

PARCO EOLICO "MONTE ARGENTU"

COMUNE DI NURRI

PROVINCIA DEL SUD SARDEGNA (SU)



STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Elaborato:

ELABORAZIONI SIA

Relazione previsionale impatto vibrazioni

Codice elaborato:

NU_SIA_A028

Data: Dicembre 2023

Il committente: Sardeolica s.r.l.

Coordinamento: FAD SYSTEM SRL - Società di ingegneria

Dott. Ing. Ivano Distinto

Dott. Ing. Carlo Foddis

Elaborazione SIA:

Dott. Ing. Bruno Manca

Elaborato a cura di:

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori

rev.	data	descrizione revisione	rev.	data	descrizione revisione
00	28/12/2023	Richiesta integrazione del MASE			

SOMMARIO

SOMMARIO.....	2
1. PREMESSA	6
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
3. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE.....	7
4. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA	14
5. PROPRIETA' MECCANICHE DEI TERRENI	17
5.1. DESCRIZIONE DEL CONTESTO GEOLOGICO DELL'AREA VASTA OGGETTO DI INTERVENTO	17
5.1.1. 6.1.1 Unità tettonica di Riu Gruppa.....	20
5.1.2. 6.1.2 Unità tettonica del Gerrei.....	22
(SVI) Arenarie di San Vito.....	22
(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria	23
(PRF) Porfiroidi (Auct.)	23
(MGM) Metarcose di Genna Mesa	23
(ACN) Argilloscisti di Rio Canoni.....	24
(SGA) Scisti a Graptoliti (Auct.).....	24
5.1.3. 6.1.3 Unità tettonica di Meana Sardo.....	24
(SVI) Arenarie di San Vito.....	25
(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria	25
(ORR) Formazione di Orroledu	26
5.1.4. 6.1.4 Corteo filoniano.....	26
5.1.5. 6.1.5 Successione vulcano-sedimentaria Tardo-Paleozoica.....	26
5.1.6. 6.1.6 Successione sedimentaria Mesozoica	27
5.1.7. 6.1.7 Successione sedimentaria Terziaria.....	28
5.1.8. 6.2 Successione vulcano-sedimentaria Miocenica	28
5.2. 6.2 Successione vulcanica Pliocenica	30
5.3. 6.3 Depositi Quaternari dell'area continentale	31
(a) Depositi di versante.....	31

(b2) Coltri eluvio-colluviali	31
(b) Depositi alluvionali	32
6. CAMPAGNA DI INDAGINI DI CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA E SISMICA	35
6.1. MASW – TECNICA E PARAMETRI UTILIZZATI.....	36
6.2. Specifiche delle indagini svolte	37
6.3. Caratteristiche della strumentazione impiegata.....	38
6.4. Elaborazione dei dati	38
6.5. Categorie di sottosuolo - D.M. 19.01.2018 (NTC 2018).....	38
6.1. Risultati delle indagini del sito MASW M1	40
6.1. Risultati delle indagini del sito MASW M2	42
6.1. Risultati delle indagini del sito MASW M3	44
7. MODELLAZIONE GEOLOGICA	47
7.1. Modello Geologico di sito	47
7.2. Modello Geologico 01 - N05, N06.....	47
7.3. Modello Geologico 02 – N08, N09, N10	49
7.1. Modello Geologico 03 – N07	50
7.2. Tabella di sintesi delle proprietà di sintesi dei terreni di interesse	51
8. PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO	52
8.1. Modello di propagazione dell'onda nel terreno.....	54
8.2. Valutazione della propagazione delle vibrazioni.....	55
9. SORGENTI DI VIBRAZIONE.....	56
9.1. Analisi della fase di cantiere per la costruzione delle opere in progetto.....	56
9.2. Potenziale incremento dei flussi di traffico indotto dal cantiere sulla viabilità locale	57
9.3. Modello per il calcolo dell'impatto dovuto alle vibrazioni in fase di cantiere	57
9.4. Scenari di riferimento di cantiere.....	58
9.1. Recettori.....	59
9.2. Scenari di riferimento di esercizio.....	62

9.3.	Limiti di riferimento	63
10.	SPETTRI DI EMISSIONE DELLE MACCHINE OPERATRICI	67
10.1.	Propagazione delle vibrazioni di un rullo vibrante.....	67
10.2.	Propagazione delle vibrazioni di una pala cingolata.....	68
10.3.	Propagazione delle vibrazioni di un autocarro.....	69
10.4.	Propagazione delle vibrazioni di un escavatore cingolato	70
10.5.	Propagazione delle vibrazioni di un martello idraulico.....	71
11.	MODALITÀ DI GESTIONE DEL DISTURBO DOVUTO ALLE VIBRAZIONI.....	72
10.6.	Criteri di azione e misure di mitigazione.....	72
12.	CONCLUSIONI	74

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1	Localizzazione comune di Nurri.....	7
Figura 2	Panoramica nei pressi N09 nell' area di studio	8
Figura 3	Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, cavidotto e sottostazione.....	9
Figura 4	Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, turbine.....	10
Figura 5	Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000	11
Figura 6	Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000 – settore Nord	12
Figura 7	Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Est - impianto	13
Figura 8	Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 6,0MW.....	15
Figura 9	Schema tettonico-strutturale della Sardegna.....	17
Figura 10	Schema Tettonico dell'area di studio (tratto da Funedda et al., 2013 Note Illustrative Foglio CARG Mandas)	19
Figura 11	Schema tettonico e sezione geologica SW-NE rappresentativa dell'area vasta di Nurri (Funedda et al., 2013).....	19
Figura 12	UNITA' TETTONICA DI RIU GRUPPA –di Pala Manna	22
Figura 13	UNITA' TETTONICA DEL GERREI – Scisti a Graptoliti – (SGA).....	24
Figura 14	Formazione del Monte Santa Vittoria (MSV)	26
Figura 15	Formazione di Ussana.....	29
Figura 16	Depositi di versante, ciottoli in Muschelkalk (sx) e in SGA e PMN (dx)	31
Figura 17	Carta Geologica del sito (settore Nord)	33
Figura 18	Carta Geologica del sito (settore Sud)	34
Figura 19	Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	41
Figura 20	Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	43
Figura 21	Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche.....	45
Figura 22	Ubicazione degli stendimenti.....	46
Figura 23	- Curva di ponderazione asse generico	53

Figura 24 - Tipologia di onde: a) e b) onde di volume, c) e d) onde di superficie	53
Figura 25 - rapporto tra le velocità di propagazione V_p e V_r	54
Figura 26 Distanza di sicurezza per le vibrazioni (scenario 01-03) - 214m	60
Figura 27 Distanza di sicurezza per le vibrazioni (scenario 02) - 146m.....	61
Figura 28 Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza	64
Figura 29 Sistema cartesiano di riferimento per persona sdraiata, in piedi o seduta	64
Figura 30 Curva di ponderazione per un asse generico - UNI 9614	65
Figura 31 Valori Limite di riferimento per vibrazioni di breve durata e permanenti (9916/2014)	66
Figura 32 Spettro di emissione della sorgente di un rullo vibrante a 10m dall'asse di cantiere.....	67
Figura 33 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni	67
Figura 34 Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata a 10m dall'asse di cantiere.....	68
Figura 35 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni	68
Figura 36 Spettro di emissione della sorgente di un autocarro 10m dall'asse di cantiere	69
Figura 37 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni	69
Figura 38 Spettro di emissione della sorgente di un escavatore cingolato 5m dall'asse di cantiere	70
Figura 39 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni	70
Figura 40 Spettro di emissione della sorgente di un martello idraulico 5m dall'asse di cantiere	71
Figura 41 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni	71

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 dislocato nel **territorio comunale di Nurri** - Provincia del Sud Sardegna (SU) e sulla viabilità laddove sono previste lavorazioni (es. posa del cavidotto o realizzazione ex-novo/adequamento 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:

1. **UNI 9614/2017** "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo";
2. **UNI 9916/2014** "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni negli edifici";

3. **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) Regione n. 14 del 7/2/2022 dal Comitato Istituzionale.

3. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO GENERALE

Nurri è un comune della provincia del Sud Sardegna situato nella Sardegna centro-meridionale, e confina con il comune di Esterzili, Isili, Mandas, Orroli, Sadali, Serri, Siurgus Donigala e Villanova Tulo. L'area che interessa le opere in progetto è situata nella periferia sud-ovest dell'abitato di Nurri, in particolare nella porzione del territorio comunale compresa tra gli abitati di Nurri, Orroli, Mandas, e il Lago Mulargia.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: 540 sez. I "Nurri" e 540 sez. II "Orroli".
- Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: 540070 "Nurri" e 540110 "Stazione Orroli".

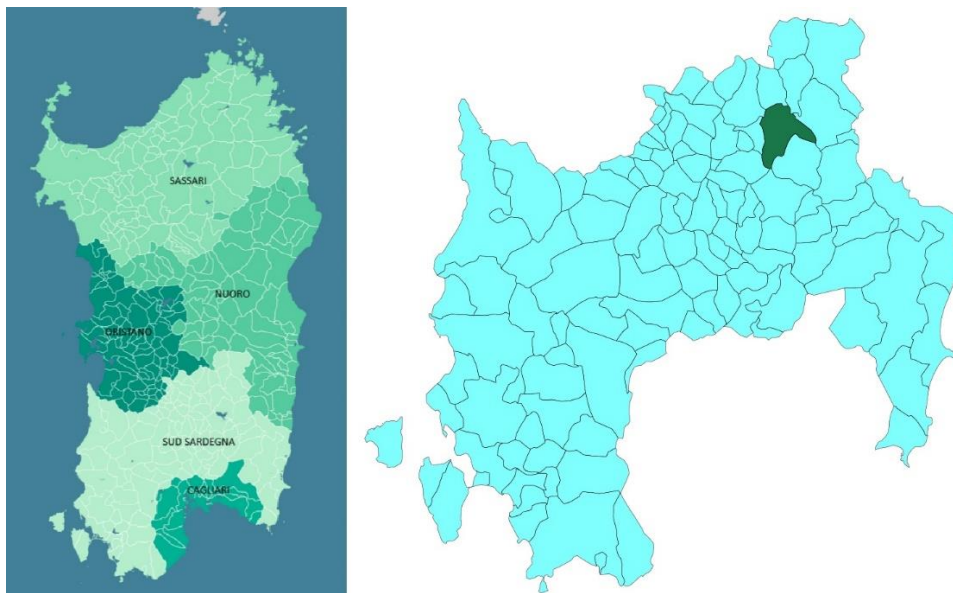


Figura 1 Localizzazione comune di Nurri



Figura 2 Panoramica nei pressi N09 nell'area di studio



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

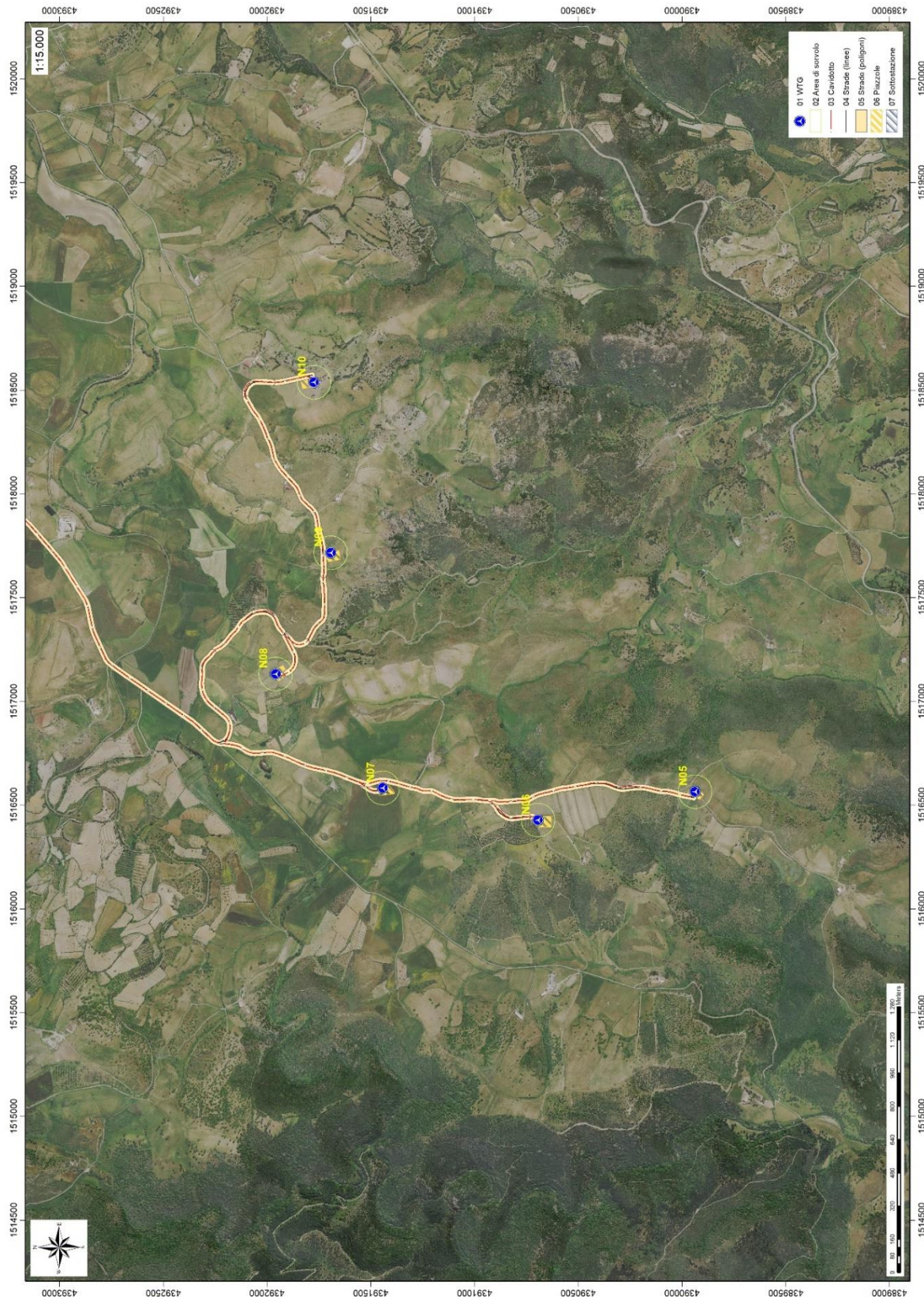


Figura 4 Localizzazione su foto aerea (Fonte RAS, 2016) dell'area interessata dal progetto, turbine.

