

PARCO EOLICO "KERSONESUS"

COMUNE DI TEULADA

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

ELABORAZIONI SIA

Relazione previsionale dell'impatto dovuto alle vibrazioni

Codice elaborato:

TL_SIA_A027

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..... | 1 |
| 1. PREMESSA | 4 |
| 2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 4 |
| 3. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE..... | 5 |
| 4. PROPRIETA' MECCANICHE DEI TERRENI | 10 |
| 4.1. Descrizione del contesto geologico dell'area vasta oggetto di intervento | 10 |
| 4.2. Successione pre-Ordoviciano medio della Zona esterna | 11 |
| 4.2.1. Micascisti ad andalusite ("Scisti di M.Settibalas" Auct.) | 11 |
| 4.2.2. Formazione di Bithia | 11 |
| 4.2.3. Formazione di Nebida..... | 12 |
| 4.2.4. Formazione di gonnesa | 13 |
| 4.2.5. Formazione di Cabitza..... | 15 |
| 4.3. Complesso plutonico del Carbonifero superiore-Permiano | 17 |
| 4.3.1. Leucograniti equigranulari e leucograniti a granato | 17 |
| 4.4. Corteo filoniano | 18 |
| 4.5. Depositi Quaternari dell'area continentale | 18 |
| 5. CAMPAGNA DI INDAGINI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E SISMICA..... | 24 |
| 5.1. Generalità sul metodo sismico a rifrazione..... | 25 |
| 5.2. Indagini sismiche: MASW | 26 |
| 5.2.1. Specifiche delle indagini svolte..... | 27 |
| 5.2.2. Caratteristiche della strumentazione impiegata | 28 |
| 5.2.3. Elaborazione dei dati..... | 28 |
| 5.2.4. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018) | 29 |
| 5.3. Risultati delle indagini del sito TL_SISM_01-TURBINA TL02..... | 31 |
| 5.3.1. M1-TL_SISM_01-TL02: MASW..... | 31 |
| 5.4. RISULTATI DELLE INDAGINI SITO TL_SISM_02-TURBINA TL05..... | 33 |
| 5.4.1. M2- TL_SISM_02-TL05: MASW | 33 |
| 5.5. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_03-TURBINA TL07 | 35 |
| 5.5.1. M3-TL_SISM_03-TL07: MASW..... | 35 |
| 5.5.2. Modello Geologico 01 – TL_A, TL_02, TL_03, TL_05, TL_06, TL_08..... | 36 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.5.3. | Modello Geologico 02 –TL_07..... | 38 |
| 5.6. | Tabella di sintesi delle proprietà di sintesi dei terreni di interesse..... | 40 |
| 6. | PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO..... | 41 |
| 7. | MODELLO DI PROPAGAZIONE DELL'ONDA NEL TERRENO | 44 |
| 8. | VALUTAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI..... | 44 |
| 9. | SORGENTI DI VIBRAZIONE..... | 45 |
| 9.1. | Analisi della fase di cantiere per la costruzione delle opere in progetto..... | 46 |
| 9.2. | Potenziale incremento dei flussi di traffico indotto dal cantiere sulla viabilità locale..... | 46 |
| 9.3. | Modello per il calcolo dell'impatto dovuto alle vibrazioni in fase di cantiere | 47 |
| 9.4. | Scenari di riferimento di cantiere | 48 |
| 9.5. | Scenari di riferimento di esercizio | 49 |
| 9.6. | Limiti di riferimento | 49 |
| 9.7. | Recettori..... | 52 |
| 9.8. | Spettri di emissione delle macchine operatrici..... | 53 |
| 9.8.1. | Propagazione delle vibrazioni di un rullo vibrante | 53 |
| 9.8.2. | Propagazione delle vibrazioni di una pala cingolata | 54 |
| 9.8.3. | Propagazione delle vibrazioni di un autocarro | 55 |
| 9.8.4. | Propagazione delle vibrazioni di un escavatore cingolato..... | 56 |
| 9.8.5. | Propagazione delle vibrazioni di un martello idraulico | 57 |
| 10. | MODALITÀ DI GESTIONE DEL DISTURBO DOVUTO ALLE VIBRAZIONI..... | 58 |
| 10.1. | Criteri di azione e misure di mitigazione..... | 58 |
| 11. | CONCLUSIONI..... | 60 |

INDICE DELLE FIGURE

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Figura 1 | Localizzazione del progetto | 5 |
| Figura 2 | Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione..... | 6 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 6,2MW | 8 |
| Figura 4 Schema tettonico-strutturale della Sardegna | 10 |
| Figura 5 Affioramento roccioso del Membro di Mattoppa (NEB1) a SE della TL_02..... | 13 |
| Figura 6 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnese. GNN2 | 14 |
| Figura 7 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnese..... | 15 |
| Figura 8 Affioramento degli Scisti di Cabitza..... | 16 |
| Figura 9 Leucograniti dell'unita Intrusiva di Villacidro | 17 |
| Figura 10 Affioramento di porfidi granitici nei pressi della TL_07 | 18 |
| Figura 11 Depositi di versante, alla base granitoidi alterato (VLD) | 19 |
| Figura 12 Coltri eluvio-colluviali, alla base Membro di Mattoppa (NEB) | 20 |
| Figura 13 Stralcio carta geologica (Fonte RAS)..... | 21 |
| Figura 14 Faglia a basso angolo nei pressi della TL_03..... | 23 |
| Figura 15 Blande pieghe a scala decimetrica nei pressi della TL_02..... | 23 |
| Figura 17 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche | 32 |
| Figura 18 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche | 34 |
| Figura 19 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche | 36 |
| Figura 20 - Curva di ponderazione asse generico | 42 |
| Figura 21 - Tipologia di onde: a) e b) onde di volume, c) e d) onde di superficie | 43 |
| Figura 22 - rapporto tra le velocità di propagazione V_p e V_r | 43 |
| Figura 23 Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza..... | 50 |
| Figura 24 Sistema cartesiano di riferimento per persona sdraiata, in piedi o seduta..... | 50 |
| Figura 25 Curva di ponderazione per un asse generico - UNI 9614 | 51 |
| Figura 26 Valori Limite di riferimento per vibrazioni di breve durata e permanenti (9916/2014) | 52 |
| Figura 27 Spettro di emissione della sorgente di un rullo vibrante a 10mdall'asse di cantiere..... | 53 |
| Figura 28 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni | 53 |
| Figura 29 Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata a 10mdall'asse di cantiere..... | 54 |
| Figura 30 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni | 54 |
| Figura 31 Spettro di emissione della sorgente di un autocarro 10mdall'asse di cantiere | 55 |
| Figura 32 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni | 55 |
| Figura 33 Spettro di emissione della sorgente di un escavatore cingolato 5m dall'asse di cantiere..... | 56 |
| Figura 34 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni | 56 |
| Figura 35 Spettro di emissione della sorgente di un martello idraulico 5mdall'asse di cantiere | 57 |
| Figura 36 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni | 57 |
| Figura 37 Distanze di sicurezza per le vibrazioni nei vari scenari..... | 61 |

1. PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del procedimento di **Valutazione d'Impatto Ambientale** ai sensi del Decreto Legislativo numero 152 del 2006, e di Autorizzazione Unica Regionale ai sensi dell'articolo 12 del Decreto Legislativo numero 387 del 2003 e del D. G. R. 3/15 del 23 Gennaio 2018. La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione agli effetti delle vibrazioni deve consentire di individuare e stimare le modifiche e/o le interferenze introdotte dall'intervento proposto e valutarne la compatibilità con gli standard esistenti, in riferimento alla verifica sia del disturbo da esse potenzialmente generate sull'uomo, sia di un eventuale potenziale danno agli edifici, per la salvaguardia del patrimonio architettonico/archeologico.

Il presente documento tecnico riporta la valutazione previsionale dei livelli di vibrazione previste, durante le fasi di cantiere, sui ricettori sensibili più vicini alle aree di installazione degli aerogeneratori del Parco Eolico e alla viabilità interessata, nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "**KERSONESUS**" dislocato nel territorio comunale di Teulada - Provincia del Sud Sardegna (SU) e sulla viabilità laddove sono previste lavorazioni (es. posa del cavidotto o realizzazione ex-novo/adeguamento stradale).

La stima dei livelli di vibrazione attesi presso i ricettori sensibili identificati secondo quanto indicato nella normativa vigente all'area di progetto ed il loro confronto con i limiti vibrazionali sono stati eseguiti secondo le prescrizioni, le indicazioni e le modalità contenute nelle normative tecniche vigenti.

La vibrazione prodotta da macchine e strumenti di cantiere, nel seguito definite **sorgenti**, si propaga attraverso il substrato geologico che su di essa agisce operando un filtraggio in funzione della **natura geolitologica** dei terreni e si attenua con l'aumentare della **distanza dai recettori**.

La vibrazione, quindi, arriva ad interagire con le fondazioni delle strutture edificate e tale interazione dipende dal tipo di fondazione, dal tipo di costruzione e dal suo stato di conservazione.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

In Italia non esiste ancora una normativa specifica di settore, pertanto, la presente è redatta facendo riferimento a normativa UNI ed ISO con particolare riferimento a:

- **UNI 9614/2017** "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
- **UNI 9916/2014** "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni negli edifici";
- **ISO 2631-2:2003** Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)

3. 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".

