



Nuovo impianto per la produzione di  
energia da fonte eolica nel comune di  
Siurgus Donigala e Selegas (SU)

RELAZIONE PREVISIONALE  
DELL'IMPATTO DOVUTO ALLE  
VIBRAZIONI

Rev. 0.0

Data: 12 Marzo 2021

WIND004.REL003f

 **ORDINE DEI GEOLOGI**  
REGIONE SARDEGNA  
SEZIONE A  
N. 656 Dott. Geol. COSMA ATZORI

*Cosma Atzori*

Committente:

**Siurgus S.r.l.**  
Via Michelangelo Buonarroti 39,  
20145 Milano  
C. F. e P. IVA: 11189260968  
PEC: siurgus@pec.it

Incaricato:

**Queequeg Renewables, ltd**  
Unit 3.21, 1110 Great West Road  
TW80GP London (UK)  
Company number: 111780524  
email: mail@quenter.co.uk



## SOMMARIO

1	Premessa e finalità dello studio .....	5
2	Normativa di riferimento .....	5
3	Inquadramento geografico generale .....	6
4	Proprietà meccaniche del terreno .....	11
4.1	Inquadramento geologico generale .....	11
	(ORR) Formazione di Orroledu:.....	15
	(SGAa) Scisti a Graptoliti – litofacies dei metacalcari:.....	15
	(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria .....	16
4.2	Campagna indagini di caratterizzazione geotecnica e sismica .....	17
4.3	M.A.S.W. - Tecnica e parametri utilizzati .....	18
4.3.1	Base sismica PN-SISM01-M1 .....	20
4.3.2	Base Sismica PN-SISM02-M2.....	21
4.3.3	Base Sismica PN-SISM03-M3.....	22
	Modello Geologico 01 – ARENARIE DI SAN VITO – WTG001, WTG002, WTG003, WTG004, WTG005 ....	23
	Modello Geologico 02 – Form. PALAMANNA – WTG006, WTG007, WTG008, WTG009 WTG014 .....	24
	Modello Geologico 03 – ARGILLOSCISTI – WTG010, WTG011, WTG012 .....	24
	Modello Geologico 04 – PORFIROIDI – WTG11, WTG13,.....	24
	Tabella di sintesi delle proprietà di sintesi dei terreni di interesse .....	25
5	Propagazione delle vibrazioni nel terreno .....	26
6	Modello di propagazione dell’onda nel terreno.....	28
7	Valutazione della propagazione delle vibrazioni .....	29
8	Sorgenti di vibrazione .....	31
	Analisi della fase di cantiere per la costruzione delle opere in progetto .....	31
	Potenziale incremento dei flussi di traffico indotto dal cantiere sulla viabilità locale.....	32
	Modello per il calcolo dell’impatto dovuto alle vibrazioni in fase di cantiere .....	32
	Scenari di riferimento di cantiere .....	33
	Scenari di riferimento di esercizio.....	34
9	Limiti di riferimento .....	34
10	Recettori .....	37
11	Modalità di gestione del disturbo dovuto alle vibrazioni .....	38
	Criteri di azione e misure di mitigazione .....	38
	Spettri di emissione delle macchine operatrici .....	41
	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN RULLO VIBRANTE .....	41

---

	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UNA PALA CINGOLATA.....	42
	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN AUTOCARRO.....	43
	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN ESCAVATORE CINGOLATO.....	44
	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI DI UN MARTELLO IDRAULICO.....	45
12	Conclusioni.....	46

## 1 Premessa e finalità dello studio

La caratterizzazione della qualità dell'ambiente in relazione agli effetti delle vibrazioni deve consentire di individuare e stimare le modifiche e/o le interferenze introdotte dall'intervento proposto e valutarne la compatibilità con gli standard esistenti, in riferimento alla verifica sia del disturbo da esse potenzialmente generate sull'uomo, sia di un eventuale potenziale danno agli edifici, per la salvaguardia del patrimonio architettonico/archeologico.

Il presente documento tecnico riporta la valutazione previsionale dei livelli di vibrazione previste, durante le fasi di cantiere, sui ricettori sensibili più vicini alle aree di installazione degli aerogeneratori del Parco Eolico e alla viabilità interessata, nell'ambito della redazione del Progetto Definitivo del Parco Eolico denominato "Pranu Nieddu" dislocato nel territorio comunale di Siurgus Donigala e Selegas (SU) e sulla viabilità laddove sono previste lavorazioni (es. posa del cavidotto o sistemazione stradale).

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

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

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

## 2 Normativa di riferimento

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

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

### 3 Inquadramento geografico generale

Siurgus Donigala è un Comune della provincia del Sud Sardegna situato nella zona centro-meridionale della Sardegna, a 452 metri sul livello del mare.

L'inquadramento cartografico di riferimento è il seguente:

- Cartografia ufficiale dell'Istituto Geografico Militare I.G.M scala 1:25 000. Serie 25 -Fogli: 548 sez. I "Goni".
- Carta Tecnica Regionale scala 1:10 000 - Fogli: 548030 "Siurgus Donigala" e 548040 "Goni".



Figura 3.1 - Panoramica dalla WTG008



Figura 3.2 - Panoramica verso la WTG007



Figura 3.3 - Panoramica da Monte Maiori verso WTG006

È prevista l'installazione di quattordici aerogeneratori di ultima generazione ad asse orizzontale (HAWTG, Horizontal axis wind turbine generators) di potenza pari a 6,6 MW ciascuno, per una potenza complessiva di 92,4 MW, denominati in ordine crescente da WTG001 a WTG014. Gli aerogeneratori saranno montati su torri tubolari di acciaio che porteranno il mozzo del rotore a un'altezza da terra di 135 metri, e l'altezza massima dal suolo di ogni macchina sarà pertanto pari a 220 metri. È inoltre prevista l'installazione di una torre anemometrica di misura che monitorerà le condizioni di vento e ambientali della zona di impianto per tutta la vita di quest'ultimo.

Le coordinate dei punti di installazione delle torri eoliche nel sistema di riferimento Gauss Boaga sono:

Aerogeneratore	CooX	CooY
WTG001	1517391.7	4379731.565
WTG002	1515453.157	4380220.568
WTG003	1516310.778	4379732.159
WTG004	1516411.857	4380510.227
WTG005	1515352.852	4379070.653
WTG006	1518769.36	4381515.51
WTG007	1518695.773	4380179.694
WTG008	1517955.29	4380172.884
WTG009	1517996.712	4381010.066
WTG010	1520006.376	4380812.018
WTG011	1522458.964	4382373.284
WTG012	1521595.857	4381214.763
WTG013	1520707.075	4381435.689
WTG014	1519028.715	4380665.58

Gli aerogeneratori previsti sono macchine con potenza nominale pari a 6,6 MW, orientati sopravvento, con controllo attivo del pitch delle pale e dello yaw della navicella. Per la progettazione di dettaglio, ai fini della valutazione dei carichi, delle dimensioni e di tutti i valori tecnici e di ingombro architettonico sono stati utilizzati gli aerogeneratori SG-170 di Siemens Gamesa. In fase realizzativa le macchine potranno però essere differenti, rimanendo nelle caratteristiche tecniche e dimensionali delle stesse.

Gli aerogeneratori previsti sono macchine con potenza nominale pari a 6,6 MW, orientati sopravvento, con controllo attivo del pitch delle pale e dello yaw della navicella. Per la progettazione di dettaglio, ai fini della valutazione dei carichi, delle dimensioni e di tutti i valori tecnici e di ingombro architettonico sono stati utilizzati gli aerogeneratori SG-170 di Siemens Gamesa. In fase realizzativa le macchine potranno però essere differenti, rimanendo nelle caratteristiche tecniche e dimensionali delle stesse.

Il rotore (rotor) del generatore è composto da tre pale ognuna di lunghezza pari a 83,33 metri. Nel complesso,

il gruppo rotante ha un diametro di 170 metri, e spazza un'area pari a 22.698 metri quadrati. Il mozzo del generatore sarà collocato ad un'altezza di 135 metri (hub height), mentre l'altezza massima raggiunta da ogni generatore (tip height), inclusa l'altezza massima da terra delle pale, sarà di 220 metri.

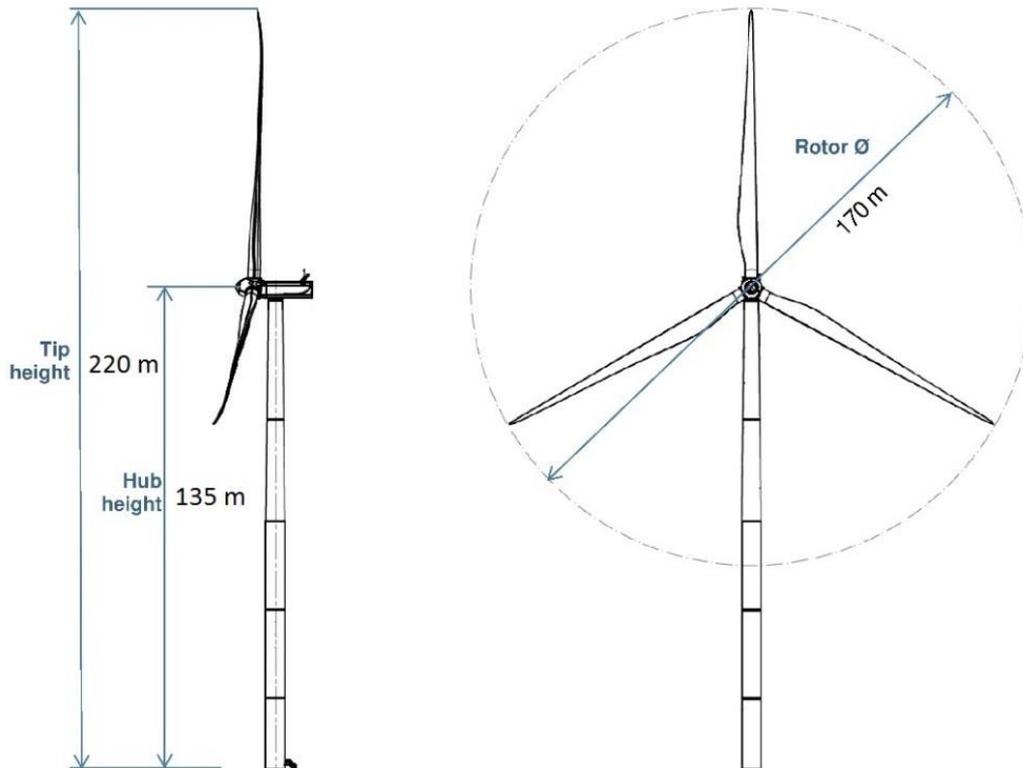


Figura 3.4 - generatore eolico ad asse orizzontale

L'energia prodotta sarà convogliata verso la stazione elettrica SE "Selegas", gestita dall'operatore Terna S.p.A., tramite un cavidotto in media tensione a 30 kV interamente interrato su strada, che raggiungerà la stazione di innalzamento della tensione di competenza del proponente collocata come da elaborati prodotti (WIND004.ELB10a, WIND004.ELB011b, WIND004.ELB011c) attraversando la frazione Sisini del Comune di Senorbì, il comune di Suelli (SU) e quello di Selegas (SU) attraverso elettrodotto interrato su strada di proprietà pubblica.