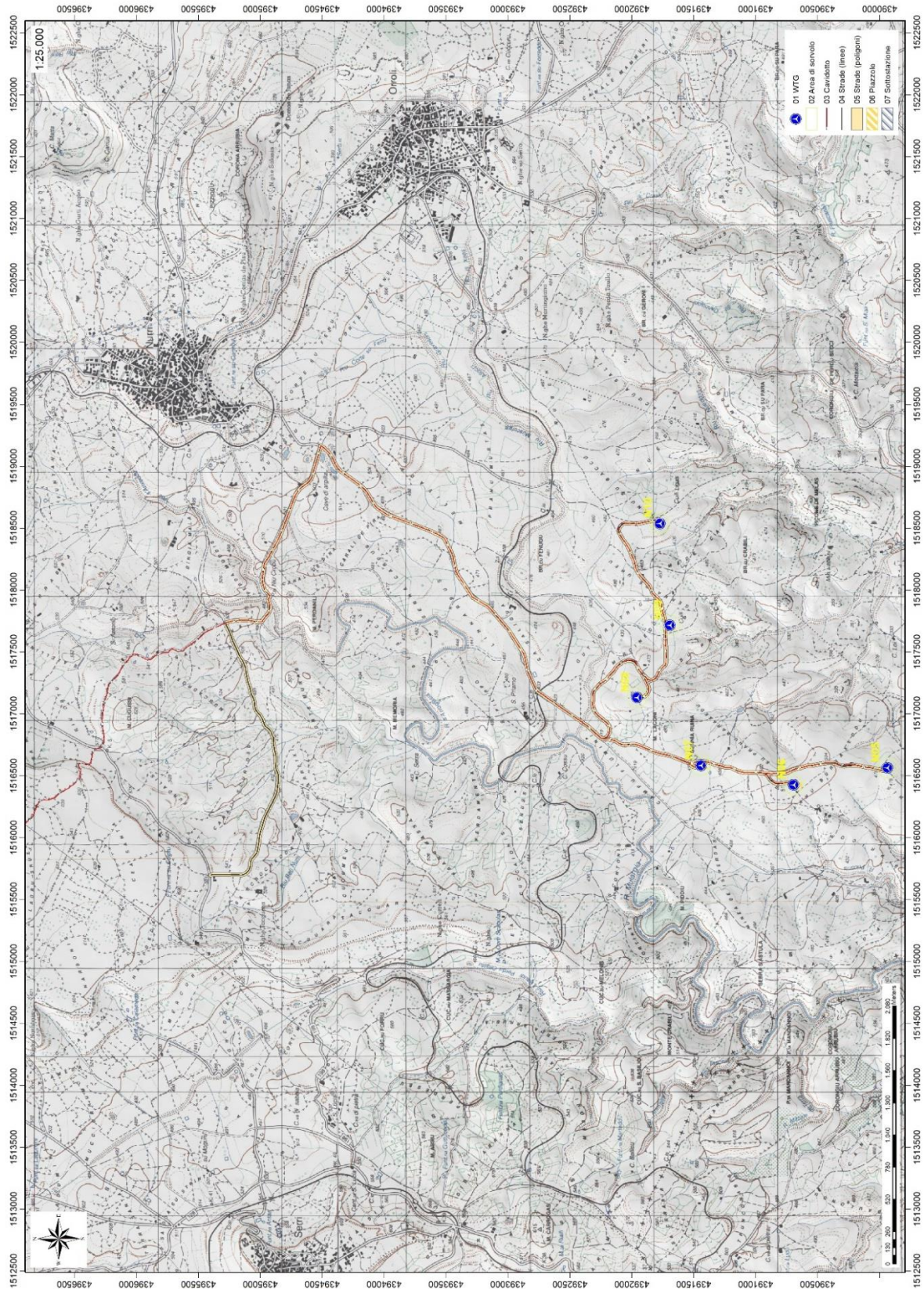


Figura 5 Inquadramento topografico su Carta IGM scala 1:25000

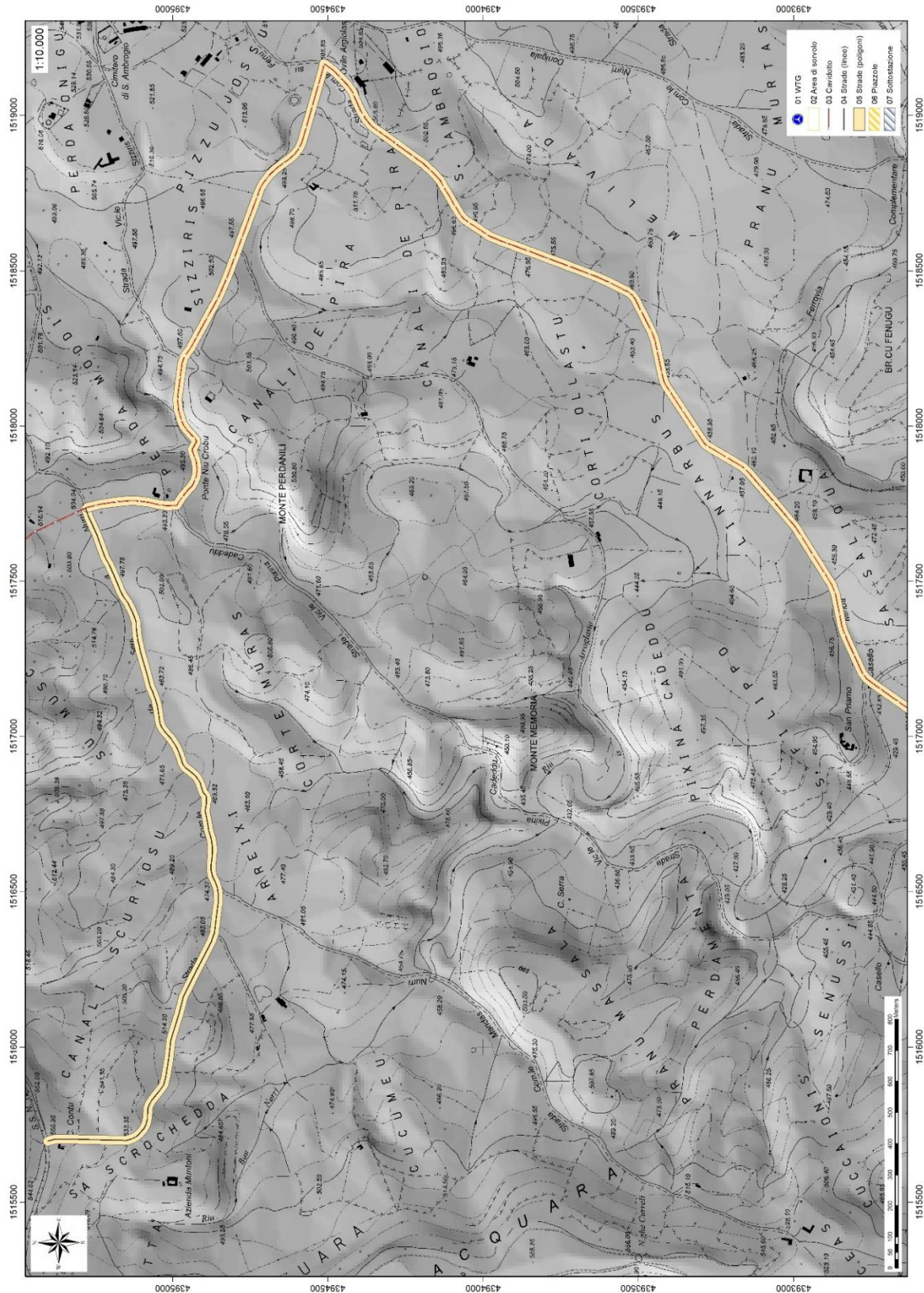


Figura 6 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000 – settore Nord

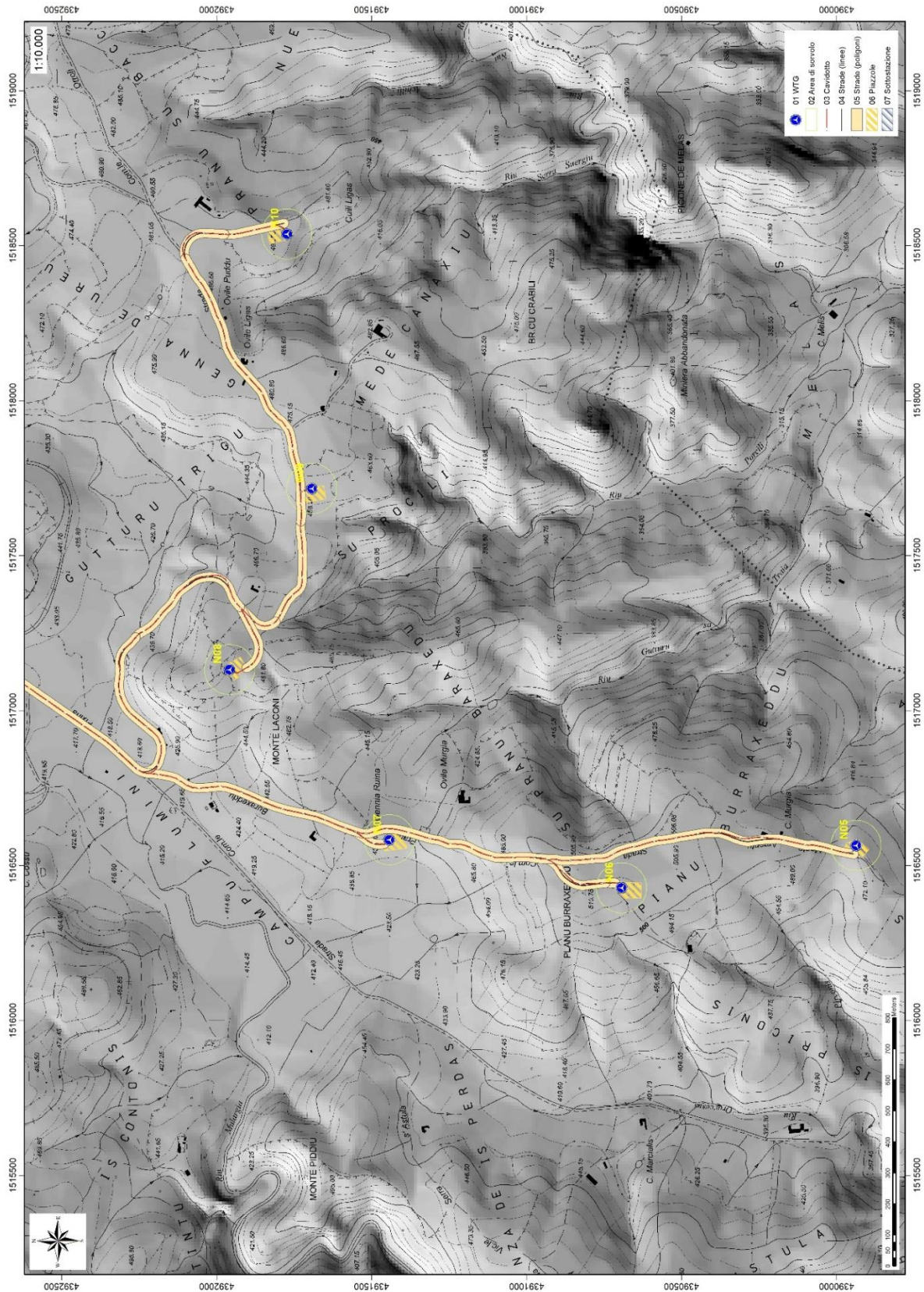


Figura 7 Inquadramento topografico su C.T.R. RAS scala 1:10000, settore Est - impianto

4. CARATTERISTICHE DI PROGETTO DELL'OPERA

L'impianto costituito dai 6 aerogeneratori funzionerà in parallelo con la rete elettrica nazionale, la connessione avverrà tramite una rete a 30 kV realizzata con cavidotto interrato e si conetterà alla sottostazione 30/150 kW An=60 MVA sita nel territorio comunale di Nurri. La sottostazione produttore tramite

un cavo AT interrato convoglierà l'energia prodotto sulla rete a 150 kV del Gestore Della Rete mediante la stazione elettrica di TERNA sempre nel territorio comunale di Nurri.

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		
N05	1516564.72	4389937.21	9°11'34.10"	39°39'32.43"	471,00	125
N06	1516427.91	4390694.18	9°11'28.42"	39°39'57.00"	508,70	125
N07	1516582.95	4391443.12	9°11'35.00"	39°40'21.28"	443,75	125
N08	1517132.11	4391958.92	9°11'58.10"	39°40'37.97"	477,90	125
N09	1517716.29	4391693.52	9°12'22.59"	39°40'29.32"	462,45	125
N10	1518538.20	4391774.06	9°12'57.10"	39°40'31.87"	480,45	119

Gli aerogeneratori individuati per la realizzazione del parco eolico hanno potenza nominale di 6000 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. NU_PC_T009). Il solo aerogeneratore NU10 ha un'altezza al mozzo di 119 m e stesso diametro del rotore, tale differenza di altezza è stata assunta per rispettare in maniera cautelativa la distanza di ribaltamento anche dai più vicini manufatti anche se non costituenti veri e propri corpi di fabbrica aziendali.

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.

L'aerogeneratore ipotizzato per le valutazioni progettuali è stato scelto tra quelli maggiormente efficienti e sofisticati presenti attualmente sul mercato; tuttavia, in fase di installazione si potranno avere variazioni tipologiche con macchine simili per caratteristiche dimensionali e tecnico-produttive, ferme restando le caratteristiche dimensionali massime dell'aerogeneratore.

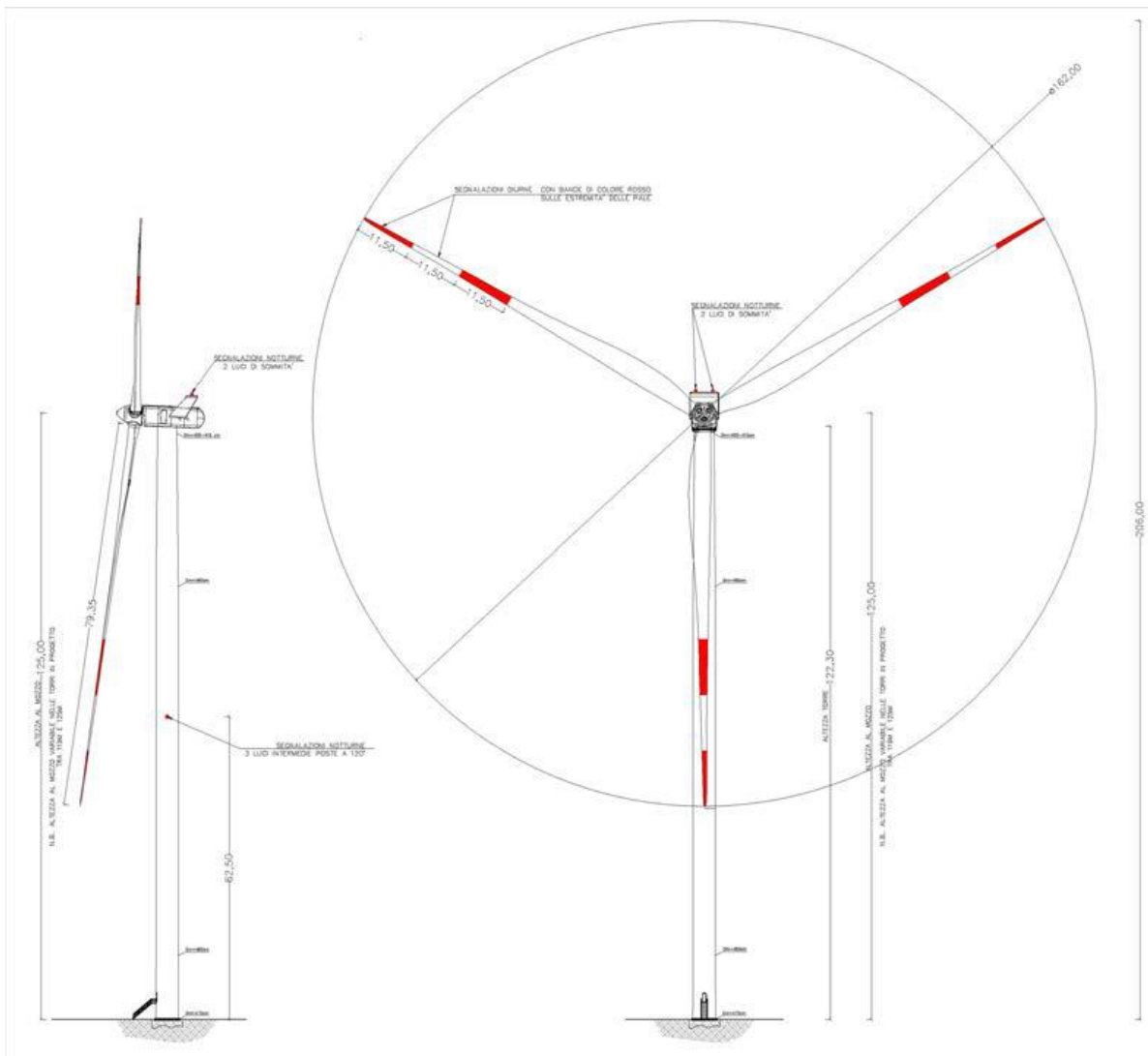


Figura 8 Aerogeneratore tipo Vestas V162 da 6,0MW

Dati tecnici:

- Potenza nominale: 6000 kW e tensione nominale di 800 volt;
- Potenza unitaria: 6250 kW;
- Frequenza: 0 – 138 Hz;
- Numero pale: 3;
- Lunghezza pale: 79,35 m;
- Raggio del rotore: 81 m;
- Area spazzata: 20611 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 3008 a 3950 m²);
- Superficie impronta fondazione 706,90 m²;
- Ingombro scavo fondazione: circa 1075,00 m².

