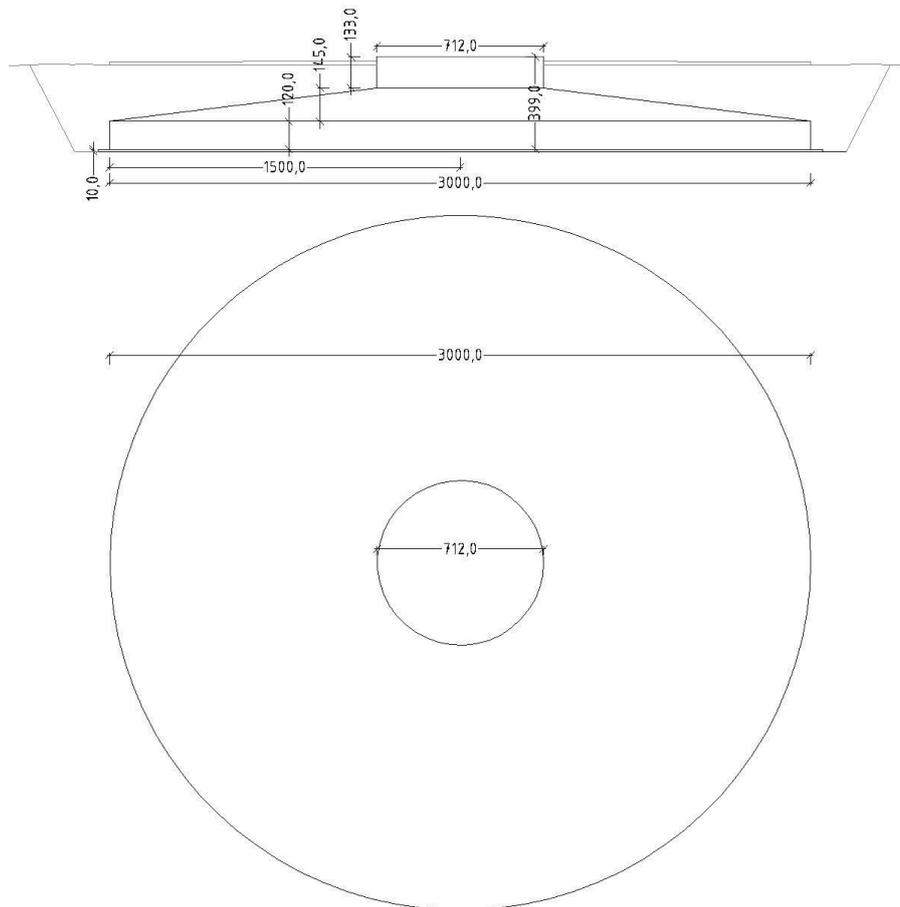


Figura 30 Schema generale della fondazione

11.AZIONI E RESISTENZE NELLE VERIFICHE AGLI STATI LIMITE

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

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

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

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti γ_{G1}

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

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

Il valore di progetto della resistenza R_d può essere determinato:

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

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

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

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

Nello specifico, la normativa evidenzia anche che ...[6.2.5] 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 (§6.4.2)

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

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

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

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

- 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.

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

Approccio 1:

- Combinazione 1: (A1+M1+R1)
- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2:

(A1+M1+R3).

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

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

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

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

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

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

Analogamente, forma, dimensioni e rigidità della struttura di fondazione devono essere stabilite nel rispetto dei 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

Characteristic Extreme								
Lead	LC/Family	PLF	Type	Mbt	Mzt	FndFr	Fzt	Ref
Sensor	[-]	[-]	[-]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[-]
Mbt	14Ecdvraa00(fam89)	1.35	Abs	147900	3222	1142	-6853	[6]
Mzt	23NTMSCHWO100(fam216)	1.35	Abs	43278	-16546	475	-6595	[4]
FndFr	23NTMHCvra00(fam219)	1.35	Abs	112800	3548	1317	-6850	[7]
Fzt	12lceUHWO100(fam70)	1.35	Abs	69281	-1636	509	-7079	[7]