Le strade di accesso al parco sono state previste secondo le specifiche di curva, inclinazione longitudinale e pendenza previste dal produttore delle componenti del generatore eolico, così da permettere ai mezzi pesanti che opereranno durante la fase di cantiere di manovrare e percorrere la viabilità. Un trasportatore

specializzato nella movimentazione e nella posa di strutture eoliche ha supportato queste valutazioni provvedendo a una fattibilità per le soluzioni di viabilità e opere civili previste in progetto.

La viabilità dovrà sopportare un peso per asse pari a 24,5 tonnellate, una pressione massima di 2,45 kg/cm. Lo sbancamento stradale di percorrenza dovrà essere pari a 6 metri, compresi 50 centimetri per lato di fascia di distanza. I gradienti longitudinali non dovranno superare il 15% sui rettilinei e il 10% in prossimità delle curve. Le curve stesse dovranno avere un raggio di curvatura interna non inferiore a 32,5 metri.

Le componenti con il maggiore ingombro che percorreranno il tragitto dal porto di Oristano ai luoghi d'intervento sono le navicelle dei generatori, i tronchi delle torri di sostegno e le pale.

La viabilità di arrivo prevista è composta da Strade Statali, Provinciali e Comunali. La viabilità esistente è per lo più in condizioni idonee, e saranno necessari adeguamenti solo nell'ultimo tratto di accesso al sito di progetto, limitando gli interventi a modifiche temporanee del tracciato per permettere il transito in sicurezza delle componenti e dei mezzi.

In dettaglio i mezzi di trasporto caricheranno dalla parte del porto di Oristano dedicata al transito commerciale, e attraverseranno le zone di smistamento mezzi onde poi immettersi sulla Strada Provinciale 97.

Il Campo Ovest è attraversato da due viabilità oggetto di adeguamento: la prima che collega le WTG002 e WTG004 alla viabilità per il Comune di Sisini (SU) e la Strada Comunale che collega San Basilio (SU) a Siurgus Donigala (SU). La seconda, parallela alla prima e collegata alla medesima viabilità pubblica, serve le WTG001, WTG003 e WTG005.

Il Campo Centrale ha una viabilità d'accesso dedicata per le WTG006, WTG008, WTG007 e WTG009 che sbocca direttamente sulla Strada Comunale Goni-Siurgus Donigala.

Il Campo Est infine collega la WTG011 e la WTG012 direttamente sulla viabilità comunale per Goni, e la WTG010 e la WTG013 con un collegamento diretto con il Campo Centrale.

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

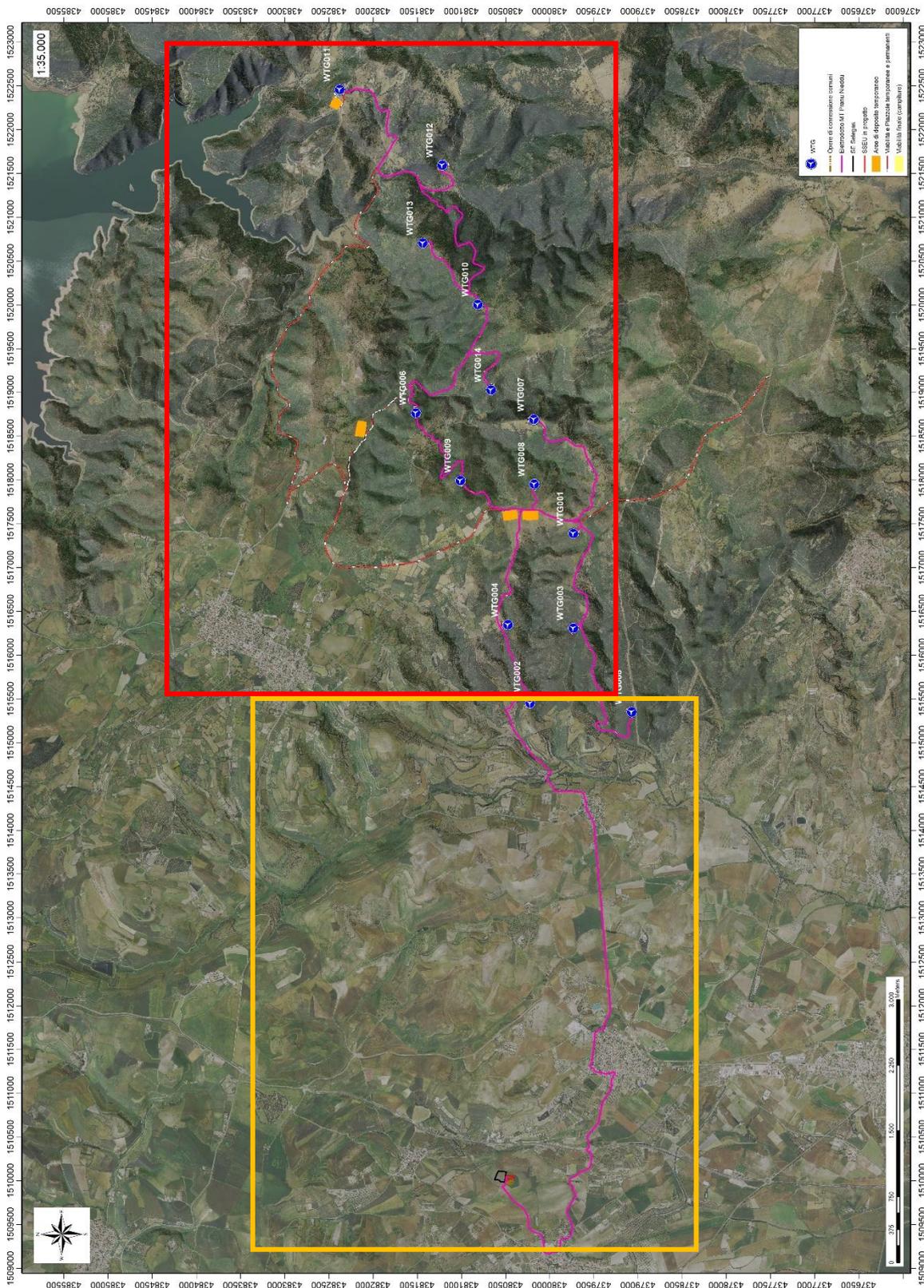


Figura 3.5 Localizzazione dell’area comprensiva delle turbine (in rosso) e del cavidotto e sottostazione (in arancio) - (Google Earth)

## 4 Proprietà meccaniche del terreno

### 4.1 Inquadramento geologico generale

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.

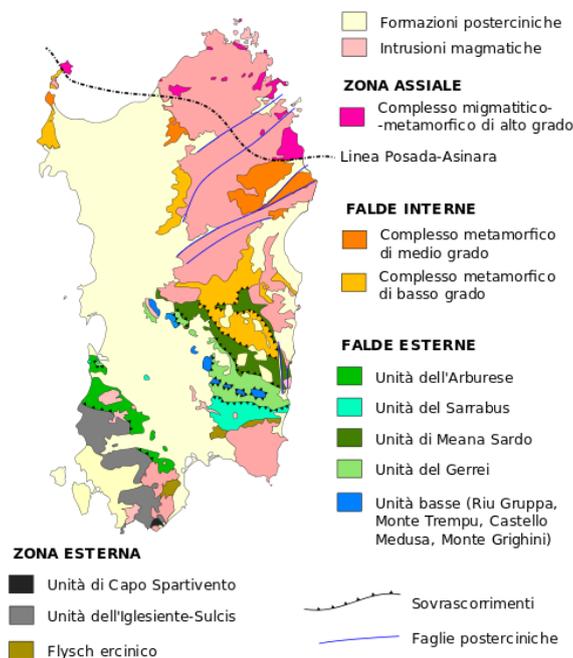


Figura 4.1: schema geologico-strutturale della Sardegna.

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. Successivamente, nel Cambriano, la messa in posto dei batoliti granitici ercinici ha prodotto metamorfismo termico e di alta pressione delle rocce esistenti.

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

Quest'orogenesi ha prodotto in Sardegna tre zone metamorfiche principali (Figura 3.1) che, da NE verso SW (procedendo dal nucleo orogenetico verso l'avanfossa) sono note come: Zona Assiale (Sardegna NE), Zona a Falde interne (Sardegna centrale), e Zona a Falde esterne (Sardegna SW).

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

Il basamento varisico è stato interessato da più fasi di emersione a partire dal Permiano; nel Cretaceo si ha nuovamente emersione, che sembra aver interessato tutta l'isola, la lacuna comprende quasi tutto il Paleocene; depositi trasgressivi dell'Eocene inferiore sono ben rappresentati nell'area di studio rappresentati dalla Formazione di Monte Cardiga che rappresenta la successione più potente e completa della Sardegna orientale (Fig. 3.2).

Seguono le coperture dei depositi quaternari costituiti da depositi di versante coltri eluvio colluviali e depositi alluvionali.