La sottostazione elettrica produttore in progetto avrà un'estensione di circa 2355 mq. In adiacenza alla sottostazione è prevista un'area di circa 1276 mq per la futura installazione di un sistema di accumulo energetico.

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

La viabilità prevista per il trasporto degli aerogeneratori dal porto di sbarco al sito di installazione seguirà le viabilità statale, provinciale e comunale asfaltata, all'interno del sito produttivo si imbrocceranno per il raggiungimento delle piazzole strade vicinali sterrate esistenti che verranno preventivamente adeguate, in alcuni tratti verranno realizzati nuovi brevi tratti di pista.

Le infrastrutture a servizio del Parco Eolico, quali strade e cavidotti nell'area dell'impianto, interesseranno per la quasi totalità aree e tracciati stradali di proprietà pubblica (comunali), solo in alcuni tratti, il cavidotto, benché sempre realizzato sul sedime reale della viabilità esistente, potrebbe interessare catastalmente terreni privati in relazione alla non corrispondenza fra tracciati reali della viabilità, tracciati da cartografia ufficiale CTR e mappe catastali.

Per ulteriori specifiche si rimanda agli elaborati tecnici di progetto.

5. PROPRIETA' MECCANICHE DEI TERRENI

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

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

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

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

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

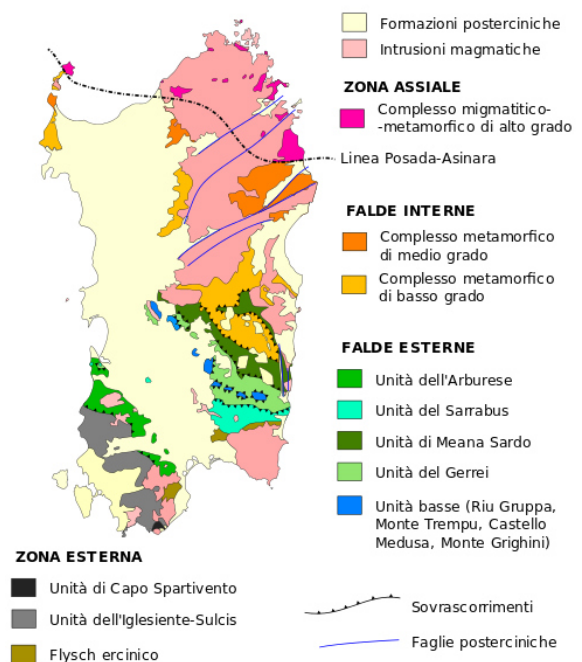


Figura 9 Schema tettonico-strutturale della Sardegna

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

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

L'Unità tettonica del Gerrei è divisa in due sottounità: la Sottounità di Arcu de su Bentu e la Sottounità di M. Lora. Le due sottounità si caratterizzano per la presenza dei Porfiroidi nella sottounità di Arcu de su Bentu e delle Vulcaniti di Monte Santa Vittoria in quella di Monte Lora. Le unità tettoniche sono interessate da una serie di fasi plicative compressive, tardo compressive e distensive che generano sistemi di pieghe e una foliazione pervasiva di piano assiale. Tra le strutture plicative maggiori che interessano il settore di studio vi è l'Antiforme del Flumendosa al cui nucleo affiora l'unità tettonica di Riu Gruppa.

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

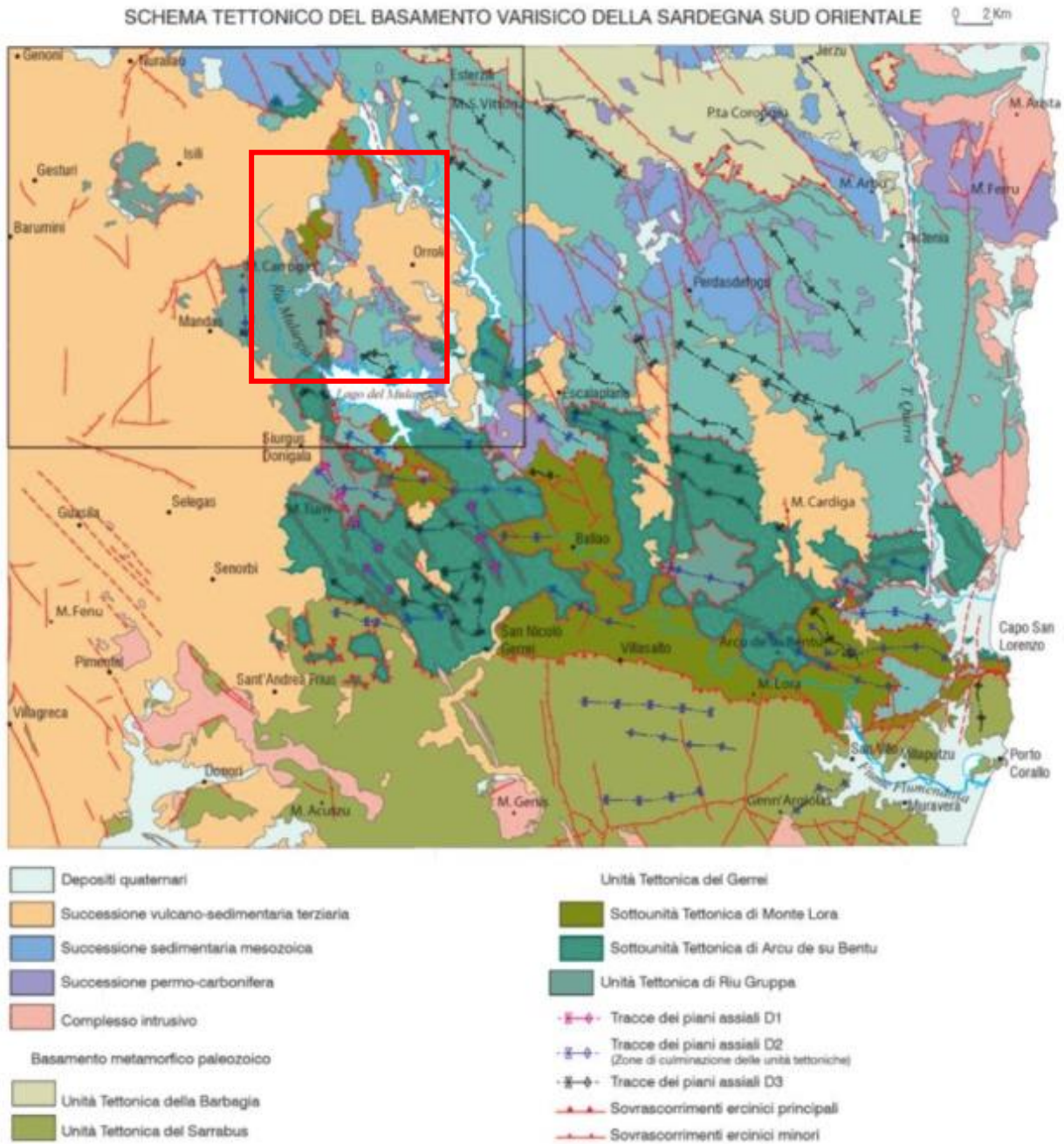


Figura 10 Schema Tettonico dell'area di studio (tratto da Funedda et al., 2013 Note Illustrative Foglio CARG Mandas)

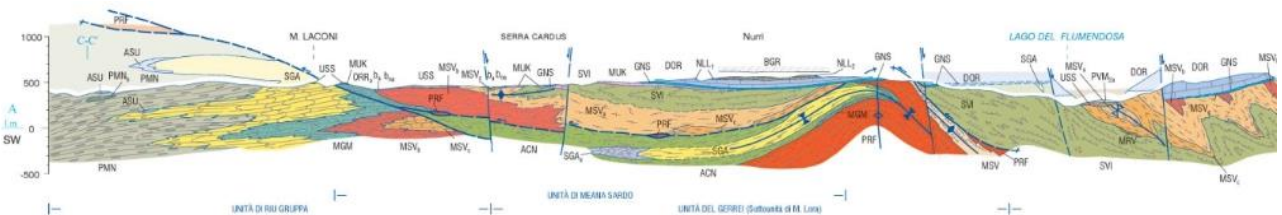


Figura 11 Schema tettonico e sezione geologica SW-NE rappresentativa dell'area vasta di Nurri (Funedda et al., 2013).

5.1.1. 6.1.1 UNITÀ TETTONICA DI RIU GRUPPA

È l'unità tettonica più profonda dell'area di studio, che affiora tra Mandas e Orroli. La successione litostratigrafica è caratterizzata da metamorfismo lievemente maggiore rispetto alle unità sovrastanti. Le attribuzioni cronostatigrafiche sono unicamente basate sulle analogie litologiche con le formazioni delle altre unità. Con questo criterio è comunque possibile ricostruire una successione che dal Cambriano arriva al Carbonifero inferiore. Le successioni presenti sono descritte in ordine cronostatigrafico (dalla formazione più antica verso la più giovane).

(MGM) Metarcose di Genna Mesa: si tratta di metarcose, metagrovacche arcosiche grigio chiare e grigio-verdastre in strati da medi a molto spessi. Si tratta di sedimenti ben selezionati, a granulometria da fine a grossa, con elementi di quarzo, feldspatici detritici e rari litici in matrice quarzoso-sericitica. Localmente le metarcose passano a metaquarzoareniti a grana fine, con intercalazioni da centimetriche a decimetriche di metapeliti scure, e rare intercalazioni di metaconglomerati minuti a elementi di quarziti, e talora sono presenti rocce silicizzate. Stratigraficamente, poggiano sulla formazione di Monte Santa Vittoria mentre il passaggio verso la soprastante formazione degli Scisti a graptoliti avviene per comparsa di metasiltiti fini e metapeliti. Lo spessore è difficilmente valutabile per via dell'intensa deformazione, ma presumibilmente è compreso tra 0 e 80 metri, anche se tale valutazione è relativa allo spessore apparente. L'età Ordoviciano superiore è attribuita per analogia con le altre unità tettoniche in quanto non sono stati rinvenuti fossili.

(SGA) Scisti a graptoliti: sono costituiti da una sequenza di filladi quarzifere e filladi scure o nere, raramente verdastre, cui localmente sono intercalati livelli di diaspri neri ("liditi") in strati medi o molto sottili. Alle filladi sono associati livelli di metacalcari grigi completamente ricristallizzati spesso con aspetto nodulare (**SGAa**). Le facies più carboniose sono frequenti in prossimità del contatto con i livelli carbonatici o con la soprastante formazione dei marmi di Asuni. Lo spessore non è valutabile a causa dell'intensa deformazione, ma apparentemente è almeno di 200 m. Il contatto superiore è netto sia con i marmi di Asuni, per la comparsa di livelli carbonatici, che con la Formazione di Pala Manna, per comparsa di metasedimenti clastici grossolani.

L'età è ascrivibile al Siluriano – Devoniano Medio per analogia con le corrispondenti litologie affioranti nelle unità tettoniche più superficiali.

Marmi di Asuni (ASU): si tratta di alternanze di marmi in banchi molto spessi, di colore variabile tra il grigio e il bianco, spesso venati con sottili livelli di filladi scure. Presentano aspetto fortemente scistoso, e sono costituiti da un'intercalazione irregolare di livelli di marmi dolomitici e metadolomie grigie. Lo

spessore varia tra 0 e 100 m, e superiormente passano per contatto stratigrafico a metaquarzoareniti grigie a grana medio-grossolana, e localmente sono in contatto con metaconglomerati a clasti di diaspri neri ("liditi") appartenenti alla formazione di Pala Manna. L'età è riferita al Devoniano medio – Carbonifero inferiore per via della sua posizione stratigrafica e per analogia con livelli affioranti in altre unità tettoniche (Calcari di Villasalto), in quanto gli unici fossili rinvenuti sono rari articoli di crinoide molto deformati.

Formazione di Pala Manna (PMN): si tratta di metaquarzoareniti grigio-scure a grana medio-grossa, con sottili livelli filladici. Sono associate a metagrovacche e metarenarie litiche, metasiltiti grigio-scure con sottili lamine filladiche nere e metapeliti scure omogenee, con intercalazioni centimetriche di metareniti grigio-verdi a grana fine. A queste litologie sono intercalate lenti di metaconglomerati poligenici, in matrice pelitico-arenacea, costituiti da clasti da millimetrici a centimetrici di quarzo, originarie quarzoareniti (**PMNb**) spesso scure, peliti e diaspri neri ("liditi"). Localmente i metaconglomerati sono costituiti esclusivamente da clasti di diaspri neri (**PMNa**) con uno spessore di alcune decine di metri. Il limite superiore è sempre tettonico, quando è in contatto con le altre unità tettoniche, altrimenti è interrotto da una discordanza basale. Lo spessore non è valutabile in quanto non affiora la base della formazione interessata da sovrascorrimenti. La successione è attribuita al Carbonifero inferiore in base alle analogie litologiche e per la posizione stratigrafica rispetto alle altre formazioni.



Figura 12 UNITA' TETTONICA DI RIU GRUPPA –di Pala Manna

5.1.2. 6.1.2 UNITÀ TETTONICA DEL GERREI

Questa unità tettonica è divisa in due sottounità: la Sottounità di M. Lora e la Sottounità di Arcu de su Bentu, geometricamente inferiore alla precedente. Le modeste differenze tra le successioni di queste due sottounità riguardano i sedimenti dell'Ordoviciano superiore e il complesso vulcano-sedimentario dell'Ordoviciano medio, che risulta costituito da metaepiclastiti, metandesiti e porfiroidi nella sottounità di Monte Lora, e da porfiroidi in quella di Arcu de su Bentu. Le successioni presenti sono descritte in ordine cronostatigrafico (dalla formazione più antica verso la più giovane).

(SVI) Arenarie di San Vito: questa formazione, che affiora a S e a O dell'abitato di Orroli, è costituita da metaquarzoareniti e, più raramente, metarenarie feldspatiche, di color grigio chiaro, grigio-verdastro o nocciola chiaro. Si tratta di rocce a granulometria fine, ben selezionate, in strati molto sottili o medi, raramente metrici, ricche in miche detritiche e matrice cloritico-sericitica, e una componente litica rappresentata da frammenti di metamorfiti. Le metarenarie formano regolari alternanze, da centimetriche a metriche, con metasiltiti e metapeliti grigio-verdastre e raramente metapeliti scure.

Localmente affiorano metaquarzoareniti grigio-chiare, massive, in bancate di alcuni metri di spessore.

Lo spessore delle Arenarie di San Vito nell'Unità tettonica del Gerrei è difficilmente valutabile a causa delle intense strutture plicative isoclinali e del contatto di base sempre tettonico. A causa dell'intensa deformazione, le strutture riconoscibili sono costituite quasi sempre dalla foliazione. L'età della formazione è riferita al Cambriano medio- Ordoviciano inferiore sulla base di associazioni ad acritarchi riconosciuti in altre aree.

(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria: affiora nella zona centro-occidentale dell'area vasta ed è costituita da metavulcaniti a chimismo intermedio e basico, metaepiclastiti, rare metarenarie feldspatiche e metaconglomerati. La scistosità, evidenziata dalla isorientazione dei fenocristalli, è sempre penetrativa e traspare quasi sempre le originarie superfici di deposizione. Lo spessore della formazione non è determinabile ma quello apparente è superiore al centinaio di metri. Il contatto di base della formazione sulla Formazione di San Vito, e quello superiore coi Porfiroidi, permettono di attribuire queste metavulcaniti all'Ordoviciano medio per via della posizione stratigrafica.

(PRF) Porfiroidi (Auct.): Si tratta di metavulcaniti che affiorano esclusivamente nell'Unità tettonica del Gerrei, originariamente costituite da tufi e ignimbriti a composizione riolitica e riodacitica con struttura occhiadina per via dei porfiroclasti di K-feldspato, plagioclasio e quarzo con dimensioni di 0,5-1 cm immersi in una massa di fondo sericitico-cloritica (**PRF**). Sono presenti livelli rimaneggiati arcocici, e in generale i depositi hanno giacitura massiva, il cui colore varia dal verdastro al giallo e rosa per alterazione. Una particolare litofacies, i Porfiroidi a grossi fenocristalli (**PRFa**) è caratterizzata da una struttura marcatamente occhiadina per la presenza di grossi porfiroclasti di feldspato potassico rosa di dimensioni massime di 7 cm in matrice filladica rosa, verde o rossa. Lo spessore della formazione, che non presenta foliazione pervasiva, è molto variabile sia per cause tettoniche che deposizionali, ma dove sono visibili i contatti di letto e tetto è inferiore al centinaio di metri. Per via della sua posizione stratigrafica sopra le Arenarie di San Vito o il Metaconglomerato di Muravera sotto, e sotto le Metarcose di Genna Mesa, l'età della successione è riferibile all'Ordoviciano medio.

