



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.132.00

PAGE

1 di/of 53

TITLE:
IT

AVAILABLE LANGUAGE:

IMPIANTO EOLICO "CARBONIA"

Relazione impatti da vibrazioni



File: GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.132.00_Relazione impatti da vibrazioni.docx

00	29/01/24	Nota MASE U.0000241 del 09/01/2024	IAT	GF	GF
			Name (Contactor)	Name (Contactor)	Name (Contactor)
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED

GRE VALIDATION

Name (GRE)	Name (GRE)	A. Puosi (GRE)
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT *****	GRE CODE																		
	GROUP	FUNCION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT			SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISIO							
	GR	EEC	R	2	6	I	T	W	1	5	0	1	2	0	0	1	3	2	0

CLASSIFICATION	UTILIZATION SCOPE
-----------------------	--------------------------

This document is property of Enel Green Power S.p.A. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power S.p.A.

INDEX

1. PREMESSA	3
2. NORMATIVA TECNICA APPLICABILE.....	4
2.1. Premessa	4
2.2. Norma ISO2631-2.....	5
2.3. Norma UNI 9614:2017.....	7
2.4. Norma UNI 9916:2014.....	8
2.5. Grandezze di riferimento e limiti applicabili al caso specifico	9
2.5.1. Valutazione del disturbo	9
2.5.2. Danni architettonici.....	11
2.5.3. Deroghe	12
3. I FENOMENI DI PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO: CENNI TEORICI E APPLICATIVI	13
3.1. I fenomeni vibratorii.....	13
3.2. Le onde elastiche	13
3.3. Magnitudo della vibrazione	15
3.4. Variazione temporale della vibrazione	16
3.5. Attenuazione dell'energia vibrazionale	16
4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	18
5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	22
5.1. Inquadramento geologico generale.....	22
5.2. Assetto litostratigrafico locale	26
5.3. Caratterizzazione geotecnica	32
5.4. Comportamento sismico del sottosuolo	34
6. INDIVIDUAZIONE DEI POTENZIALI RICETTORI	36
7. DESCRIZIONE SOMMARIA DELLE PRINCIPALI LAVORAZIONI DI CANTIERE.....	38
7.1. Opere civili del parco eolico	38
7.2. Fornitura e montaggio degli aerogeneratori	38
7.3. Opere per la realizzazione delle linee elettriche	39
7.4. Opere civili per l'allestimento stazione di utenza 33/220 kV	39
7.5. Montaggi elettromeccanici della stazione di utenza 33/220 kV	39
7.6. Gestione delle terre e delle rocce da scavo	40
8. ANALISI PREVISIONALE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONE IN FASE DI CANTIERE	41
8.1. Il metodo previsionale	41
8.2. Caratterizzazione delle sorgenti	42
8.3. Scenari previsionali di calcolo dei livelli vibrazionali	43
8.4. Stima dei livelli vibrazionali ed analisi dei risultati.....	44
8.5. Analisi dei livelli vibrazionali in fase di esercizio.....	44
9. ANALISI DEI LIVELLI VIBRAZIONALI IN FASE DI DISMISSIONE	47
10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	48
11. BIBLIOGRAFIA	49
12. APPENDICE: TABELLE DI CALCOLO	50

1. PREMESSA

La realizzazione del progetto di impianto eolico denominato *Carbonia* - nei territori di Carbonia e Gonnese (Regione Sardegna - Provincia del Sud Sardegna) - al pari di ogni cantiere edile funzionale alla realizzazione di opere infrastrutturali, comporta l'esecuzione di lavorazioni che possono determinare l'insorgenza di vibrazioni meccaniche nel sottosuolo.

Tali perturbazioni, attraverso note dinamiche di propagazione nel terreno, possono essere potenzialmente avvertite in corrispondenza degli edifici più prossimi alle aree di lavorazione. In generale, l'insorgenza di danni strutturali agli edifici, nel loro insieme, attribuibili a fenomeni vibratorii è estremamente rara e, quando tali danni siano stati segnalati, quasi sempre derivavano dal concorso di altre cause. Affinché le vibrazioni possano arrecare danni strutturali è necessario, in ogni caso, che esse raggiungano livelli tali da causare, in una prima fase, fastidio e disturbo agli occupanti.

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, internazionali e nazionali, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo e del danno in edifici interessati da fenomeni vibrazionali.

In assenza di una normativa specifica che disciplini la materia, per le finalità di analisi degli effetti ambientali concernenti la propagazione di vibrazioni relativamente al progetto in esame, i principali riferimenti sono rappresentati, a livello nazionale, dalle seguenti norme tecniche emanate dall'UNI:

- 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 sugli edifici".

Il presente documento, facente parte integrante dello Studio di impatto ambientale del progetto di parco eolico "*Carbonia*", si propone di analizzare le dinamiche di propagazione delle vibrazioni in prossimità delle aree di cantiere pervenendo ad una stima dell'entità delle stesse e, in definitiva, ad una verifica dell'accettabilità degli effetti attesi sugli occupanti e sui fabbricati, avuto riguardo delle soglie di riferimento indicate nelle richiamate norme tecniche.

Peraltro, come espressamente riconosciuto dalla UNI 9614 (Appendice C), una qualunque definizione di limiti di riferimento per le attività costruttive che comportino emissione di vibrazioni è un'operazione molto complessa e comunque discutibile, potendo costituire una penalità sul risultato finale del lavoro, avuto riguardo soprattutto della transitorietà e discontinuità del fenomeno vibratorio associato all'operatività dei cantieri edili.

2. **NORMATIVA TECNICA APPLICABILE**

2.1. **PREMESSA**

Il concetto di "disturbo" è, come noto, un argomento piuttosto delicato in quanto coinvolge diverse caratteristiche dell'essere umano (corpo e psiche), investendo, inoltre, questioni tecniche, normative e giuridiche.

Per gli aspetti strettamente acustici la scienza e la tecnica hanno avuto modo di svilupparsi da lungo tempo (dalla fine della Seconda guerra mondiale, in particolare) e hanno dato luogo a una vasta e articolata gamma di conoscenze, norme e leggi, accompagnate dallo sviluppo di una sensibilità tecnica specifica. Per il disturbo indotto dalle vibrazioni gli studi medico-ingegneristici, anch'essi di lunga data, non hanno avuto un'evoluzione altrettanto efficace ai fini della prevenzione del disturbo alle persone: le norme tecniche sono limitate, spesso datate e, almeno in Italia, prive di riscontro e trasposizione giuridica.

Fino all'anno 2007 la regolamentazione era quasi esclusivamente di natura tecnica. Dal 2007, anno del decreto che introdusse concetti e obblighi sul rischio indotto al corpo umano (dei lavoratori) dalle vibrazioni, si è assistito a un notevole sviluppo per quanto concerne la valutazione del possibile danno fisiologico, determinato dall'esposizione a livelli di vibrazioni elevati e/o di lunga durata.

Per gli aspetti di disturbo (che in genere sono legati non tanto al possibile danno fisiologico, al corpo umano, quanto al danno di natura psicologica che il disturbo determina) tutto è rimasto fermo all'anno 2003. Verso la fine degli anni '70, infatti, la ISO, con la sua norma 2631 aveva introdotto per la prima volta il concetto di "disturbo" da vibrazioni, inquadrando tecniche di misura, ponderazioni in frequenza e valori limite.

La norma internazionale ha per anni costituito l'unico riferimento tecnico per la valutazione dell'effetto delle vibrazioni sull'uomo. A metà degli anni 80 tale norma si è ramificata con sezioni sempre più specifiche. Per l'esposizione alle vibrazioni all'interno degli edifici nel 1989 è stata sviluppata una parte *ad hoc* (la ISO 2631-2 "Acoustics - Description, measurement and assessment of environmental noise - Part 2: Determination of sound pressure levels"). La ISO 2631-2 aveva una sua autonomia scientifica ed era completa, contenendo tutte le indicazioni per una valutazione esauriente: curve di ponderazione (espresse in via diretta oppure implicite attraverso la formulazione dei limiti in frequenza), modalità di misura, limiti di disturbo (*annoyance*, nella versione inglese).

La ISO 2631 ha avuto in Italia due trasposizioni di rilievo tecnico e regolamentare: la prima, in ambito normativo, deve riferirsi all'emanazione della UNI 9614:1990. La norma UNI presenta è introdotta (con un inusuale punto "Chiarimenti") come una sorta di "traduzione ragionata" della ISO 2631-2, della quale adotta principi e metodologie ma della quale si propone come "chiarificazione", semplificazione e, in qualche misura, "italianizzazione". Aggiunge anche una sezione sulle vibrazioni di origine ferroviaria. Un'ulteriore derivazione della ISO 2631-2 è stato un capitolo del regolamento di igiene della Regione Lombardia, che imponeva i limiti della ISO 2631-2 come criterio di igienicità (e quindi di abitabilità) degli edifici. Nel 2003 la ISO 2631-2 ha subito una rivoluzione soprattutto per questi aspetti:

- i metodi di misura e di ponderazione sono stati rivisti drasticamente, anche in virtù dell'introduzione massiccia dei sistemi digitali per l'acquisizione e per l'elaborazione dei dati;
- sono stati eliminati i limiti di riferimento per il disturbo. Sotto questo aspetto la norma affronta il problema come se fosse all'anno zero, dichiarandosi come norma puramente tecnica, utile e necessaria per un protocollo di misura comune fra tutti gli sperimentatori del mondo. Sulla base delle misure raccolte con i nuovi metodi proposti dalla norma potranno essere sviluppati e articolati indici, limiti e metodi di valutazione.

Si osserva di fatto la presa d'atto a livello internazionale che tutti i dati epidemiologici fino ad allora raccolti in questo ambito siano privi di rappresentatività.

A livello nazionale questo drastico cambio di indirizzo ha reso di fatto il panorama tecnico privo di riferimenti di sostanza e anche formali.

Alla luce di tali circostanze l'UNI ha intrapreso un cammino particolarmente lungo e oneroso volto a riscrivere una norma "di aggiornamento" che contenesse una valutazione sui possibili limiti massimi di vibrazioni. Valutazione da basare, evidentemente, sui criteri epidemiologici, ingegneristici e normative robuste.

Ne è nata una revisione (la UNI 9614:2017) che mutua dalla ISO 2631-2:2003 metodi di misura, ponderazione e valutazione dei parametri sintetici, oltre che la strumentazione di misura (conforme alla UNI EN ISO 8041-1:2017 "Risposta degli esseri umani alle vibrazioni

- *Strumenti di misurazione - Parte 1: Strumenti per la misura di vibrazioni per uso generale*”).

Per quanto attiene i limiti, la nuova UNI 9614 ha preso spunto da una serie di studi e norme (in particolare da una norma norvegese, la NS 8176E:2006).

La UNI 9614 inquadra in dettaglio le modalità di misura e indica i limiti di riferimento massimi, organizzandoli per diverse tipologie di utilizzo suddivise in ambienti a uso abitativo e altri ambienti particolari (scuole, ospedali e attività lavorative). In definitiva, la norma è orientata, per quanto riguarda i limiti di riferimento, al recettore del disturbo, senza fare riferimento alla tipologia di sorgente, né per l'origine (macchinari, infrastrutture di trasporto, ecc.) né per il tipo di sollecitazione che ne deriva (impulsività, parzialità, componenti tonali, ecc.) risultando in un'analisi univoca e, almeno nelle intenzioni, robusta.

2.2. **NORMA ISO2631-2**

La norma tecnica ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi, sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è 1÷80 Hz mentre il parametro di valutazione è rappresentato dal valore efficace dell'accelerazione a_{rms} (ossia la media quadratica - *root mean square*) così definito:

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

dove:

a(t) = accelerazione in funzione del tempo,

T = durata dell'integrazione nel tempo dell'accelerazione.

La norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità (in funzione delle frequenze di centro banda definite per terzi di ottava) che rappresentano le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X,Y e alla combinazione dei tre assi di riferimento (*Figura 2.1*); i valori numerici delle curve base sono riportati in *Figura 2.2*.