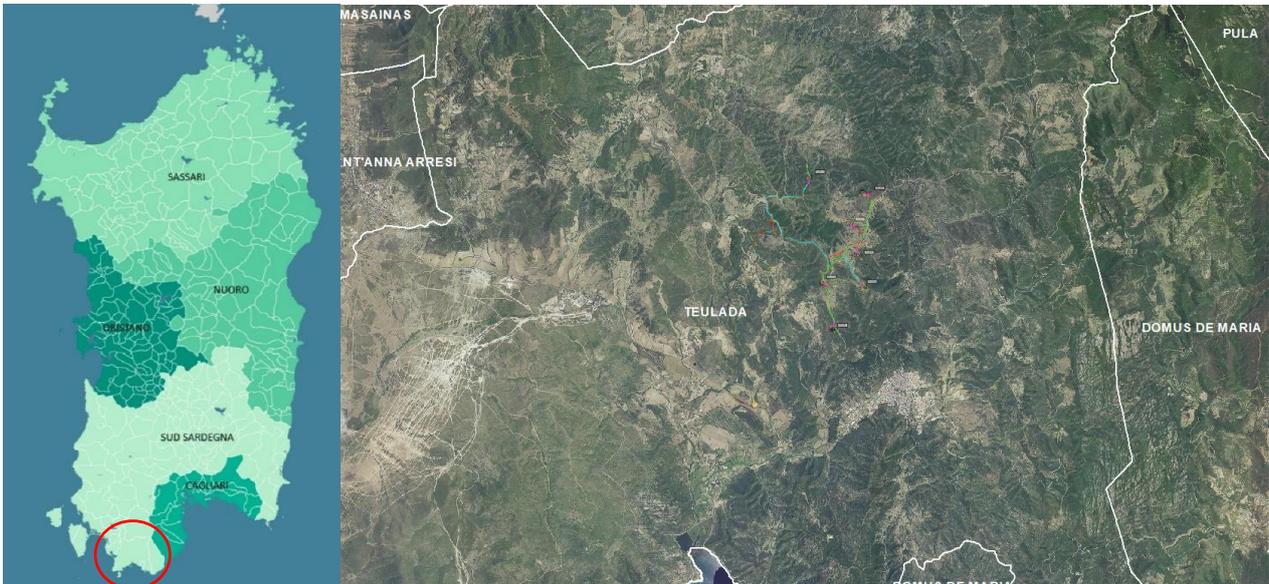


Figura 1 Localizzazione del progetto

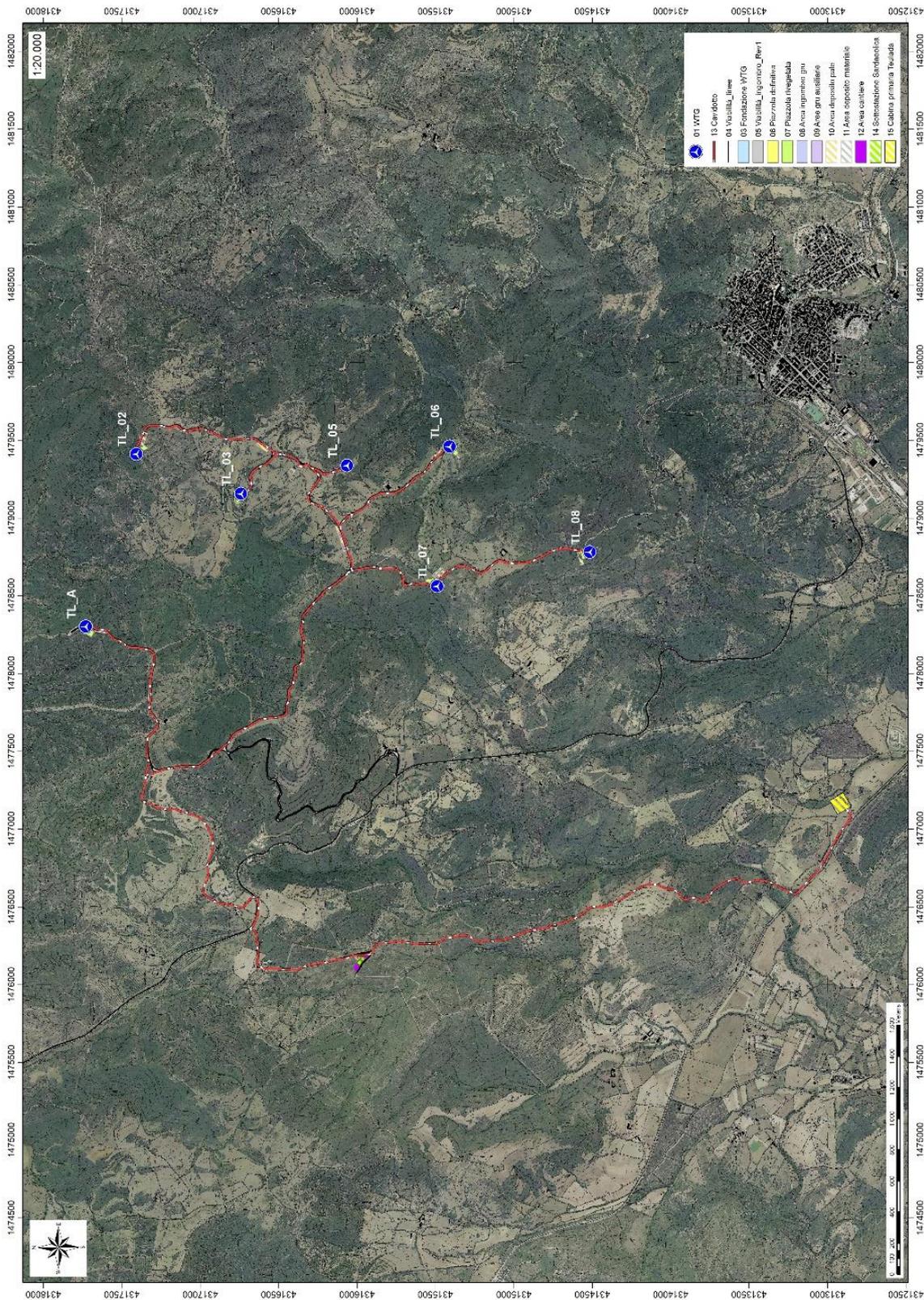


Figura 2 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.

Dott.ssa Geol.
COSIMA ATZORI



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

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA SARDEGNA
Sezione A n°656

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

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.

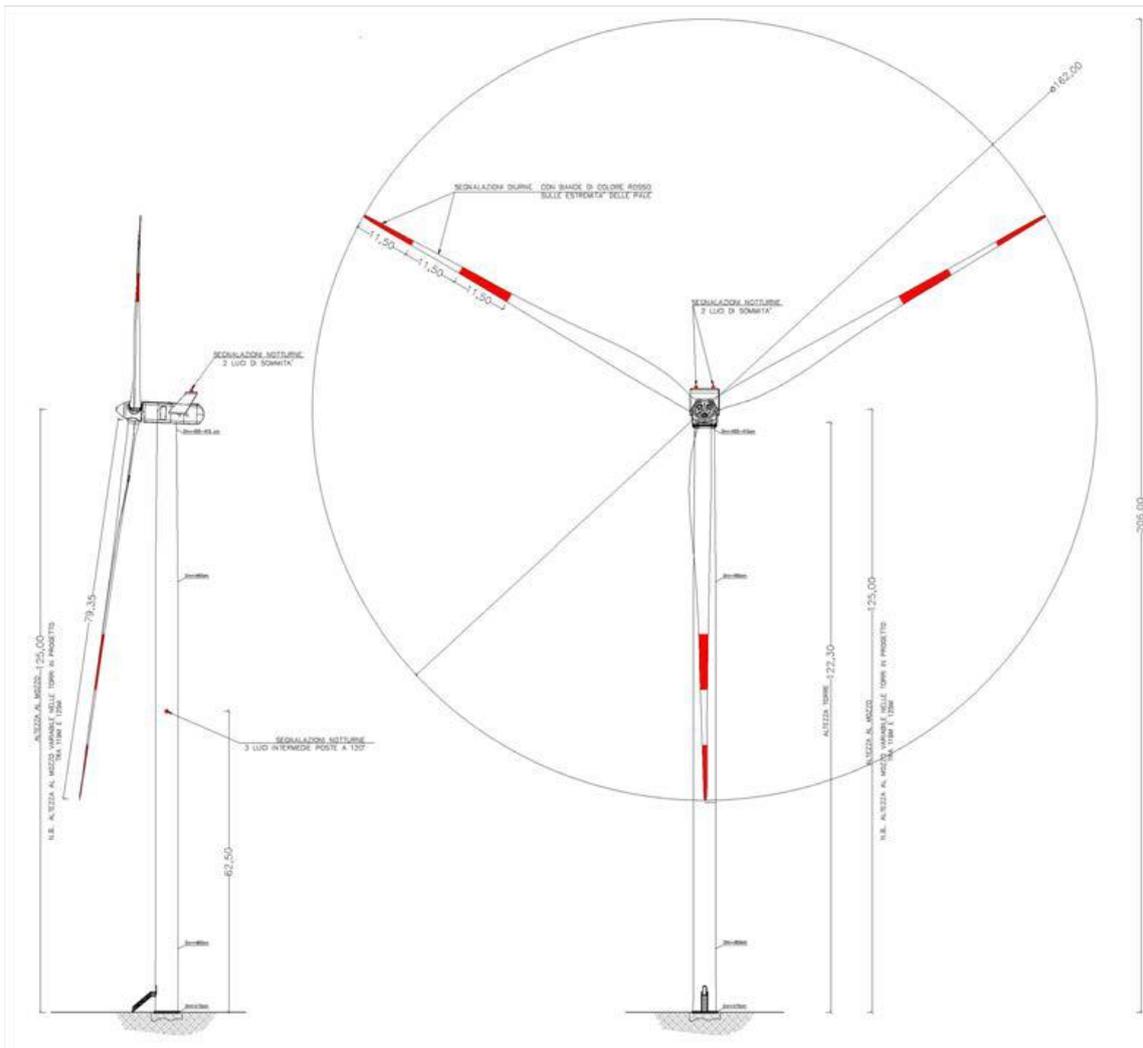


Figura 3 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 6,2MW

| 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:

- 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.

4. PROPRIETA' MECCANICHE DEI TERRENI

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

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

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

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

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

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

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

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

L'area di studio ricade 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

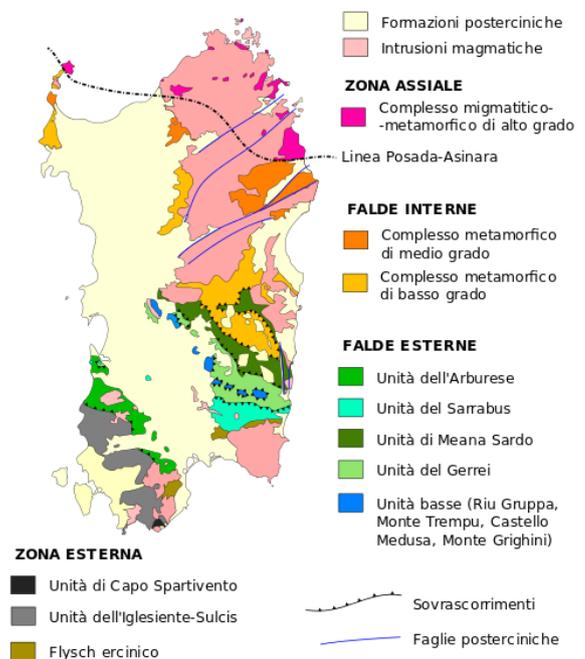


Figura 4 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

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 Gonnesa, 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.

4.2. SUCCESSIONE PRE-ORDOVICIANO MEDIO DELLA ZONA ESTERNA

4.2.1. 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.

4.2.2. 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.

4.2.3. 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 5 Affioramento roccioso del Membro di Mattoppa (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.

4.2.4. FORMAZIONE DI GONNESA

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 metacalcari ben stratificati, caratterizzati da ripetizioni cicliche di facies costituite da originari:

a) fanghi carbonatici stratificati; b) stromatoliti laminate; c) stromatoliti laminate con pseudomorfi di gesso o anidride; d) pisoliti vadose e/o brecce da disseccamento; localmente sono presenti livelli



Figura 6 Membro del Calcare Ceroide,
Formazione di Gonnese. GNN2

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 metacalcari 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 Calcare ceroide permette di riferire l'intera Formazione di Gonnese al Cambriano inferiore.



Figura 7 Membro del Calcare Ceroide, Formazione di Gonnessa.

4.2.5. FORMAZIONE DI CABITZA

Questa formazione affiora nell'Iglesiente-Sulcis ed è stata suddivisa in due membri che dal basso sono: a) Calcare 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 Calcare nodulare poggia con contatto netto sul Calcare ceroide, localmente tramite una breccia ad elementi di Calcare 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, metacalcri grigi e rosati con struttura nodulare e marne giallastre. Gandin all'interno di questo membro distingue tre litofacies: a) metacalcri massivi, ben stratificati con porzioni a lamine (prevalentemente wackestone-packstone); b) metacalcri nodulari più o meno marnosi e ricchi di resti fossili; c) alternanze di metacalcri ed originarie marne.

I metacalcri 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 Calcare 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 Calcare 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 Calcare 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 8 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.

4.3. COMPLESSO PLUTONICO DEL CARBONIFERO SUPERIORE-PERMIANO

4.3.1. LEUCOGRANITI EQUIGRANULARI E LEUCOGRANITI A GRANATO

I leucograniti affiorano diffusamente in tutti i settori del basamento sardo. Si contraddistinguono per l'omogeneità composizionale 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 9 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 ololeucocrata derivante dalla quasi totale assenza della biotite e per la tessitura in genere isotropa, ma talvolta anche orientata.

4.4. 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 10 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 femici 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).

4.5. 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 11 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 12 Coltri eluvio-colluviali, alla base Membro di Mattoppa (NEB)

(b) Depositi alluvionali: Si tratta di materiali che si rinvergono 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).

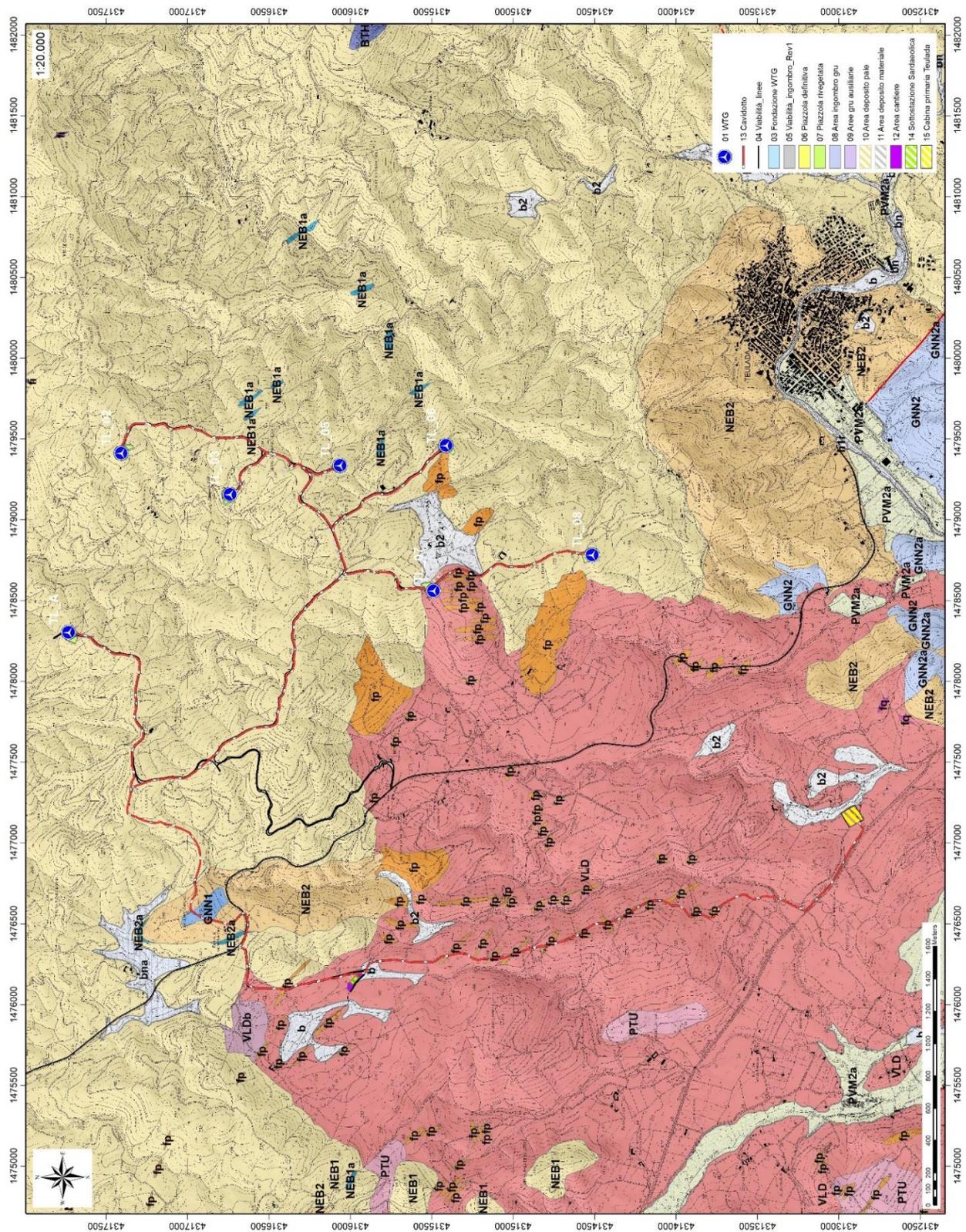


Figura 13 Stralcio carta geologica (Fonte RAS)