(MGM) Metarcose di Genna Mesa: questa formazione è costituita da metaconglomerati quarzosi a granulometria arenitica e clasti dei sottostanti porfiroidi alla base della successione, e da metareniti stratificate o massive, poco mature e a granulometria da fine a grossolana con grani di quarzo e K-feldspato millimetriche, e metarcose mature e quarzoareniti ben stratificate. Lo spessore è variabile, ma non supera i 15 m.

Il contatto con le successioni inferiori è discordante (cartograficamente), mentre quello superiore sfuma con la soprastante formazione degli Argilloscisti di Rio Canoni. Per via di questa continuità e

per la presenza di rari articoli di crinoide, l'età della formazione è attribuita all'Ordoviciano superiore (Caradoc).

(ACN) Argilloscisti di Rio Canoni: alla base, la formazione è costituita da metarenarie fini grigio scuro, con rari livelli più grossolani, seguiti da metasiltiti talora carboniose di colore grigio-nocciola caratteristiche per la presenza di vacuoli limonitizzati dovuti a dissoluzione di resti fossili. Lo spessore della formazione è inferiore a 20 m, e il contatto inferiore con le metarcose di Genna Mesa è concordante, mentre quello superiore con i sedimenti siluro-devonici è netto. Il contenuto fossilifero di questa formazione, ricco in briozoi, brachiopodi, crinoidi, gasteropodi e trilobiti, permette di attribuire questa formazione all'Ashgill (Ordoviciano superiore).

(SGA) Scisti a Graptoliti (Auct.): costituiti da metapeliti scure (giallastre o grigie per alterazione), intercalate a livelli di quarziti nere ("liditi") (**SGA**). Sono presenti lenti discontinue di metacalcari nodulari (**SGAa**) di massimo 5 m di lunghezza e 2 di spessore, interstratificate nella successione. Lo spessore è assai variabile per via dell'intensa deformazione, infatti i contatti sono spesso laminati tettonicamente. L'età della successione è riferibile al Siluriano - Devoniano medio grazie alla ricca associazione fossilifera a graptoliti, conodonti, scifocrinoidi, crinoidi, tentaculiti e trilobiti.



Figura 13 UNITÀ TETTONICA DEL GERREI – Scisti a Graptoliti – (SGA)

5.1.3. 6.1.3 UNITÀ TETTONICA DI MEANA SARDO

Affiora nella parte centro-orientale dell'area di studio e si trova in contatto tettonico con la sottostante unità tettonica del Gerrei. Le successioni presenti sono descritte in ordine cronostratigrafico (dalla formazione più antica verso la più giovane).

(SVI) Arenarie di San Vito: questa formazione è costituita da metarenarie fini di colore grigio-verde oliva, metasiltiti, quarziti e metargilliti, e un livello di metaconglomerati a elementi di quarzo e metarenarie in matrice filladica intercalati nella parte mediana della successione. La parte alta della formazione è caratterizzata da livelli da centimetrici a decimetrici di metapeliti varicolori da grigio a viola scuro, ed è ricoperta in discordanza dal metaconglomerato di Muravera o direttamente dalla Formazione di Monte Santa Vittoria. La base della formazione invece non è mai esposta, in quanto è tagliata dal contatto basale tettonico con la sottostante unità del Gerrei. Lo spessore della formazione, seppur interessata da diversi raddoppi tettonici, è superiore ai 100 m. L'età della successione è attribuita al Cambriano medio – Ordoviciano inferiore, sulla base dei fossili di acritarchi rinvenuti.

(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria: è costituita da un complesso vulcanico-epiclastico suddiviso in tre litofacies: metaepiclastiti grossolane con ciottoli di metarioliti, metagrovacche vulcaniche e metandesiti, e metarioliti afiriche.

Le metaepiclastiti (**MSVa**) sono rappresentate da metagrovacche litiche, metarenarie vulcaniche e metaconglomerati, a scarsa selezione e con grani spigolosi immersi in matrice quarzoso-sericitica.

Le metagrovacche e metandesiti (**MSVb**) sono rappresentate da metaepiclastiti verdastre, prevalentemente metagrovacche, massive o in banchi di alcuni metri di spessore, con abbondanti frammenti litici che le conferiscono un aspetto macchiettato. Sono intercalate a metavulcaniti grigio scure a composizione da andesitica a basaltica.

Le metarioliti afiriche (**MSVc**) presentano colore bianco-giallastro con rari cristalli di feldspato potassico immersi in una massa di fondo microcristallina più o meno sericitica o silicizzata, con tessitura finemente scistosa e intensamente piegate.

Le tre litofacies sopra descritte sono correlabili con le formazioni di Manixeddu, Serra Tonnai e Monte Corte Cerbos affioranti nella Barbagia. L'età attribuita è Ordoviciano medio.



Figura 14 Formazione del Monte Santa Vittoria (MSV)

(ORR) Formazione di Orroledu costituito da alternanze di metarenarie e metasiltiti grigie, distinte in due litofacies: alla base, metagrovacche e metarenarie arcose e metaconglomerati **(ORRa)** matrice-sostenuti, con clasti di quarzo bianco e nero e frammenti litici mediamente arrotondati, di dimensioni massime di 1-2 cm, in matrice quarzosa biancastra; metarenarie e metasiltiti varicolori grigio-nocciola, scarsamente selezionate, e interessate da clivaggio ardesiaco penetrativo, e aspetto vacuolare nelle frazioni più fini a causa della dissoluzione di fossili. Talora sono presenti livelli di originari metacalcari tipo *mudstone*. Lo spessore è estremamente variabile in quanto il contatto di base è trasgressivo. La successione viene riferita all'Ordoviciano superiore per la presenza di brachiopodi, articoli di crinoidi, briozoi, ostracodi, gasteropodi, trilobiti e conodonti.

5.1.4. 6.1.4 CORTEO FILONIANO.

(fp) Filoni ed ammassi di porfidi granitici: sono costituiti da filoni con spessori generalmente non superiori a qualche decina di metri; e dimensioni variabili tra qualche metro e parecchie centinaia di metri, orientati secondo direzioni N-S e NNW-SSE.

Presentano struttura isotropa porfirica per presenza di fenocristalli di K-feldspato, quarzo e rare biotite e muscovite, immersi in una massa di fondo granofirica. L'età è riferibile al Carbonifero superiore - Permiano.

5.1.5. 6.1.5 SUCCESSIONE VULCANO-SEDIMENTARIA TARDO-PALEOZOICA

La successione permiana è costituita da rocce sedimentarie e vulcaniche, sebbene nell'area di studio affiori solo la serie sedimentaria, rappresentata dalla formazione di Rio su Luda.

(LUD) Formazione di Rio su Luda: costituita da conglomerati, epivulcanoclastiti ed argilliti con rari livelli carbonatici. La porzione basale (**LUDa**) è costituita da un conglomerato poligenico eterometrico con clasti scarsamente elaborati di metamorfiti e quarzo, massivo con alcune strutture canalizzate, che giace in discordanza sul basamento ercinico. Lo spessore varia da pochi a 30 m, anche se può apparire maggiore per via di alcune faglie dirette. L'età di questo deposito è attribuita al Permiano inferiore per via dei resti fossili rinvenuti nelle litofacies superiori.

5.1.6. 6.1.6 SUCCESSIONE SEDIMENTARIA MESOZOICA

La successione sedimentaria mesozoica è costituita da due sintemi separati da una discordanza: il sintema triassico, che include depositi continentali (Buntsandstein Auct.) e calcari neritici (Muschelkalk Auct.), e quello giurassico che comprende sedimenti fluiviali e transizionali (Formazione di Genna Selole), e calcari dolomitici di piattaforma neritica (formazione di Dorgali).

(BUN) Buntsandstein Auct.: è costituita da un conglomerato basale poligenico rossastro con abbondante matrice sabbiosa, con clasti di quarzo e metamorfiti del basamento in minore quantità. Tale deposito è sormontato da un'alternanza centimetrica e decimetrica di argilliti marnose, siltiti e subordinate arenarie rossastre o grigio-verdi, con strutture evaporitiche tipo *halite casts* alla base degli strati marnosi.

Presenta una giacitura suborizzontale e uno spessore non superiore a 20 m. Il contatto inferiore è sempre discordante, mentre quello superiore è netto col Muschelkalk. In base alle associazioni fossilifere e a quelle sporo-polliniche, la formazione viene attribuita al Triassico medio (Anisico).

(MUK) Muschelkalk Auct.: la formazione include calcari stratificati con laminazioni e tracce di bioturbazioni, dolomie e calcari dolomitici mal stratificati, di colore grigio-giallastro e nocciola, che nella porzione superiore della successione possono esser silicizzati. Sono riconoscibili diverse strutture sedimentarie, dalle laminazioni ai ripple mark, e nella parte alta prevalgono i calcari tipo mudstone e wackestone. Lo spessore massimo della formazione è di 20 m, con un limite inferiore netto, e quello superiore erosivo, che passa per discordanza sia ai depositi giurassici che a quelli terziari. L'età è Triassico medio (Ladinico).

(GNS) Formazione di Genna Selole: questa formazione, di esiguo spessore (0 – 30 m), è costituita da conglomerati monogenici quarzosi, con intercalazioni di quarzoareniti biancastre e argille bianche

o grigio-chiare caolinifiche, a clasti ben arrotondati del basamento (quarzo, liditi, porfidi, quarziti, ecc...), con strutture sedimentarie. Sono spesso associate argille grigie o bianche, con rari livelli di conglomerati monogenici quarzosi e frammenti di lignite nera. Il contatto inferiore è sempre discordante, mentre quello superiore è concordante con i calcari della formazione di Dorgali soprastante. Nelle frazioni siltose e argillose sono conservati i resti vegetali e pirite, e alla base del conglomerato affiorano paleosuoli ricchi in ossidi e idrossidi di ferro. Sulla base delle paleoflore l'età attribuita alla formazione è il Giurassico medio (Dogger).

(DOR) Formazione di Dorgali: è costituita da depositi tabulari suborizzontali o debolmente inclinati che formano degli altipiani detti "Tacchi". La parte basale è formata da calcari marnosi e marne giallastro-grigie, con locali intercalazioni arenacee e siltitico-argillitiche grigio-verdastre, seguiti da dolomie e calcari dolomitici da biancastri fino a nocciola o rossastri, fossiliferi, in banchi decimetrici o metrici. La formazione, che presenta uno spessore massimo di 50 m, ricopre in discordanza quella di Genna Selole, mentre il limite superiore è sempre erosivo con le successioni soprastanti (formazioni di Ussana, Nurallao e basalti delle Giare). In base all'associazione fossilifera (gasteropodi, ostracodi, lamellibranchi e brachiopodi), la formazione viene riferita al Giurassico medio-superiore (Dogger – Malm).

5.1.7. 6.1.7 SUCCESSIONE SEDIMENTARIA TERZIARIA

La successione sedimentaria terziaria, che poggia sul basamento paleozoico in discordanza, è ben rappresentata dalle coperture dell'Eocene inferiore.

(FMCa) Formazione di Monte Cardiga – Litofacies delle arenarie: nell'area di studio questa formazione affiora in strati tabulari direttamente discordanti sui depositi mesozoici o direttamente su quelli paleozoici. Si tratta della litofacies basale (**FMCa**) ad arenarie a cemento carbonatico o siliceo ben stratificate, e conglomerati poligenici grossolani in bancate di oltre 1 m di spessore, a prevalenti clasti elaborati del basamento paleozoico con quarzo, liditi e porfidi, in abbondante matrice arenacea. Alle arenarie, spesso gradate e laminate, sono intercalati livelli marnosi fossiliferi (gasteropodi, lamellibranchi, frustoli vegetali) di spessore 0,5 m. Lo spessore di questa litofacies varia tra 15 e 30 m, e l'età è riferibile all'Eocene inferiore (Ypresiano).

5.1.8. 6.2 SUCCESSIONE VULCANO-SEDIMENTARIA MIOCENICA

(USS) Formazione di Ussana: affiora nella parte centro-orientale dell'area vasta. La formazione è costituita da conglomerati clasto-sostenuti, fortemente eterometrici e poligenici, e da arenarie poco

classate organizzate in banchi grossolani, con sporadici livelli argillosi, e intercalazioni di livelli discontinui di piroclastiti e arenarie vulcanoclastiche (**USSe**), travertini (**USSf**) e calcari lacustri (**USSg**). La frazione conglomeratica è prevalente, e presenta clasti elaborati di dolomie e calcari mesozoici ed eocenici e arenarie eoceniche, e rari clasti del basamento paleozoico, con scarsa matrice sabbiosa o argillosa e buon grado di compattazione. Il contatto di base è discordante sul basamento paleozoico, sui depositi mesozoici e eocenici, mentre il contatto superiore con la formazione di Nurallao è graduale. La formazione presenta spessore variabile da pochi metri a 150 m, e contiene diverse associazioni fossilifere che permettono di riferirla all'Oligocene superiore – Miocene inferiore (Aquitano inferiore).



Figura 15 Formazione di Ussana

(NLL) Formazione di Nurallao: affiora a SE e a W di Nurri, ed è composta da un membro basale fossilifero noto come "conglomerato di Duidduru" (**NLL1**) di spessore variabile tra 0 e 30 m, costituito da depositi conglomeratici eterometrici a ciottoli e blocchi di tutte le formazioni precedenti, organizzati in livelli decimetrici alternati a livelli di arenarie grossolane stratificate e con differente grado di cementazione.

Il membro sommitale della formazione è rappresentato dalle arenarie di Serra Longa (**NLL2**), costituite da arenarie e conglomerati minuti con stratificazione parallela e incrociata, che passano lateralmente e verso l'alto ad arenarie grossolane a cemento carbonatico. Le arenarie costituiscono grossi banchi, e sono composte da elementi moderatamente selezionati di quarzo e feldspati, grano-sostenuti, intercalate a livelli conglomeratici decimetrici, e areniti e ruditi bioclastiche in strati spessi da 1 a 10 m. Lo spessore del membro varia da pochi metri fino a superare 100 m. Per il ricco

contenuto fossilifero (turrifellidi, coralli, foraminiferi, ostreidi, pettinidi, echinidi, ecc...) la formazione è datata Oligocene superiore – Burdigaliano inferiore.

(GST) Marne di Gesturi: è costituita da una successione prevalentemente marnoso-arenacea (GST), al cui interno sono distinti: conglomerati basali e sabbie di ambiente transizionale (GSTc), banchi di calcareniti ad alghe (Lithothamnium) (GSTb), e, nella parte superiore, livelli piroclastici e tufiti (GSTa). Sebbene questa formazione possa raggiungere spessori superiori ai 200 m, nell'area di studio i conglomerati basali non eccedono il metro, mentre i banchi di calcareniti presentano uno spessore costante di 3 m e una continuità laterale notevole, e i livelli tufitici raggiungono spessori massimi di 20 m.

Le Marne di Gesturi poggiano in discordanza sulle sottostanti formazioni del I ciclo miocenico o direttamente sul basamento paleozoico, e il tetto è sempre eroso. Per via dell'abbondante contenuto in foraminiferi, ostracodi, pteropodi, bivalvi ed echinidi, l'età attribuita a tali depositi è Burdigaliano superiore – Langhiano medio.

(ARX) Formazione di Aragixi – si tratta di piccoli lembi di vulcaniti piroclastiche, principalmente tufi a struttura porfirica per frammenti litici immersi in massa di fondo criptocristallina, tufi pomicei e cineritici, generalmente con un buon grado di litificazione. La composizione sembrerebbe dacitica, e il colore varia dal grigio al rossastro. La formazione presenta spessori intorno al metro, al massimo 15 m, con affioramenti che poggiano in discordanza sul basamento paleozoico o sulla formazione di Ussana, mentre il limite superiore è sempre eroso. L'età, stimata con datazioni radiometriche, indica un intervallo compreso tra l'Aquitano superiore e il Burdigaliano inferiore.