L'Annex A della ISO 2631-2, non facente parte integrante della norma, fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni. A tal fine sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie); i valori dei fattori di moltiplicazione sono indicati in *Tabella 2.1*.

Tabella 2.1 – Fattori numerici per le curve di ponderazione

Frequenza [Hz]	Accelerazione in $m/s^2 \cdot 10^{-3}$		
	Asse Z	Assi X-Y	Assi combinati
1	10.00	3.60	3.60
1.25	8.90	3.60	3.60
1.6	8.00	3.60	3.60
2	7.00	3.60	3.60
2.5	6.30	4.51	3.72
3.15	5.70	5.68	3.87
4	5.00	7.21	4.07
5	5.00	9.02	4.30
6.3	5.00	11.40	4.60
8	5.00	14.40	5.00
10	6.30	18.00	6.30
12.5	7.81	22.50	7.80
16	10.00	28.90	10.00
20	12.50	36.10	12.50
25	15.60	45.10	15.60
31.5	19.70	56.80	19.70
40	25.00	72.10	25.00
50	31.30	90.20	31.30
63	39.40	114.00	39.40
80	50.00	144.00	50.00

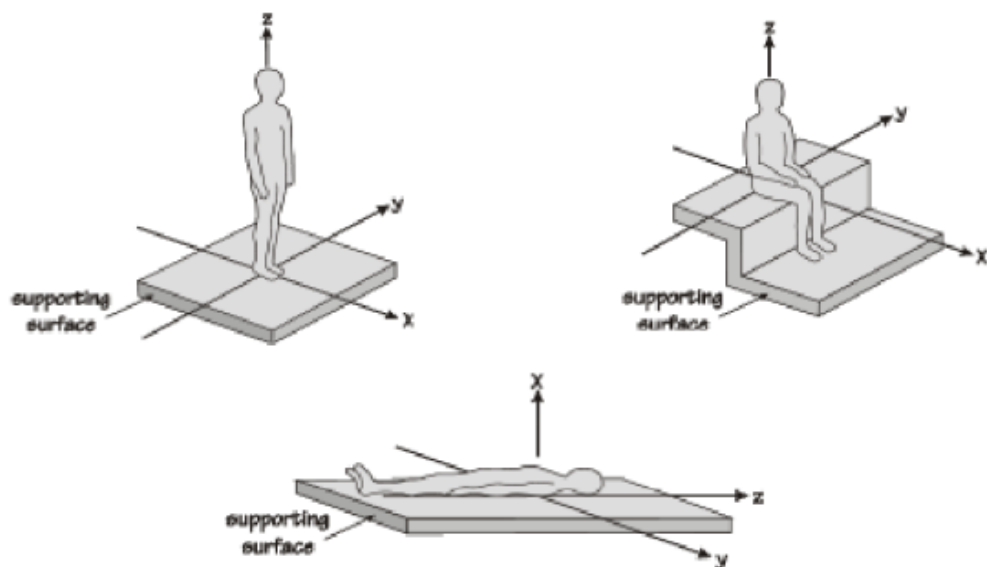


Figura 2.1 - Rappresentazione delle tre componenti in funzione della posizione del corpo

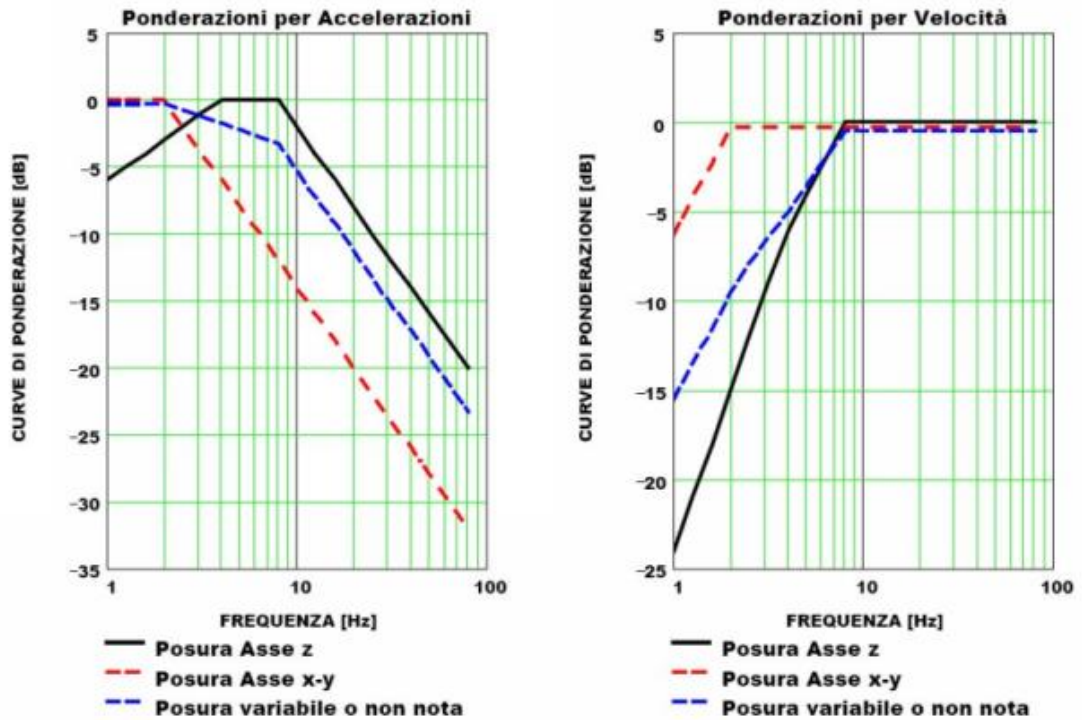


Figura 2.2 – Curve di ponderazione (ISO) per vibrazioni lungo gli assi verticali, orizzontali e per postura non nota nell'intervallo di frequenze 1÷80 Hz

Tabella 2.2 – Fattori di moltiplicazione delle curve base (ISO 2631-2 Annex A)

Destinazione d'uso	Periodo	vibrazioni	
		continue/intermittenti	vibrazioni transitorie
Luoghi di lavoro critici (camere operatorie, laboratori di precisione, teatri, ecc.)	Giorno	1	1
	Notte	1	1
Edifici residenziali	Giorno	2+4	30+90
	Notte	1.4	1.4+20
Uffici	Giorno	4	60+128
	Notte	4	60+128
Luoghi di lavoro	Giorno	8	90+128
	Notte	8	90+128

Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

2.3. NORMA UNI 9614:2017

La norma UNI 9614 è sostanzialmente in accordo con la ISO 2631-2. Tuttavia, sebbene le modalità di misura siano le stesse, la valutazione del disturbo è effettuata sulla base del valore di accelerazione r.m.s. ponderato in frequenza, il quale è confrontato con una serie di valori limite dipendenti dal periodo di riferimento (giorno, dalle 6:00 alle 22:00, e notte, dalle 22:00 alle 6:00) e dalle destinazioni d'uso degli edifici. Generalmente, tra le due norme, la UNI 9614 si configura come più restrittiva.

Dato che gli effetti prodotti dalle vibrazioni sono differenti a seconda della frequenza delle accelerazioni, vanno impiegati dei filtri che ponderano le accelerazioni a seconda del loro

effetto sul soggetto esposto. Tali filtri rendono tutte le componenti dello spettro equivalenti in termini di percezione e quindi di disturbo. I simboli dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza e del corrispondente livello sono rispettivamente, a_w e L_w . Quest'ultimo, espresso in dB, è definito come $L_w = 20 \cdot \log_{10} (a_w / 10^{-6} \text{ ms}^{-2})$.

Le curve di ponderazione sono definite in funzione della direzione di trasmissione delle vibrazioni (X, Y e Z). Nel caso la postura del soggetto esposto non sia nota o vari nel tempo, va impiegato il filtro definito nel prospetto I della norma, ottenuto considerando per ogni banda il valore minimo tra i due filtri suddetti.

2.4. NORMA UNI 9916:2014

La norma UNI 9916:2014 inquadra la problematica dei danni agli edifici derivanti dalle vibrazioni. La norma non ha valenza strutturale e ancor meno sismica e non riguarda la possibilità di danneggiamenti pericolosi per la stabilità degli edifici, ma ha ad oggetto i cosiddetti "danni di soglia" (detti anche danni "cosmetici"), che consistono tipicamente nella formazione di fessure, crepe, distacchi di intonaco e fenomeni affini.

Nonostante l'apparente, estrema, specificità della norma, la disciplina è in realtà assai vasta e interessa tanto edifici posti nelle vicinanze di sorgenti legate al traffico veicolare e ferroviario, quanto edifici prossimi ad aree di cantiere o attività industriali (macchinari in generale e, in particolare, presse, magli e similari) o anche da sorgenti interne agli edifici.

La fissazione di criteri generali e, quindi, di limiti che indichino la pericolosità delle sollecitazioni meccaniche rispetto alla formazione di danni di soglia è materia assai complessa: la stessa identica sollecitazione dà luogo a danni in edificio e non a un altro, in funzione della tipologia costruttiva, così come all'interno dello stesso edificio sollecitato a vibrazione i danni si manifestano in alcune zone e non in altre.

Adirittura, il medesimo edificio, invecchiando (si pensi agli intonaci, per esempio) può cambiare il comportamento in risposta alle vibrazioni.

La stessa via di propagazione della sollecitazione meccanica dalla sorgente all'edificio oggetto di studio è spesso chiara solo se si considera in prima approssimazione, ma diventa ignota o non conoscibile se occorre individuare con esattezza la via meccanica attraverso la quale la sollecitazione si propaga: tra una ferrovia e un'abitazione si può ipotizzare a grandi linee questa via. Ma quando occorre stabilire se il responsabile della trasmissione è il terreno oppure, per esempio, condutture interrato, la cosa è ben più complessa.

Infine, è sempre presente il dubbio se il danno visibile sia dovuto alle vibrazioni oppure a fenomeni d'altra natura, fra cui *in primis* l'assetto statico. La necessità di normare un ambito così variegato, tuttavia, risiede nel fatto che il problema è molto diffuso e origina contenziosi significativi sotto gli aspetti tecnici ed economici.

In ambito italiano la normativa è stata piuttosto carente fino alla pubblicazione, nel 2004, della prima edizione della UNI 9916. La norma si rifaceva per la parte quantitativa a norme straniere (in particolare a quelle tedesche, inglesi e norvegesi), mentre per la parte metodologica e strumentale prevedeva una serie di prescrizioni e suggerimenti.

Dopo dieci anni di utilizzo della prima edizione, sono maturati i tempi per una revisione piuttosto approfondita.

In primo luogo, l'edizione del 2014, partendo dalle considerazioni sopra espresse sulla peculiarità di ciascun caso, richiede allo sperimentatore uno sforzo e un approfondimento maggiore: indagini volte ad appurare il legame di causa ed effetto fra vibrazioni e danno visibile, che richiedono un'attenta valutazione di tipo strumentale. La valutazione non può e non deve essere effettuata sulla base di approcci semplicistici, ma dev'essere sviluppata attraverso metodologie di confronto spettrale fra più canali che rendano rigorose le conclusioni. Non di meno lo sperimentatore deve valutare criticamente i dati di misura, che non possono essere considerati brutalmente numeri da inserire in una tabella, ma, appunto, dati ingegneristici e scientifici che devono essere declinati caso per caso.

Sulla scorta dell'esperienza di un decennio la norma indica ora come preferenziale l'indicazione della norma tedesca DIN 4150-3, lasciando tuttavia al tecnico la possibilità di utilizzare norme più strettamente attinenti al suo caso. Per l'applicazione piuttosto complessa della DIN, la UNI 9916 contiene una chiara e dettagliata appendice informativa sul trattamento dei dati e dei segnali. Sempre sulla base dei problemi che si sono manifestati nel passato, la nuova edizione indica con maggiore chiarezza e dettaglio il tipo di strumentazione da utilizzare per le misurazioni, aprendo alla strumentazione "moderna" quali gli accelerometri MEMS e le schede di acquisizione per computer, non dimenticando di dettagliare i metodi di calcolo e filtraggio per l'ottenimento della velocità (parametro utilizzato per la valutazione della potenzialità di danno) a partire dalla misurazione dell'accelerazione.