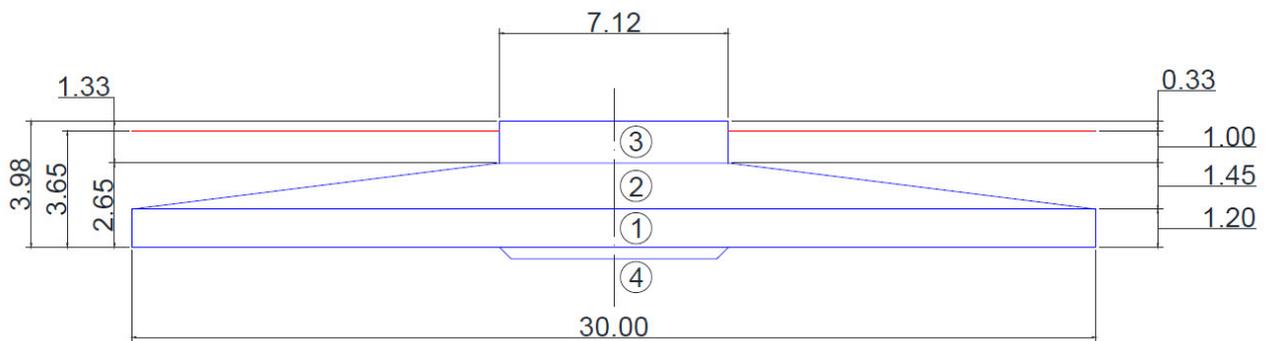
Table 2-1 Characteristic Extreme (excl. PLF). Load cases sorted with PLF.

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

11.5. CARICHI PERMANENTI

I carichi permanenti sono dati dal peso proprio del terreno di ricoprimento, della gabbia di tirafondi e del plinto di fondazione. Dalla relazione di predimensionamento delle fondazioni si evince che: Il peso della fondazione calcolato è pari a 33.902.35 kN, mentre per quanto concerne il terreno di

ricoprimento, per un volume di circa 1250mc, prendendo come riferimento un terreno con peso specifico 1.6000 daN/M3 si ottiene un peso complessivo di 20.000kN.



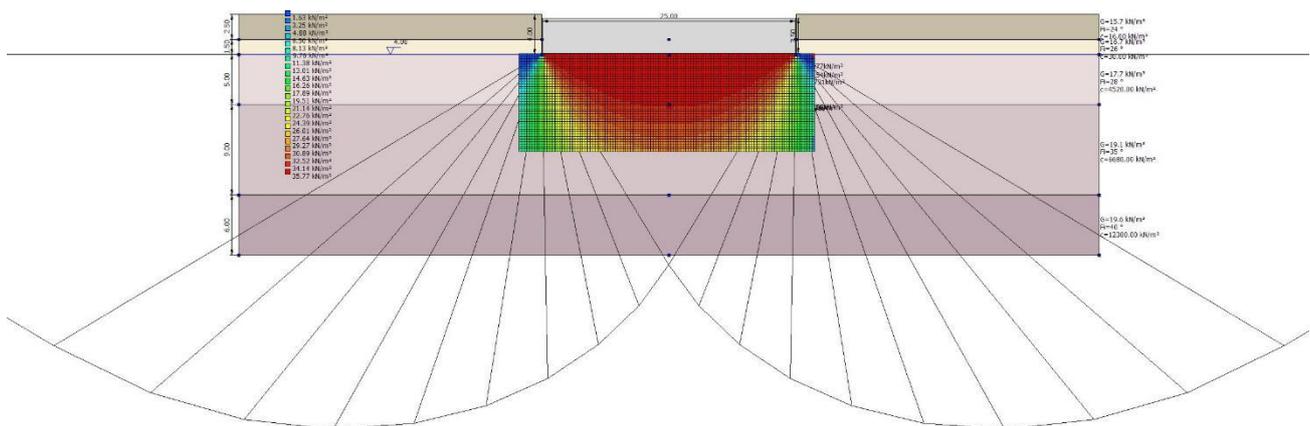
14. MODELLI GEOTECNICI DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE

Le verifiche sono state eseguite sui modelli geotecnici individuati. È stato utilizzato il software Loadcap 2022 della GEOSTRU. La fondazione è stata schematizzata come una piastra circolare dello spessore pari all'altezza della fondazione proposta, 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. È quindi opportuno, in fase esecutiva, disporre un accurato piano di indagini localizzato sulle singole postazioni.