Le strutture delle litologie su cui ricade il parco eolico sono riconducibili a diversi eventi che caratterizzano la storia della Sardegna meridionale, le evidenze più antiche dei quali risalgono alla tettonica plicativa caledoniana (Fase sarda) è testimoniata nel Sulcis e nell'Iglesiente da una discordanza angolare tra le formazioni del Cambriano - Ordoviciano Inferiore e quelle dell'Ordoviciano Superiore. La Fase sarda si manifesta con deboli deformazioni caratterizzate da pieghe cilindriche a largo raggio di curvatura, di direzione assiale E-W, non riconoscibili alla scala dell'affioramento per la sovrapposizione sia delle pieghe coassiali E-W della I fase ercinica, sia di quelle di direzione N-S della II fase ercinica principale. La prima fase Ercinica (F1) di più debole entità, caratterizzata da pieghe cilindriche a grande raggio di curvatura che si sovrappongono alle strutture di direzione assiale E-W della Fase caledoniana. Queste strutture, prive di scistosità, non sono molto evidenti anche perchè la fase N-S (fase ercinica principale) le ha deformate profondamente. La presenza di strutture E-W erciniche è plausibile sia per considerazioni di carattere regionale, sia per la forte immersione assiale verso N (50° - 70°) delle pieghe erciniche della fase N-S. I dati strutturali indicano che le suddette strutture si siano formate a partire da superfici già inclinate verso N, corrispondenti al fianco settentrionale della grande struttura di Nuxis-Santadi-Teulada, con a nucleo le metarenarie della formazione di Nebida. La seconda fase deformativa Ercinica, strutturalmente la più importante poiché ha determinato il raccorciamento maggiore, è caratterizzata da pieghe isoclinali e subisoclinali di direzione assiale N-S di ampiezza variabile (con deviazioni di direzione NW-SE e talora coricate verso W), e da una foliazione di piano assiale (S2) ben sviluppata che nei litotipi siltitici e pelitici rappresenta l'anisotropia planare più evidente alla scala dell'affioramento. Da un punto di vista regionale le strutture prodottesi durante questa II Fase ercinica (fase principale) hanno una taglia minore rispetto alle pieghe E-W della I Fase ercinica, ma le loro caratteristiche rivelano raccorciamenti più importanti. Nei livelli a minore competenza si generano pieghe chiuse accompagnate da una caratteristica scistosità ("scistosità trasversale" Auct.) di direzione prevalente circa N-S. La tettonica tardo-ercinica o post-collisionale (F3) dell'area di studio, come quella di tutta la Zona esterna, è caratterizzata da eventi deformativi minori rispetto a quelli della II Fase N-S che hanno prodotto raccorciamenti modesti, con piegamenti di direzione e stile variabile come kink, pieghe a scatola e a chevron, con assi di direzione N 70° e N 120° ed immersione variabile tra 15° e 30° . Il clivaggio (fracture cleavage e crenulation cleavage) è sviluppato soprattutto nelle parti più profonde delle successioni, in modo discontinuo, ed in funzione dei litotipi e della posizione entro le strutture maggiori. Talora sono presenti pieghe simili o subisoclinali. Anche se regionalmente non si sono prodotti effetti vistosi, localmente sono notevoli le complicazioni tettoniche.



Figura 14 Faglia a basso angolo nei pressi della TL_03.



Figura 15 Blande pieghe a scala decimetrica nei pressi della TL_02.

5. CAMPAGNA DI INDAGINI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E SISMICA

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' 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 |
| M2-TL_SISM_02-TL05 | MASW | NW-SE | 69,0 |
| M3-TL_SISM_03-TL07 | MASW | SE-NW | 69,0 |

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

5.1. GENERALITÀ SUL METODO SISMICO A RIFRAZIONE

Il metodo sismico a rifrazione studia la velocità di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo quando il terreno è sottoposto a sollecitazioni artificiali. La determinazione delle velocità si ottiene misurando i tempi di primo arrivo delle onde sismiche generate in diversi punti sulla superficie topografica. Operativamente i profili sismici si eseguono disponendo sul terreno una serie di sensori (geofoni), posti ad un intervallo costante, collegati ad un sismografo mediante un cavo multipolare. Dopo l'allestimento del dispositivo di ricezione si provvede a generare artificialmente vibrazioni impulsive in corrispondenza di punti prestabiliti lungo i profili: Nello stesso istante di partenza della vibrazione viene trasmesso al sismografo il comando di avvio della registrazione (trigger). Da questo istante inizia l'acquisizione digitale, con campionamento ad intervallo costante e predeterminato, dei segnali ricevuti dai sensori. L'interpretazione dei segnali e la ricostruzione del profilo di velocità delle onde P consiste di almeno due fasi ben distinte, e cioè l'interpretazione dei sismogrammi e l'interpretazione dei diagrammi tempi-istanze (dromocrone).

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

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

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

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

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

Con questa tecnica il sottosuolo viene suddiviso in elementi finiti di forma quadrata e di dimensioni estremamente piccole (dell'ordine di grandezza di decimetri) un software specifico, (nel nostro caso

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

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

5.2. 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.

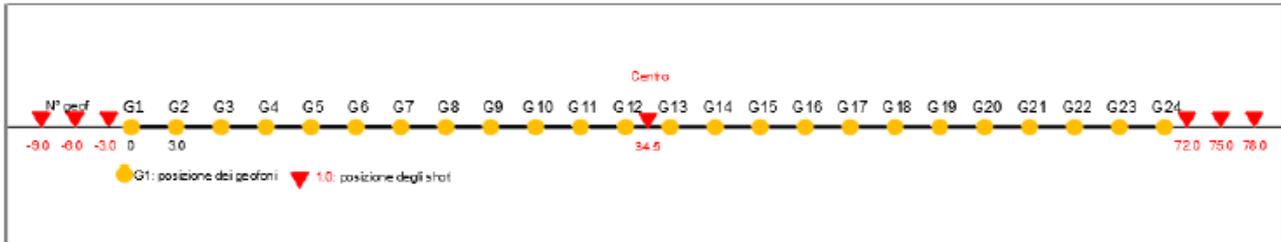
5.2.1. SPECIFICHE DELLE INDAGINI SVOLTE

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



5.2.2. 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..

5.2.3. 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.

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

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

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

con:

h_i spessore dell' i -esimo strato;

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

N numero di strati;

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

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

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

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

| Categoria | Descrizione |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</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. |

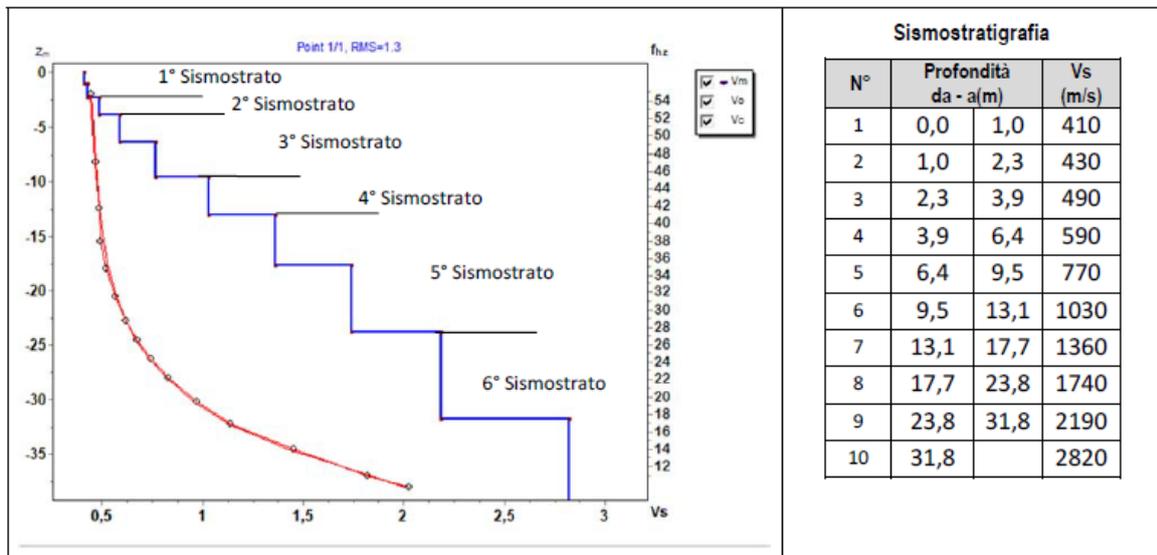
5.3. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_01-TURBINA TL02

5.3.1. 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 Vs 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 Vs..

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

MASW M1-TL_SISM_01-TL02 - PROFILO Vs



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

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

con:

hi spessore dell’i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **9,5 m** (Vs>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: **Vs 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 16 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

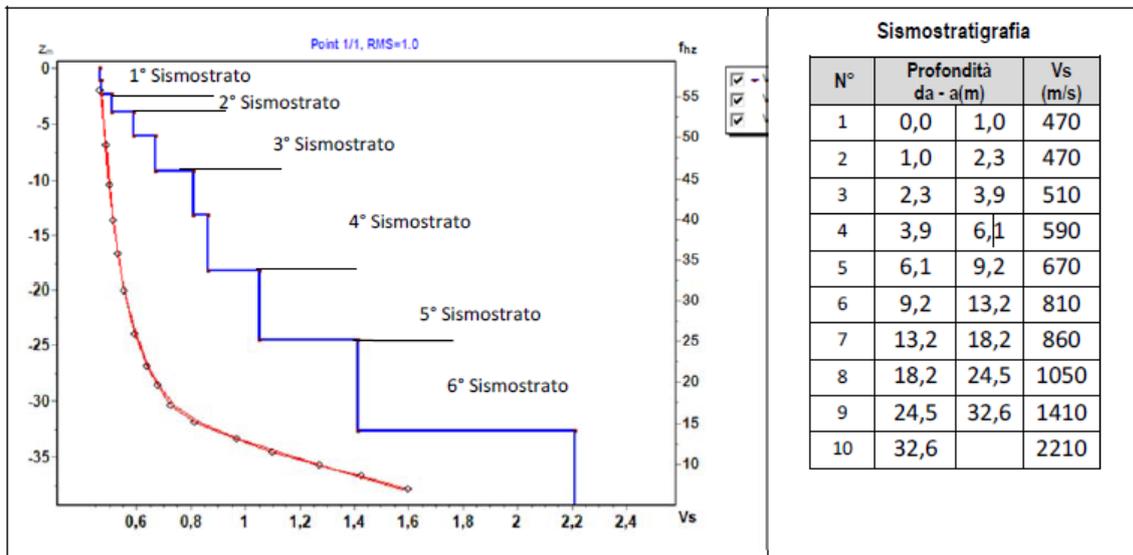
5.4. RISULTATI DELLE INDAGINI SITO TL_SISM_02-TURBINA TL05

5.4.1. 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, 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 **9,2 m** (Vs>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: **Vs 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 17 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

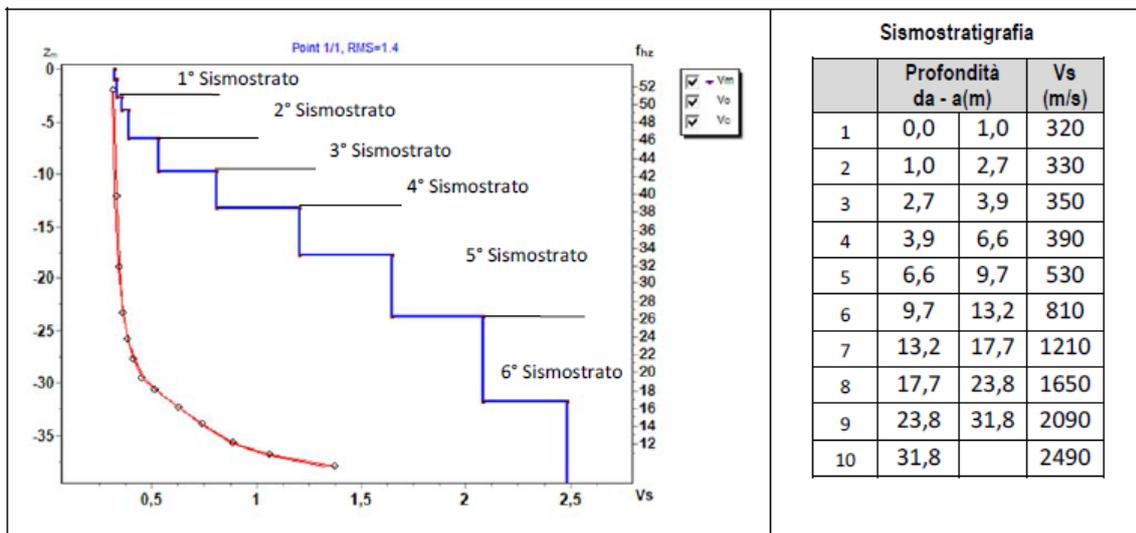
5.5. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO TL_SISM_03-TURBINA TL07

5.5.1. 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:

hi spessore dell’i-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 9,7 m (Vs>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: Vs 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 18 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

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:

5.5.2. 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 ϕ 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.