5.2. 6.2 SUCCESSIONE VULCANICA PLIOCENICA

(BGR) Basalti delle Giare: costituiscono espansioni tabulari che possono raggiungere estensioni di oltre 20 kmq, come nel caso di Nurri e Orroli. I basalti (**BGR**) sono spesso associati a accumuli di piroclastiti scoriacee (**BGRa**). Generalmente il deposito è costituito da una breccia basale sormontata da bancate decametriche di lava. Le lave sono vescicolate e presentano inclusi olocristallini chiari a composizione feldspatica, e scuri di composizione magmatica simile a quella della lava stessa. Lo spessore della formazione è compreso tra 5 e 30 m, che risulta formata da diverse colate sovrapposte. Le datazioni radiometriche hanno fornito un'età Pliocene medio-superiore.

5.3. 6.3 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 16 Depositi di versante, ciottoli in Muschelkalk (sx) e in SGA e PMN (dx)

(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.

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

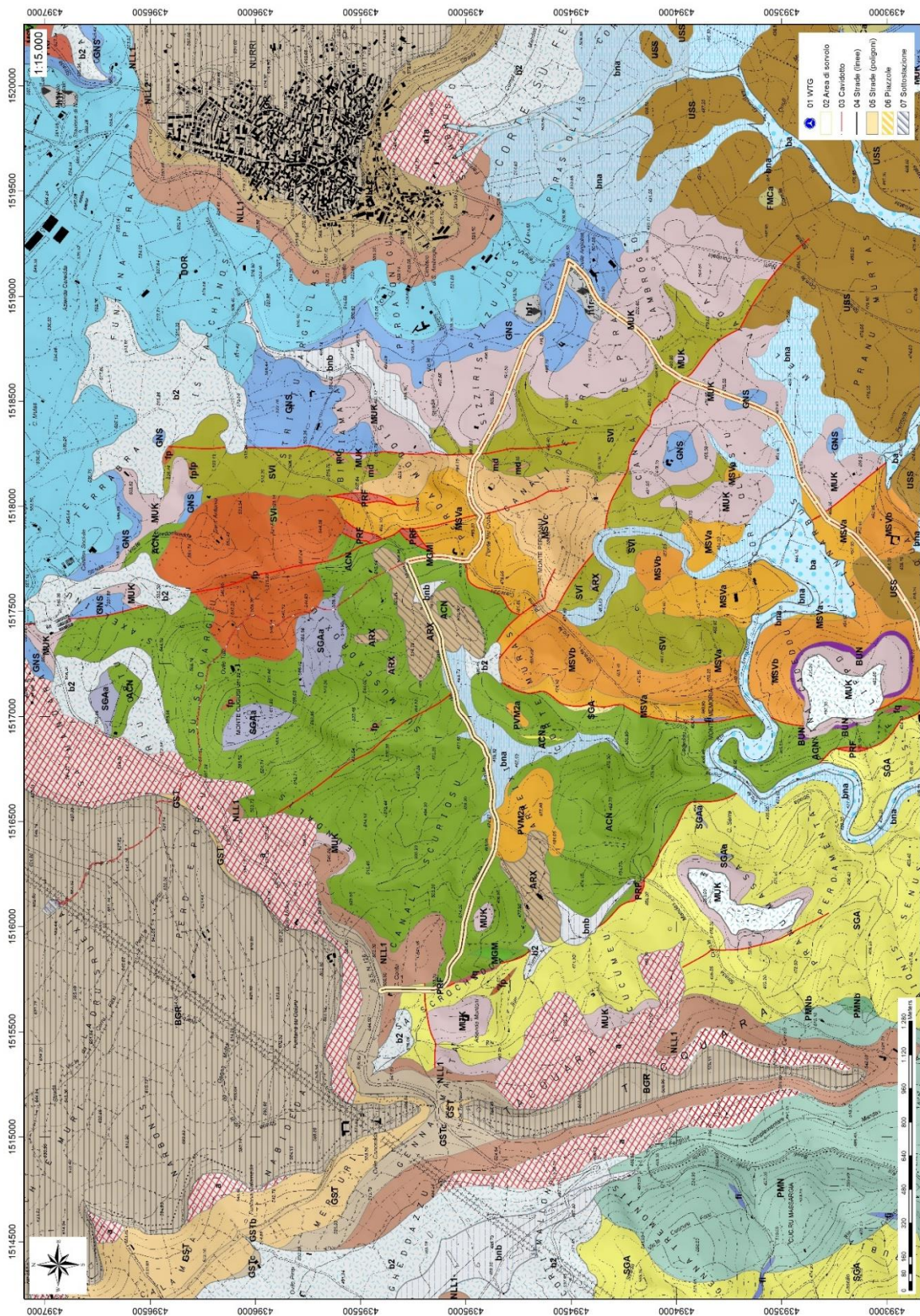


Figura 17 Carta Geologica del sito (settore Nord)

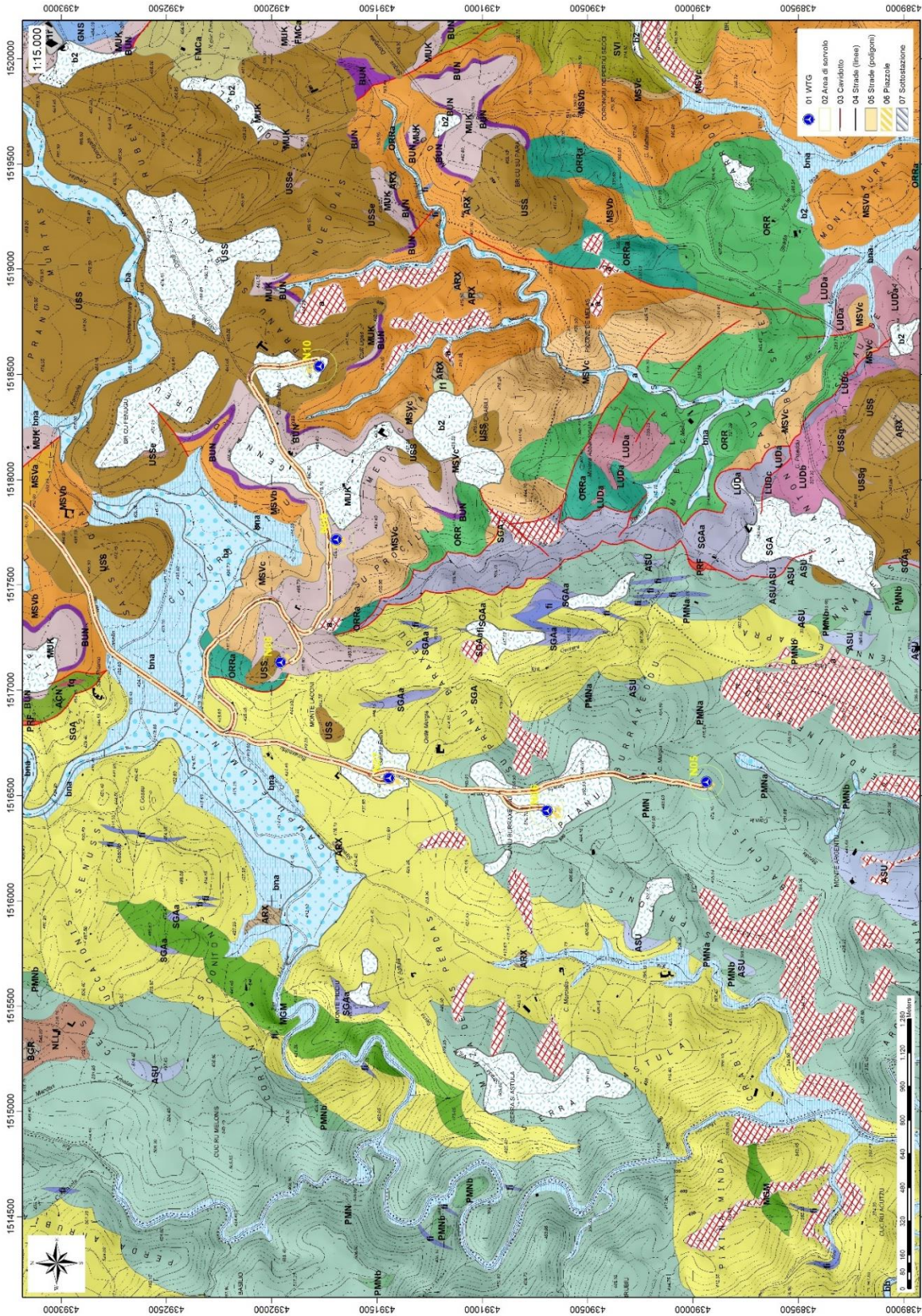


Figura 18 Carta Geologica del sito (settore Sud)

6. 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 n°3 stendimenti di sismica a rifrazione in onde P**. Tutte le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle rifrazioni. È stato inoltre eseguito il Rilievo topografico tramite GPS differenziale STONEX S70G (geofoni, punti di shot, elettrodi /picchetti) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni di tomografia elettrica e sismica. Sono stati infine elaborati i dati ottenuti tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego di software specialistici.

Tabella 1. Quadro riassuntivo delle indagini svolte

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

Tabella 1 Ubicazione degli stendimenti

6.1. MASW – TECNICA E PARAMETRI UTILIZZATI

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.

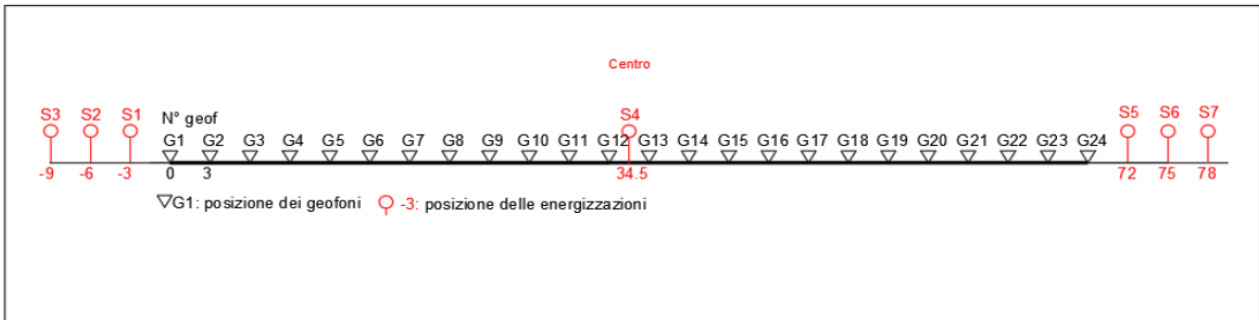
Profondità di indagine

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.

6.2. 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.



6.3. 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.

6.4. 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.

6.5. 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)

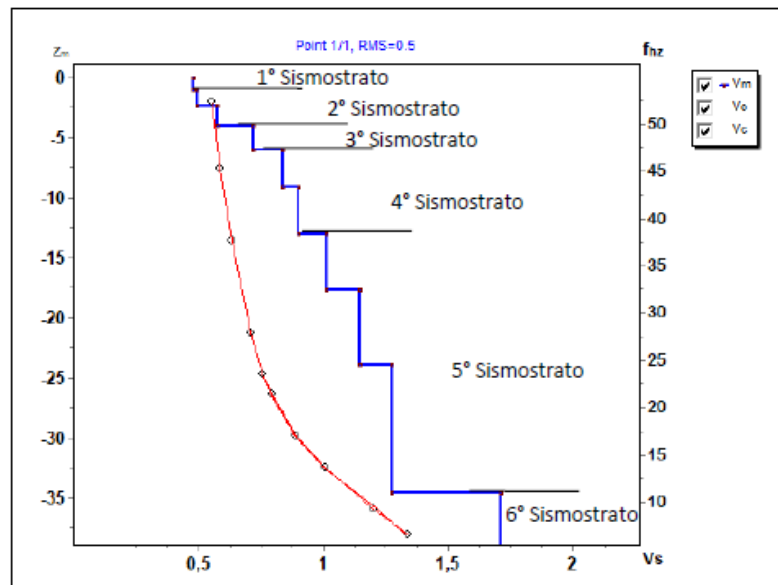
Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere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

6.1. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO MASW M1

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

- **1° sismostrato** (da 0,0 m a 1,0 m) con Vs di 480 m/s, Terre molto addensate e roccia totalmente fratturata
- **2° sismostrato** (da 1,0 m a 4,0 m) con Vs tra 500 e 570 m/s, Roccia totalmente fratturata
- **3° sismostrato** (da 4,0 m a 6,0 m) con Vs di 720 m/s, Roccia intensamente fratturata
- **4° sismostrato** (da 6,0 m a 12,9 m) con Vs tra 840 e 900 m/s, Substrato roccioso intensamente fratturato
- **5° sismostrato** (da 12,9 m a 34,5 m) con Vs tra 1010 e 1270 m/s, Substrato roccioso fratturato
- **6° sismostrato** (>34,5 m) con Vs di 1710 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M1 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, 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 6,0 m (Vs>800 m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 6,0 m di profondità dal p.c. è pari a: $V_s \text{ eq} = 6,0/0,0105 = 570 \text{ m/s}$ che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	V_p	V_s	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico E_d	Modulo di Young statico E_d	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità α o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-1,0	10%	1.800	960	480	0,33	1.108	111	412	1.108
2	1,0-4,0	10%	1.900	1.070	535	0,33	1.451	145	539	1.451
3	4,0-6,0	15%	2.000	1.440	720	0,33	2.766	415	1.040	2.766
4	6,0-12,9	20%	2.100	1.740	870	0,33	4.237	847	1.589	4.237
5	12,9-34,5	30%	2.300	2.280	1.140	0,33	7.973	2.392	2.991	7.973
6	>34,5	40%	2.300	3.420	1.710	0,33	17.937	7.175	6.727	17.937

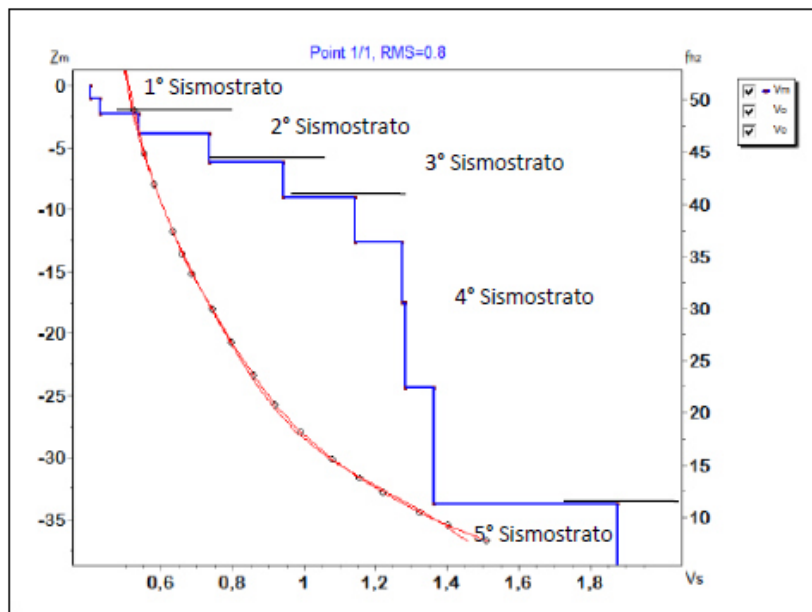
Figura 19 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

6.1. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO MASW M2

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M2, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati, Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

- **1° sismostrato** (da 0,0 m a 2,3m) con Vs tra 400 e 430 m/s, Terre molto addensate
- **2° sismostrato** (da 2,3 m a 6,2 m) con Vs tra 540 e 730 m/s, Roccia intensamente fratturata
- **3° sismostrato** (da 6,2 m a 9,1 m) con Vs di 940 m/s, Substrato roccioso alterato e argillificato
- **4° sismostrato** (da 9,1 m a 33,8 m) con Vs tra 1140 e 1360 m/s, Substrato roccioso fratturato
- **5° sismostrato** (>33,8 m) con Vs di 1880 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M2 - PROFILO Vs