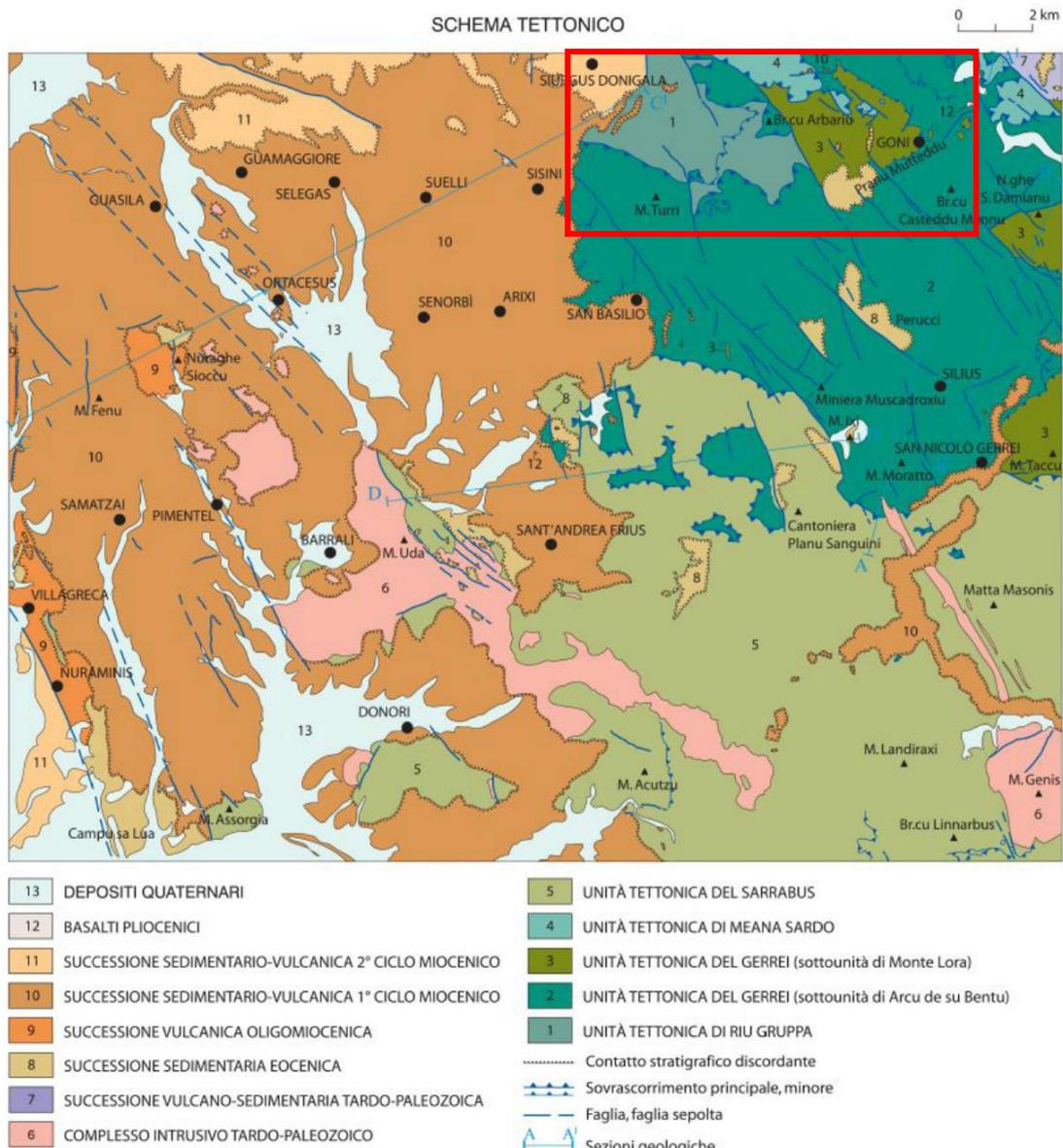


Figura 4.2: Schema Tettonico dell'area di studio (tratto da Funedda et al., 2014 Note Illustrative Foglio CARG Senorbi)

### Depositi quaternari:

**a - Coltri eluvio-colluviali.** Depositi di versante. Detriti con clasti angolosi, talora parzialmente cementati. OLOCENE

**b2 - Coltri eluvio-colluviali.** Detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE

**(bnb) Depositi alluvionali terrazzati:** si tratta di depositi prevalentemente sabbiosi (bnb), di spessore non superiore di 4-5 m, di ambiente di conoide o piana alluvionale e situati in prossimità dei corsi d'acqua. Olocene.

**(GSTc) Formazione delle Marne di Gesturi** – Litofacies basale: affiora a Siurgus Donigala ed è costituita da arenarie microconglomeratiche e conglomerati discontinui. Lo spessore nell'area di studio arriva a 100 metri, mentre l'età attribuita a tali depositi è Burdigaliano superiore – Langhiano medio-superiore.

**(NLL) Formazione di Nurallao:** affiora a sud di Siurgus Donigala, ed è composta da un membro basale noto come "conglomerato di Duidduru" (NLL1). Oligocene superiore – Burdigaliano inferiore

#### **Successione vulcano-sedimentaria Oligo-Miocenica**

**(USS) Formazione di Ussana:** affiora tra Siurgus Donigala e San Basilio, ed è costituita da conglomerati eterometrici grossolani, con ciottoli e blocchi di dimensioni da centimetriche a decimetriche di rocce del Paleozoico, ben elaborati, alternati a livelli di argille siltose arrossate. Oligocene superiore – Miocene inferiore

#### **Successione Eocenica della Sardegna Orientale:**

**FMCa** – Litofacies nella **Formazione di Monte Cardiga**. Arenarie e puddinghe: arenarie grossolane e conglomerati poligenici con prevalenti clasti del basamento cristallino paleozoico, raramente argilliti con resti di piante con ostree e cerizi. EOCENE INF.

#### **Corteo filoniano:**

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

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

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

#### **Unità tettonica di Meana Sardo:**

**MSVb** – Litofacies nella **Formazione di Monte Santa Vittoria**. Metavulcaniti, probabili originarie piroclastiti e metaepiclastiti ("Formazione Serra Tonnai"). ORDOVICIANO ?MEDIO

**MSVa** – Litofacies nella **Formazione di Monte Santa Vittoria**. Metavulcaniti a chimismo intermedio e basico, metaepiclastiti, metarenarie feldspatiche e metaconglomerati con componente vulcanica. ORDOVICIANO ?MEDIO

**(ORR) Formazione di Orroledu**: costituito da alternanze di metarenarie e metasiltiti grigie, distinte in due litofacies: metagrovacche e metarenarie arcose (ORRa) affioranti alla base della successione, e metacalcari (ORRc) grigio-bluastri, spesso silicizzati.

**(SGAa) Scisti a Graptoliti – litofacies dei metacalcari**: affiora ad est di Siurgus, ed è costituita da metacalcari scuri fossiliferi. L'età attribuita è Siluriano – Devoniano medio.

#### **Unità tettonica del Gerrei:**

**PMN – Formazione di Pala Manna**. Alternanze di metasiltiti, metarenarie e metaquarzoareniti. Olistoliti di diaspri neri (liditi). CARBONIFERO ?INF.

**SGAb** – Litofacies negli **Scisti a Graptoliti AUCT. "Scisti a Tentaculiti" AUCT.**: Alternanze decimetriche regolare di metasiltiti e metacalcari grigi. SILURIANO - DEVONIANO MEDIO

**SGAa – Scisti a Graptoliti AUCT**. Metapeliti carboniose e metasiltiti con graptoliti, con intercalati livelli di diaspri neri (liditi). SILURIANO - DEVONIANO MEDIO

**SGA** - Litofacies negli **Scisti a Graptoliti AUCT**. Metacalcari scuri e metacalcari nodulari fossiliferi, con abbondanti crinoidi e ortoceratidi. SILURIANO - DEVONIANO MEDIO

**ACN – Argilloscisti di Rio Canoni**. Metapeliti grigio-verdastre, metasiltiti carbonatiche fossilifere, rare intercalazioni di metacalcari e metavulcaniti basiche. ORDOVICIANO SUPERIORE

**MGM – Metarcose di Genna Mesa**. Metarcose e metagrovacche arcose, metaquarzoareniti e metaconglomerati quarzosi, in grossi banchi o massivi. ORDOVICIANO SUP.

**MRV – Metaconglomerato di Muravera**. Metaconglomerati eterometrici poligenici, grossolani, con clasti arrotondati di quarzoareniti e arenarie listate, in matrice filladica, alternati a metasiltiti e metarenarie di colore verde, talora grigio scuro. ORDOVICIANO ?MEDIO

**MSV – Formazione di Monte Santa Vittoria**. Metavulcaniti a chimismo intermedio e basico, metaepiclastiti, metarenarie feldspatiche e metaconglomerati con componente vulcanica. ORDOVICIANO ?MEDIO

**PRF - Porfiroidi AUCT**. Metarioliti e metariodaciti con struttura occhiadina, metaepiclastiti ORDOVICIANO ?MEDIO

**SVI - Arenarie di San Vito.** Alternanze irregolari, da decimetriche a metriche, di metarenarie micacee, quarziti e metasiltiti, e livelli di metaconglomerati minuti quarzosi nella parte alta. CAMBRIANO MEDIO - ORDOVICIANO INF.

#### Unità tettonica di Riu Gruppa:

**(MSV) Formazione di Monte Santa Vittoria:** è costituita da metavulcaniti di colore scuro tendente al verde (**MSVb**), e da metavulcaniti chiare (**MSVc**), correlabili rispettivamente con le formazioni di Serra Tonnai e Monte Corte Cerbos riconosciute nell'unità tettonica di Meana Sardo.

**(MGM) Metarcose di Genna Mesa:** si tratta di metarenarie arcose, metagrovacche e metasiltiti grigio-verdi, talora alternate a quarziti grossolane biancastre in bancate metriche, e qualche raro metaconglomerato a ciottoli di quarzo. (Ordoviciano superiore)

**(SGA) Scisti a graptoliti:** sono costituiti da metapeliti carboniose di colore nerastro (**SGA**), con intercalazioni lentiformi di metacalcari (**SGAa**) e di metasiltiti beige con sottili intercalazioni di calcari, e selci nere ("liditi").

**Formazione di Pala Manna (PMN):** si tratta di alternanze di metarenarie micacee, metasiltiti e quarziti e rari elementi di metacalcari, caratterizzati da foliazioni e di piano assiale (**PMN**).