Metodo, questo, che è di gran lunga il più diffuso grazie alla forte diffusione degli accelerometri piezoelettrici. Tutti gli aspetti metrologici (*in primis* la taratura) sono stati rivisti e talora inseriti ex novo in maniera che le valutazioni possano essere inquadrare correttamente e uniformemente.

Con questa revisione, oltre a un'incrementata efficacia, la Commissione UNI ha inteso fissare basi comuni fra diversi sperimentatori in maniera che nel futuro possano essere focalizzati ancora meglio aspetti a oggi poco conosciuti, attraverso l'uso di misurazioni accurate e adeguate.

2.5. GRANDEZZE DI RIFERIMENTO E LIMITI APPLICABILI AL CASO SPECIFICO

2.5.1. Valutazione del disturbo

In accordo con la norma UNI 9614:2017 la valutazione del disturbo generato da una sorgente deve essere effettuata confrontando il parametro descrittore della vibrazione della sorgente con i limiti di riferimento indicati in Tabella 2.3.

I limiti possono esprimersi in base al livello di accelerazione in dB, espresso come:

$$L = 20 \cdot \text{Log}_{10} \frac{a}{a_0}$$

dove a_0 è il valore dell'accelerazione di riferimento, pari a 10^{-6} m/s² (normativa ISO 1683).

Gli spettri di vibrazione, nel campo delle frequenze da 1 a 80 Hz, vengono rappresentati per terzi di ottava, con valori centrali di ottava indicati in Tabella 2.3.

Tabella 2.3 – Rappresentazione del campo di frequenza 1÷80 Hz per terzi di ottava

Numero di banda di frequenza	Frequenza centrale [Hz]	Numero di banda di frequenza	Frequenza centrale [Hz]
0	1	10	10
1	1.25	11	12.5
2	1.6	12	16
3	2	13	20
4	2.5	14	25
5	3.15	15	31.5
6	4	16	40
7	5	17	50
8	6.3	18	63
9	8	19	80

Il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza L_W è dato dalla seguente relazione:

$$L_W = 10 \cdot \text{Log}_{10} \sum_1 10^{\frac{L_{iW}}{10}}$$

Dove L_{iW} sono i livelli di vibrazione calcolati per terzi di ottava, ponderati in frequenza secondo il filtro indicato in Figura 2.3. Le curve rappresentano le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X, Y.

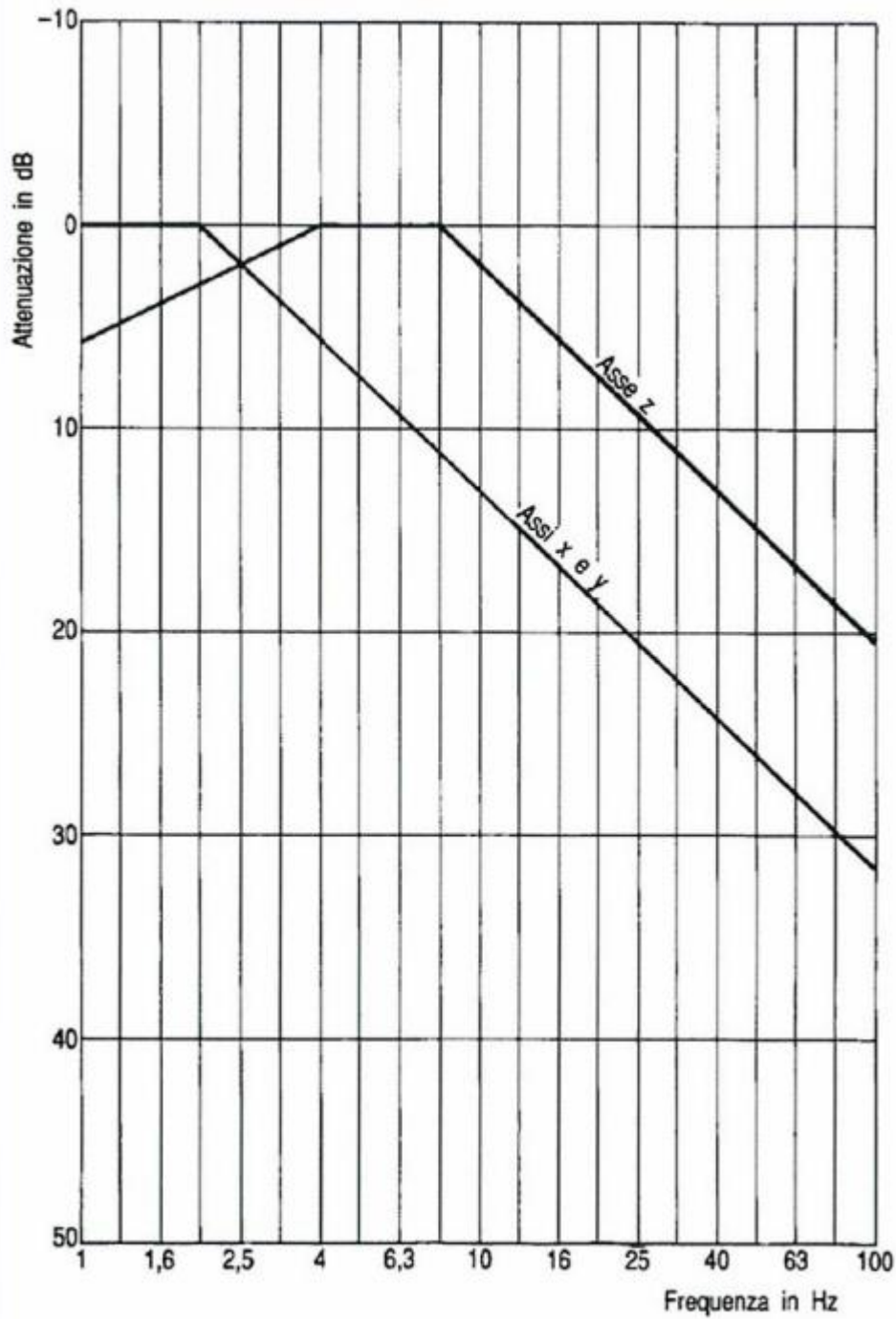


Figura 2.3 – Curve di ponderazione norma UNI 9614:2017

I limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente sono indicati in Tabella 2.4.

Tabella 2.4 - limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente

Luogo	A_w [m/s^2]	L_w [dB]
Ospedali	2,00E-03	66
Asili e case di riposo	3,60E-03	71
Abitazioni (notte)	5,00E-03	74
Abitazioni (giorno)	7,20E-03	77
Abitazioni (festivi)	5,40E-03	75
Scuole	5,40E-03	75
Uffici	1,44E-02	83
Fabbriche	2,88E-02	89

Quando i valori o i livelli delle vibrazioni riscontrate superano i limiti indicati, le vibrazioni possono essere considerate oggettivamente disturbanti per il soggetto esposto.

Si sottolinea come i limiti sopra indicati, definiti per la limitazione del disturbo sulla persona, siano generalmente più restrittivi di quelli relativi al danneggiamento degli edifici (ISO 4866 e UNI 9916). Pertanto, è lecito assumere che, laddove i livelli di vibrazione riscontrati non superino significativamente le soglie stabilite per il disturbo sugli individui, non siano prevedibili effetti di danneggiamento, ancorché minimi, agli edifici.

2.5.2. Danni architettonici

Ai fini della valutazione della possibilità di danno architettonico la norma UNI 9916 raccomanda di fare riferimento alla DIN 4150 parte 3, trattata nell'Appendice D della predetta norma UNI.

In considerazione della grande variabilità delle situazioni che possono presentarsi per quanto riguarda la tipologia strutturale dell'edificio e le caratteristiche della sorgente, peraltro, la norma UNI ammette che possano essere utilizzate in alternativa alla DIN 4150-3 anche altre norme purché venga adeguatamente documentata e motivata la loro adozione.

Relativamente alle vibrazioni di breve durata, riferibili a quelle dove siano da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata.

I limiti contenuti nella Appendice D della UNI 9916 sono riportati nella Tabella 2.5.

Tabella 2.5 – Valori di riferimento per la velocità di vibrazione al fine di valutare l’azione delle vibrazioni di breve durata sulle costruzioni (Appendice D – Prospetto D.1 Norma UNI 9916:2004)

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.

2.5.3. Deroghe

Come previsto nell’Appendice C (punto C1) della UNI 9614:2017, deroghe ai limiti di riferimento possono essere concesse per attività temporanee o attività per le quali misure mitigative adeguate non siano implementabili o economicamente sensate, quando viste all’interno della breve attività disturbante.

Di fatto, le attività con queste caratteristiche sono le sole attività di cantiere o, più in generale, le attività legate ad alcune lavorazioni temporanee all’interno o all’esterno dell’edificio recettore.

3. I FENOMENI DI PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NEL TERRENO: CENNI TEORICI E APPLICATIVI

3.1. I FENOMENI VIBRATORI

Un'onda di vibrazione meccanica è semplicemente uno spostamento elastico del materiale attorno ad una posizione di equilibrio che, se questo è omogeneo ed isotropo, si propaga nel mezzo sotto forma di onde sferiche.

Durante la propagazione della perturbazione ondulatoria, le tensioni indotte nel mezzo dalle vibrazioni sono di livello molto basso e di brevissima durata. Ciò rende trascurabili sia i comportamenti non lineari del mezzo sia i fenomeni viscosi.

Le costanti elastiche che entrano in gioco in un processo di vibrazione, pertanto, si riferiscono a determinazioni effettuate in tali condizioni e vengono definite dinamiche per differenziarle dai valori determinati in condizioni statiche o quasi statiche, in cui invece i comportamenti non lineari e i fenomeni viscosi possono avere una notevole influenza.

Le costanti elastiche dinamiche sopra menzionate sono legate tra loro dalle seguenti relazioni:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{(\lambda + \mu)}$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}$$

$$K = \frac{3\lambda + 2\mu}{3}$$

dove

E = modulo di Young;

μ = modulo di taglio;

λ = costante di Lamé;

ν = coefficiente di Poisson

K = modulo di Bulk.

Come detto, tutto quanto espresso precedentemente è valido per mezzi isotropici.

Le costanti elastiche sono definite in maniera tale da risultare dei numeri positivi. Come si può notare dalle relazioni sopra riportate il coefficiente di Poisson ν dovrà assumere valori compresi tra 0 e 0.5.

Una analisi esaustiva dei fenomeni vibratorii implica l'acquisizione di informazioni sulla ampiezza e frequenza del segnale nonché sulla variazione di tali parametri in funzione del tempo.

Un segnale di vibrazione può essere scomposto in componenti armoniche attraverso analisi di Fourier, consentendo la determinazione di parametri caratteristici del fenomeno: ampiezza dell'oscillazione (*peak particle displacement*), velocità di spostamento (*peak particle velocity*), accelerazione e frequenza.

3.2. LE ONDE ELASTICHE

Le perturbazioni elastiche derivano dall'energia di deformazione propagantesi da una sorgente.

Le onde propagantesi all'interno di un corpo elastico sono di tre tipi.

Le onde di compressione, note come onde longitudinali, primarie o onde P, si propagano attraverso una deformazione di compressione o dilatazione lungo la direzione di propagazione della perturbazione. In pratica, il moto associato al passaggio di un'onda di compressione è caratterizzato da un'oscillazione lungo la direzione di propagazione attorno ad un punto fisso.