5.5.3. 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 |

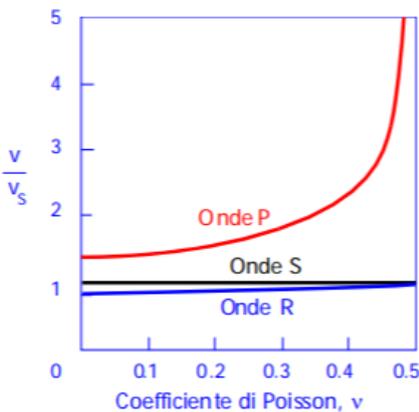
| Teulada - MODELLO GEOLOGICO 02 (TL_07) | | | | | | | |
|-------------------------------------------|---------|-------|-------|------|------|------|--------|
| Dati Parametri Resistenza | | | | | | | |
| Tipo di Terreno | | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 |
| Descrizione | | | | | | | |
| Peso di volume | [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.

5.6. TABELLA DI SINTESI DELLE PROPRIETÀ DI SINTESI DEI TERRENI DI INTERESSE

Di seguito si riporta la stima del valore di V_r (m/sec) in relazione alla misura di V_s effettuata mediante l'indagine geofisica tipo MASW correlate come da schema riportato di fianco:

il rapporto V_p/V_s dipende dal coefficiente di Poisson; in genere la V_r è sempre di poco minore della V_s



per $\nu = 0.25$ $V_R = 0.919 V_S$

$\nu = 0.33$ $V_R = 0.933 V_S$

$\nu = 0.40$ $V_R = 0.943 V_S$

$\nu = 0.50$ $V_R = 0.955 V_S$

Modello Geologico di sito– Profilo sismico M1/M2/M3

Modello geologico 01

| profondità in m (da-a) | V_s (m/sec) | ν | V_r (m/sec) |
|------------------------|------------------|-------|------------------|
| 0,00 – 2,50 | 420 | 0,33 | 392 |
| 2,50 – 4,00 | 490 | 0,33 | 162 |
| 4,00 – 9,00 | 630 | 0,33 | 588 |
| 9,00 – 18,00 | 860 | 0,33 | 802 |
| 18,00 – 24,00 | 1050 | 0,33 | 980 |
| 24,00 – 32,00 | 1810 | 0,33 | 1689 |

Modello geologico 02

| profondità in m (da-a) | V_s (m/sec) | ν | V_r (m/sec) |
|------------------------|------------------|-------|------------------|
| 0,00 – 2,70 | 325 | 0,33 | 303 |
| 2,70 – 4,50 | 350 | 0,33 | 327 |
| 4,50 – 13,00 | 460 | 0,33 | 429 |
| 13,00 – 18,00 | 810 | 0,33 | 756 |
| 18,00 – 24,00 | 1430 | 0,33 | 1334 |
| 24,00 – 32,00 | 2290 | 0,33 | 2137 |

Dott.ssa Geol.

COSIMA ATZORI



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

6. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO

Le caratteristiche dei fenomeni vibratorii che possono interessare un edificio variano in modo sostanziale in funzione della natura della sorgente di eccitazione e delle caratteristiche dinamiche dell'edificio stesso. Per una corretta esecuzione delle misurazioni, premessa necessaria per giungere a descrivere completamente il fenomeno e valutare quindi la possibilità che esso produca danni, è necessario tenere conto dei seguenti fattori:

- meccanismo di eccitazione e trasmissione;
- durata del fenomeno;
- natura deterministica o aleatoria del fenomeno;
- distribuzione spettrale dell'energia.

L'energia immessa nel terreno dalla **sorgente**, quando questa è esterna all'edificio, genera onde "elastiche" che raggiungono la fondazione modificandosi nel loro contenuto spettrale per effetto delle **caratteristiche fisico-meccaniche del terreno** attraversato.

Il fenomeno si traduce, nella generalità dei casi, in un'**attenuazione dell'intensità del moto**, man mano che ci si allontana dalla sorgente, per effetto delle **proprietà dissipative del terreno** e per un effetto geometrico. Usualmente tale fenomeno è più sensibile per le componenti del moto alle alte frequenze e nei terreni incoerenti e di tipo sciolto e dà quindi luogo ad uno spettro (del moto alla base) caratterizzato da un contenuto spettrale più ricco in basse frequenze.

In alcuni casi, quando si è in presenza di condizioni stratigrafiche particolari, possono verificarsi fenomeni di risonanza che tendono ad amplificare alcuni valori spettrali rispetto ad altri.

La norma UNI 9614/2017, che richiama e fa riferimento primario alla ISO 2631-2:2003 prevede di valutare il livello complessivo di accelerazione ponderata nell'intervallo da 1 ad 80 Hz: se il segnale disturbante è caratterizzato da un'emissione concentrata entro una singola banda di 1/3 di ottava, è sufficiente correggere il valore misurato applicando la correzione riportata in Fig. 11 (ad esempio essa vale -19 dB a 50 Hz). Se viceversa lo spettro è continuo ed esteso a più bande, occorre anzitutto calcolare il livello di accelerazione corretto a ciascuna frequenza, indi sommare energeticamente i livelli di accelerazione alle varie frequenze onde ricavare il valore complessivo:

$$L_{acc,w,tot} = 10 \cdot \lg \left[\sum_i 10^{(L_{acc,i} + C_i)/10} \right]$$

Questa metodica rende tuttavia le cose molto complicate in presenza di fenomeni di propagazione che producono un'attenuazione con la distanza che dipende fortemente dalla frequenza. Occorre, infatti, effettuare un calcolo separato della propagazione a ciascuna frequenza, e ricalcolare poi, punto per punto, il livello di accelerazione complessiva ponderata.

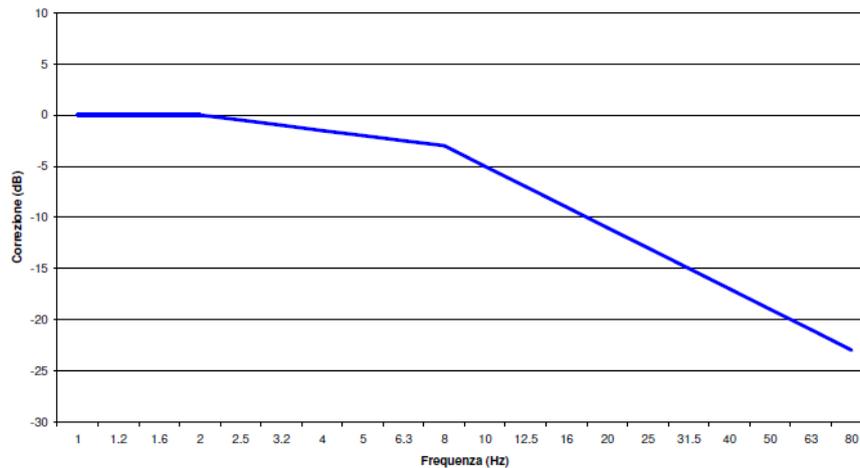


Figura 19 - Curva di ponderazione asse generico

Le vibrazioni si propagano nel terreno circostante, alla zona della sorgente, subendo un'attenuazione dipendente dalla natura del terreno, dalla frequenza del segnale, e dalla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto.

Si deve distinguere tra tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale:

1. Onde di compressione (onda P)
2. Onde di taglio (onda S)
3. Onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L)

I primi due tipi sono onde di volume ("body-waves"), mentre le onde di superficie, come dice il nome, si propagano sull'interfaccia fra due strati con diverse proprietà meccaniche, principalmente quindi sulla superficie di separazione fra terreno ed aria. La seguente figura mostra schematicamente i diversi tipi di onde.

La velocità di propagazione dei diversi tipi di onde non è la stessa: le onde di compressione (onde P) sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie viaggiano con velocità più basse, in dipendenza del valore del modulo di Poisson del terreno. La fig.13 mostra il rapporto fra velocità di propagazione delle onde P ed R riferito alla velocità di propagazione delle onde di superficie S.

Ne consegue che l'onda che maggiormente interagisce con gli elementi strutturali (fondazioni, murature portanti, tramezzi e solai) degli edifici sono le onde di superficie Vr.

Nell'effettuare un calcolo analitico della propagazione di vibrazioni si effettuano diverse ipotesi semplificatrici:

1. si considera il terreno omogeneo e isotropo
2. la propagazione dell'energia vibrazionale avviene sulla superficie del suolo per mezzo di onde di Rayleigh; l'effetto delle onde primarie, secondarie e di Love è trascurato

3. ogni sorgente emette energia vibrazionale in superficie in modo omnidirezionale.

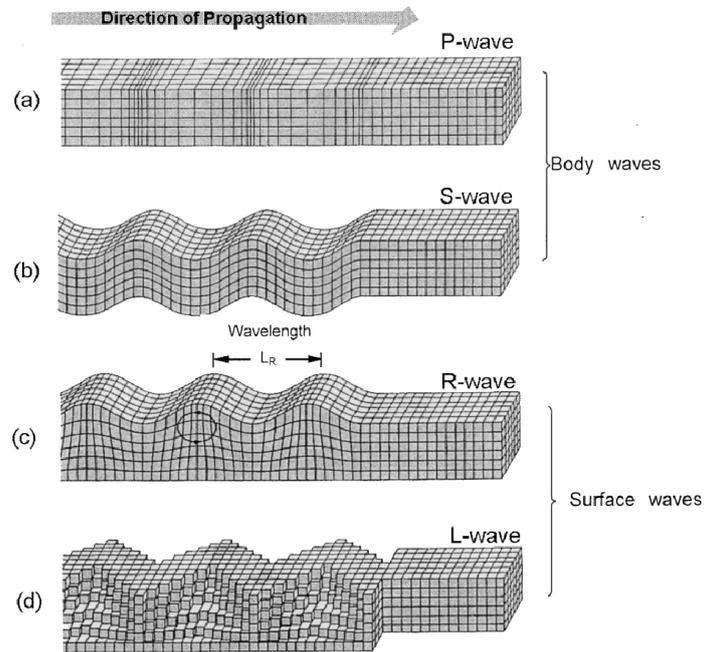


Figura 20 - Tipologia di onde: a) e b) onde di volume, c) e d) onde di superficie

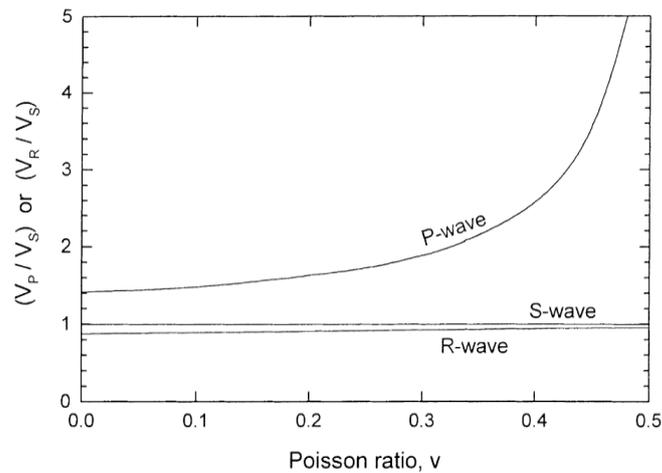


Figura 21 - rapporto tra le velocità di propagazione V_p e V_r

7. MODELLO DI PROPAGAZIONE DELL'ONDA NEL TERRENO

Il modello di propagazione impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) è basato sulla seguente formulazione:

$$a(d, f) = a(d_0, f) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot \eta / c \cdot (d-d_0)}$$

In cui η è il fattore di perdita del terreno, c la velocità di propagazione in m/s, f la frequenza in Hz, d la distanza in m e d_0 la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

L'esponente n è funzione della tipologia di sorgente e dalla profondità. Pertanto, per sorgenti poste in superficie (es. fondazioni superficiali, scavi poco profondi, etc) si assume $n=0,5$ e $n=1$ per sorgenti profonde (fondazioni su pali, perforazioni, etc).