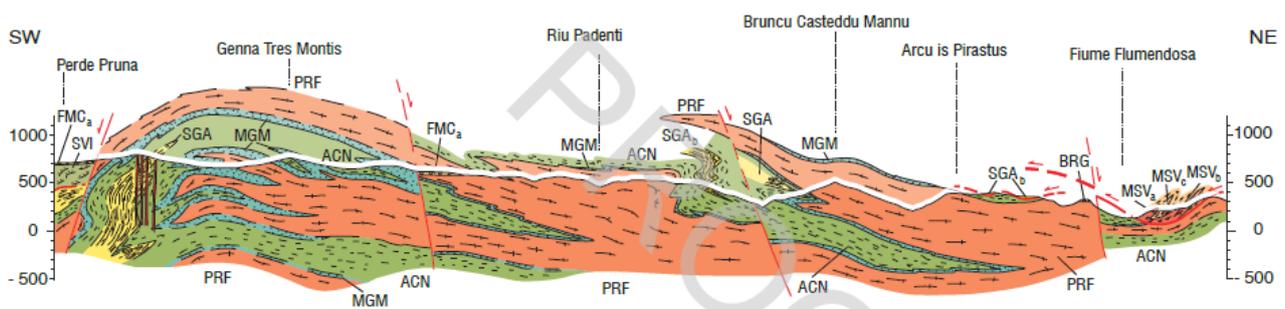


Figura 4.3: Schema tettonico e sezione geologica SW-NE rappresentativa dell'area vasta ad est di Goni (Funedda et al., 2014).

Per la descrizione completa delle facies e dell'assetto geostrutturale si rimanda all'elaborato "Relazione Geologica".

## 4.2 Campagna 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)

Sono state utilizzate due metodiche di indagine:

Diretta in sito – mediante l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo con il prelievo e la conservazione delle carote in apposite cassette per lo studio e il prelievo di campioni da caratterizzare in laboratori e l'esecuzione di prove in foro per la stima delle caratteristiche di resistenza dei terreni (SPT);

Indiretta in sito – mediante l'utilizzo delle metodiche di indagine geofisica - esecuzione di profili di sismica a rifrazione e MASW;

Diretta in Laboratorio Geotecnico: caratterizzazione geotecnica di campioni di roccia e terreni prelevati dai sondaggi (point load, classificazione delle terre, prove di taglio diretto)

Le indagini in sito sono state realizzate tra il 12 e il 24 novembre 2020 dalla Ditta Dr. Antonello Angius con sede in Cagliari (CA) e dalla ditta GEOSERVICE con sede in Villa San Pietro (CA). Le analisi di tipo geotecnico sono state effettuate presso il Laboratorio Geotecnico GEOSYSTEM con sede in Quartu Sant'Elena (CA). Le operazioni si sono svolte sotto la Direzione Lavori della scrivente.

Le sedi di indagine sono state scelte in modo da essere rappresentative dei diversi assetti geologico-strutturali che interesseranno le opere di progetto.

Nello specifico il piano delle indagini è stato eseguito come segue:

1. n.5 sondaggi a carotaggio continuo della profondità massima raggiunta di 13,00 mt con l'esecuzione complessiva di prove n° 2 SPT in foro;
2. prelievo di campioni di carota a quote definite e successiva caratterizzazione geotecnica dei terreni con analisi in laboratorio (peso di volume e grado di umidità, prove su spezzoni di carota Point Load);

Viene di seguito riportata una tabella con l'ubicazione delle stesse corredata da una tabella riassuntiva.

Tabella 4.1 - Ubicazione dei sondaggi geognostici

Sondaggio	Località	Coordinate Nord	Coordinate Est	Profondità (m) da p.c.
S_01	Masoni Aragana	39°33'59"	9°12'10"	7,00
S_02	Genna de Crexia	39°34'32"	9°13'55"	7,70
S_03	Genna de Crexia	39°34'40"	9°13'33"	14,30
S_04	Pressi “Sedda de s’ortu”	39°35'26"	9°15'31"	15,00
S_05	Corte Luxiumini	39°34'44"	9°14'55"	15,00

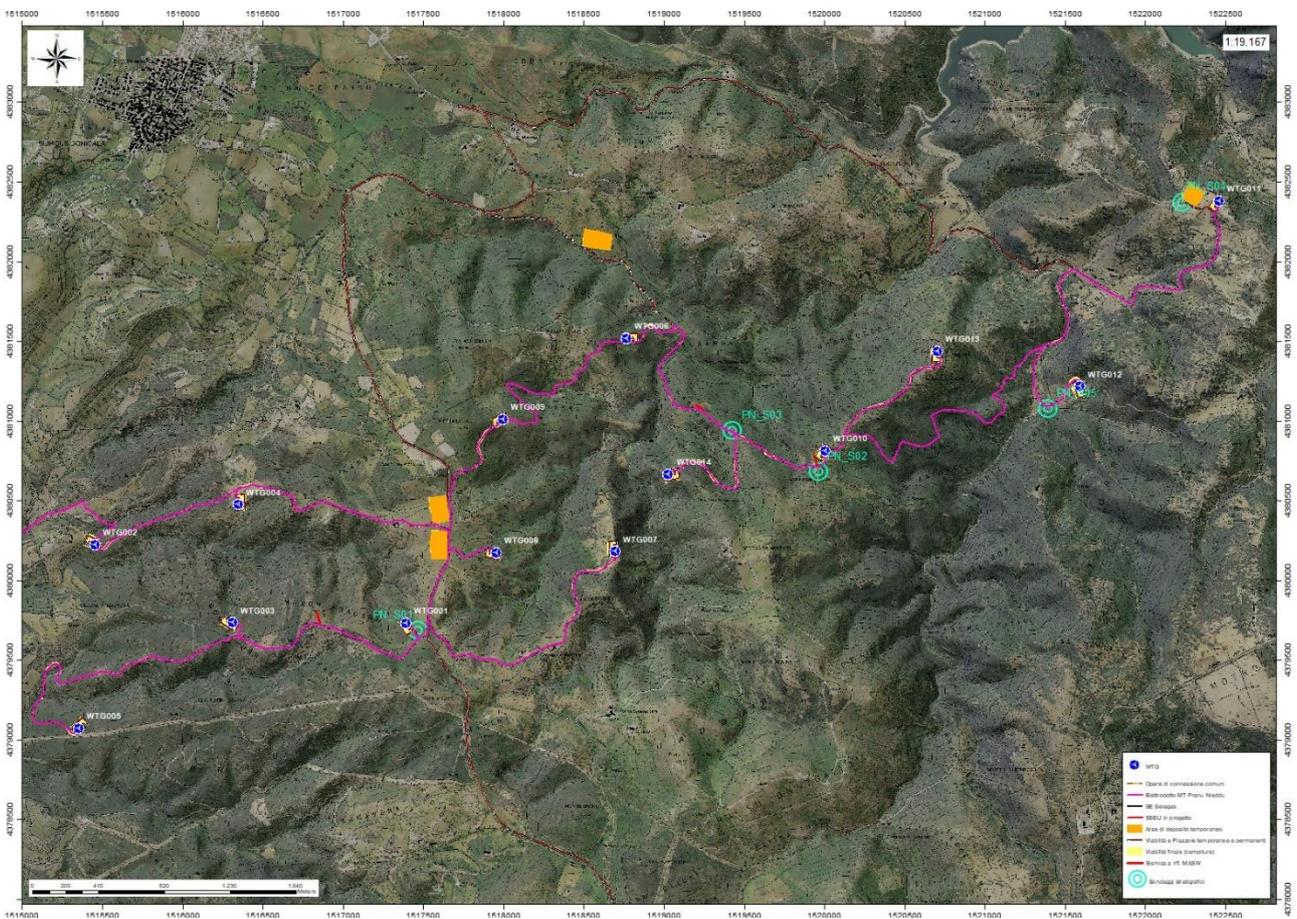


Figura 4.4 - Ubicazione delle indagini

### 4.3 M.A.S.W. - Tecnica e parametri utilizzati

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva, che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali Vs, basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione. La natura dispersiva delle onde superficiali è correlabile al fatto che onde ad alta frequenza con lunghezza d'onda corta si propagano negli strati più superficiali e quindi danno informazioni sulla parte più superficiale del suolo, invece onde a bassa frequenza si propagano negli strati più profondi e quindi interessano gli strati più profondi del suolo." (da Caratterizzazione sismica dei suoli con il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves – V. Roma 2006). L'indagine svolta ha visto l'applicazione di tecnica M.A.S.W. di tipo attivo, ossia misura del comportamento dei terreni a seguito di un'energizzazione.

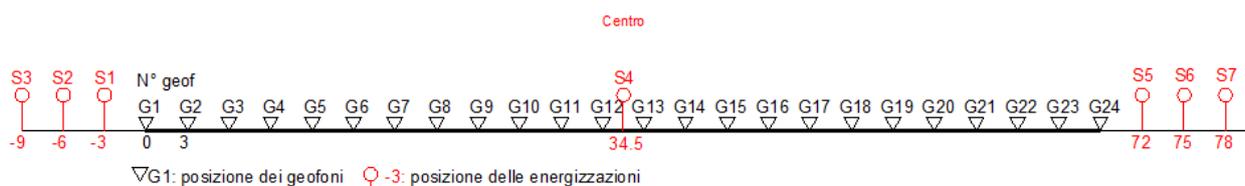


Figura 4.5 - Schema geometrico di acquisizione dei dati per gli stendimenti di lunghezza  $L=69,0\text{m}$

L'indagine si sviluppa mediante la materializzazione sul terreno di una linea retta mediante la posa di una fettuccia metrica. A seguire vengono posizionati i geofoni intervallati ad una distanza pari a 3,0 m in funzione anche della disponibilità di spazio. Esternamente alla stesa geofonica, da ora base sismica, a distanza di interesse che può essere pari ad un multiplo della distanza intergeofonica ma anche variabile (in funzione delle disponibilità di cantiere), sia in andata (ovvero in prossimità del geofono 1) che al ritorno (ovvero all'ultimo geofono posizionato sulla base sismica), vengono svolte delle energizzazioni mediante massa battente pari a Kg 10,0. Nel caso in esame, sono state svolte le energizzazioni in "andata" e in "ritorno" con distanza dal geofono 1 e dal geofono 24 crescente e pari a multipli della distanza intergeofonica (v. schema Fig. 14.4).

Il metodo risulta efficace se la base sismica è ubicata su piano a pendenza costante e per una stratificazione piano parallela al piano topografico. Al fine di svolgere al meglio la campagna geofisica M.A.S.W., è utile che lo sviluppo lineare della base sismica sia limitata in lunghezza secondo i siti.

La maggior profondità di caratterizzazione raggiunta è legata alla minor frequenza registrata. Come già indicato nella figura, una frequenza alta caratterizza gli strati superficiali. La registrazione delle frequenze minori è destinata ai geofoni più lontani dalla sorgente.