Le onde di taglio (onde trasversali, secondarie o onde S) si propagano attraverso deformazioni ortogonali rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Nel caso in cui tutte

le direzioni di oscillazione appartengano allo stesso piano, l'onda trasversale è detta piana. Il principale tipo di onda elastica che si genera nell'ambito dei lavori di costruzione (onde di superficie o di Rayleigh) è contraddistinto da un moto delle particelle secondo un'ellisse retrograda perpendicolare al terreno e con ampiezza che decresce esponenzialmente con la profondità.

Le onde di Love (L): vengono generate solo in un mezzo in cui la velocità delle onde S varia (in genere aumenta) con la profondità. Il moto della particella al loro passaggio è trasversale alla direzione di propagazione e confinato in un piano orizzontale; pertanto, può venire registrata solo dalle componenti orizzontali dei sismometri. La loro velocità varia tra la velocità delle onde S associata allo strato più lento a quella associata allo strato più veloce.

In generale la velocità di propagazione di un'onda elastica nel materiale può essere espressa nella seguente forma:

$$v = \left[\frac{\text{modulo elastico del materiale}}{\text{densità del materiale}} \right]^{1/2}$$

In particolare, la velocità v_p di un'onda di compressione è data da

$$v_p = \left[\frac{\psi}{\rho} \right]^{1/2}$$

o, essendo $\psi = K + 4/3\mu$, da:

$$v_p = \left[\frac{K + 4/3\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

La velocità delle onde trasversali è esprimibile come segue:

$$v_s = \left[\frac{\mu}{\rho} \right]^{1/2}$$

Dalle equazioni sopra riportate si può notare che, nello stesso mezzo, le onde di compressione si propagano più rapidamente delle onde di taglio. Il rapporto v_p/v_s in qualunque materiale è, inoltre, determinato dal valore del coefficiente di Poisson (ν), come si evince dalla seguente equazione:

$$v_p / v_s = \left[\frac{2(1-\nu)}{(1-2\nu)} \right]^{1/2}$$

e, poiché generalmente il coefficiente di Poisson vale 0.25, si ha che $v_p \cong 1.7v_s$.

La velocità delle onde di Rayleigh (V_R) è legata alla velocità delle onde di taglio (V_S) dalla seguente relazione:

$$V_R = K \cdot V_S$$

Dove K è funzione del coefficiente di Poisson (Richart et al, 1970) ed è simile, ma leggermente

inferiore, alla velocità delle onde di taglio.

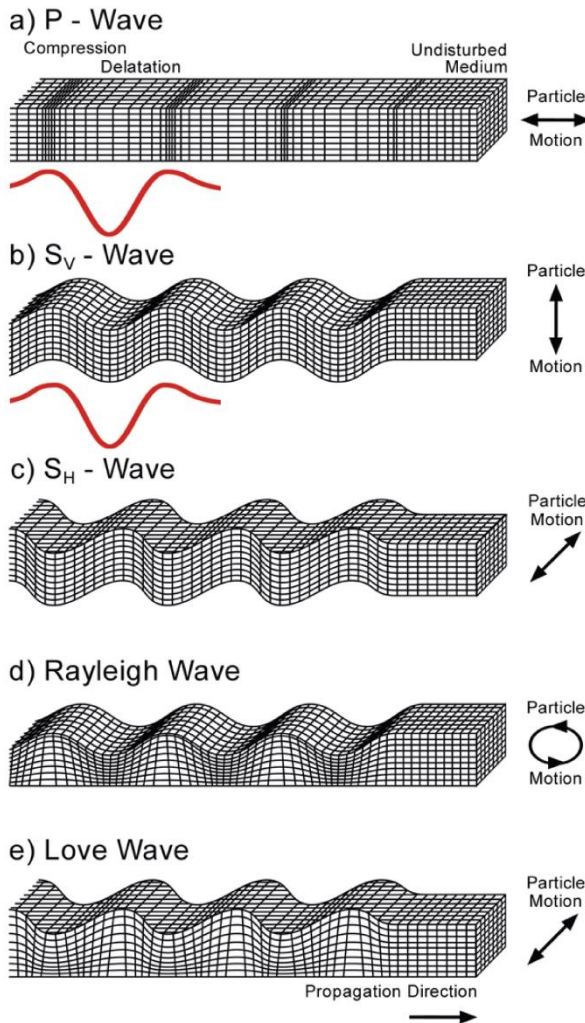


Figura 3.1 - Caratteristiche delle onde sismiche

3.3. MAGNITUDO DELLA VIBRAZIONE

Un'onda di vibrazione è comunemente descritta in termini di velocità di oscillazione delle particelle del mezzo elastico attraversato, ciò in ragione della circostanza che i danni agli edifici hanno mostrato una buona correlazione con questo parametro (New, 1986).

Inoltre, la sensibilità umana rispetto alle vibrazioni si è rivelata pressoché costante nel range di frequenza da 8Hz÷80Hz (BSI, 1992a), comprendente l'intervallo di frequenze più comunemente incontrate nell'ambito di misure eseguite in corrispondenza di cantieri edili.

La misura della velocità di oscillazione (ppv) è agevolmente misurabile attraverso trasduttori piezoelettrici. In letteratura tale parametro è stato quantificato in quattro differenti modi, essendo lo stesso riferibile:

- alla componente verticale (quantunque la stessa possa non essere quella più grande);
- a quella maggiore delle tre componenti fra loro perpendicolari (x, y, z);
- alla risultante effettiva, quale massima oscillazione della somma vettoriale delle tre componenti del segnale;
- alla media quadratica delle tre componenti (*square root of the sum of squares - SRSS*), rappresentativa della somma vettoriale del valore massimo assunto da ciascuna componente, indipendentemente dalla sua variazione nel tempo (*pseudo resultant*).

La pseudo risultante è per definizione il valore massimo che può essere determinato e generalmente sovrastima la risultante effettiva (tipicamente maggiore del 20% - Hiller e Hope, 1998).

3.4. VARIAZIONE TEMPORALE DELLA VIBRAZIONE

Oltre alla magnitudo e frequenza della vibrazione, il potenziale danno o disturbo relativo dipende dalla natura e durata della vibrazione. Le vibrazioni nel terreno possono classificarsi come segue:

- Vibrazioni continue: variazioni cicliche in ampiezza che si ripetono nel tempo;
- Transienti di vibrazione: variazioni cicliche in ampiezza che raggiungono un picco per poi decrescere fino ad annullarsi;
- Vibrazioni intermittenti: sequenze di transienti di vibrazione con distanza temporale reciproca tale da determinare, per ciascun evento, un decadimento dell'ampiezza fino a valori trascurabili;
- Vibrazioni pseudo-stazionarie: sequenze di transienti di vibrazione con distanza temporale reciproca sufficientemente ravvicinata tale che la "coda" di ogni evento si sovrappone all'arrivo dell'evento successivo.

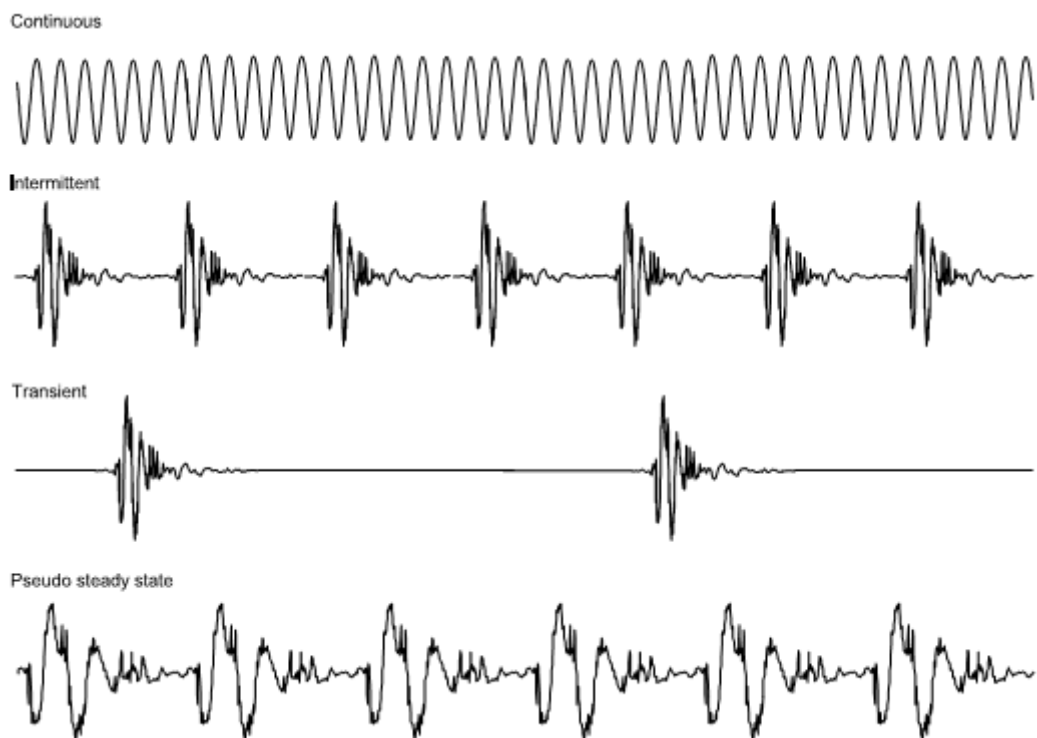


Figura 3.2 – Variazioni temporali delle vibrazioni

In generale, le vibrazioni continue hanno probabilità maggiore di generare danni negli edifici o essere disturbanti per gli occupanti rispetto alle vibrazioni intermittenti.

3.5. ATTENUAZIONE DELL'ENERGIA VIBRAZIONALE

L'attenuazione descrive il fenomeno di decadimento energetico della vibrazione durante la sua propagazione. Tale processo è conseguenza di due principali fattori: il decadimento geometrico e quello attribuibile alle caratteristiche del mezzo attraversato.

In un mezzo perfettamente elastico l'attenuazione energetica è di natura puramente geometrica ed è determinata dall'incremento progressivo della superficie investita dal moto ondulatorio (per le onde P ed S) o della lunghezza del percorso attraversato (per le onde superficiali). Per quanto precede, l'energia decade secondo $1/r^2$ per le onde "di corpo" o "di volume" (*body waves*) e secondo $1/r$ per le onde di superficie, dove "r" è la distanza dalla sorgente. Conseguentemente la velocità della particella si attenua secondo $1/r$ e $1/r^{0.5}$ per le onde di volume e di superficie rispettivamente. L'attenuazione geometrica è indipendente dalle proprietà del mezzo di propagazione.

Miller e Pursey (1955) dimostrarono che, approssimativamente, due terzi dell'energia sismica irradiata da una sorgente posizionata sulla superficie del terreno deve attribuirsi alle onde di Rayleigh. Tale circostanza, unita alla minore entità dell'attenuazione geometrica rispetto alle onde di volume, indica che le onde di Rayleigh sono le più significative nell'ambito dei

fenomeni vibrazionali associati al settore dei lavori di costruzione.

Un'ulteriore causa della perdita di energia lungo il percorso di una vibrazione deriva dal comportamento non perfettamente elastico del mezzo attraversato. L'energia elastica, infatti, decresce all'interno del materiale a causa di fenomeni dissipativi (perdite energetiche per frizione o per fenomeni di riflessione/rifrazione all'interfaccia tra due mezzi con diverso comportamento elastico) che possono portare alla progressiva scomparsa del segnale. Il coefficiente di attenuazione α esprime la perdita di energia lungo una distanza equivalente alla lunghezza d'onda λ del segnale.