Il fattore di smorzamento o di perdita del terreno η è funzione della natura del terreno ed è in generale pari a 0,1 per sabbie, ghiaie, o simili e 0,01 per gli elementi lapidei.

| Tipo di terreno | η |
|--------------------------|----------|
| Roccia | 0.01 |
| Sabbia, ghiaia, ciottoli | 0.1 |
| Limi, argille | 0.2 -0.5 |

8. VALUTAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI

Sulla base dei dati relativi ai singoli modelli geologici rappresentativi del sito di interesse si sono definiti i valori del fattore di smorzamento η e dell'esponente n di seguito riportati.

Poiché i lavori interesseranno solo gli strati superficiali verranno valutate le vibrazioni prodotte dai mezzi meccanici fino a 2m tenendo conto degli sismostrati rilevati e delle relative velocità V_r calcolate per ognuno di essi.

Modello Geologico di sito– Profilo sismico M1/M2/M3 $v = 0,33$ $V_r = 0,933 V_s$

Modello geologico 01

| profondità in m (da-a) | V_s (m/sec) | v | V_r (m/sec) | η | n |
|------------------------|------------------|------|------------------|--------|-----|
| 0,00 – 2,50 | 420 | 0,33 | 392 | 0.05 | 0.5 |
| 2,50 – 4,00 | 490 | 0,33 | 162 | 0.01 | 0.5 |
| 4,00 – 9,00 | 630 | 0,33 | 588 | 0.01 | 0.5 |
| 9,00 – 18,00 | 860 | 0,33 | 802 | 0.01 | 0.5 |
| 18,00 – 24,00 | 1050 | 0,33 | 980 | 0.01 | 0.5 |
| 24,00 – 32,00 | 1810 | 0,33 | 1689 | 0.01 | 0.5 |

Modello geologico 02

| profondità in m (da-a) | Vs (m/sec) | v | Vr (m/sec) | | |
|------------------------|---------------|------|---------------|------|-----|
| 0,00 – 2,70 | 325 | 0,33 | 303 | 0.05 | 0.5 |
| 2,70 – 4,50 | 350 | 0,33 | 327 | 0.01 | 0.5 |
| 4,50 – 13,00 | 460 | 0,33 | 429 | 0.01 | 0.5 |
| 13,00 – 18,00 | 810 | 0,33 | 756 | 0.01 | 0.5 |
| 18,00 – 24,00 | 1430 | 0,33 | 1334 | 0.01 | 0.5 |
| 24,00 – 32,00 | 2290 | 0,33 | 2137 | 0.01 | 0.5 |

Se da una parte la **caratterizzazione geotecnica di dettaglio del sito** ha permesso di risalire con una buona approssimazione al **reale comportamento della propagazione delle onde superficiali** che generano la maggiore componente vibrazionale, allo stato attuale non è possibile effettuare **misure dirette sulle configurazioni di cantiere** previste (macchine e attrezzature) per **l'assenza di mezzi analoghi nel sito di progetto** ma anche in quelli più prossimi e geologicamente simili **assimilabili a quello in progetto**. Le misure su cantieri **non assimilabili** si riferirebbero a contesti non realistici e perciò **non rappresentativi**.

Pertanto, al fine di poter avere un quadro di riferimento della situazione benché non esaustivo per le ragioni appena espresse, verrà effettuata una disamina degli scenari maggiormente impattanti attraverso l'utilizzo di dati di letteratura (ammessa dalla norma – App.C punto C.4) rimandando alla fase esecutiva l'effettuazione di tutte le **misure dirette e relative elaborazioni** da effettuarsi secondo quanto previsto al punto 6 e 8 della UNI 9614/2017.

9. SORGENTI DI VIBRAZIONE

La norma UNI 9614/2017 al punto 5 suddivide le sorgenti per tipologia in funzione di:

1. posizione rispetto agli edifici,
2. funzione,
3. rispetto alle caratteristiche della durata della vibrazione prodotta ovvero in funzione al periodo di attività della sorgente.

Nel caso specifico in studio le sorgenti sono:

1. rispetto alla posizione – **esterne agli edifici**;

2. rispetto alla funzione – **legate ad attività non essenziali e legate ad attività che non possono essere contemplate tra quelle interrompibili con successivi danni ad impianti, pericolo di incidenti e danni a produzioni.**
3. rispetto al periodo di attività della sorgente – **tra le sorgenti temporanee presenti per gran parte della giornata (cantieri).**

9.1. ANALISI DELLA FASE DI CANTIERE PER LA COSTRUZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO

In fase di valutazione previsionale, per quantificare il potenziale impatto delle vibrazioni relativo alla fase di costruzione e di installazione dei generatori si fa riferimento ad un programma di massima delle attività di cantiere ed in particolare alle fasi di lavorazione che possono risultare maggiormente gravose sotto il profilo vibratorio perché, ad esempio, comprendono l'impiego di attrezzature e macchinari che devono funzionare all'aperto.

In particolare, la fase di sbancamento preliminare alla erezione delle torri e di getto di calcestruzzo per costituire le platee ed i basamenti delle torri medesime e la realizzazione della nuova viabilità di servizio costituiscono potenzialmente la fase di attività più importante, senza sottovalutare quella relativa alla movimentazione di attrezzature e mezzi mediante autocarri che andranno ad incidere sulla viabilità. Si prevede infatti l'impiego di escavatori, dumpers, beton-cars, attrezzi ed utensili manuali. Inoltre, il cantiere può indurre un incremento di traffico stradale sulla viabilità locale.

Tali attività non vengono svolte simultaneamente in tutti i siti di installazione degli aerogeneratori, ma vengono compiute un sito per volta ed inoltre, benché la valutazione degli impatti negli scenari a seguire sarà fatta considerando la contemporaneità di attività dei mezzi, questo nella realtà non avviene.

Si prevede che le attività saranno svolte unicamente in periodo diurno ed in normale orario lavorativo e, pertanto, **non si fa riferimento al periodo notturno. Non sono altresì previsti, in questa fase lavorazioni nei giorni festivi.** Tuttavia, se per qualche ragione non prevedibile in questa fase, si dovesse necessariamente lavorare in uno dei periodi sopracitati, verrà messo in atto quanto contenuto nel **Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere** da redigere prima dell'inizio dei lavori.

9.2. POTENZIALE INCREMENTO DEI FLUSSI DI TRAFFICO INDOTTO DAL CANTIERE SULLA VIABILITÀ LOCALE

Per quanto riguarda il traffico indotto dal cantiere, si prevede un flusso di mezzi per il trasporto di materiali, componenti e personale quantificabile in punte di 100-120 transiti giornalieri concentrati per una decina di giorni in occasione dell'approntamento delle materie necessarie alla realizzazione

delle opere fondanti e della struttura degli aerogeneratori, in aggiunta al flusso di traffico locale attualmente presente (poche decine di veicoli/giorno) sulla viabilità di accesso al cantiere.

9.3. MODELLO PER IL CALCOLO DELL'IMPATTO DOVUTO ALLE VIBRAZIONI IN FASE DI CANTIERE

Sulla base del cronoprogramma indicato negli elaborati progettuali con riferimento allo spettro di emissione delle macchine operatrici e dell'incremento previsto nei flussi di traffico stradale, è stato sviluppato un modello di calcolo previsionale dell'impatto della componente vibrazioni da applicare a scenari individuati come rappresentativi delle attività e indicati di seguito, in prossimità dei ricettori maggiormente sensibili.

Sono stati individuati i seguenti scenari maggiormente impattanti dal punto di vista della propagazione di vibrazioni:

Scenario 01 – attività di sistemazione della rete viaria e opere civili sottostazione di trasformazione;

Scenario 02 – attività di posa dei cavidotti;

Scenario 03 – attività di realizzazione delle fondazioni delle torri di supporto;

Gli scenari di calcolo considerano la **contemporaneità nell'utilizzo dei mezzi di cantiere** (condizione più sfavorevole) e le **peggiori condizioni di trasmissione delle vibrazioni dal mezzo substrato** in un orario di lavoro compreso tra le 7:30 e le 13:00 e poi tra le 14:00 e le 16:30.

Il calcolo è stato effettuato utilizzando la regola cosiddetta **SRSS** ovvero **Square Root of the Sum of Squares** che viene utilizzata in presenza di sorgenti multiple. Normalmente i mezzi d'opera non saranno impiegati continuativamente e contemporaneamente. Inoltre, durante l'orario di cantiere è previsto che i macchinari abbiano delle fermate legate alle necessità produttive.

La norma **UNI 9614/2017 prevede che sia considerata periodo diurno la fascia oraria dalle 6.00 alle 22.00** (punto 3.17) e **fissa il limite per la massima accelerazione a 7,2 mm/s²** (punto 9.1).

Altresì nella valutazione del disturbo e sempre cautelativamente, i macchinari verranno considerati posizionati nel punto più vicino al ricettore in relazione all'attività da essi svolta.

Non è tuttavia possibile escludere il verificarsi di eventuali superamenti temporanei dei limiti differenziali solamente in occasione di specifiche o particolari lavorazioni svolte in vicinanza dei ricettori.

In questi casi si deve fare riferimento alla **gestione di attività temporanee (cantieri) in deroga ai limiti massimi** previsti dalla norma **UNI 9614/2017** al punto 9.5 e contenuta nell'**Appendice C** che prevede la stesura del **Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere** da redigere prima dell'inizio dei lavori.

Al fine della valutazione della distanza oltre la quale il valore di vibrazione è inferiore alle soglie limite dettate dalla norma si sono prese in considerazione le caratteristiche geologiche del **modello**

geologico di sito rappresentativo. Gli alti valori di Vs riscontrati in corrispondenza del **modello geologico 01** dovranno essere confermati da precise misure in sito.

Modello geologico 01

| profondità in m (da-a) | Vs (m/sec) | v | Vr (m/sec) | η | n |
|------------------------|---------------|------|---------------|--------|-----|
| 0,00 – 2,50 | 420 | 0,33 | 392 | 0.05 | 0.5 |
| 2,50 – 4,00 | 490 | 0,33 | 162 | 0.01 | 0.5 |
| 4,00 – 9,00 | 630 | 0,33 | 588 | 0.01 | 0.5 |
| 9,00 – 18,00 | 860 | 0,33 | 802 | 0.01 | 0.5 |
| 18,00 – 24,00 | 1050 | 0,33 | 980 | 0.01 | 0.5 |
| 24,00 – 32,00 | 1810 | 0,33 | 1689 | 0.01 | 0.5 |

9.4. SCENARI DI RIFERIMENTO DI CANTIERE

Scenario 01 – attività di sistemazione della rete viaria e opere civili sottostazione di trasformazione: Il modello previsionale utilizzato per la valutazione dell'impatto dovuto a vibrazioni comprende le seguenti macchine operatrici:

1. Pala cingolata
2. Autocarro
3. Rullo vibrante
4. Escavatore

Scenario 02 – attività di posa dei cavidotti: Il modello previsionale utilizzato per la valutazione dell'impatto dovuto a vibrazioni comprende le seguenti macchine operatrici:

1. Escavatore
2. Autocarro

Scenario 03 – attività di realizzazione delle fondazioni e piazzole delle torri di supporto agli aerogeneratori: Il modello previsionale utilizzato per la valutazione dell'impatto dovuto a vibrazioni comprende le seguenti macchine operatrici:

1. Escavatore
2. Martellone idraulico
3. Autocarro
4. Pala cingolata
5. Betoniera*
6. Gru*

| MOD. GEO.03 | Distanza minima oltre la quale il valore di vibrazione è inferiore alla soglia limite di 7,2 mm/sec ² |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Scenario 01 | 167 |
| Scenario 02 | 113 |
| Scenario 03** | 167 |

*Gli spettri di emissione per questi macchinari non sono reperibili in letteratura; pertanto, per la loro valutazione si rimanda alla campagna di misure prevista nel piano di cantierizzazione in fase esecutiva.