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.

In data 06/08/2020 è stata realizzata la prospezione geofisica integrativa al piano di indagini dirette effettuate tramite l'esecuzione di sondaggi. La prospezione è stata articolata in:

- Esecuzione di n° 3 stendimenti di sismica MASW (M1 – M2 – M3) e n° 3 rifrazioni (R1 – R2 – R3). Le basi sismiche MASW ricadono lungo il medesimo allineamento delle Rifrazioni in onde P.
- Rilievo topografico tramite livella laser di tutti i punti di misura (geofoni, punti di shot, picchetti in acciaio) e restituzione dei profili altimetrici da impiegare nelle sezioni sismiche;
- Elaborazione dei dati tramite analisi delle prospezioni acquisite in campagna, applicazione filtri, e restituzione grafica delle sezioni sismiche con l'impiego del software ZondST2D.

Gli stendimenti sono stati posizionati in modo da esser rappresentativi delle condizioni litostratigrafiche e geostrutturali, in accordo con quanto rilevato dai sondaggi e dai rilievi di superficie. Le indagini sono state eseguite dalla ditta Geoservice Sas.

Nella Tab. 4.2 è riportato il quadro riassuntivo delle indagini svolte, con le sigle identificative, la direzione di esecuzione (da elettrodo/geofono iniziale a quello finale), e la loro lunghezza complessiva, mentre nella Fig. 14.1 sono rappresentati i punti dove sono state effettuate le indagini.

Tabella 4.2 - Quadro riassuntivo indagine geofisica

Stendimento	Orientamento	Lunghezza (m)
<i>PN-SISM01-M1</i>	SE-NW	69,00
<i>PN-SISM02-M2</i>	SE-NW	69,00
<i>PN-SISM03-M3</i>	SE-NW	69,00
<i>PN-SISM01-R1</i>	SE-NW	69,00
<i>PN-SISM02-R2</i>	SE-NW	69,00
<i>PN-SISM03-R3</i>	SE-NW	69,00

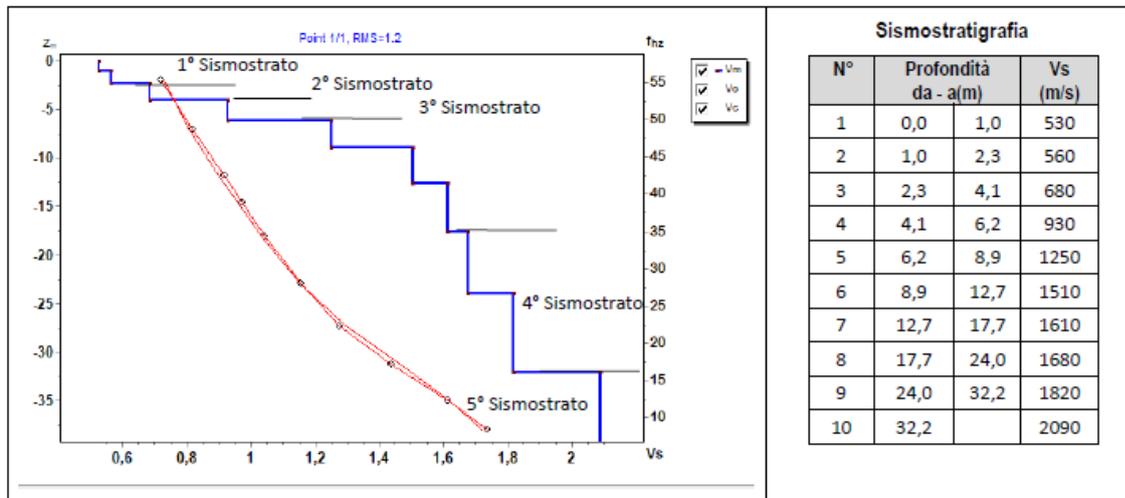
L'indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione MX, dal quale si possono distinguere i sismostrati di seguito indicati. Si ricorda che si tratta di un profilo medio della velocità di taglio Vs.

#### 4.3.1 Base sismica PN-SISM01-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.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 2,3	1° sismostrato con Vs tra 530 e 560 m/s, Terre molto addensate e rocce intensamente fratturate
2,3 – 4,1	2° sismostrato con Vs di 680 m/s, Substrato roccioso molto fratturato
4,1 - 6,2	3° sismostrato con Vs di 930 m/s, Substrato roccioso fratturato
6,2 – 17,7	4° sismostrato con Vs tra 1250 e 1680m/s Substrato roccioso debolmente fratturato
17,7– 32,2	5° sismostrato con Vs tra 1820 e 2090m/s, Substrato roccioso sano
>32,2	6° sismostrato con Vs> di 2090 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M1 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c.= 604 m/s)



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 4,1 m (Vs>800 m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 4,1 m di profondità dal p.c. è pari a:  $Vs_{eq} = 4,1 / 0,006787 = 604 \text{ m/s}$  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.

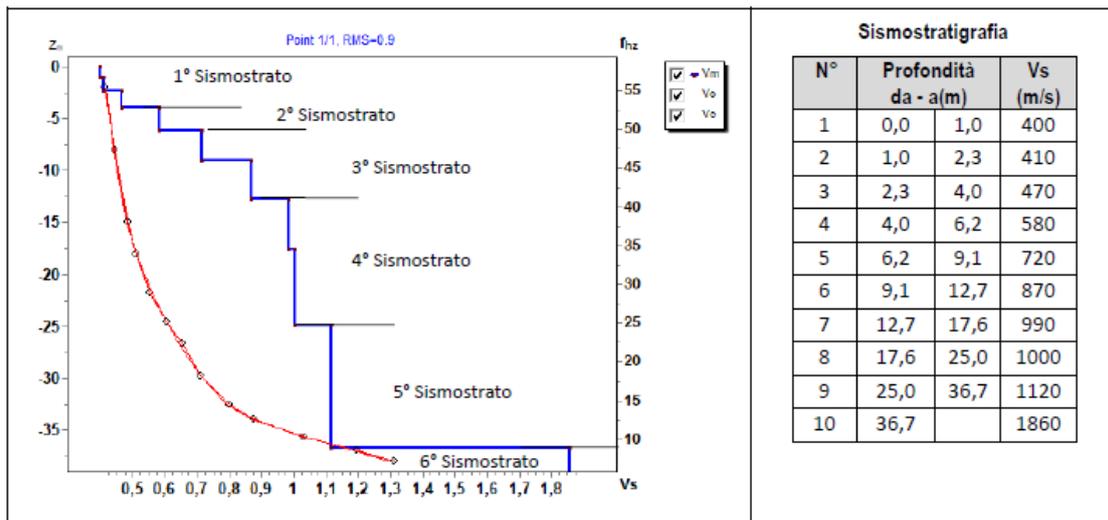
Si precisa che per fondazioni con piano di imposta sito a profondità maggiore di 1,1 m il substrato si troverà a quote < 3 metri e la classe di sottosuolo passa a Categoria A.

#### 4.3.2 Base Sismica PN-SISM02-M2

L’indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione 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.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 4,0	1° sismostrato con Vs tra <b>400 e 470 m/s</b> , Terre molto addensate e rocce intensamente fratturate
4,0 – 6,2	2° sismostrato con Vs di <b>580 m/s</b> , Roccia intensamente fratturata
6,2 – 12,7	3° sismostrato con Vs tra <b>720 e 870 m/s</b> Substrato roccioso intensamente fratturato
12,7– 25,0	4° sismostrato con Vs tra <b>990 e 1000 m/s</b> , Substrato debolmente fratturato
25,0- 36,7	5° sismostrato con Vs tra <b>1120 e 1860m/s</b> , Substrato roccioso sano
>36,7	6° sismostrato con Vs > di <b>1860m/s</b> , Substrato roccioso sano

MASW M2 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c.= 532 m/s)



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

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

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato **9,1 m** (Vs>800 m/s).La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a **9,1 m** di profondità dal p.c. è pari a: **Vs eq= 9,1/0.017094= 532 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.

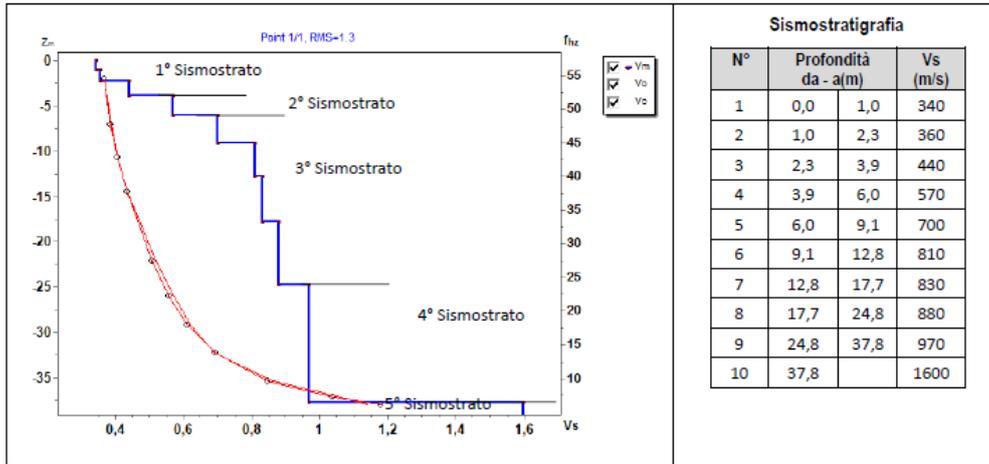
Si precisa che per fondazioni con piano di imposta sito a profondità maggiore di 6,1 m il substrato si troverà a quote < 3 metri e la classe di sottosuolo passa a Categoria A.

### 4.3.3 Base Sismica PN-SISM03-M3

L’indagine sismica con tecnica MASW ha permesso di ottenere il profilo medio di velocità delle onde di taglio verticali Vs della sezione 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.