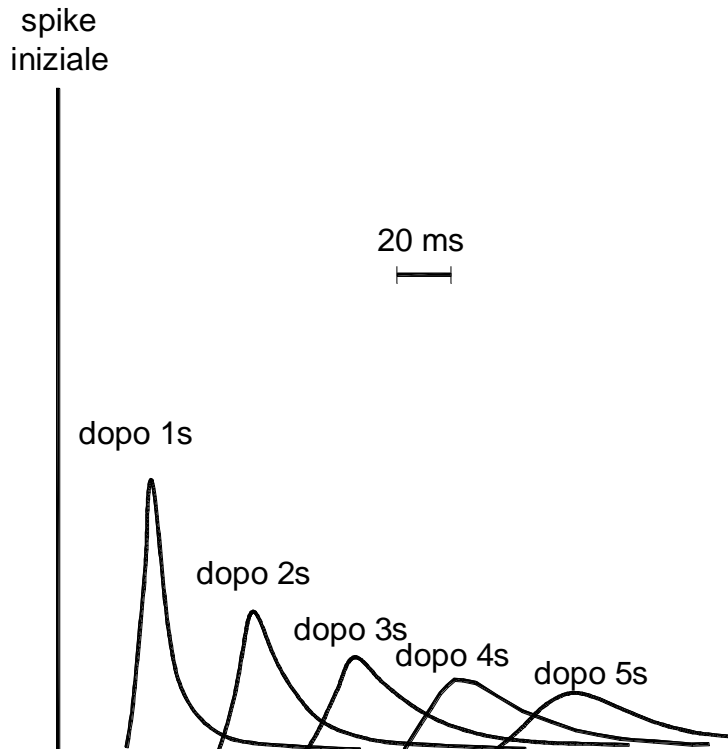


Figura 3.3 - Progressiva variazione della forma d'onda durante la propagazione a causa dell'effetto di attenuazione (Anstey, 1977)

4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area che ospiterà l'impianto eolico in progetto ricade nella Sardegna Sud Occidentale entro i territori comunali di Carbonia e Gonnese, provincia del Sud Sardegna.

Il sito, interno all'Ambito di paesaggio costiero N°6 del Piano Paesaggistico Regionale denominato "Carbonia e Isole sulcitane", si sviluppa altimetricamente tra le quote comprese fra gli 80 m s.l.m. (WTG7) e i 200 m s.l.m. (WTG5).

Il cavidotto interrato di tensione 33 kV, si svilupperà in prevalenza su viabilità esistente e attraverserà il territorio di Carbonia sino a quello di Gonnese con uno sviluppo lineare complessivo di circa 16 km. In quest'ultimo comune, a sud dell'abitato di Nuraxi Figus (frazione di Gonnese), sarà ubicata la prevista Sottostazione utente di trasformazione 220/33 kV che sarà collegata in antenna a 220 kV con una nuova stazione di smistamento 220 kV della RTN (anch'essa ubicata nel Comune di Gonnese) da inserire in entra - esce alla linea RTN a 220 kV "Sulcis - Oristano", il cui Piano Tecnico delle Opere (PTO) è stato benestariato da Terna in data 19/12/2023.

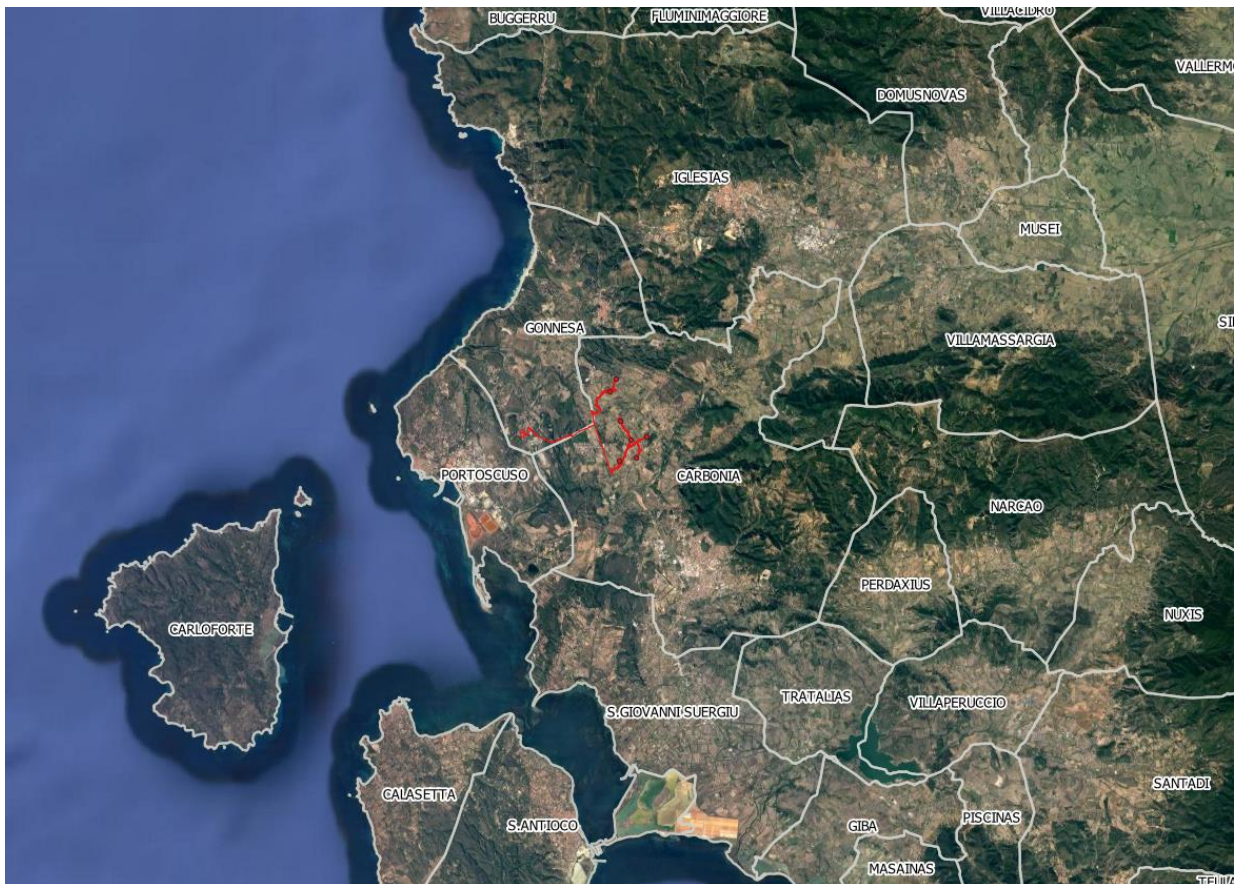


Figura 4.1 - Inquadramento del layout di impianto (in rosso) rispetto ai limiti amministrativi comunali - Elaborazione GIS. (Fonte: PPR Sardegna)

Il layout di impianto presenta un allineamento lungo direzione prevalente S-N, per uno sviluppo di circa 3,6 km tra le località di *Sedda Umbrosa* (aerogeneratore WTG7) e *Is Serras* (aerogeneratore WTG3).

Le coordinate delle WTG in progetto, espresse nel sistema di riferimento UTM - WGS84 (fuso 32) sono riportate in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 - Coordinate delle WTG in progetto

COORDINATE WTG WGS84 UTM 32N		
	EST (m)	NORD (m)
WTG1	456222	4340969
WTG2	455801	4340048
WTG3	454910	4343448
WTG4	454659	4342906
WTG5	455109	4341615
WTG6	455545	4340821
WTG7	455056	4339891

L'area di impianto è individuabile sulla cartografia IGM in scala 1:25000 Foglio 555 Sezione n. 3 - "Portoscuso" e nella Carta Tecnica Regionale Numerica in scala 1:10.000 alla sezione 555140 - Cortoghiana.

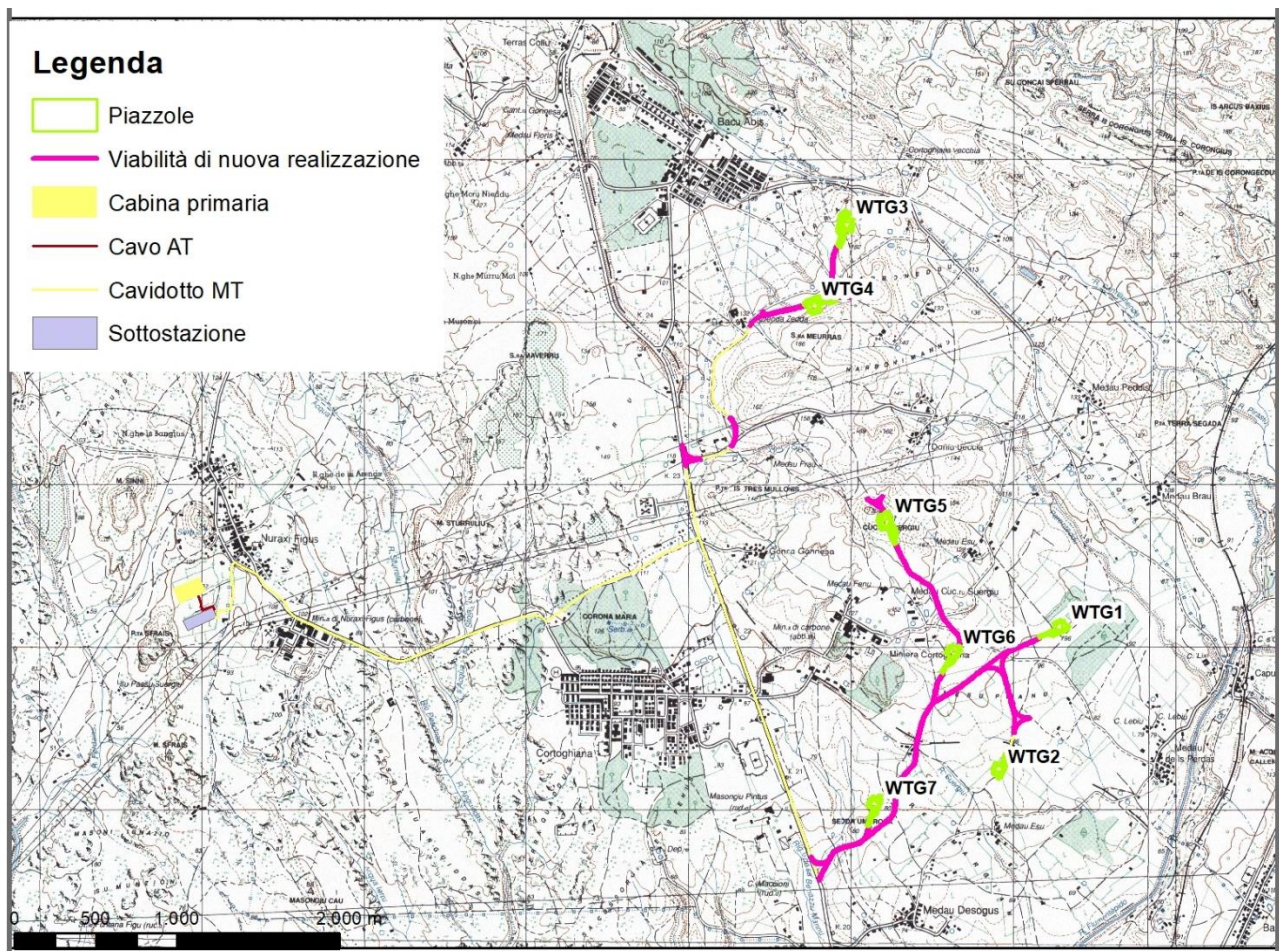


Figura 4.2 - Inquadramento su cartografia IGM 1:25000 delle aree di impianto e relative opere di connessione

L'area oggetto di studio fa parte di un settore collinare retrocostiero contraddistinto da modeste quote altimetriche. Il contesto è caratterizzato da quote massime di circa 200 m e con pendenze generalmente piuttosto contenute, a meno di situazioni locali legate all'evoluzione del reticolo idrografico e all'affioramento di orizzonti elevata competenza, in

particolare nei settori con affioramento di rocce vulcaniche (comprensorio del *Monte Sfrais* e dintorni, incisione valliva del *Riu Sturruliu*). La principale asta fluviale dell'area è il fiume *Flumentepido*, il cui corso è posto a sud dell'area di impianto, caratterizzato in genere da sponde blandamente ondulate, ma che nel tratto compreso fra *Conca S'Ollastu* e *Conca Is Angius* presenta un tratto fortemente incassato, con affioramenti rocciosi vulcanoclastici. Altre aste rilevati sono il *Riu Arca Bascu*, con deflusso in direzione nord-ovest e foce nel Golfo di Gonnese, il *Riu Sturruliu*, attraversato dal cavidotto (in canalina su ponte), il *Riu Perdaias* (compreso fra le due ipotesi di sottostazione) e il *Riu Pirastu*, affluente in destra idrografica del *Flumentepido*.