La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, 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 6,2 m (Vs>800 m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 6,2 m di profondità dal p.c. è pari a: $V_s eq = 6,2/0,0116 = 535$ m/s che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	V_p	V_s	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico E_d	Modulo di Young statico E_d	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-2,3	10%	1.800	830	415	0,33	824	82	314	824
2	2,3-6,2	10%	1.900	1.270	635	0,33	2.040	204	765	2.040
3	6,2-9,1	15%	2.000	1.880	940	0,33	4.717	708	1.765	4.717
4	9,1-33,8	20%	2.100	2.500	1.250	0,33	8.748	1.750	3.285	8.748
5	>33,8	40%	2.300	3.760	1.880	0,33	21.683	8.673	8.130	21.683

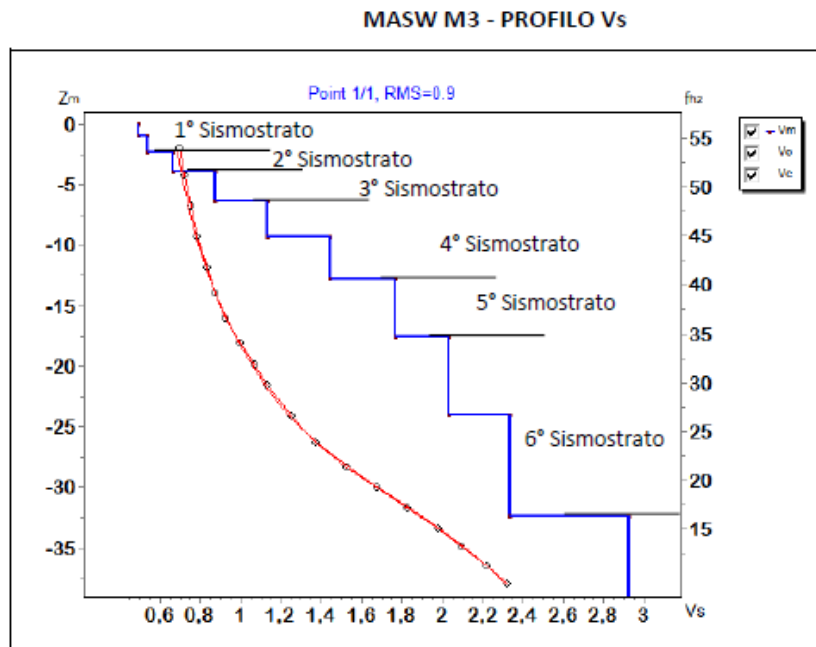
Figura 20 Parametri di deformazione dinamici e statici dei terreni determinati tramite misure sismiche

6.1. RISULTATI DELLE INDAGINI DEL SITO MASW M3

L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs dello stendimento M3, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati, Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

- **1° sismostrato** (da 0,0 m a 2,3 m) con Vs tra 500 e 540 m/s, Terre e roccia totalmente fratturata
- **2° sismostrato** (da 2,3 m a 4,0 m) con Vs di 670 m/s, Roccia intensamente fratturata
- **3° sismostrato** (da 4,0 m a 6,4 m) con Vs di 880 m/s, Substrato roccioso intensamente fratturato
- **4° sismostrato** (da 6,4 m a 12,8 m) con Vs tra 1140 e 1450 m/s, Substrato roccioso fratturato
- **5° sismostrato** (da 12,8 m a 17,6 m) con Vs di 1770 m/s, Substrato roccioso sano
- **6° sismostrato** (da 17,6 m a 32,4 m) con Vs tra 2030 e 2340 m/s, Substrato roccioso

Sano



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

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

con:

h_i spessore dell'*i*-esimo strato;

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

N numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 4,0 m ($V_s > 800$ m/s).

La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 4,0 m di profondità dal p.c. è pari a: $V_s \text{ eq} = 4,0/0,0069 = 580 \text{ m/s}$ che dà luogo ad una categoria B, ossia:

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

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

Sismostrato	Prof/zona	CT*	Densità γ	V_p	V_s	Coefficiente di Poisson ν	Modulo di Young dinamico E_d	Modulo di Young statico E_d	Modulo di taglio G_0	Modulo di comprimibilità o di Bulk - K
			[Kg/m ³]	[m/s]	[m/s]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	0,0-2,3	10%	1.800	1.040	520	0,33	1.294	129	490	1.294
2	2,3-4,0	10%	1.900	1.340	670	0,33	2.275	228	853	2.275
3	4,0-6,4	20%	2.000	1.760	880	0,33	4.129	826	1.549	4.129
4	6,4-12,8	30%	2.100	2.590	1.295	0,33	9.395	2.818	3.521	9.395
5	12,8-17,6	40%	2.200	3.540	1.770	0,33	18.378	7.351	6.894	18.378
6	17,6-32,4	50%	2.300	4.370	2.185	0,33	29.283	14.642	10.984	29.283

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

<p>TAVOLA 1 PLANIMETRIA GENERALE UBICAZIONE INDAGINI Comune di Nurri Progetto: "Realizzazione di un parco eolico in agro di Nurri-Isili (SU)"</p>	<p>LEGENDA</p> <ul style="list-style-type: none">○ Sondaggi geognostici— Stendimenti sismici MASW e a rifrazione
---	--



Figura 22 Ubicazione degli stendimenti

7. MODELLAZIONE GEOLOGICA

7.1. MODELLO GEOLOGICO DI SITO

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

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

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

L'analisi ha permesso di fatto di definire il modello geologico del sito ed in particolare, in relazione alle diverse condizioni geologiche e geostrutturali rilevate, sono stati individuati 3 modelli geologici rappresentativi descritti di seguito:

7.2. MODELLO GEOLOGICO 01 - N05, N06

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati geofisici M1 e M2, i dati dei sondaggi SN_01 e SN_02 e i dati dei rilievi geomeccanici.

A partire dal piano campagna dopo un primo spessore di suolo di circa 0,15m si incontra il substrato litoide costituito da uno spessore di circa 6 m di metarenarie alterate della Formazione di Pala Manna alterata, in appoggio agli Scisti a Graptoliti da mediamente alterati a inalterati.

Le condizioni dell'ammasso roccioso, appartenenti alla litologia metarenitica sono state studiate in un affioramento situato a 470m della N05, lo stesso si presenta mediamente fratturato, sono state riconosciute 3 principali famiglie di fratture, la prima con immersione a circa N100 e inclinazione tra i 30° e i 50°, mentre le restanti presentano immersione N260 e circa N180 con inclinazione tra i 30° e i 60°. Il materiale prelevato dai due sondaggi è costituito nei primi sei metri da alternanze di livelli lapidei mediamente alterati e fortemente fratturati e livelli parzialmente o totalmente argillificati, in cui la struttura della roccia madre è stata obliterata. Da un confronto tra i dati si evince che i risultati dell'analisi geofisica risultano in accordo con le informazioni stratigrafiche. 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 di laboratorio 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 di tali criticità nelle pareti poste a N ed a W, per quanto riguarda scivolamenti rotazionali e/o planari.

0.00m - 0.15m Suolo.

0.15m - 6.00m Metarenarie alterate.

6.00m - in poi Metapeliti.

Nurri - MODELLO GEOLOGICO 01		(N05,N06)		
Dati Parametri Resistenza				
Tipo di Terreno		S1-Suolo	S2 - Metarenarie alterate	S3 - Metapeliti
Descrizione				
Peso di volume	[kg/mc]	1800	1950	2050
Peso di volume saturo	[kg/mc]	2000	2000	2100
Angolo di attrito interno	[°]	25	23.34	33.13
Coesione	[Mpa]	0	0,120	0,281
Dati Parametri Deformabilità				
Modulo elastico	[Mpa]	1108	2108	6418
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	0,33
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	412	765	2407
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	480	635	1025

7.3. MODELLO GEOLOGICO 02 – N08, N09, N10

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati geofisici, i dati del sondaggio SN_03 e i dati dei rilievi geomeccanici. A partire dal piano campagna il substrato in questo modello è costituito da uno spessore di circa 5m da litologie carbonatiche appartenenti alla Formazione del Muschelkalk, che poggia sugli Scisti a Graptoliti che si presentano da mediamente alterati a inalterati. Le condizioni dell'ammasso roccioso, appartenenti alla litologia carbonatica, sono state studiate in un affioramento situato a est del parco, il quale si presenta fortemente fratturato. Le discontinuità sono date da stratificazione sub-orizzontale e da tre principali famiglie di fratture che si intersecano ortogonalmente dividendo l'ammasso in cubi dalle dimensioni talvolta sub-decimetriche.

Il materiale prelevato dal sondaggio SN_03 è costituito nei primi quattro metri da calcari di colore beige estremamente fratturato. Da un confronto tra i dati si evince che i risultati dell'analisi geofisica risultano in accordo con le informazioni stratigrafiche.

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 di laboratorio 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 N ed a E per quanto riguarda scivolamenti planari e crolli/ribaltamenti.

0.00m-5m Calcari fratturati.

5m-in poi Metapeliti.

Nurri - MODELLO GEOLOGICO 02		(N08, N09, N10)		
Dati Parametri Resistenza				
Tipo di Terreno		S1 – Calcari fratturati	S2 - Metapeliti	
Descrizione				
Peso di volume	1850	2050	1950	
Peso di volume saturo	1900	2100	2000	
Angolo di attrito interno	35.13	33.13	23.34	
Coesione	0,288	0,281	0,120	
Dati Parametri Deformabilità				
Modulo elastico	[Mpa]	1784,5	6418	
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	671,5	2407	
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	595	1025	

7.1. MODELLO GEOLOGICO 03 – N07

Per la caratterizzazione sono stati utilizzati i dati di rilevamento geologico e geomeccanico di campo. In questo modello, a differenza dei due precedenti, il substrato si compone di una sola litologia, che viene differenziata a sua volta per il suo stato di alterazione; in mancanza di dati diretti, ma per questioni più cautelative, è stato ipotizzato in base alle evidenze di sito e dal comportamento delle litologie direttamente studiate un livello superficiale di circa 5-6m di Scisti a Graptoliti alterati che poggiano sulla medesima litologia allo stato sano. Le caratteristiche del livello alterato sono state acquisite dal sismostrato 4 della MASW M1, mentre quelle del substrato sano dal sismostrato 4 della MASW M3, poiché è stato possibile verificare la natura del materiale di tali livelli mediante osservazione diretta nei sondaggi geognostici rispettivamente NU_SN_01 e NU_SN_03. Tale modello così desunto dovrà essere confermato mediante indagini dirette in fase di progettazione esecutiva. Le condizioni dell'ammasso roccioso, appartenenti a questa litologia sono state studiate in un affioramento situato 400m a Est del SN_01. Esso si presenta mediamente fratturato e poco alterato, è presente una scistosità immergente tendenzialmente verso il versante con inclinazione inferiore a quella del pendio. Si distinguono 2 famiglie principali di fratture entrambe sub-verticali. Sono stati rilevati casi di piccoli scivolamenti sulla superficie di scistosità lungo tagli subverticali in corrispondenza del passaggio di piccole faglie, dove la roccia si presentava infatti parzialmente argillificata.

Nurri - MODELLO GEOLOGICO - GEOTECNICO 03 (N07)				
Dati Parametri Resistenza				
Tipo di Terreno		S1 – Calcari fratturati	S2 - Metapeliti	
Descrizione				
Peso di volume	[kg/mc]	2050	1950	
Peso di volume saturo	[kg/mc]	2100	2000	
Angolo di attrito interno	[°]	33.13	23.34	
Coesione	[Mpa]	0,281	0,120	
Dati Parametri Deformabilità				
Modulo elastico	[Mpa]	1784,5	6418	
Coefficiente di Poisson	[]	0,33	0,33	
Modulo di taglio (G)	[Mpa]	671,5	2407	
Velocità onde di taglio Vs	[m/sec]	595	1025	

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 di laboratorio 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 di tali criticità nelle pareti poste a N e a W, per quanto riguarda scivolamenti rotazionali e/o planari.

0.00m-5m Metapeliti alterate.

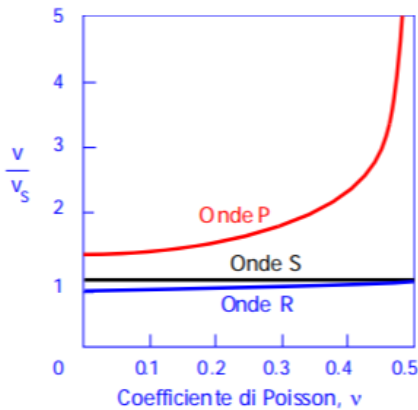
5m-in poi Metapeliti inalterate.

Ai fini del calcolo della distanza di propagazione delle vibrazioni verrà preso in considerazione il valore di Vs corrispondente al livello orizzonte 0,00m-2,00m poiché spesso la coltre superficiale non è presente e la roccia è in affioramento.

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

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

il rapporto Vp/Vs dipende dal coefficiente di Poisson; in genere la Vr è sempre di poco minore della Vs.



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 M3

$\nu = 0,33$ $V_r = 0,933 V_s$

Profondità in m (da-a)	Vs (m/sec)	ν	Vr (m/sec)
0,00 - 2,30	520	0,33	485
2,30 - 4,00	670	0,33	625
4,00 - 6,40	880	0,33	821
6,40 - 12,80	1295	0,33	1208

8. 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. 23 (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.

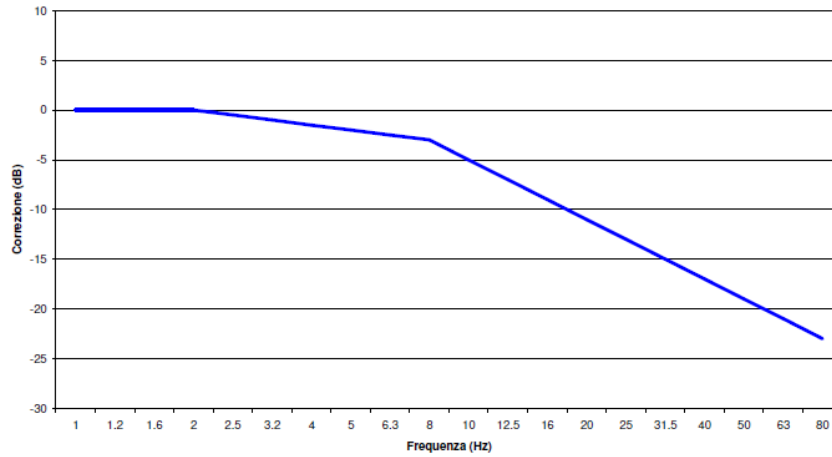


Figura 23 - Curva di ponderazione asse generico

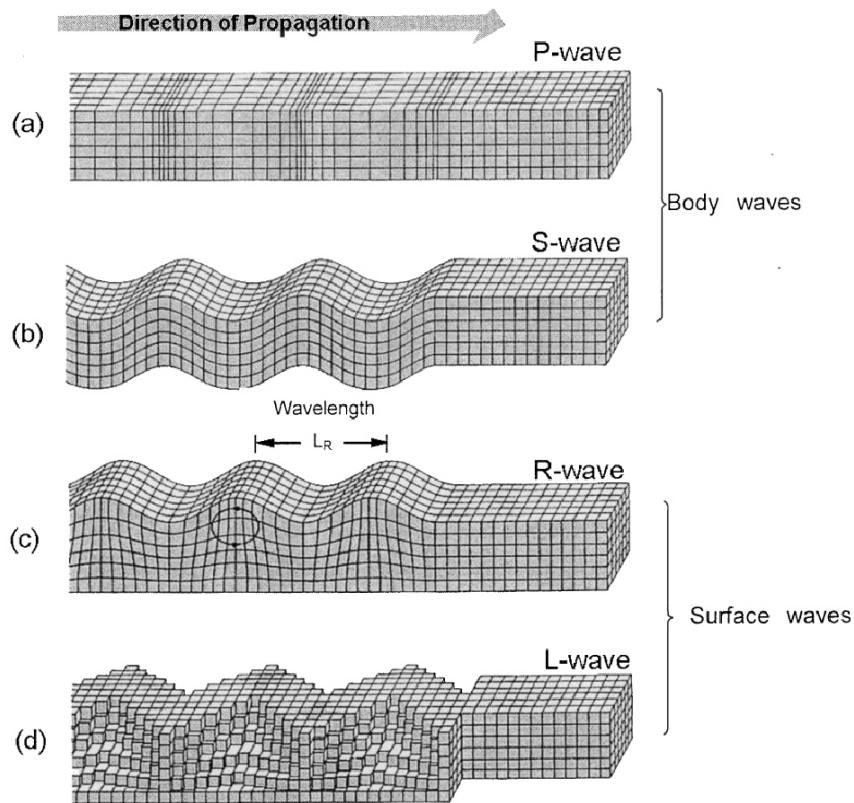


Figura 24 - Tipologia di onde: a) e b) onde di volume, c) e d) onde di superficie

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.