Profondità [m sotto il pc]	Descrizione
0 – 3,9	1° sismostrato con Vs tra 340 e 440 m/s, Terre molto addensate o rocce tenere intensamente fratturate
3,9 – 6,0	2° sismostrato con Vs di 570 m/s, Roccia intensamente fratturata
6,0 – 24,8	3° sismostrato con Vs tra 700 e 880 m/s Substrato roccioso intensamente fratturato
24,8 – 37,8	4° sismostrato con Vs tra 970 e 1600 m/s, Substrato roccioso sano
>37,8	5° sismostrato con Vs >di 1600 m/s, Substrato roccioso sano

MASW M3 - PROFILO Vs (Vs eq da p.c= 498 m/s)



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

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

con:

*h<sub>i</sub>* spessore dell’i-esimo strato;

*V<sub>S,i</sub>* velocità delle onde di taglio nell’i-esimo strato;

*N* numero di strati;

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

Esaminato il profilo delle Vs si pone come profondità del substrato 9,1 m (Vs>800 m/s). La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio calcolata per il substrato posto a 9,1 m di profondità dal p.c. è pari a: **Vs eq = 9,1/0,018269= 498 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.

Si precisa che per fondazioni con piano di imposta sito a profondità maggiore di 6,1 m la classe di sottosuolo passa a Categoria A.

Sulla base dei dati raccolti è stato quindi possibile definire il **modello geologico del sito** che viene di seguito riassunto.

**Modello Geologico 01 – ARENARIE DI SAN VITO – WTG001, WTG002, WTG003, WTG004, WTG005**

Il sondaggio di riferimento è il **PN\_S01**; il profilo sismico di riferimento è il **PN-SISM-01\_M1**. Di seguito in sintesi la stratigrafia di riferimento e i parametri geotecnici.

**0,00m – 0,30m** – suolo/materiale di riporto.

**0,30m – 1,50m** – Basamento scistoso alterato, fratturazione con presenza di ossidi di Fe, secco

**1,50m – 3,50m** – Metargillisti e metasiltiti mediamente fratturate, presenza di livelli millimetrici a Ossidi di Fe e livelli millimetrici carboniosi,

**da 3,50m in poi** – Metarenarie da mediamente a molto fratturate, presenza di livelli di 1-2cm ossidati color bordeaux, presenza di livelli di Quarzo pluricentimetrici, fino a fondo indagine (12,00m da p.c).

#### **Modello Geologico 02 – Form. PALAMANNA – WTG006, WTG007, WTG008, WTG009 WTG014**

Il profilo sismico di riferimento è il **PN-SISM-03\_M3**. Di seguito in sintesi la stratigrafia di riferimento e i parametri geotecnici.

**0,00m – 0,30m** – suolo/materiale di riporto.

**0,30m – 3,90m** – Basamento scistoso metacalcareo vo metasilicatico alterato, molto fratturato

**3,90m in poi** – Basamento scistoso metacalcareo vo metasilicatico da mediamente a molto fratturato,

#### **Modello Geologico 03 – ARGILLOSCISTI – WTG010, WTG011, WTG012**

Il sondaggio di riferimento è il **PN\_S02, PN\_S04 e PN\_S05**. Il profilo sismico di riferimento è il **PN-SISM-02\_M2**. Di seguito in sintesi la stratigrafia di riferimento e i parametri geotecnici.

**0,00m – 0,30m** – suolo/materiale di riporto.

**0,30m – 1,50m** – deposito di versante o basamento scistoso molto alterato, secco

**1,50m – in poi** – Scisti neri carboniosi o metasiltiti fini, con locali livelli di metarcese. Intensamente fratturato, fino a fondo indagine (13,00m da p.c).

#### **Modello Geologico 04<sup>1</sup> – PORFIROIDI – WTG11, WTG13,**

---

<sup>1</sup> Per i dati geotecnici si è fatto riferimento ad indagine geofisica realizzata dalla società scrivente su stessa litologia e ambito geostrutturale nei pressi di Ballao – da confermare in sede di progettazione esecutiva

Il sondaggio di riferimento è il **BN\_S04** (riportato negli allegati); Di seguito in sintesi la stratigrafia di riferimento e i parametri geotecnici.

**0,00m – 0,50m** – suolo/materiale di riporto.

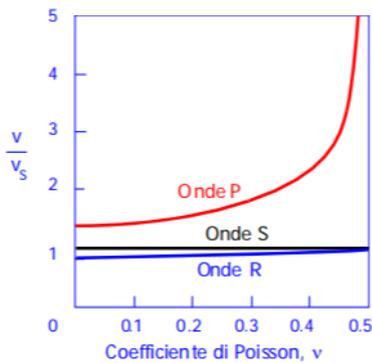
**0,50m – 1,00m** – argilla localmente sabbiosa da debolmente compatta a compatta con elementi litici.

**da 1,00m in poi** – roccia metamorfica fratturata per uno spessore di circa 2-3m poi massiva fino a fondo indagine (7,70m da p.c).

**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  $v = 0.25$   $V_R = 0.919 V_S$

$v = 0.33$   $V_R = 0.933 V_S$

$v = 0.40$   $V_R = 0.943 V_S$

$v = 0.50$   $V_R = 0.955 V_S$

Modello Geologico di sito 01 – Profilo sismico PN-SISM-01\_M1  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	Vs (m/sec)	v	Vr (m/sec)
0-2.3	530	0,33	494.49
2.3-4.1	680	0,33	634.44
4.1-6.2	930	0,33	867.69

Modello Geologico di sito 02 – PN-SISM-03\_M3  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	Vs (m/sec)	v	Vr (m/sec)
0-3.9	340	0,33	317.22

3.9-6.0	570	0,33	<b>531.81</b>
6.0-24.8	700	0,33	<b>653.10</b>

Modello Geologico di sito 03 – Profilo sismico PN-SISM-02\_M2  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	$V_s$ (m/sec)	$v$	$V_r$ (m/sec)
0-4.0	400	0,33	<b>373.20</b>
4.0-6.2	580	0,33	<b>541.14</b>
6.2-12.7	720	0,33	<b>671.76</b>

Modello Geologico di sito 04 – Profilo sismico M2-R2  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	$V_s$ (m/sec)	$v$	$V_r$ (m/sec)
0-4.0	400	0,33	<b>373.20</b>
4.0-6.2	580	0,33	<b>541.14</b>
6.2-12.7	720	0,33	<b>671.76</b>

## 5 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. 3.4 (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:

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

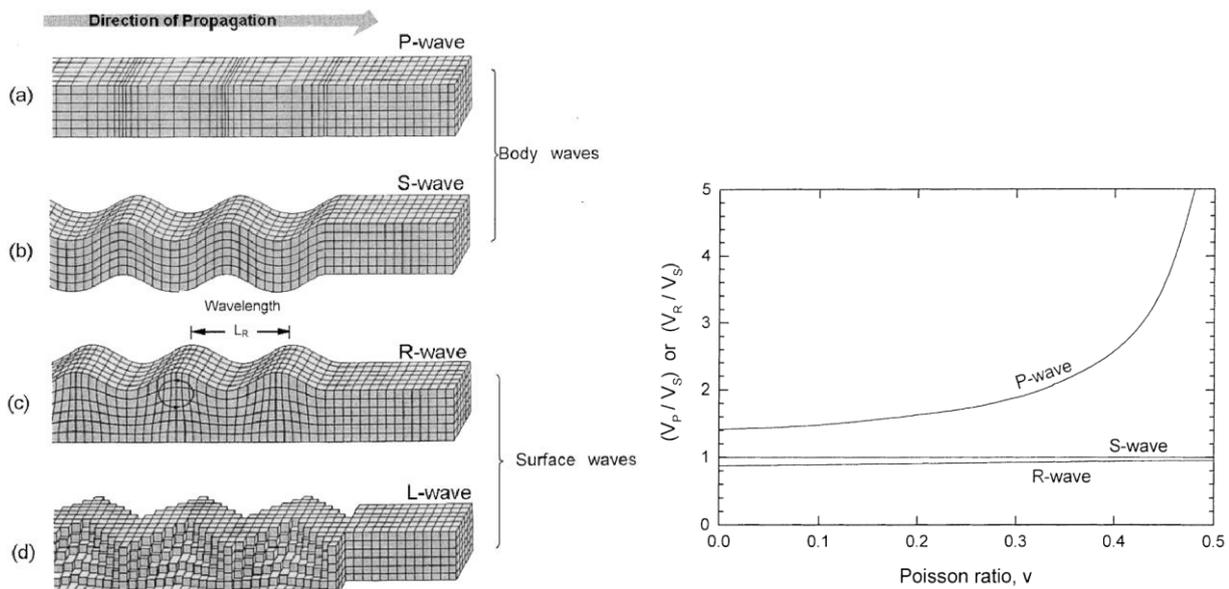
Questa metodica rende tuttavia le cose molto complicate in presenza di fenomeni di propagazione che, come abbiamo visto, producono un'attenuazione con la distanza che dipende fortemente dalla frequenza. Occorre, infatti, effettuare un calcolo separato della propagazione a ciascuna frequenza, e ricalcolare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

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

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

- a) Onde di compressione (onda P)
- b) Onde di taglio (onda S)
- c) Onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L)

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



La velocità di propagazione dei diversi tipi di onde non è la stessa: le onde di compressione (onde P) sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie viaggiano con velocità più basse, in dipendenza del valore del modulo di Poisson del terreno. La seguente figura 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  $V_r$ .

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

- si considera il terreno omogeneo e isotropo
- 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
- ogni sorgente emette energia vibrazionale in superficie in modo omnidirezionale.