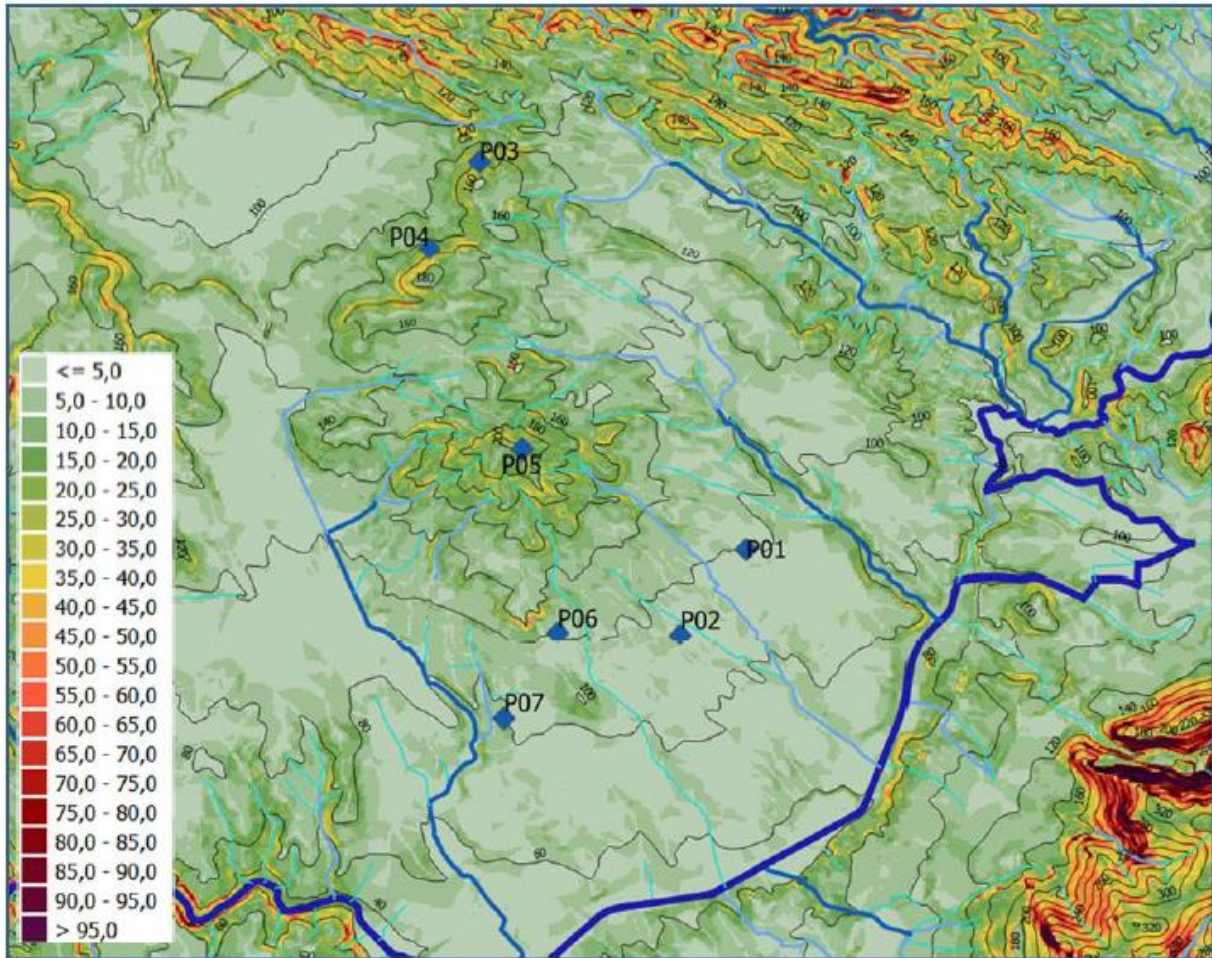


Figura 4.3 - Carta delle pendenze dell'area di diretto interesse e di un suo immediato intorno, tratta dal DTM passo 20 m del Geoportale Nazionale. Pendenze espresse in percentuale.

La configurazione del layout di progetto nello stralcio di inquadramento su ortofoto è illustrata di seguito.

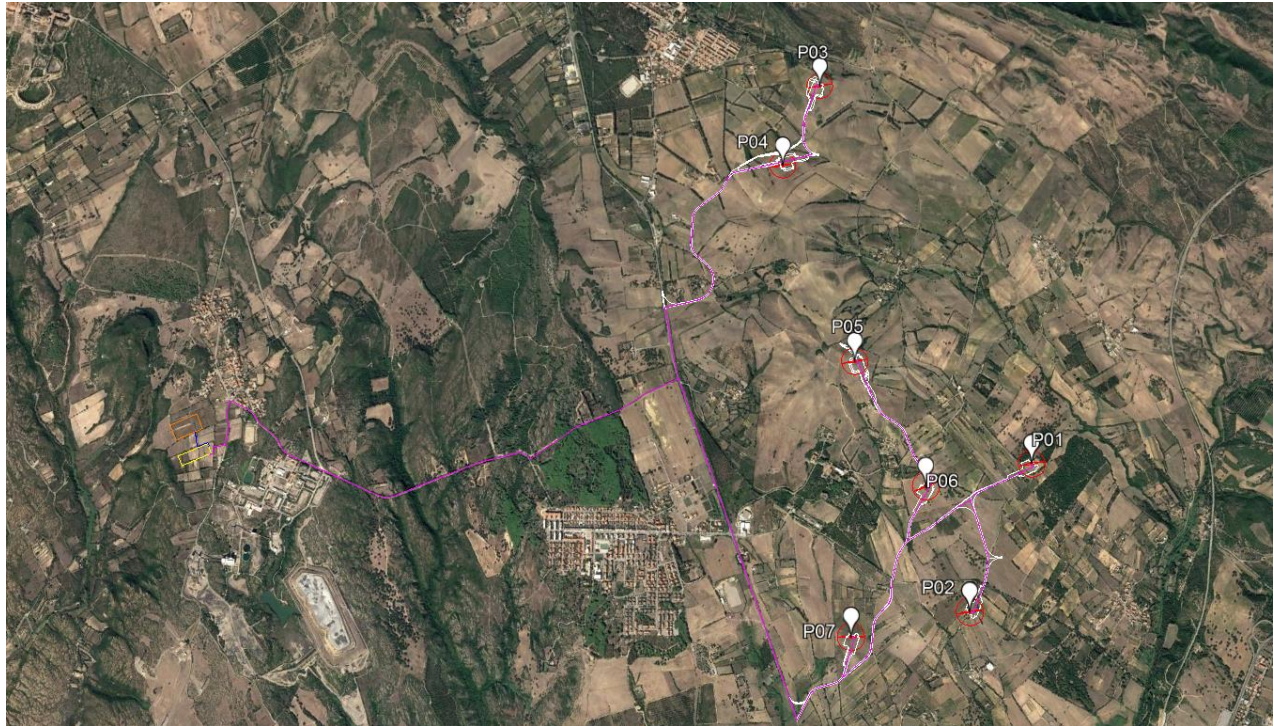


Figura 4.4 - Ubicazione delle WTG (in rosso), della viabilità di impianto (in bianco), del cavidotto MT di impianto (in magenta) della stazione utente di trasformazione 220/33 kV (in giallo) della futura stazione di smistamento 220 kV (in arancione), su immagine satellitare (Fonte: Google Earth).

Nella Tabella 4.2 vengono riportate in km le distanze delle singole WTG dai centri abitati dei Comuni presenti all'interno e nell'intorno dell'area di studio.

Tabella 4.2 - Distanze delle singole WTG dai centri abitati dei Comuni interessati

Comune	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4	WTG5	WTG6	WTG7
Carbonia	6,5	5,9	9,4	9	7,6	6,7	6,2
Gonnesa	5,7	6,5	3	3,5	4,9	5,7	6,6
Iglesias	11,1	12,1	9,5	10	10,9	11,5	12,6
Narcao	17	17,1	19,2	19,2	18,3	17,6	17,8
Perdaxius	11,8	11,7	12,3	14,2	13	12,3	12,3
Portoscuso	9,9	9,4	9,2	8,8	8,9	9,2	8,7
S. Giovanni Suergiu	11,8	11	14,5	14	12,7	11,8	11
Tratalias	14,7	14,1	17,5	17,1	15,8	14,9	14,4
Villamassargia	14,5	15,3	14,8	15,2	15,3	15,2	16,1

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

5.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

Nella carta geologico-strutturale di Sardegna e Corsica l'area di intervento rientra in un settore complesso, con le unità metamorfiche paleozoiche, i terreni sedimentari di età terziaria, le serie vulcaniche burdigalino-aquitaniene e i terreni quaternari continentali.

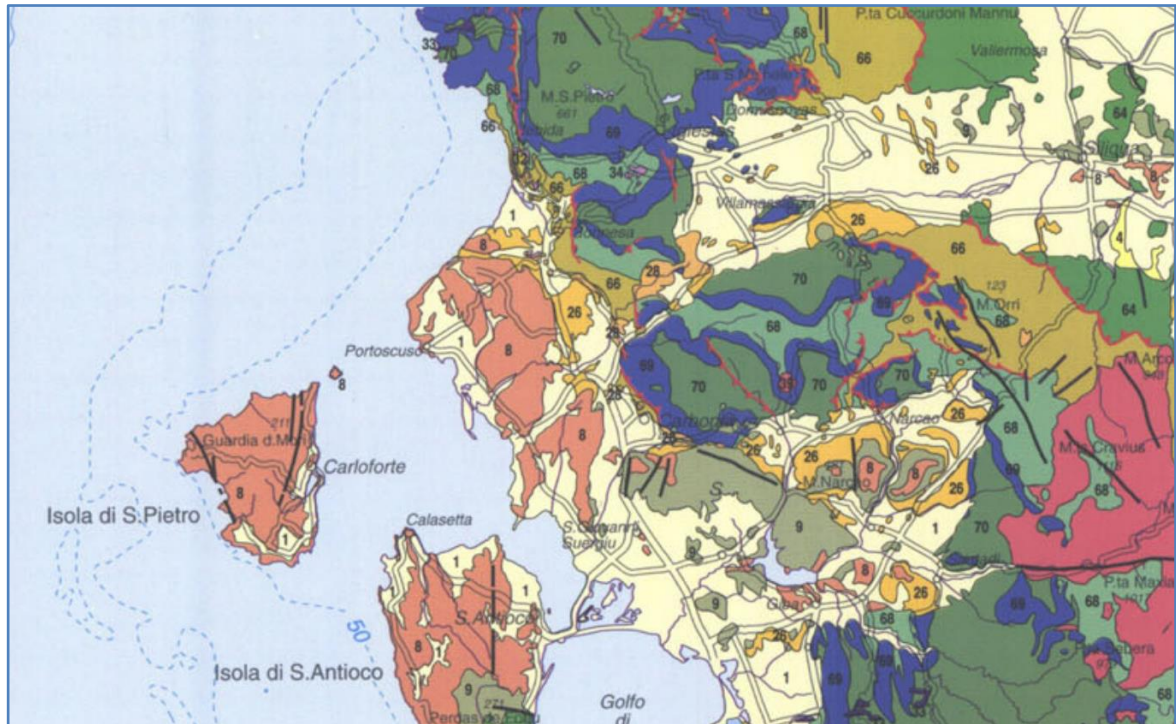


Figura 5.1 - Stralcio Carta Geologica e strutturale della Sardegna e della Corsica

Nella più accurata Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000 a cura del Comitato per il Coordinamento della Cartografia Geologica e Geotematica della Sardegna (edizione 1996) l'area rientra nel gruppo denominato 10a, ovvero la Formazione del Cixerri "Conglomerati, arenarie e siltiti argillose poggianti su calcari e argille di ambiente paralicco del Luteziano" e 2 "Depositi plio-pleistocenici: Arenarie eoliche con cervidi e proboscidi, Conglomerati, arenarie e biocalcareni con molluschi". La zona interessata dalle opere di connessione, posta più a ovest, rientra invece nel contesto contrassegnato dalla sigla 11, ovvero dal ciclo vulcanico calcalcalino oligomiocenico, caratterizzato da prevalenti ignimbriti a chimismo riolitico, riodacitico, dacitico e comenditico e più raramente da colate, cupole di ristagno e talora prodotti freatomagmatici.