** valore indicativo ottenuto senza il contributo di autobetoniera e gru.

9.5. SCENARI DI RIFERIMENTO DI ESERCIZIO

Relativamente alla valutazione del disturbo in fase di esercizio e perciò dovuto a vibrazioni provenienti dal funzionamento degli aerogeneratori, poiché queste vengono totalmente dissipate dai corpi di fondazione non propagandosi nell'ambiente circostante, non si manifestano problematiche legate al disturbo alla persona e/o a eventuali danni alle strutture.

Qualora, in fase di esercizio, si dovesse eseguire un intervento di manutenzione straordinaria che prevede l'utilizzo di macchine operatrici le cui vibrazioni in fase di attività sono potenzialmente impattanti, verrà opportunamente redatto un apposito piano di monitoraggio e si farà riferimento a tutte le direttive previste dalla UNI 9614/2017 all'Appendice C per la gestione degli effetti prodotti da vibrazioni in attività temporanee (cantieri).

9.6. LIMITI DI RIFERIMENTO

Il problema della percezione umana delle vibrazioni in termini di disturbo (annoyance) dipende dalla tipologia di attività svolta e dall'intensità e frequenza che essa genera e che produce la vibrazione. I limiti di riferimento sono riportati dalla norma **UNI 9614/2017** che suddivide gli edifici in base alla loro destinazione d'uso in 5 classi, ipotizzando quindi una differente sensibilità alle vibrazioni e al punto 9, ai fini della valutazione del disturbo dovuto a vibrazioni e indica dei limiti per le accelerazioni con riferimento alla tollerabilità a fenomeni vibratorii.

Di seguito vengono riportati per i diversi tipi di ambiente e per i diversi periodi della giornata i valori limite di disturbo.

| Ricettore | Periodo | Accelerazione ponderata della sorgente (mm/sec ²) |
|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Ambienti ad uso abitativo (punto 9.1) | Diurno | 7,2 |
| | Notturmo | 3,6 |
| | Diurno di giornate festive | 5,4 |
| Luoghi lavorativi (punto 9.2.1) | Non specificato | 14 |
| Ospedali, case di cura ed affini (punto 9.2.2) | Non specificato | 2 |
| Asili e case di riposo (punto 9.2.3) | Limitatamente ai periodi in cui è previsto riposo diurno | 3,6 |
| Scuole (punto 9.2.4) | Limitatamente nel periodo di fruizione | 5,4 |

Figura 22 Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza

La sensibilità umana è variabile con la frequenza, e dipende dall'asse cartesiano considerato rispetto al riferimento relativo al corpo umano. Le curve di sensibilità umana sono codificate dalla norma tecnica UNI 9614/2017, rispetto ai sistemi di riferimento per persone sdraiate, sedute o in piedi, riportato nelle seguenti figure:

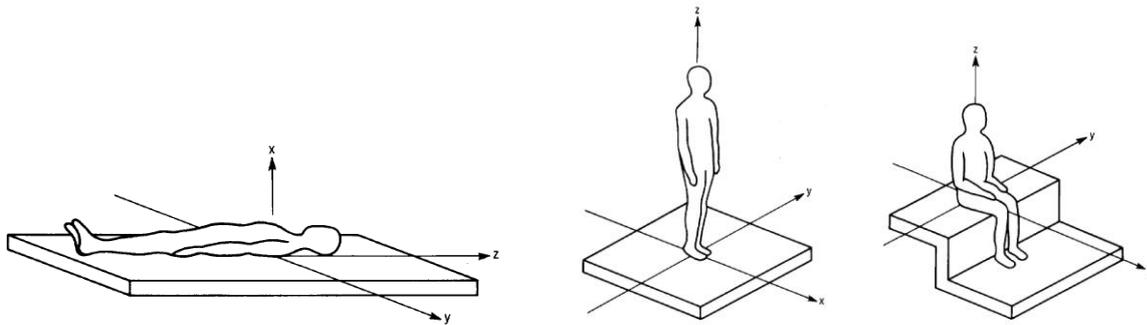


Figura 23 Sistema cartesiano di riferimento per persona sdraiata, in piedi o seduta

Il campo di frequenze considerato è 1÷80 Hz. Al segnale di accelerazione rilevato devono essere applicati per le singole frequenze dei valori di attenuazione (curve di ponderazione) al fine di rendere equivalente la percezione umana alle varie frequenze.

Nel caso considerato, tuttavia, la popolazione si troverà esposta indifferentemente su uno dei tre assi, a seconda della giacitura dei soggetti, che è ovviamente non predeterminale e variabile nel corso delle 24 ore. In tali casi, la norma UNI 9614/2017 prevede l'impiego di una curva di ponderazione per asse generico (o meglio, per asse non definibile), che è riportata nella seguente figura.

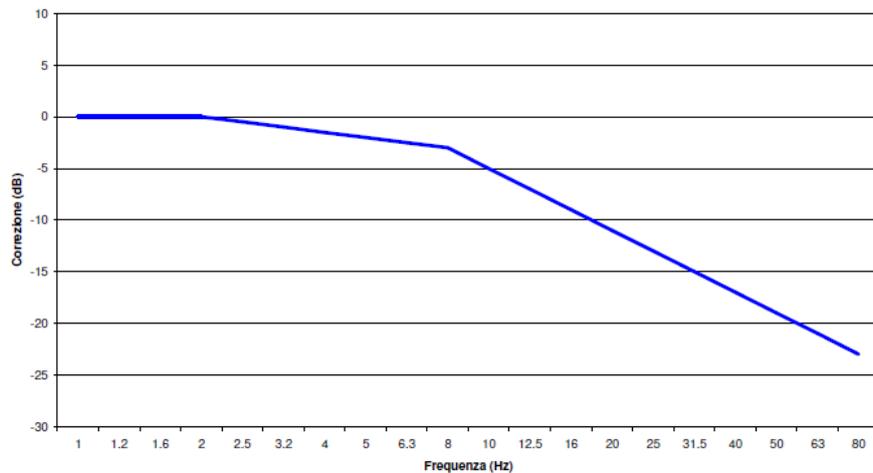


Figura 24 Curva di ponderazione per un asse generico - UNI 9614

Per quanto concerne il danno strutturale i limiti presi in considerazione nella norma UNI 9614/2017, risultano più elevati per almeno un ordine di grandezza a ciascuna frequenza, dei limiti individuati dalla norma UNI 9916/2014 nei riguardi del danno potenziale alle strutture. Ne consegue che la verifica dei limiti secondo la norma 9614/2017 esclude il generarsi di effetti dannosi sulle strutture dei ricettori considerati. **Tuttavia, in fase esecutiva, sarà effettuata una campagna di misure sui fabbricati qualificati come ricettori sensibili secondo quanto previsto dalla norma 9916/2014 ai punti 6,7 e 8.**

Di seguito si riportano i Valori di Riferimento per la valutazione degli effetti delle vibrazioni secondo la DIN 4150 a cui fa riferimento la UNI 9916/2014 al punto 9.

La DIN4150-3 considera 3 classi di edifici:

1. Edifici industriali e ostruzioni strutturalmente simili;
2. Edifici residenziali e costruzioni simili;
3. Costruzioni che non appartengono alle prime due categorie e sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)

E considera due tipi di vibrazione:

1. Vibrazione di breve durata;
2. Vibrazione permanente

prospetto D.1 **Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni**

| Classe | Tipo di edificio | Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s | | | | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| | | Fondazioni | | | Piano alto | Solai Componente Verticale |
| | | Da 1 Hz a 10 Hz | Da 10 Hz a 50 Hz | Da 50 Hz a 100 Hz ^{*)} | Per tutte le frequenze | Per tutte le frequenze |
| 1 | Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili | 20 | Varia linearmente da 20 ($f=10$ Hz) a 40 ($f=50$ Hz) | Varia linearmente da 40 ($f=50$ Hz) a 50 ($f=100$ Hz) | 40 | 20 |
| 2 | Edifici residenziali e costruzioni simili | 5 | Varia linearmente da 5 ($f=10$ Hz) a 15 ($f=50$ Hz) | Varia linearmente da 15 ($f=50$ Hz) a 20 ($f=100$ Hz) | 15 | 20 |
| 3 | Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici) | 3 | Varia linearmente da 3 ($f=10$ Hz) a 8 ($f=50$ Hz) | Varia linearmente da 8 ($f=50$ Hz) a 10 ($f=100$ Hz) | 8 | 3/4 |

*) Per frequenze oltre 100 Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100 Hz.

prospetto D.2 **Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni**

| Classe | Tipo di edificio | Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s (per tutte le frequenze) |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzioni strutturalmente simili | 10 |
| 2 | Edifici residenziali e costruzioni simili | 5 |
| 3 | Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici) | 2,5 |

Figura 25 Valori Limite di riferimento per vibrazioni di breve durata e permanenti (9916/2014)

9.7. RECETTORI

L'analisi dei ricettori è stata effettuata entro un raggio di 1000m dalle aree di cantiere e dalla viabilità di servizio. Successivamente si sono presi in considerazione gli scenari di cantiere maggiormente impattanti e da questi si sono derivate le distanze massime oltre le quali le vibrazioni potenzialmente prodotte non superano i valori soglia dettati dalla norma 9614/2017.

9.8. SPETTRI DI EMISSIONE DELLE MACCHINE OPERATRICI

9.8.1. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN RULLO VIBRANTE

Vengono di seguito riportati i risultati del modello previsionale descritto per un rullo vibrante e per i modelli geologici di riferimento di cui al cap.8.

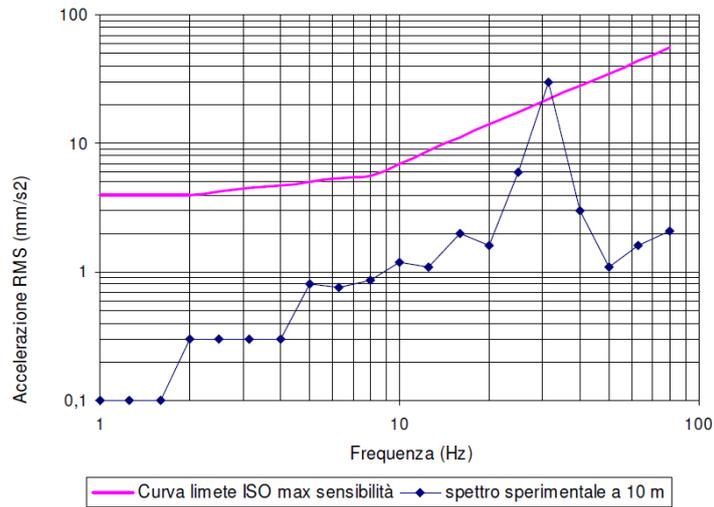


Figura 26 Spettro di emissione della sorgente di un rullo vibrante a 10mdall'asse di cantiere

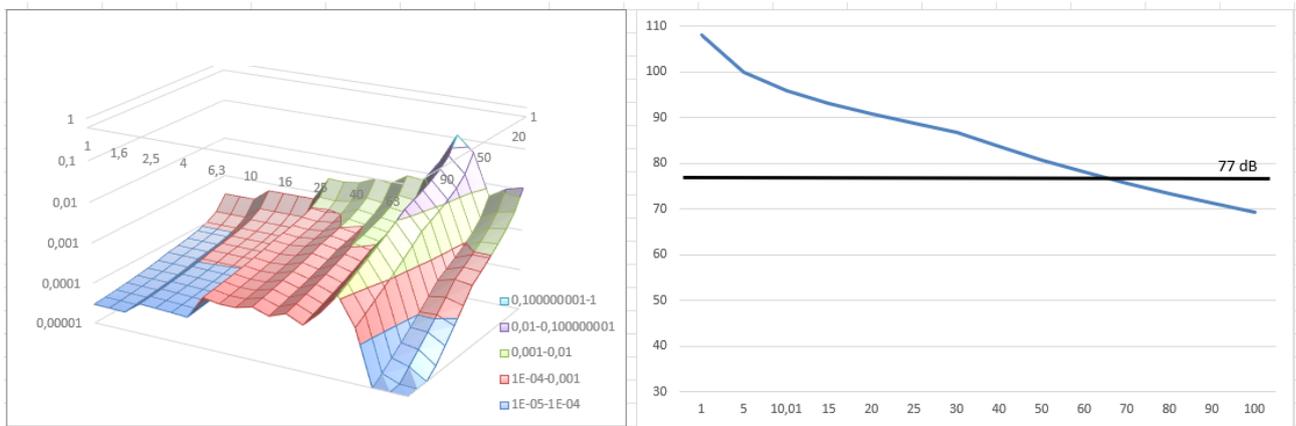


Figura 27 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

9.8.2. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UNA PALA CINGOLATA

Vengono di seguito riportati i risultati del modello previsionale descritto per una pala cingolata e per i modelli geologici di riferimento di cui al cap.8.