14.1. MODELLO GEOTECNICO 01 - TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08



DATI GENERALI

Normativa	NTC_2018
Zona	Teulada
Lat./ Long. [WGS84]	38.9732933044434/8.72609233856201
Diametro della fondazione	25.0 m
Profondità piano di posa	4.0 m
Profondità falda	4.0
Sottofondazione...Sporgenza, Altezza	0.1/0.1 m
Correzione parametri	

SISMA

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

Coefficiente sismico orizzontale 0.0075

=====

Coefficienti sismici [N.T.C.]

=====

Dati generali

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

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: B
 Categoria topografica: T1

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

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

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

STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore [m]	Peso unità di volume [kN/m ³]	Peso unità di volume saturato [kN/m ³]	Angolo di attrito [°]	Coef- ficiente [kN/m ²]	Coef- ficiente non drenat [kN/m ²]	Modulo Elastico [kN/m ²]	Modulo Edome- trico [kN/m ²]	Poisson	Coeff. consoli- daz. primari [cmq/s]	Coeff. consoli- dazion e second aria	Descriz- ione
2.5	15.69	16.67	24.0	16.0	0.0	91000	0.0	0.33	0.0	0.0	S1
1.5	16.67	17.65	26.0	30.0	0.0	109000	0.0	0.33	0.0	0.0	S2
5.0	17.65	18.63	28.0	4520.0	0.0	190000	0.0	0.0	0.0	0.0	S3
9.0	19.12	19.12	35.0	6680.0	0.0	562000	0.0	0.0	0.0	0.0	S4
6.0	19.61	19.61	40.0	123000	0.0	1177000	0.0	0.0	0.0	0.0	S5

Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazi- one	Pressione normale di progetto [kN/m ²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A2+M2+R2	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Progetto

2	Sisma	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Servizio
4	A(1)+M(2) +R(2)	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Progetto

Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coef. Rid. Capacità portante verticale	Coef.Rid.C apacità 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]	13403.3 kN/m ²
Resistenza di progetto[Rd]	7446.28 kN/m ²
Tensione [Ed]	920.0 kN/m ²
Fattore sicurezza [Fs=Qult/Ed]	14.57
Condizione di verifica [Ed<=Rd]	Verificata

COEFFICIENTE DI SOTTOFONDAZIONE BOWLES (1982)