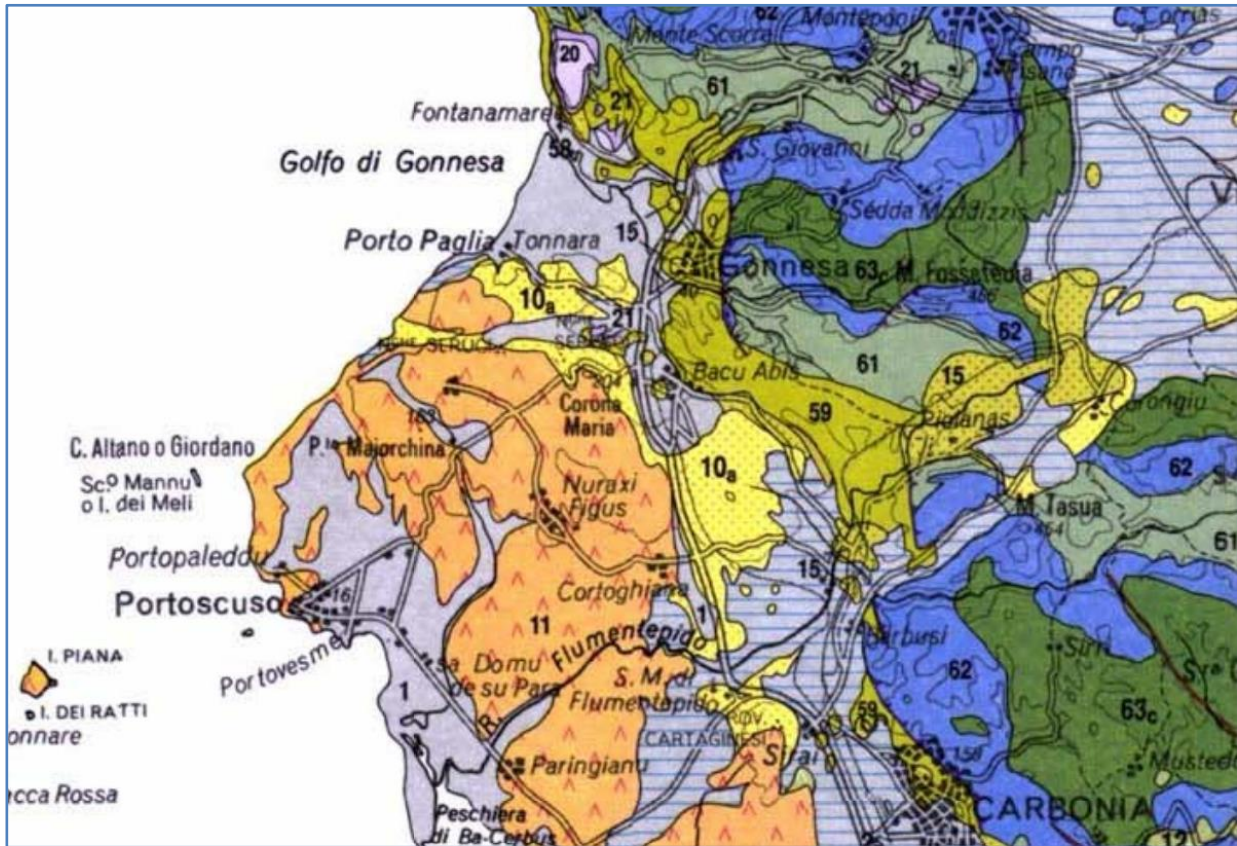
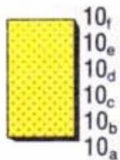


Figura 5.2 - Stralcio Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000. Fonte Cartografia geologica | Ordine Regionale dei Geologi della Sardegna.

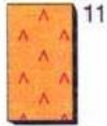
Depositi continentali e successione marina Post Eocene medio - Miocene inf.
Post Middle Eocene - Lower Miocene continental and marine deposits



10_f
10_e
10_d
10_c
10_b
10_a

Conglomerati e arenarie continentali con banchi di selce, tufiti, tufi pomicei (Lacustre Auct. p.p.), con Piante (*Bombacoxylon owenii*, *Arganioxylon sardum*, *Pinuxylon zobelianum*, *Palmoxyton sardum*, etc.) (Lago Omodeo, Anglona) 10_f. **Burdigaliano**.
Arenarie, conglomerati, tufiti più o meno arenacee, calcari sublitorali, con Foraminiferi planctonici, Molluschi pelagici (*Vaginella depressa*, *Clio triplicata*, etc.), Molluschi bentonici (*Pecten corsicanus*, *Ostreinella neglecta*), Coralli hermatipici, Echinoidi, etc. (Molassa a *vaginella*, Arenarie di Gesturi, Formazione della Marmilla p.p. Auct.) (Anglona: Castelsardo; Sarcidano-Mandrolisai: Genoni, Asuni; Arburese: Funtanazza; etc.); marne argillose ittiolitiche, arenarie e siltiti con Molluschi bentonici (*Pereiraia gervaisi*, *Tympanotonos margaritaceus*) (formazione delle Marne di Ales Auct.) (Marmilla: Ales; Arburese: Funtanazza; etc.) 10_a.
Calcari selciosi, siltiti, arenarie e conglomerati fluviali, con intercalazioni di tufi riolitici, con resti di Piante (*Glyptostrobus europaeus*, *Sequoia* cf. *sternbergi*, *Cinnamomophyllum scheuchzeri*, etc.), Ostracodi, Alghe (Characee), Molluschi (*Planorbis exiguus*, *Lymnaea pachigaster*, *Helix* cf. *ramondi*) (Lacustre p.p. Auct.) (Logudoro: Oschiri, Berchidda; Anglona; Arburese: Funtanazza; Nurra: Porto Conte) 10_a.
Conglomerati fluviali, talora arrossati, a elementi di basamento cristallino (Logudoro: Piano Ladu; Anglona: Casteldoria); conglomerati poligenici continentali, arenarie e calcareniti con Nummuliti rimaneggiati (Baronie: M. Albo, La Caletta, M. Tuttavista; Barbagia: Lanaitto) 10_c. **Formazione di Ussana** - Conglomerati poligenici e arenarie continentali, con matrice argillosa rossastra; nella parte alta microconglomerati, arenarie e siltiti, litorali, con Ostreidi, Mtilidi, Ceritidi (Campidano: Monastir, Nuraminis); conglomerati fluviali (Marmilla: Trexenta; Sarrabus: M. Genis; Gerrei: S. Nicolò Gerrei; Sarcidano: Villanovatulo; etc.) 10_b.
Oligocene sup. - Aquitaniano.
Formazione del Cixerri - Conglomerati, arenarie e siltiti argillose rossastre, continentali, poggianti sopra calcari e argille paralici con Carofite e Palinomorfi del Luteziano (Iglesiente: Tanca Aru, etc.) 10_a.
Post Eocene medio - Oligocene.

Ciclo vulcanico calcalino oligo-miocenico (14 - 32 Ma)
Oligocene-Miocene calcaline volcanic cycle (14-32 Ma)



11

Rioliti, riodaciti, daciti e subordinatamente comenditi, in espandimenti ignimbrici, cupole di ristagno e rare colate, a cui si associano prodotti freatomagmatici ("fall" e "surge"); talora livelli epiclastici intercalati (Sulcis; Mandrolisai; Allai, Asuni, Ruinas; Oristanese; Paulilatino; Valle del Tirso: Fordongianus; Logudoro; Anglona; Planargia) **11. Oligocene sup. - Miocene inf. medio.**

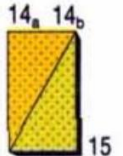
Ignimbrites, lava domes and rare lava flows of rhyolitic, rhyodacitic, dacitic and locally comenditic composition, with fall and surge deposits; intercalations of sedimentary and epiclastic deposits (Sulcis; Mandrolisai; Allai, Asuni, Ruinas; Oristanese; Paulilatino; Valle del Tirso; Fordongianus; Logudoro; Anglona; Planargia) 11. Upper Oligocene - Lower Middle Miocene.



12

Andesiti, andesiti basaltiche e rari basalti ad affinità tholeitica e calcalina, talora brecciati, in colate, cupole di ristagno (Planargia: Montresta, Tresnuraghes; Oristanese: Bauladu; Marmilla: Ales; Sulcis: Narcao, S. Antioco); lave dacitiche e andesitiche in cupole e filoni (Valle del Cixerri; Campidano: Monastir; Planargia: C. Marargiu; Sulcis: Pula, Carbonia, Sarroch); andesiti, basalti andesitici e latiti ad affinità da calcalina alta in K a shoshonitica (Anglona); localmente gabbrì e gabbronoriti in corpi ipoabissali (Arburese: M. Arcuentu, M. Nureci); quarzodioriti porfiriche (porfiriti di alghero Auct.), (Nurra: Calabona) **12. Oligocene sup. - Miocene inf..**

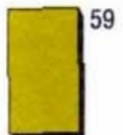
Successioni transizionali e marine del Paleocene Sup.- Eocene medio
Upper Paleocene-Lower Eocene transitional and marine successions



15

SUCCESSIONE DELLA SARDEGNA ORIENTALE (Sarrabus; Gerrei; Salto di Quirra: M.te Cardiga; Baronie; Orosei). Calcari, calcari marnosi e marne argillose sublitorali, con Coralli, Echinoidi, Nummuliti (*Nummulites biarrizensis*, *N. leymeriei*, *N. purchisoni*), Assiline, Operculine, Discocycline (Calcari a Nummuliti Auct.) **14_b**. Arenarie e conglomerati poligenici più o meno quarzosi fluvio-deltizi, con Ceritidi **14_a**. **Ypresiano - Luteziano inf..**

SUCCESSIONE DEL SULCIS E DELLA TREXENTA (Sulcis: Terras de Collu; Trexenta: N.ghe Sioco; Iglesiente: Gonnese). Calcari litorali e transizionali con Characee, Ostracodi, Alveolinidi della zona ad *Alveolina cucumiformis*, Orbitolitidi e Miliolitidi (Miliolitico Auct.); calcari marnosi, marne e argille continentali e paralico-transizionali con depositi di carbone, con Palinomorfi (*Corsinopollites ichnusae*, *Leiotriletes dorogensis*), Characee, Perissodattili (*Lophiodon sardus*, *Atalanodon monterini*), Alveolinidi (*Alveolina* cf. *subpyrenaica*, *A. lepidula*), Carofite (*Nitellopsis thaleri*) e Ostracodi (*Neocyprideis*) (Lignifero Auct.); alla base: arenarie e conglomerati di piana alluvionale **15. Paleocene sup. - Eocene inf. medio.**