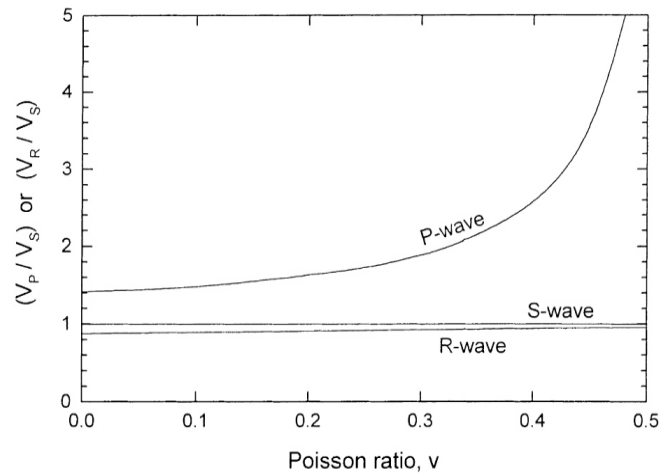


Figura 25 - rapporto tra le velocità di propagazione Vp e Vr

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.25 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.

8.1. 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

8.2. 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/M4 $v = 0,33$ $V_r = 0,933 V_s$

Profondità in m (da-a)	V_s (m/sec)	v	V_r (m/sec)	η	n
0,00 – 2,30	520	0,33	485	0.05	0.5
2,30 – 4,00	670	0,33	625	0.01	0.5
4,00 - 6,40	880	0,33	821	0.01	0.5
6,40 –12,80	1295	0,33	1208	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. 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, betoniere, 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 105 transiti giornalieri in occasione dell'approntamento delle materie necessarie alla realizzazione delle opere fondanti ai quali si sommano circa 10-15 viaggi necessari all'approntamento 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/sec²** (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**.

9.4. SCENARI DI RIFERIMENTO DI CANTIERE

Scenario 01 – attività di sistemazione della rete viaria e opere civili della cabina collettore: 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*

Distanza minima oltre la quale il valore di vibrazione è inferiore alla soglia limite di 7,2 mm/sec ²	
Scenario 01	214 m
Scenario 02	146m
Scenario 03**	214 m

*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.

9.1. 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.

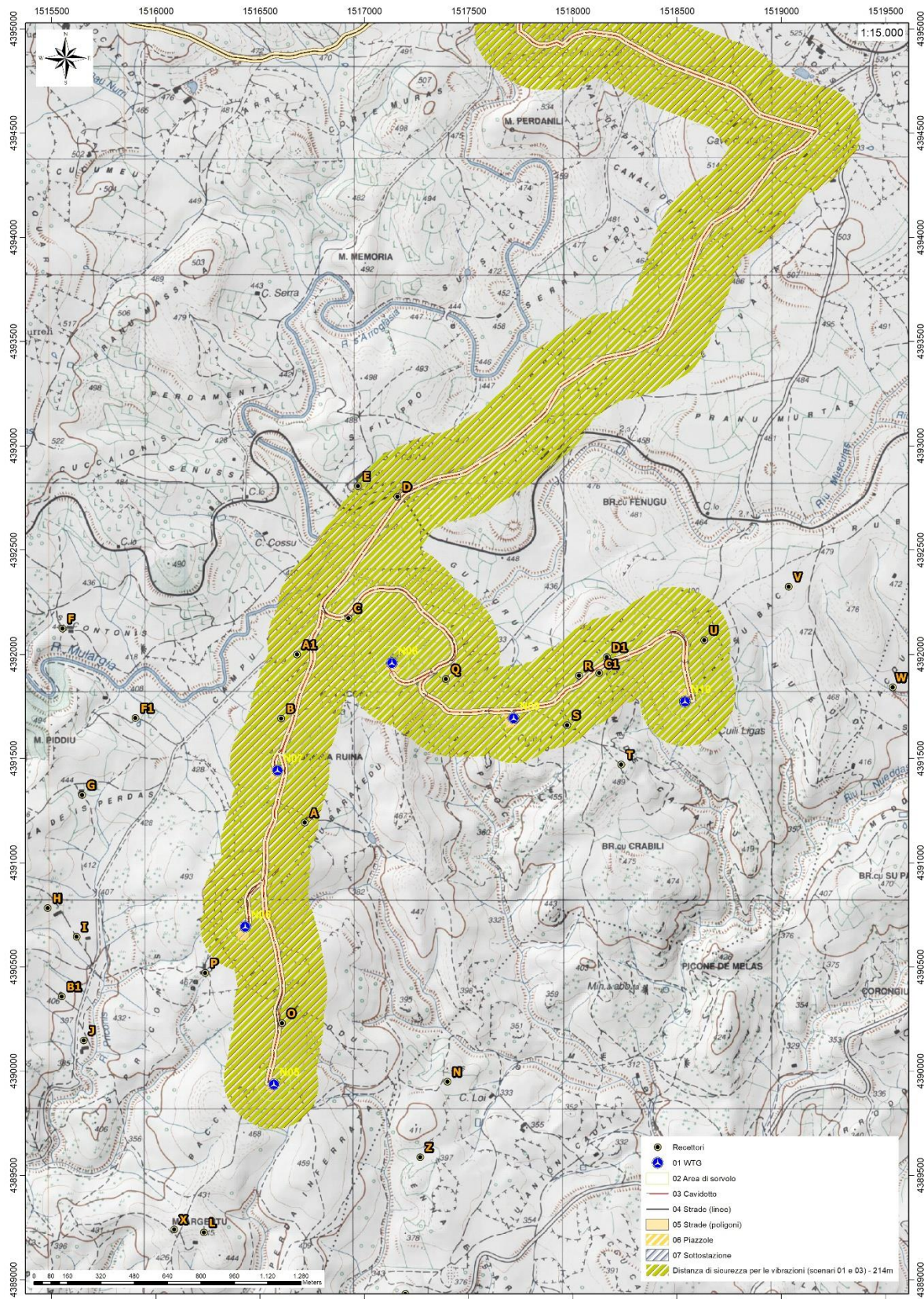


Figura 26 Distanza di sicurezza per le vibrazioni (scenario 01-03) - 214m

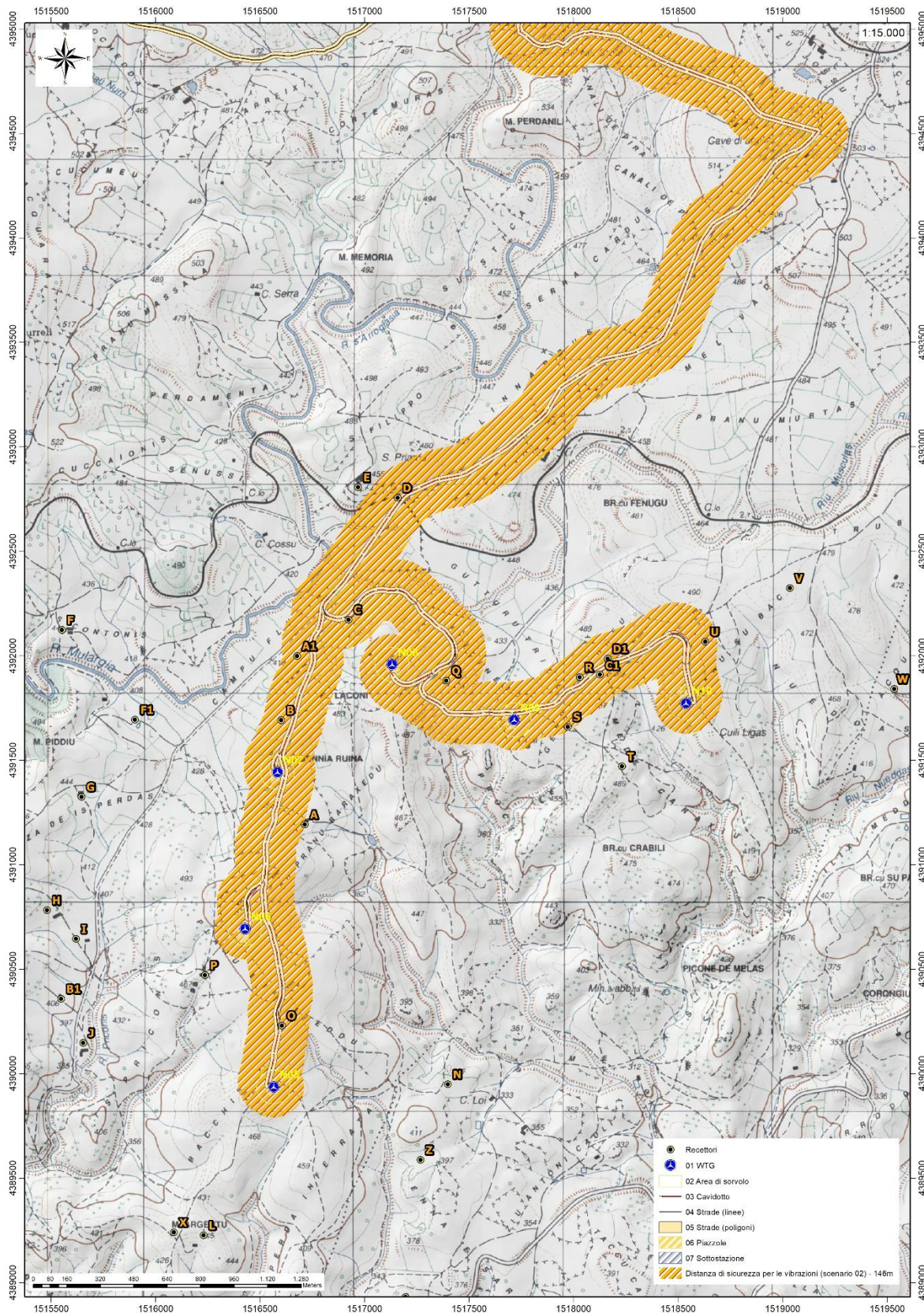


Figura 27 Distanza di sicurezza per le vibrazioni (scenario 02) - 146m

9.2. 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).

Le fonti di rumore e vibrazione emesse da una turbina eolica sono essenzialmente di natura aerodinamica, (causate dall'interazione tra il vento e le pale), meccanica (generate dagli attriti meccanici dei componenti del rotore e del sistema di trasmissione del generatore) e cinetica (generate dalle oscillazioni e dal passaggio e cambiamento di stato da stazionario a combinato.

Le oscillazioni sono causate dal vento che insiste sul piano del rotore degli aerogeneratori generando momenti forzanti opportunamente controllati dalle strutture di fondazione, nonché dall'interazione aerodinamica e meccanica delle pale con la torre.

Diversi studi della BWEA (British Wind Energy Association) hanno mostrato che a distanza di poche decine di metri il rumore risultante dalle esigue vibrazioni prodotte dalle turbine eoliche risulta sostanzialmente poco distinguibile rispetto al rumore residuo.

In particolare, per i fenomeni vibratorii è possibile analizzare come questi si trasmettono nel terreno circostante le fondazioni di sostegno delle torri degli aerogeneratori.

Le vibrazioni perdono energia durante la propagazione nel terreno e la loro ampiezza diminuisce con l'aumentare della distanza dalla sorgente.

Vari studi inerenti a Wind Farm realizzate con questo modello di pala eolica (Vestas V162-5.6; HH = 125m; RD = 162m)¹ riportano che le vibrazioni associate al funzionamento delle turbine eoliche possono essere rilevate con gli strumenti, ma lo sono sotto la soglia di percezione, anche all'interno

¹ HERITAGE WIND PROJECT PRE-CONSTRUCTION SOUND LEVEL IMPACT ASSESSMENT ,2020

di un parco eolico, rilevando valori ben al di sotto dei limiti di percezione umana. Anche da monitoraggi diretti attraverso accelerometri risulta che i movimenti sismici (vibrazioni) indotti sul terreno sono così bassi da difficilmente indurre qualsiasi risposta fisica e/o strutturale. Due studi MA DEP review (Styles 200521; Schofield 201022) indicano che a 100m di distanza da una turbina il moto massimo indotto è pari a circa 120 nanometri (circa 1Hz).

Infine, il Ministero dell'Ambiente, del Clima e dell'Energia dello Stato federale del BadenWuerttemberg, Germania, ha pubblicato uno studio dettagliato sugli infrasuoni e le vibrazioni indotte da turbine eoliche. I risultati hanno rilevato che i livelli di velocità di vibrazione di una turbina Nordex N117 da 2,4 MW a distanze inferiori a 300 metri erano inferiori a $0,1 \times 10^{-4}$ metri/sec.

Le misurazioni delle vibrazioni trasmesse al suolo sono state anche effettuate da Epsilon su turbine Siemens 2.3 e GE 1.5sle.

Le velocità di vibrazione RMS massime al suolo erano 0,071 mm/secondo ($0,71 \times 10^{-4}$ metri/secondo) nella banda di un terzo di ottava a 8 Hz. Questo è stato misurato circa 300m sottovento da un WTG GE 1.5sle sotto la massima potenza e maggior condizione di vento al suolo.

La velocità di vibrazione terrestre di fondo RMS alla stessa posizione era di 0,085 mm/sec. Nessuna vibrazione percettibile è stata avvertita dal funzionamento delle turbine eoliche. Il GE 1.5sle ha una velocità di rotazione massima di 20 rpm (frequenza di passaggio della lama di 1 Hz) e Siemens 2.3 ha una velocità di rotazione massima di 15,4 giri/min (frequenza di passaggio lama di 0,77 Hz).

Le frequenze massime di rotazione per le turbine eoliche del progetto proposto sono:

◆ Vestas V162-6,8 = 12,1 giri/min

Pertanto, la vibrazione trasmessa dal suolo può essere rilevata dagli strumenti ma non è diversa dalla vibrazione di fondo sempre presente e non preoccupante.

In fase di esercizio sarà definito un piano di monitoraggio nel tempo che consideri anche le eventuali variazioni di livello di vibrazioni al suolo dovute all'usura delle strutture.

9.3. 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 28 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:

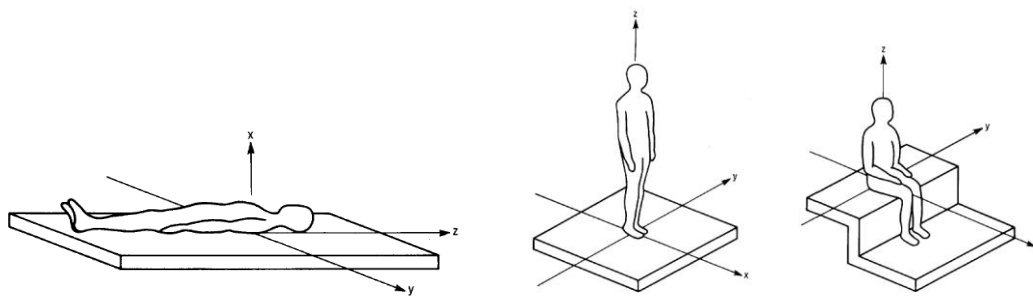


Figura 29 Sistema cartesiano di riferimento per persona sdraiata, in piedi o seduta

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.