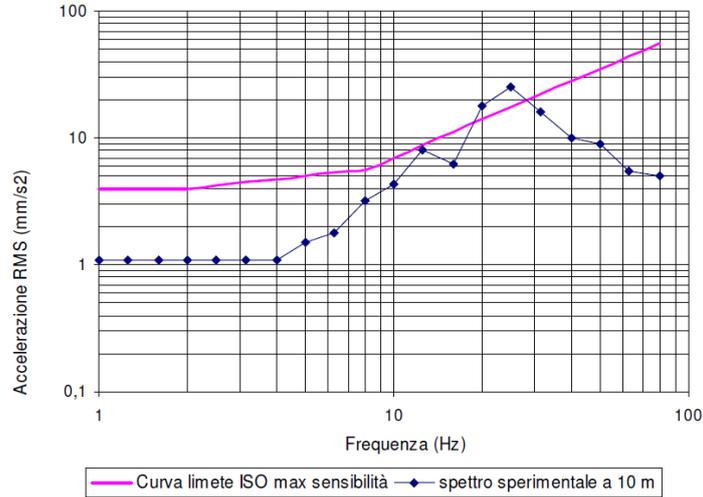


Figura 28 Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata a 10mdall'asse di cantiere

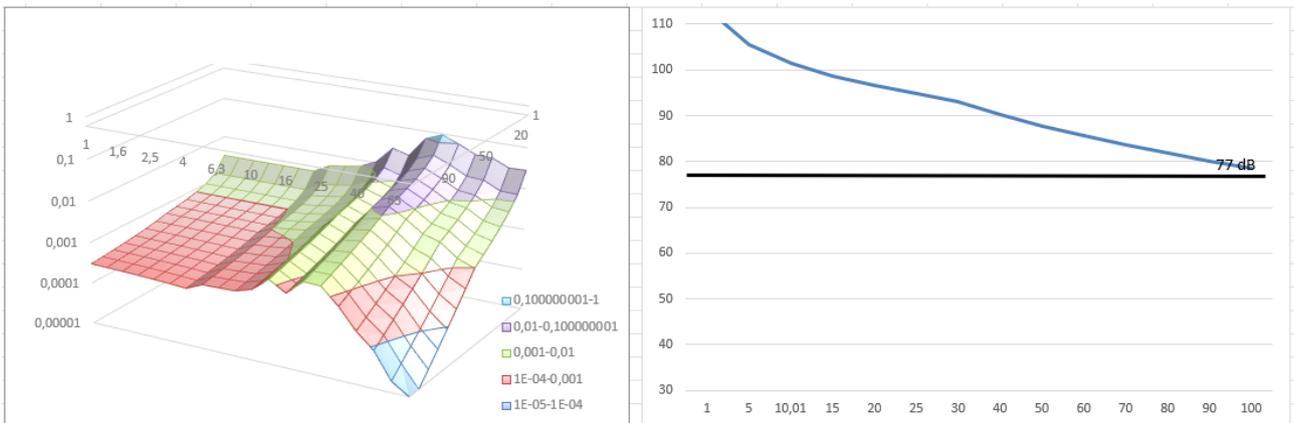


Figura 29 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

9.8.3. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN AUTOCARRO

Vengono di seguito riportati i risultati del modello previsionale descritto per un autocarro e per i modelli geologici di riferimento di cui al cap.8.

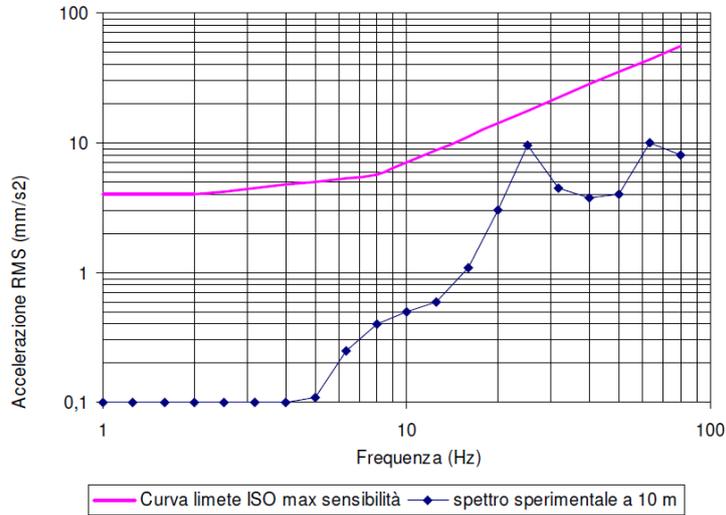


Figura 30 Spettro di emissione della sorgente di un autocarro 10mdall'asse di cantiere

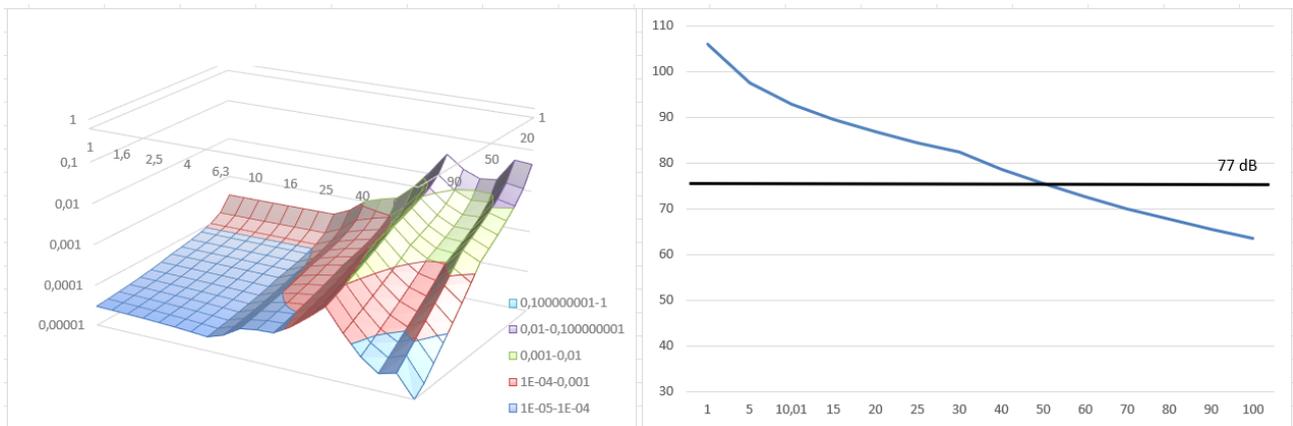


Figura 31 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

9.8.4. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN ESCAVATORE CINGOLATO

Vengono di seguito riportati i risultati del modello previsionale descritto per un escavatore cingolato e per i modelli geologici di riferimento di cui al cap.8.

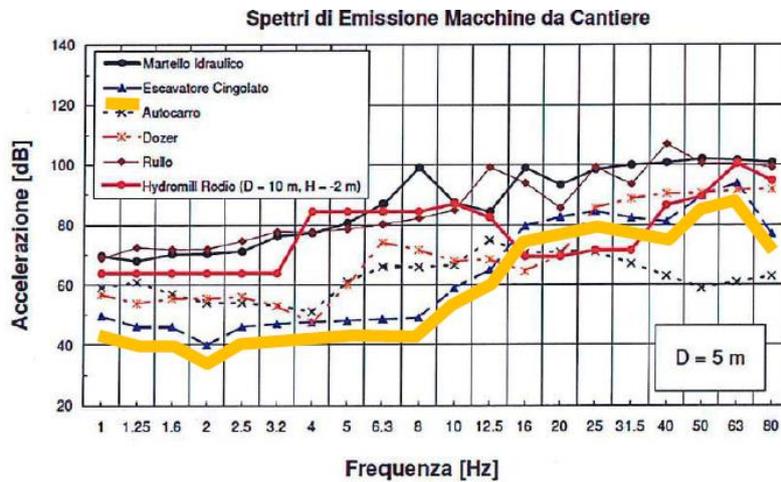


Figura 32 Spettro di emissione della sorgente di un escavatore cingolato 5m dall'asse di cantiere

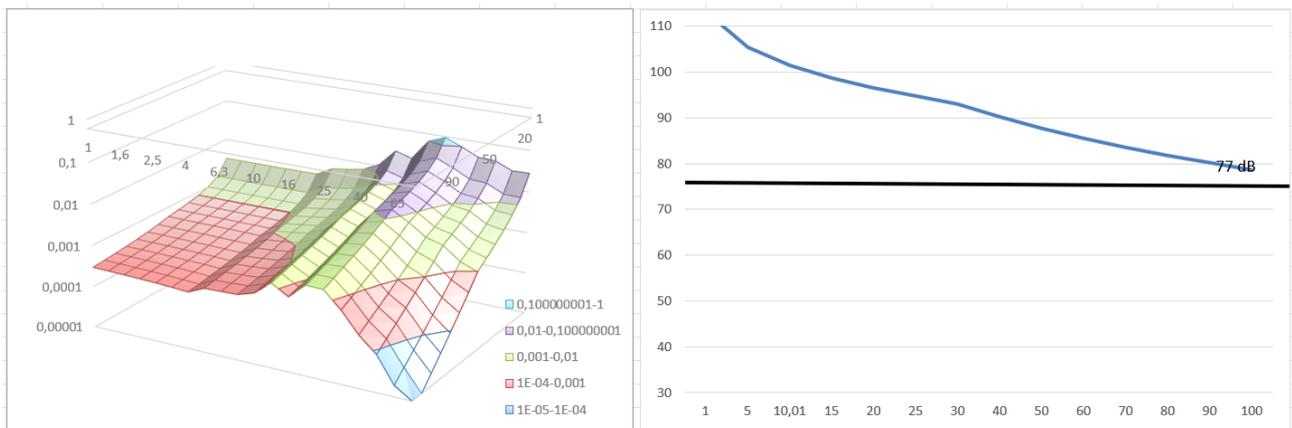


Figura 33 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

9.8.5. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN MARTELLO IDRAULICO

Vengono di seguito riportati i risultati del modello previsionale descritto per un martello idraulico e per i modelli geologici di riferimento di cui al cap.8.

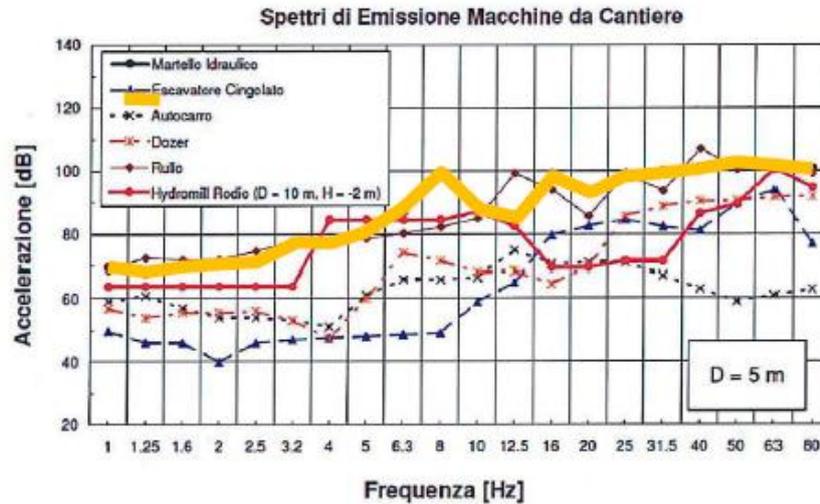


Figura 34 Spettro di emissione della sorgente di un martello idraulico 5mdall'asse di cantiere

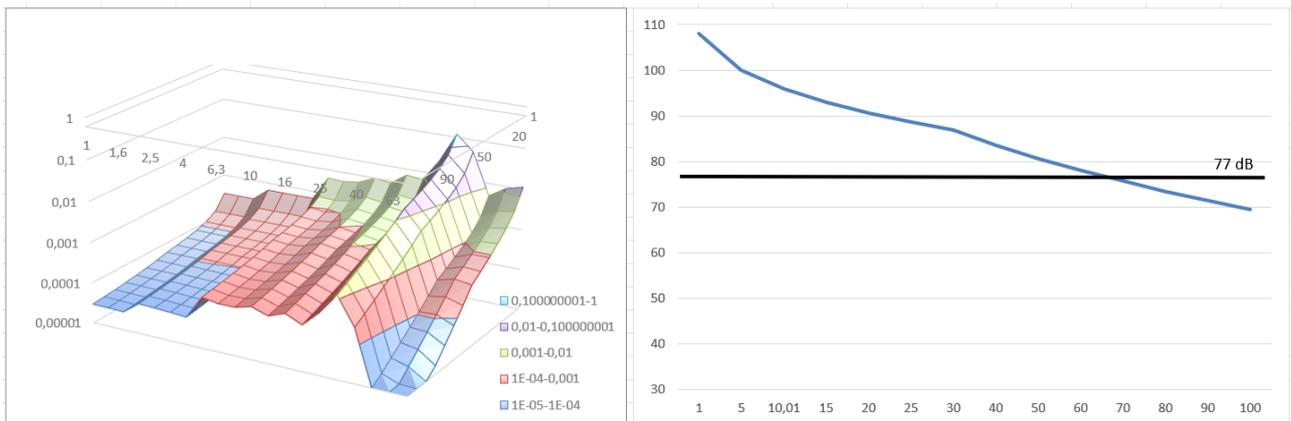


Figura 35 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

10. MODALITÀ DI GESTIONE DEL DISTURBO DOVUTO ALLE VIBRAZIONI

Le attività di cantiere quali il passaggio di veicoli pesanti, le demolizioni, la battitura di pali, ecc. costituiscono una sorgente di disturbo con caratteristiche molto diverse da caso a caso; nella maggioranza dei casi si tratta di fenomeni transitori di breve durata facilmente isolabili e pertanto nella maggior parte dei casi gestibili. Qualora non fosse tecnicamente possibile o economicamente giustificabile mettere in atto soluzioni lavorative differenti a quelle previste e si dovessero verificare condizioni per cui si abbia evidenza del superamento dei limiti di riferimento, in accordo con quanto indicato al punto 9.5 della norma UNI 9614/2017 che dispone la possibilità di deroghe a tali limiti concedibili in alcuni casi per **attività temporanee o di cantiere**, verranno attuate le attività previste dalle linee guida all'**Appendice C** della stessa norma.