## 6 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  $\eta$  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  $\eta$  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	$\eta$
Roccia	0.01
Sabbia, ghiaia, ciottoli	0.1
Limi, argille	0.2 -0.5

## 7 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  $\eta$  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 01 – Profilo sismico PN-SISM-01\_M1  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	$V_s$ (m/sec)	$v$	$V_r$ (m/sec)	$\eta$	$n$
0-2.3	530	0,33	494.49	0.05	0.5
2.3-4.1	680	0,33	634.44	0.01	0.5
4.1-6.2	930	0,33	867.69	0.01	0.5

Modello Geologico di sito 02 – PN-SISM-03\_M3  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	$V_s$ (m/sec)	$v$	$V_r$ (m/sec)	$\eta$	$n$
0-3.9	340	0,33	317.22	0.05	0.5
3.9-6.0	570	0,33	531.81	0.01	0.5
6.0-24.8	700	0,33	653.10	0.01	0.5

Modello Geologico di sito 03 – Profilo sismico PN-SISM-02\_M2  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	Vs (m/sec)	v	Vr (m/sec)	$\eta$	n
0-4.0	400	0,33	373.20	0.05	0.5
4.0-6.2	580	0,33	541.14	0.01	0.5
6.2-12.7	720	0,33	671.76	0.01	0.5

Modello Geologico di sito 04 – Profilo sismico M2-R2  $v=0,33$   $V_r = 0,933 V_s$

profondità in m (da-a)	Vs (m/sec)	v	Vr (m/sec)	$\eta$	n
0-4.0	400	0,33	373.20	0.05	0.5
4.0-6.2	580	0,33	541.14	0.01	0.5
6.2-12.7	720	0,33	671.76	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

## 8 Sorgenti di vibrazione

La norma UNI 9614/2017 al punto 5 suddivide le sorgenti per tipologia in funzione di 1) posizione rispetto agli edifici, 2) funzione, 3) rispetto alle caratteristiche della durata della vibrazione prodotta ovvero in funzione al periodo di attività della sorgente. Nel caso specifico in studio le sorgenti sono:

- rispetto alla posizione – **esterne agli edifici;**
- 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.**
- rispetto al periodo di attività della sorgente – **tra le sorgenti temporanee presenti per gran parte della giornata (cantieri).**

### 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 costituiscono potenzialmente la fase di attività più importante, senza sottovalutare quella relativa alla movimentazione di attrezzature e mezzi mediante autocarri che andranno ad incidere sulla viabilità. Si prevede infatti l'impiego di escavatori, dumpers, beton-cars, attrezzi ed utensili manuali. Inoltre, il cantiere può indurre un incremento di traffico stradale sulla viabilità locale.

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

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

## 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 circa 40 transiti/giorno in aggiunta al flusso di traffico locale attualmente presente (poche decine di veicoli/giorno) sulla viabilità di accesso al cantiere.

## 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/s<sup>2</sup>** (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 01** maggiormente cautelativo.

### Scenari di riferimento di cantiere

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

- Pala cingolata
- Autocarro
- Rullo vibrante
- 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:

- Escavatore
- 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:

- Escavatore
- Martellone idraulico
- Autocarro
- Pala cingolata
- Betoniera\*
- Gru\*

MOD. GEO. 02	Distanza minima oltre la quale il valore di vibrazione è inferiore alla soglia limite di 7,2 mm/sec <sup>2</sup>
<b>Scenario 01</b>	
<b>Scenario 02</b>	
<b>Scenario 03**</b>	

MOD. GEO. 03	Distanza minima oltre la quale il valore di vibrazione è inferiore alla soglia limite di 7,2 mm/sec <sup>2</sup>
<b>Scenario 01</b>	<b>190</b>
<b>Scenario 02</b>	<b>170</b>
<b>Scenario 03**</b>	<b>190</b>

Tabella 8-1 Valutazione distanza di sicurezza per le vibrazioni

\*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.

### Scenari di riferimento di esercizio

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

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

## 9 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 <sup>2</sup> )
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 9.1 - 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:

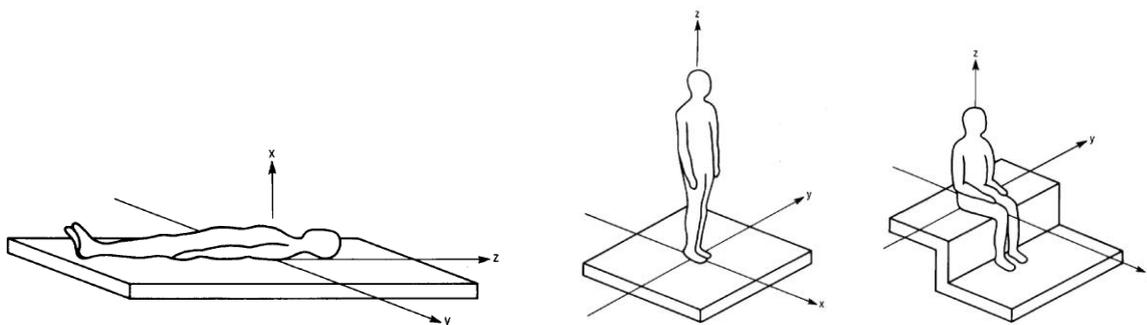


Figura 9.2 - Sistema cartesiano di riferimento per persona sdraiata, in piedi o seduta

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.

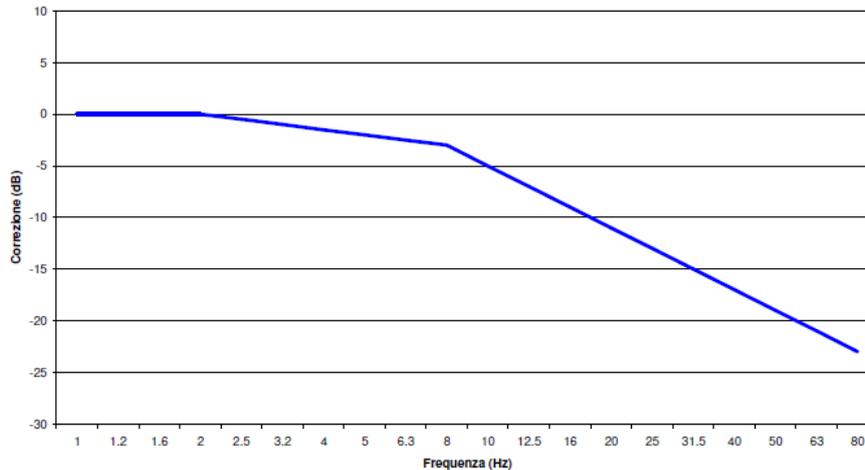


Figura 9.3 - Curva di ponderazione per un asse generico - UNI 9614

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 de 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 <sup>*)</sup>	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 9.4 - Valori Limite di riferimento per vibrazioni di breve durata e permanenti (9916/2014)

## 10 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.

Tali distanze sono state utilizzate inoltre per valutare, secondo la 9916/2014 gli edifici potenzialmente suscettibili di danno secondo quanto previsto dalla norma stessa.

## 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 a quelle previste e si dovessero verificare condizioni per cui si abbia evidenza del superamento dei limiti di riferimento, in accordo con quanto indicato al punto 9.5 della norma UNI 9614/2017 che dispone la possibilità di deroghe a tali limiti concedibili in alcuni casi per **attività temporanee o di cantiere**, verranno attuate le attività previste dalle linee guida all'**Appendice C** della stessa norma.

### Criteria 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:

- **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

- **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

- **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 del problema 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, esplicitata 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 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.

**spettri di emissione delle macchine operatrici**  
**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.

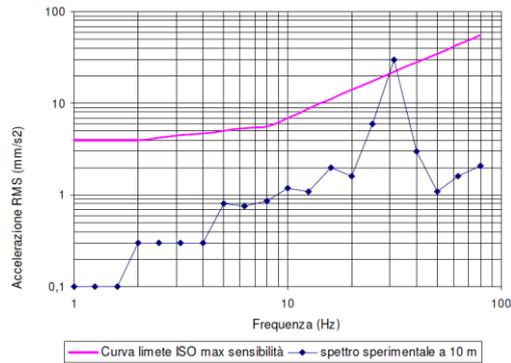


Figura 11.1- Spettro di emissione della sorgente di un rullo vibrante a 10m dall'asse di cantiere

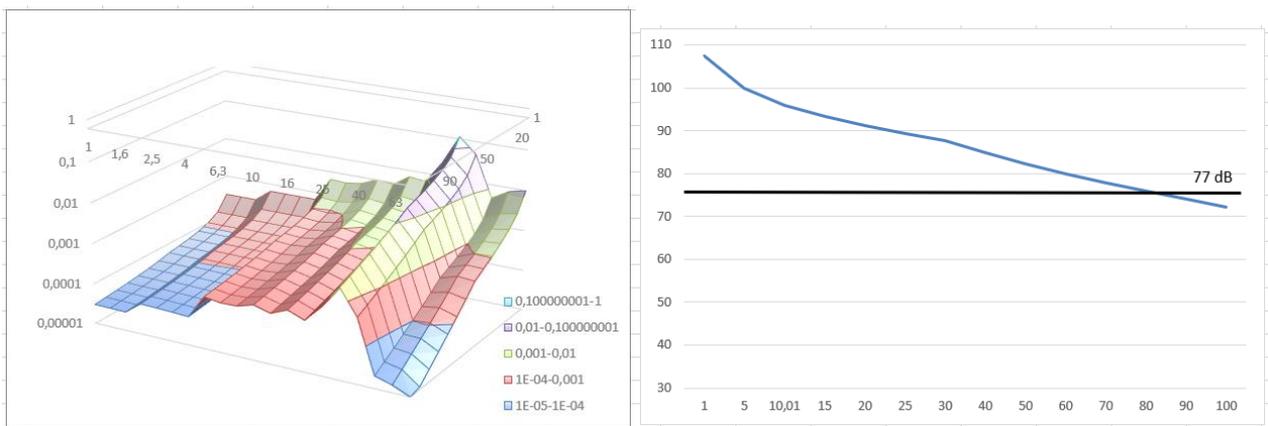


Figura 11.2 - Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni – MOD GEO 01

### 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.

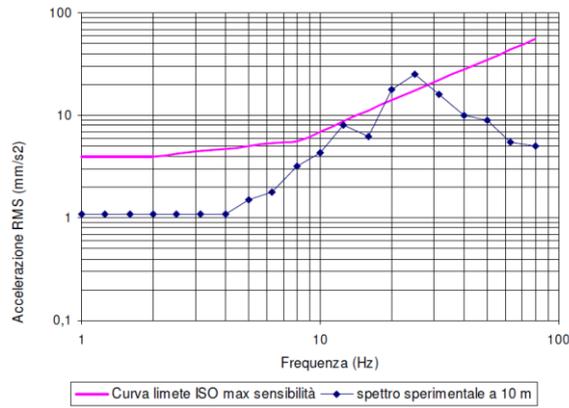


Figura 11.3- Spettro di emissione della sorgente di una pala cingolata a 10mdall’asse di cantiere