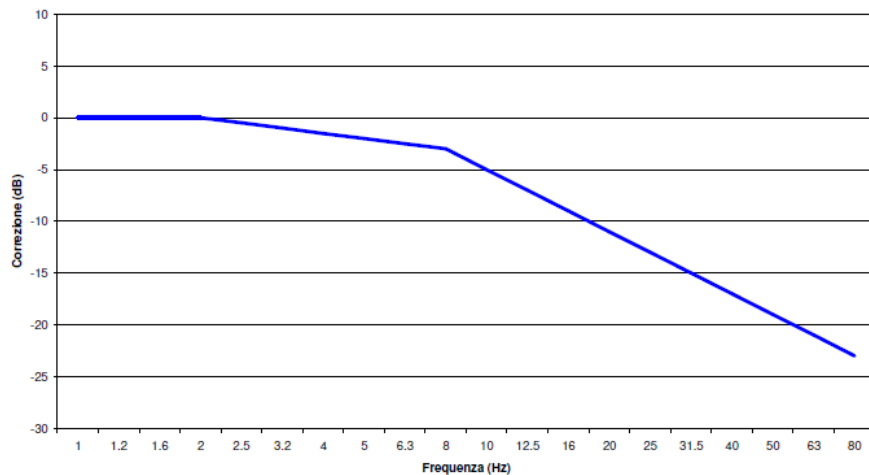


Figura 30 Curva di ponderazione per un asse generico - UNI 9614

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

10. SPETTRI DI EMISSIONE DELLE MACCHINE OPERATRICI

10.1. 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.

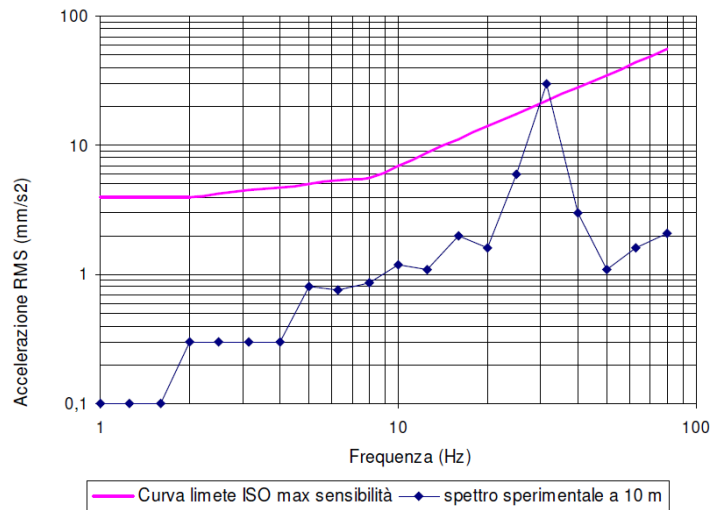


Figura 32 Spettro di emissione della sorgente di un rullo vibrante a 10m dall'asse di cantiere

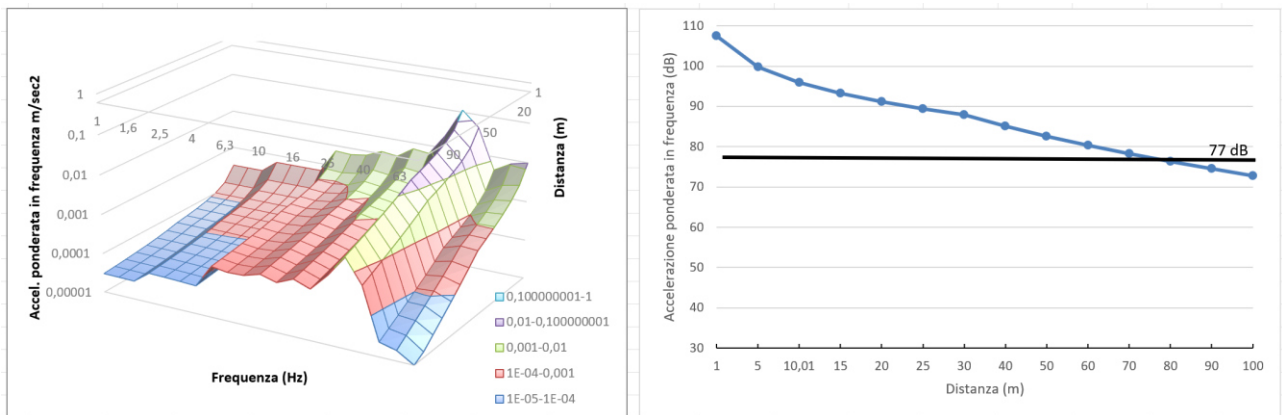


Figura 33 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

10.2. 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.

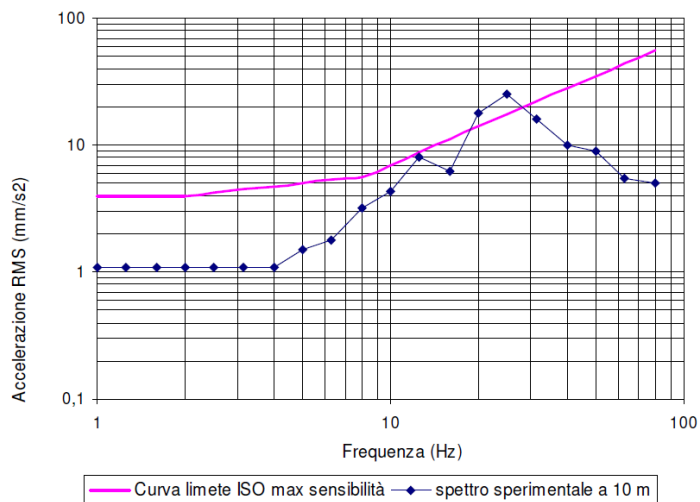


Figura 34 Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata a 10m dall'asse di cantiere

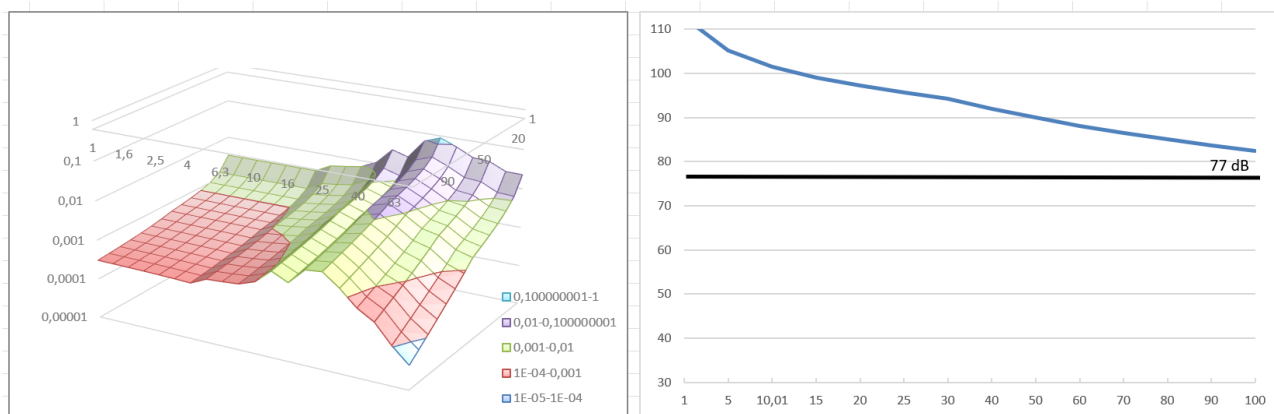


Figura 35 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

10.3. 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.

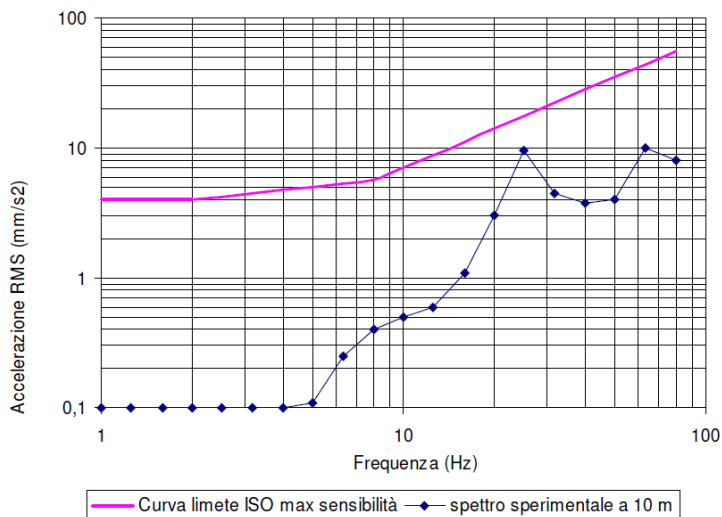


Figura 36 Spettro di emissione della sorgente di un autocarro 10m dall'asse di cantiere

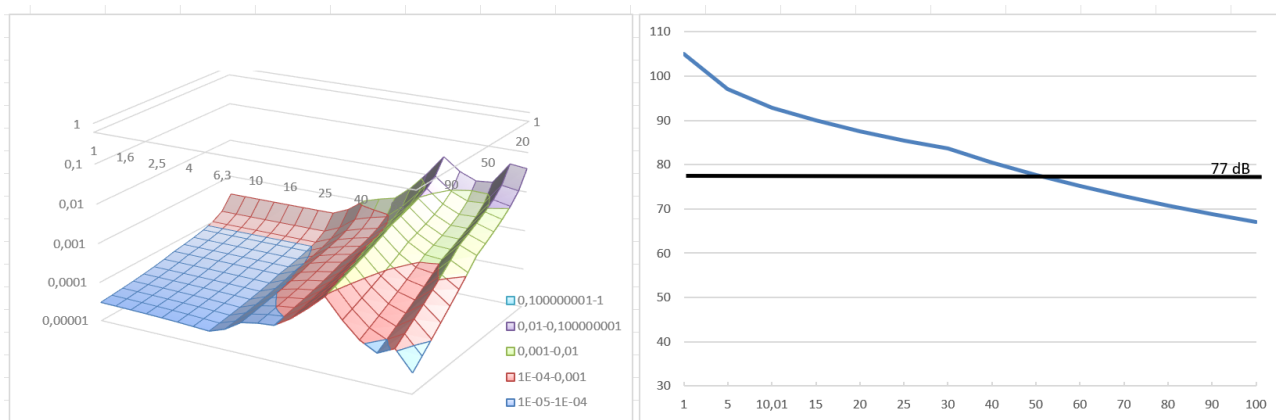


Figura 37 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

10.4. 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.

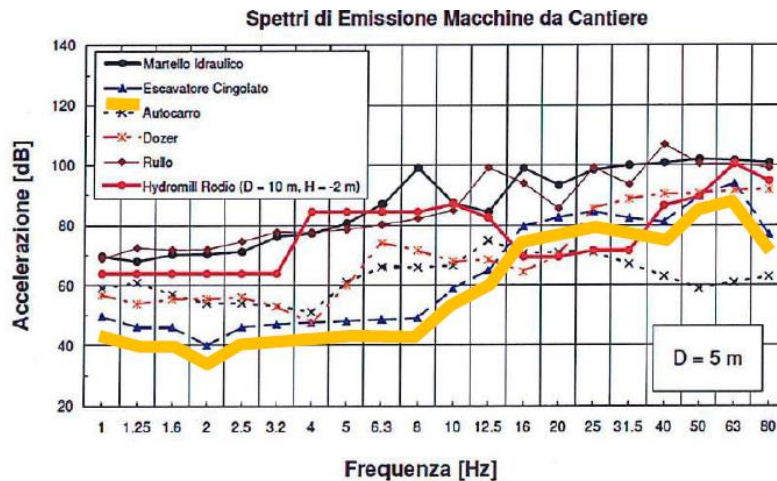


Figura 38 Spettro di emissione della sorgente di un escavatore cingolato 5m dall'asse di cantiere

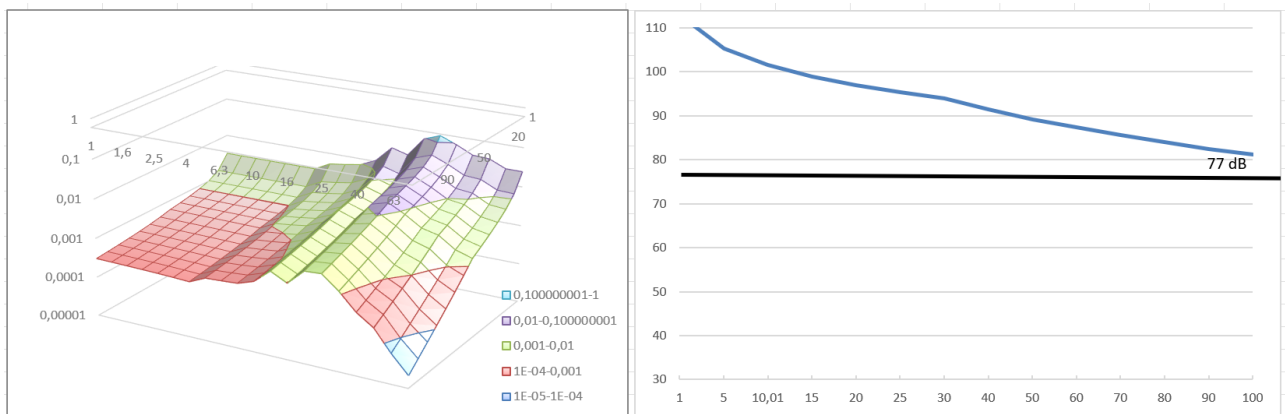


Figura 39 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

10.5. 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.

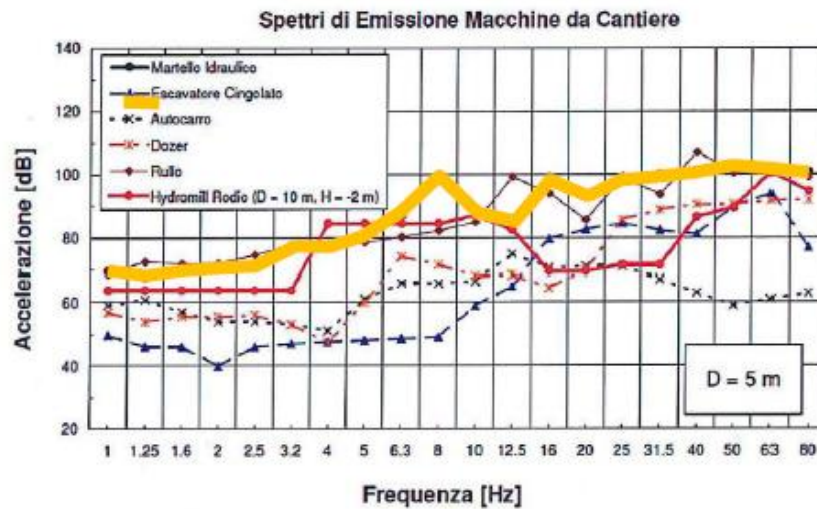


Figura 40 Spettro di emissione della sorgente di un martello idraulico 5m dall'asse di cantiere

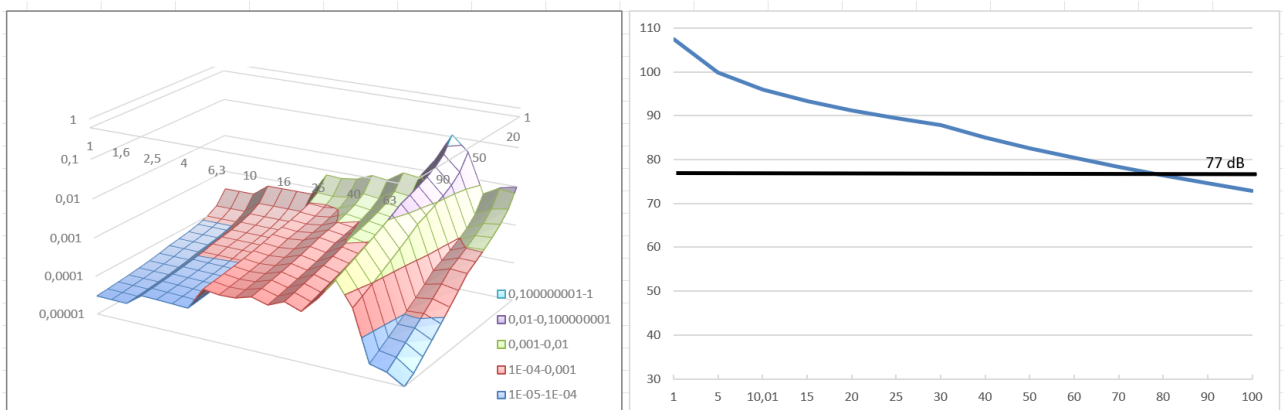


Figura 41 Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni

11. 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 da 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.

10.6. 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.

12. 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 $7,2 \text{ mm/sec}^2$.

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 146m (posa dei cavidotti) e i 214m (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.