10.1. CRITERI DI AZIONE E MISURE DI MITIGAZIONE

Sebbene i limiti di riferimento relativi al disturbo non siano, in certi casi, esplicitabili, in generale il primo criterio con cui affrontare la gestione del disturbo generato da vibrazioni è che:

- 1. le vibrazioni dovrebbero essere contenute in modo da evitare danni alle strutture più prossime** (la norma di riferimento per tali valutazioni è la UNI 9916/2014)

Per quanto concerne invece il disturbo alle persone, il primo criterio che dovrebbe essere garantito è

- 2. Il rispetto del periodo di riposo notturno** ovvero evitare tutte quelle attività che possano portare al risveglio durante il periodo dalle ore 22.00 alle ore 6.00 o, in adiacenza a strutture quali scuole, case di riposo in cui è previsto il riposo pomeridiano per la durata dello stesso.

Un altro criterio da tenere in considerazione è:

- 3. la valutazione di modalità esecutive a minore impatto e posizionamento di sorgenti fisse lontano dai ricettori** ovvero la rivalutazione delle attività lavorative previste con l'intento di abbassare il complessivo livello di vibrazione generato e la dislocazione delle sorgenti a maggiore impatto a distanze maggiori per garantire una maggiore dissipazione della vibrazione immessa.

Risulta evidente che il miglior approccio alla gestione di tale tematica nel suo complesso venga studiato approfonditamente dall'impresa esecutrice dei lavori in base alla propria dotazione di attrezzature e mezzi e alla sua organizzazione. L'analisi preventiva di tutte le situazioni di impatto e

delle relative modalità di gestione sarà contenuta in un documento che l'impresa dovrà fornire all'ente o al soggetto controllore prima dell'inizio dei lavori contenente le misure di mitigazione che verranno adottate nell'ambito di una più ampia strategia di gestione dell'impatto e di tutte quelle azioni risolutive anche in presenza di lamentele e/o esposti.

Tale documento, individuato con il nome di **PIANO di GESTIONE dell'IMPATTO VIBRAZIONALE di CANTIERE (PGIVC)** ha l'obiettivo, per quanto ragionevolmente attuabile in relazione agli obiettivi di progetto, di limitare i livelli di vibrazione così che le residenze interessate o altri ricettori sensibili siano protetti da eccessivi livelli di vibrazione associati alle attività di cantiere. Di seguito vengono riportati i contenuti minimi richiesti per le lavorazioni in progetto:

1. censimento dei ricettori: deve essere fornita la lista completa e aggiornata dei ricettori ritenuti sensibili e di questi devono essere fornite le seguenti informazioni: destinazione d'uso, attività in esso svolte, caratteristiche costruttive e condizioni di conservazione. I ricettori verranno classificati in base a queste caratteristiche e alle fasce orarie di rispetto del riposo.
2. tipologia di lavorazioni: deve essere stilata una precisa lista delle lavorazioni ed in particolar modo di quelle fasi che prevedono sovrapposizione di sorgenti potenzialmente impattanti. Di essi si dovrà conoscere il potenziale di impatto ottenuto da misure dirette o da dati di letteratura. Questa fase è di fondamentale importanza e propedeutica alla valutazione dell'entità del disturbo e della sua durata.
3. attività informativa preventiva: il piano di gestione dell'impatto vibrazionale di cantiere deve contenere un accurato programma di informazione preventiva rivolto alla popolazione ritenuta sensibile. L'informazione, esplicita mediante i mezzi di divulgazione locali (volantini, riunioni della popolazione, avvisi e/o ordinanze comunali, porta a porta) devono contenere tutti gli elementi necessari alla corretta informazione degli eventi previsti: valori limite, orario delle lavorazioni, durata, tipologia. Le comunicazioni dovranno altresì informare chiaramente che le vibrazioni non saranno tali da recare danni permanenti alle strutture.
4. monitoraggi: prima dell'inizio delle attività di cantiere previste, dovrà essere effettuato un piano di monitoraggio con misure dirette su ciascuna di quelle più impattanti con particolare riferimento a quelle la cui interferenza può potenzialmente generare superamenti delle soglie limite. Le modalità esecutive delle misure, il numero e la successiva elaborazione dei dati deve essere eseguita con le modalità descritte al punto 6 della UNI 9614/2017. La strumentazione da utilizzare avrà le caratteristiche previste al punto 7 della stessa norma e sarà opportunamente calibrata e tarata, dandone evidenza allegando al piano di monitoraggio la documentazione rilasciata dall'ente certificatore. Qualora ci si trovasse in presenza di lamentele e/o esposti, al fine di verificare con la massima cura l'entità del disturbo, il tecnico misuratore utilizzerà il questionario predisposto all'Appendice B della UNI 9614/2017, finalizzato ad una raccolta dati efficace e completa.
5. mitigazioni: il PGIVC dovrà contenere tutte le misure di mitigazione individuate per limitare il disturbo generato dalla vibrazione. Sarà indicata al suo interno un'analisi ex-ante ed ex-post da cui si possa evincere l'efficacia delle misure di mitigazione individuate.

6. **controlli:** il PGIVC deve prevedere un piano di controllo e audit interno finalizzato alla corretta applicazione delle misure di mitigazione e in generale di tutte le azioni strutturali e non strutturali in esso evidenziate. Verrà predisposto un accurato calendario minimo dei controlli da attuare per tutta la durata delle lavorazioni.

Per quanto non esplicitamente esposto nella presente, si rimanda all'Appendice C della norma UNI 9614/2017.

11. CONCLUSIONI

Lo studio ha permesso di analizzare il potenziale impatto dovuto a vibrazioni prodotte dalle macchine operatrici, in accordo con quanto previsto alle norme 9416/2017 e 9916/2014, che verranno impiegate per la realizzazione del Parco Eolico e successivamente durante il suo esercizio. A tal fine e con l'intento di valutare efficacemente le attività previste sono stati individuati tre scenari di riferimento per la fase di cantiere. Quindi sono state valutate le distanze oltre le quali il livello di vibrazione prodotto complessivamente dalle attività risulta minore dei limiti prefissati dalla norma ovvero con accelerazione ponderata minore di 7,2 mm/sec².

L'analisi porta ad un range di distanze di sicurezza, nella peggiore delle ipotesi (considerando la contemporaneità dei mezzi in azione per le diverse attività di cantiere), compreso tra i 113m (posa dei cavidotti) e i 167m (fase di realizzazione delle fondazioni delle torri a supporto degli aerogeneratori e delle piazzole di servizio).

I risultati dello studio mostrano che la componente vibrazioni non comporta in generale incompatibilità di alcuna natura tra le attività previste e l'assetto ambientale esistente sia nei confronti della salute umana e quindi nella percezione del disturbo, che relativamente ad eventuali ripercussioni sulle strutture.

All'interno di queste distanze in generale non ricadono recettori sensibili quali abitazioni; tuttavia, ricadono all'interno diversi recettori con attività lavorative diurne.

Nello specifico in fase esecutiva dovrà essere valutato l'eventuale impatto sulle strutture e adeguatamente pianificato il cronoprogramma lavori prevedendo ancorché il momentaneo allontanamento dei proprietari negli orari di lavoro.

Eventuali superamenti dei limiti, ammessi dalla normativa per attività temporanee quali i cantieri, verranno gestiti secondo quanto riportato nel Piano di Gestione dell'Impatto Vibrazionale di Cantiere da redigere prima dell'inizio dei lavori.

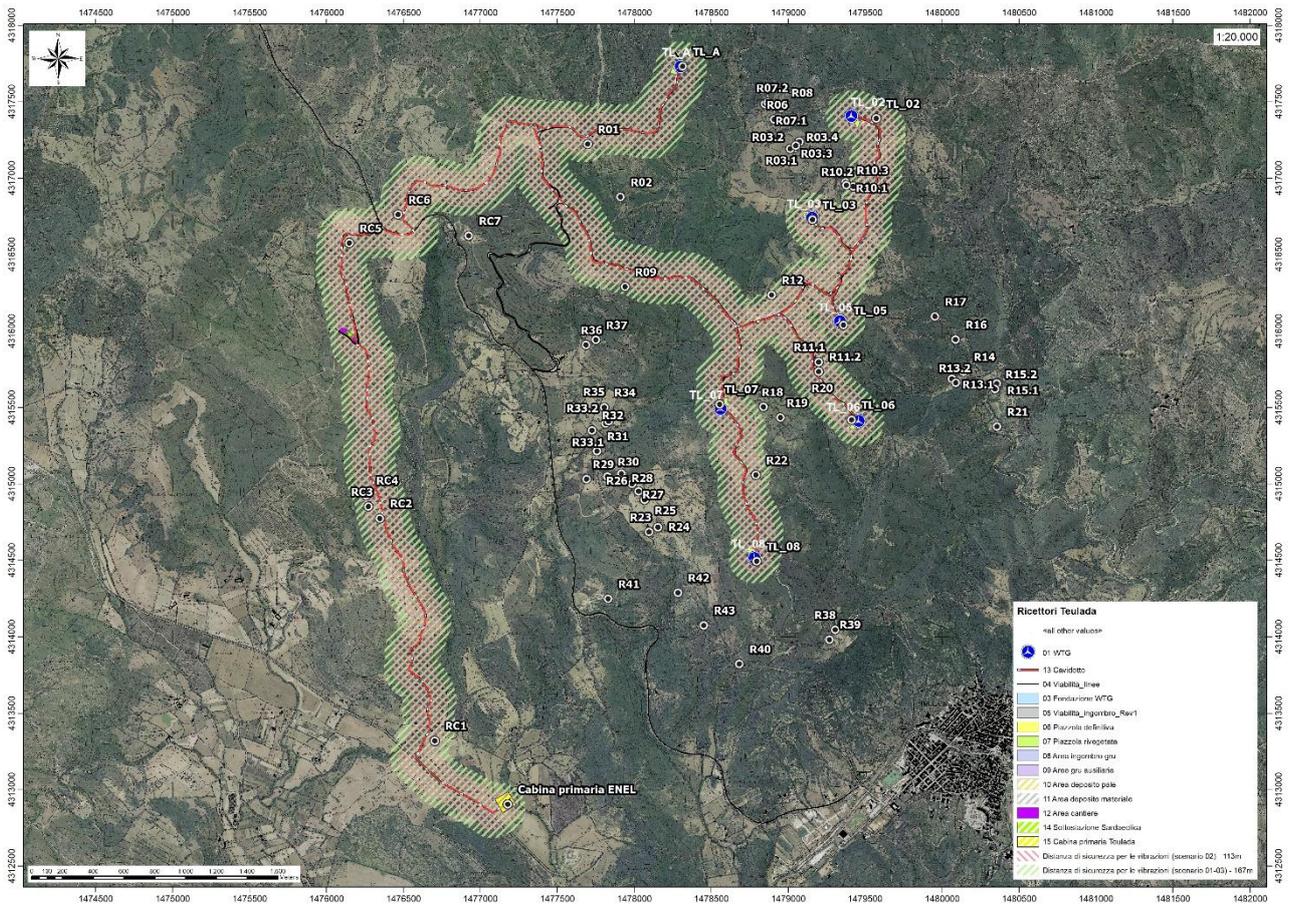


Figura 36 Distanze di sicurezza per le vibrazioni nei vari scenari