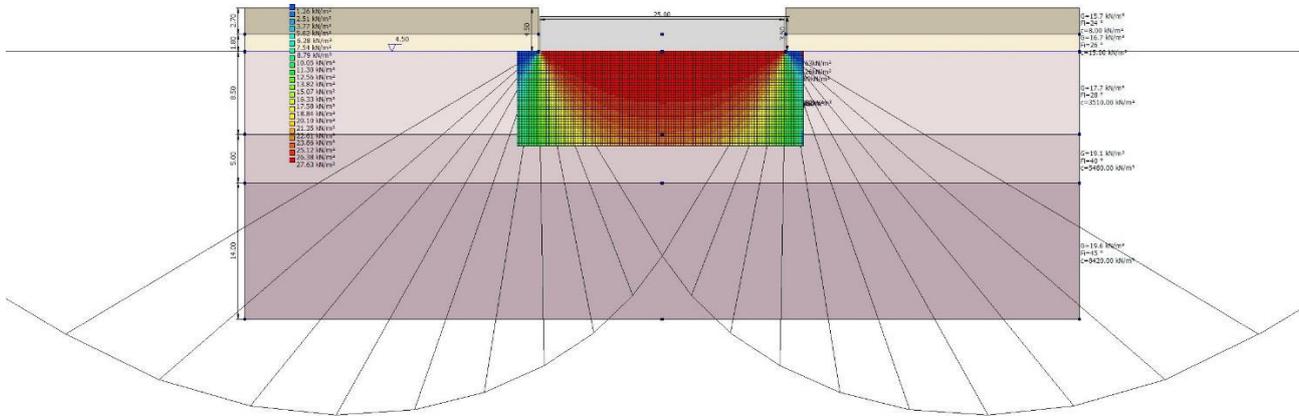
Costante di Winkler 536131.9 kN/m³

CEDIMENTI ELASTICI

Pressione normale di progetto	920.0	kN/m ²
Spessore strato	5.0	m
Profondità substrato roccioso	10.0	m
Modulo Elastico	461000.0	kN/m ²
Coefficiente di Poisson	0.33	
=====		
Coefficiente di influenza I1	0.03	
Coefficiente di influenza I2	0.07	
Coefficiente di influenza Is	0.07	
=====		
Cedimento al centro della fondazione	4.26	mm
=====		
Coefficiente di influenza I1	0.01	
Coefficiente di influenza I2	0.04	
Coefficiente di influenza Is	0.03	
Cedimento al bordo	0.95	mm

14.1. MODELLO GEOTECNICO 02 - TL_07

Si ammette che il piano di posa della fondazione sia a -4,50m da p.c. ovvero che la fondazione poggia sull'orizzonte S3.



DATI GENERALI

=====
 Normativa NTC_2018
 Zona Teulada
 Lat./ Long. [WGS84] 38.9732933044434/8.72609233856201
 Diametro della fondazione 25.0 m
 Profondità piano di posa 4.5 m
 Profondità falda 4.5
 Sottofondazione...Sporgenza, Altezza 0.1/0.1 m
 Correzione parametri
 =====

SISMA

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

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

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

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: B
 Categoria topografica: T1

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

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

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

STRATIGRAFIA TERRENO

Spessore [m]	Peso unità di volume [kN/m ³]	Peso unità di volume saturato [kN/m ³]	Angolo di attrito [°]	Coesione [kN/m ²]	Coesione non drenata [kN/m ²]	Modulo Elastico [kN/m ²]	Modulo Edometrico [kN/m ²]	Poisson	Coeff. consolidazione primaria [cmq/s]	Coeff. consolidazione secondaria	Descrizione
2.5	15.69	16.67	24.0	8.0	0.0	54000	0.0	0.33	0.0	0.0	S1
1.5	16.67	17.65	26.0	15.0	0.0	68000	0.0	0.33	0.0	0.0	S2
5.0	17.65	18.63	28.0	3510.0	0.0	51000	0.0	0.0	0.0	0.0	S3
9.0	19.12	19.12	40.0	5480.0	0.0	499000	0.0	0.0	0.0	0.0	S4
6.0	19.61	19.61	45.0	8420.0	0.0	2181000	0.0	0.0	0.0	0.0	S5

Carichi di progetto agenti sulla fondazione

Nr.	Nome combinazione	Pressione normale di progetto [kN/m ²]	N [kN]	Mx [kN·m]	My [kN·m]	Hx [kN]	Hy [kN]	Tipo
1	A2+M2+R2	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Progetto
2	Sisma	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Progetto
3	S.L.E.	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Servizio
4	A(1)+M(2) +R(2)	920.00	7079.00	16546.00	147900.00	1317.00	0.00	Progetto

Sisma + Coeff. parziali parametri geotecnici terreno + Resistenze

Nr	Correzione Sismica	Tangente angolo di resistenza al taglio	Coesione efficace	Coesione non drenata	Peso Unità volume in fondazione	Peso unità volume copertura	Coeff. Rid. Capacità portante verticale	Coeff. Rid. C apacità 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

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. 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.

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.