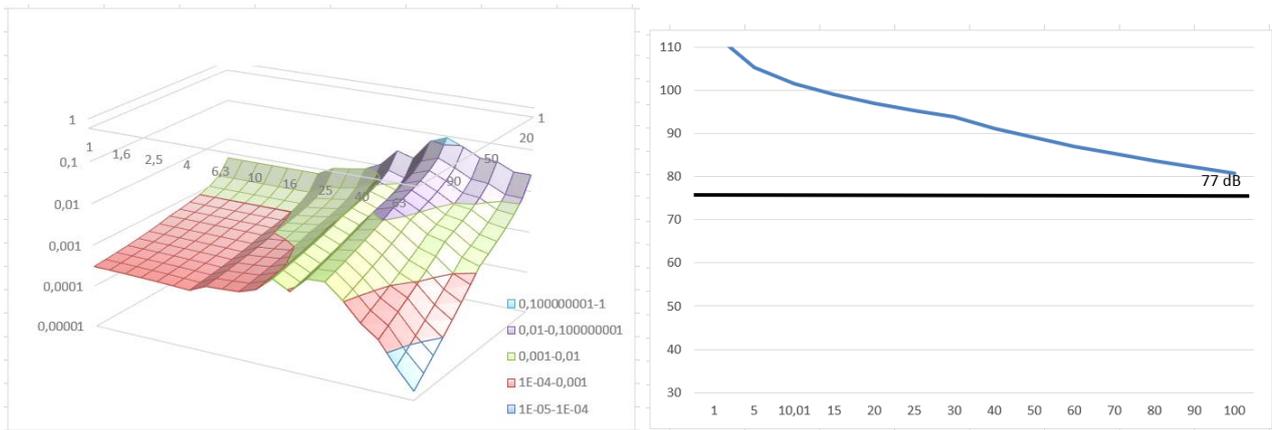


Figura 11.4 - Modifica dello spettro dell’accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni – MOD GEO 01

### 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.

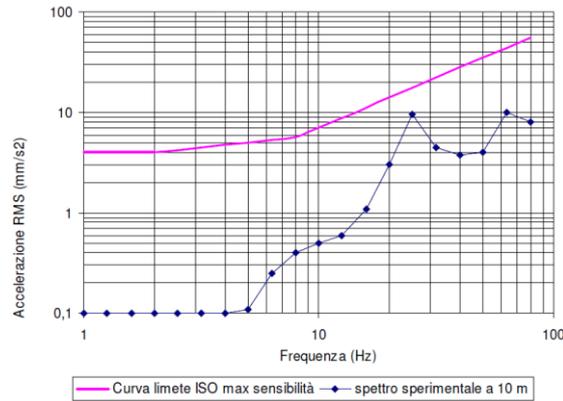


Figura 11.5- Spettro di emissione della sorgente di un autocarro 10mdall'asse di cantiere

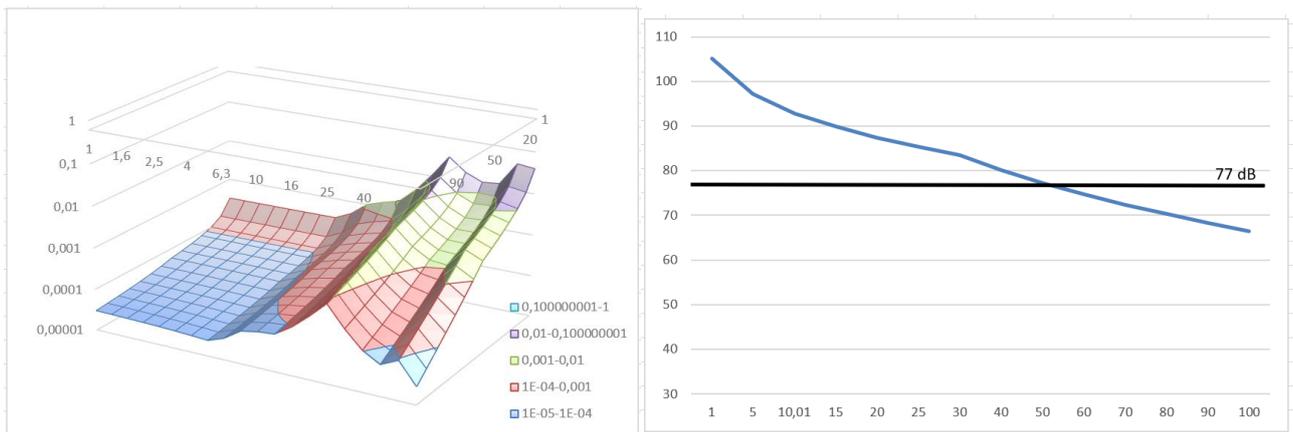


Figura 11.6 - Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni – MOD GEO 01

### 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.

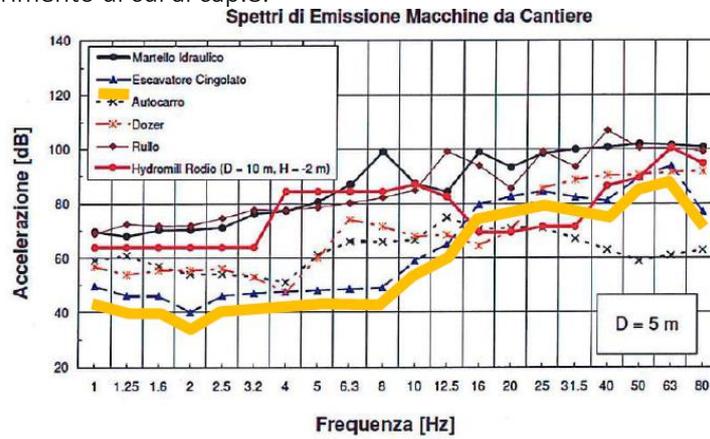


Figura 11.7- Spettro di emissione della sorgente di un escavatore cingolato 5m dall’asse di cantiere

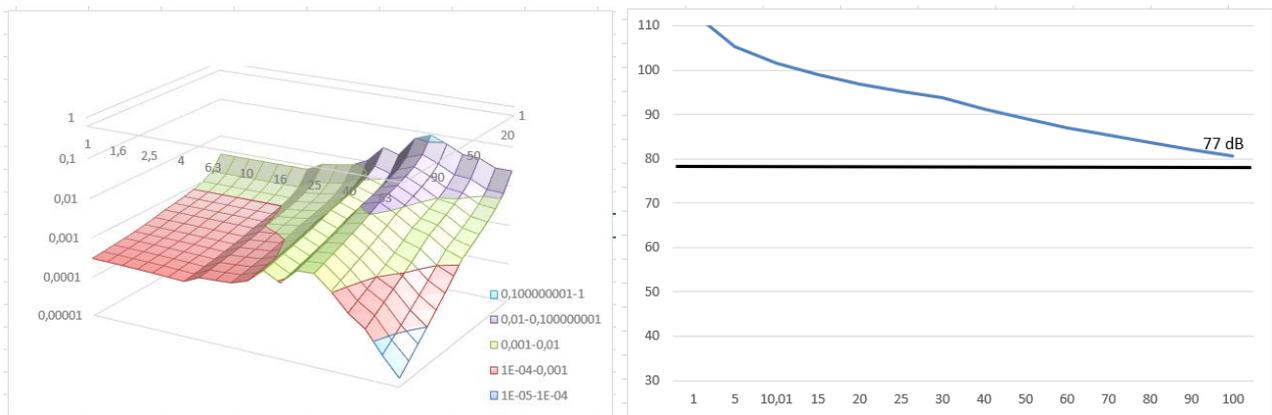


Figura 11.8 - Modifica dello spettro dell’accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni – MOD GEO 01

### 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.

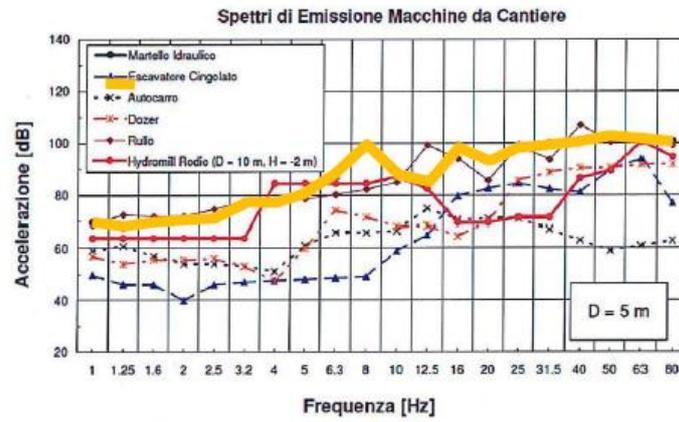


Figura 11.9- Spettro di emissione della sorgente di un martello idraulico 5m dall'asse di cantiere

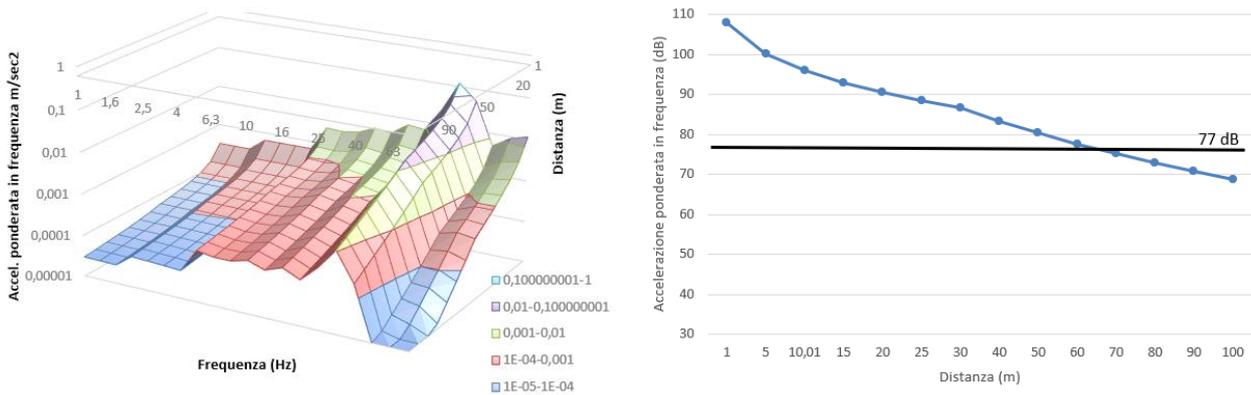


Figura 11.10 - Modifica dello spettro dell'accelerazione ponderata in funzione della distanza e della frequenza e curva di propagazione delle vibrazioni – MOD GEO 01

## 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 mm/sec<sup>2</sup>.

**L'analisi porta ad un range di distanze di sicurezza compreso tra i 170m (posa dei cavidotti) e i 190m (fase di realizzazione delle fondazioni delle torri a supporto degli aerogeneratori e delle piazzole di servizio).**

All'interno di queste distanze non ricadono ricettori sensibili quali abitazioni.

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.

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