59

Metasiltiti e metarenarie con intercalazioni di metavulcaniti basiche e metatufiti, con Briozoi, Brachiopodi (*Nicolella actoniae*, *Dolerorthis maxima*, *Paurorthis gnoliana*, etc.), Tentaculiti litorali (*Cornulites*), Graptoliti (*Glyptograptus* cf. *tenuissimus*, etc.), Crinoidi, Trilobiti (*Ovalocephalus tetrasulcatus*, *Arthrorhynchus tarda*) (formazione di M.te Orri, formazione di Portixeddu, formazione di Domusnovas, formazione di Rio San Marco Auct.); metaconglomerati con olistoliti di calcari e dolomie cambriani, metasiltiti e metarenarie rosso-violacee di piana da alluvionale a costiera (Pudding, formazione di M.te Argento Auct.) (Iglesiente: Portixeddu, Buggerru, Fluminimaggiore, P.ta S'Argiola, P.ta Su Amadori, Mason Porcus, R. Cannamenda, Caput Aquas, etc.) **59. Caradoc-Ashgill.**



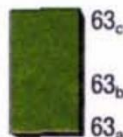
61

Formazione di Cabitza - Argilloscisti, metarenarie, metacalcari nodulari e metasiltiti con rare lenti calcaree, con Trilobiti (*Sclenopieuroopsis* cf. *ribeiroi*, *Paradoxides mediterraneus*, *Corynexochus* sp., *Conocoryphe* cf. *brevifrons*, *Jincella* cf. *prantli*, *Bailliella* cf. *levyi*, *Micragnostus* sp.), Graptoliti bentonici (*Rhabdinopora flabelliformis*), Foraminiferi bentonici (*Hemisphaerammina* cf. *cecillalickeri*?), Spongieri, Carpoidi, Hyolitidi, Brachiopodi, Incertae sedis (*Chancelloria marocczana*, *C. sardinica*), Alghe (*Girvanella problematica*), Echinodermi, Acritarchi, (Scisti di Cabitza, Calcescisti, formazione di Campo Pisano Auct.) (Iglesiente: Cabitza, M.te S. Giovanni, Nebida, Campo Pisano, Gonnese, Villamassargia) **61. Cambriano inf.- Ordoviciano inf..**



62

Formazione di Gonnese (Metallifero Auct.) - Metacalcari e metadolomie con rari Archeociati, Trilobiti, Echinodermi (Calcarea ceroide, Dolomia grigia, formazione di San Giovanni Auct.) (Iglesiente: Is Ollastus, Acquacadda, S. Giovanni, etc.); metadolomie e metacalcari stromatolitici, con rari Archeociati (*Rasetticcyathus* sp., *Coscinocyathus* sp.) (Dolomia rigata, formazione di Santa Barbara Auct.) (Iglesiente: Planu Sartu, Arcu Biasterria, S. Barbara, etc.) **62. Cambriano inf..**



63_c

Formazione di Nebida (Formazione delle Arenarie Auct.) - Metarenarie a cemento carbonatico, metadolomie, metacalcari oolitici e micritici, con Trilobiti (*Dolerolenus bifidus*, *Sardoredlichia laskai*, *Giordanella meneghini*), Archeociati (*Rasetticcyathus iglesiensis*), Alghe, Brachiopodi, Lingulidi, rari Hyolitidi ed Echinodermi (formazione di P.ta Manna, membro di P.ta Manna Auct.); arenarie e arenarie siltose con rare intercalazioni di calcari con Alghe (*Girvanella meneghini*, *Epiphiton*), Archeociati (*Rasetticcyathus iglesiensis*, *Inessoccyathus spatiosus*, *Taylorcyathus vologdini*, *Coscinocyathus elongatus*), Trilobiti (*Giordanella meneghini*, *Enantiaspis enantiopa*) (formazione di Matoppa, membro di Matoppa Auct.) (Sulcis; Iglesiente) **63_c. Cambriano inf..**

Filladi e metarenarie, talora con intercalazioni di metaconglomerati e di marmi spesso dolomiti (formazione di Bithia Auct.); metavulcaniti basiche (Sulcis) **63_b. ? Precambriano - Cambriano inf..** Micascisti ad Andalusite (Scisti di M. Settiballas Auct.) (Sulcis) **63_a. ? Precambriano.**

A seguire si riporta l'estratto della cartografia CARG, Foglio 555 "Iglesias"

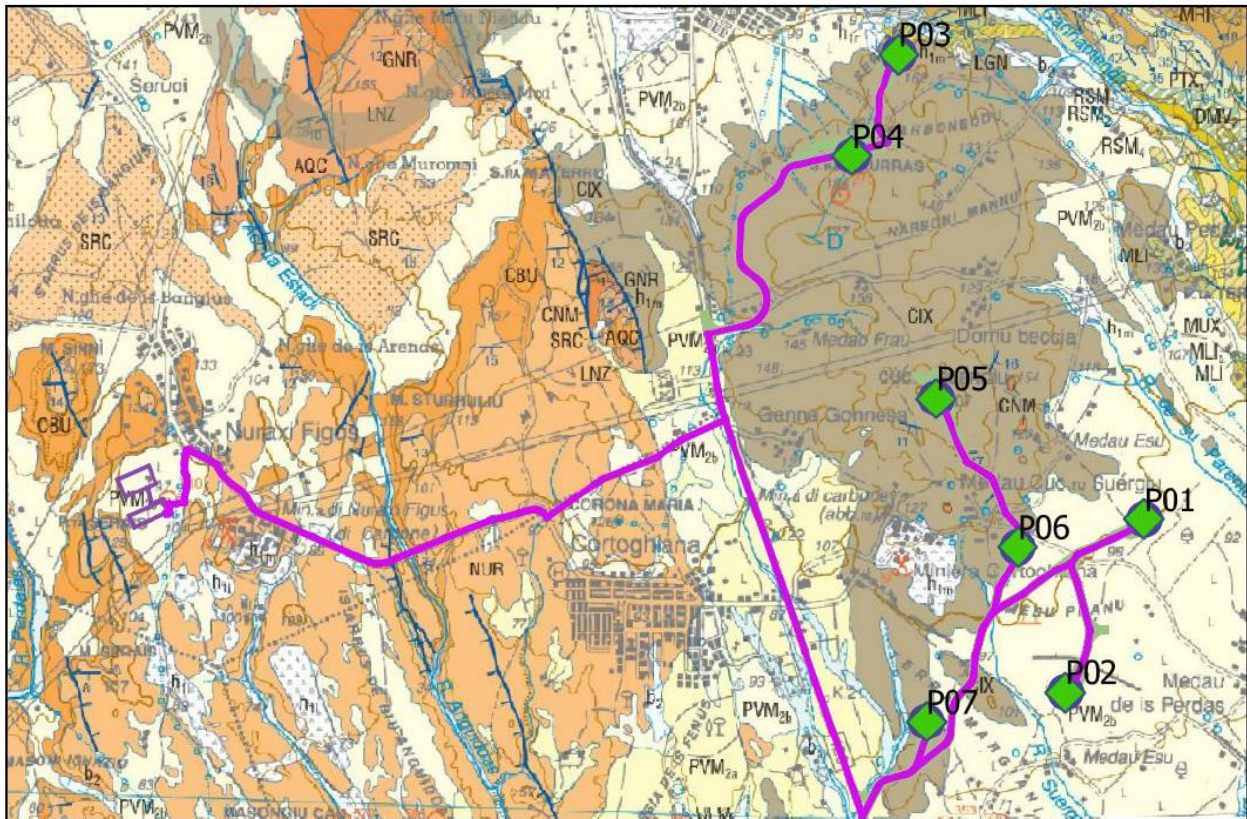


Figura 5.3 – Stralcio cartografia CARG Foglio 555 "Iglesias". Fonte: isprambiente.gov.it

L'area si presenta piuttosto complessa come assetto tettonostratigrafico poiché comprende terreni che coprono un arco temporale molto ampio, con vicissitudini tettoniche e fasi genetiche diversificate. Le unità tettonostratigrafiche presenti nell'area sono le seguenti, riportate dalla più recente alla più antica:

- Depositi continentali dell'area continentale (Olocene)
 - h_n – depositi antropici (discariche industriali, riporti, discariche minerarie, bonifiche)
 - b_a – depositi alluvionali (ghiaie con subordinate sabbie e limi)
 - b_2 – coltri eluvio-colluvionali (depositi fini frammisti a depositi grossolani)
 - a – depositi di versante
- Depositi pleistocenici
 - PVM-Sintema di Portovesme-subsintema di Portoscuso (ghiaie alluvionali terrazzate, sabbie eoliche, detriti di versanti e breccie, corpi di frana con accumuli caotici e blocchi)
- Successioni vulcano-sedimentarie terziarie (Miocene inferiore-medio)
 - CBU – Rioliti di Monte Crobu (Depositati piroclastici da flusso da densamente saldati a non saldati (tufi, tufi a lapilli e tufi-breccia), a tussitura porfirica e a composizione riolitica. Alla base breccie poligeniche)
 - NUR – Rioliti di Nuraxi (depositi piroclastici di flusso intensamente saldati, porfirici, a composizione riolitica, con livello vitrofirico alla base)
 - SRC – Rioliti di Seruci (depositi piroclastici di flusso intensamente saldati, porfirici, a composizione riolitica, spesso con depositi da caduta e con livello vitrofirico alla base)
 - ACQ – Daciti di Acqua Sa Canna (depositi piroclastici di flusso non saldati e depositi di caduta a composizione dacitica; in alternanza conglomerati e arenacei vulcanoclastici)
 - LNZ – Rioliti di Lenzu (depositi piroclastici di flusso densamente saldati a composizione dacitica con depositi di caduta alla base)

- CNM - Daciti di Corona Maria (Depositi piroclastici da flusso da densamente saldati a non saldati, porfirici, a composizione decitica, spesso con vetro vitrofirico; talore alla base sono presenti depositi da caduta e paleosuoli)
- Successione sedimentaria paleogenica
 - CIX – Formazione del Cixerri (arenarie quarzoso-feldspatiche, marne, argille siltose e conglomerati poligenici, conglomerati e arenarie quarzose, liditi e calcari lacustri)
 - LGN – Lignitifero (alternanze ritmiche di argille spesso carboniose, marne, calcari, arenarie con abbondante materia organica e depositi di lignite)
 - MLI – Miliolitico (Clacari e calcari arenacei, spesso ricchissimi in miliolidi; alla base talora conglomerati a clasti di quarzo e liditi)
- Successione sedimentaria mesozoica (Triassico inferiore – medio)
 - _BUN – Bundsandstein (conglomerati e brecce da granosostenuti a matrice-sostenuti, alternati ad arenarie grossolane)
- Basamento metamorfico paleozoico – successione post-Discordanza Sarda
 - FLU – Formazione di Fluminimaggiore (alternanza di calcari nodulari scuri e metapeliti scure riccamente fossilifere); Siluriano inferiore-Devoniano inferiore
 - RSM – Formazione di Rio San Marco (metargilliti, metasiltiti, metarenarie, alternanze ritmiche parallele e torbiditiche, metabrecce, metaconglomerati); Ordoviciano superiore
 - PTX – Formazione di Portixeddu (metasiltiti e metargilliti e con rari noduli fosfatici e intercalazione metavulcanoclastica) Ordoviciano superiore
 - AGU – Formazione di Monte Argentu “Puddinga” (metasiltiti, metapeliti, metaconglomerati, megabrecce poligeniche ed eterometriche); Ordoviciano medio-superiore
- Basamento metamorfico paleozoico – successione pre-Discordanza Sarda
 - CAB – Formazione di Cabitza “Argilloscisti laminati” (alternanze di metasiltiti e metapeliti, in parte con metarenarie, lenti di calcari); Cambriano medio-Ordoviciano inferiore
 - GNN – Formazione di Gonnese “Metallifero” (calcari grigi massivi in parte dolomitizzati “Membro del calcare ceroide” e dolomie stratificate e laminate, spesso stromatolitiche, con noduli e livelli di selce scura alla base “Membro della Dolomia Rigata”); Cambriano inferiore

5.2. ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO LOCALE

Il dettaglio delle condizioni geologiche può essere desunto attraverso la cartografia geologica ufficiale disponibile, facendo riferimento alla cartografia in scala 1:50.000 che rappresenta la cartografia di riferimento. Di seguito si riporta uno stralcio dei tematismi CARG digitalizzati con l'ubicazione delle WTG.

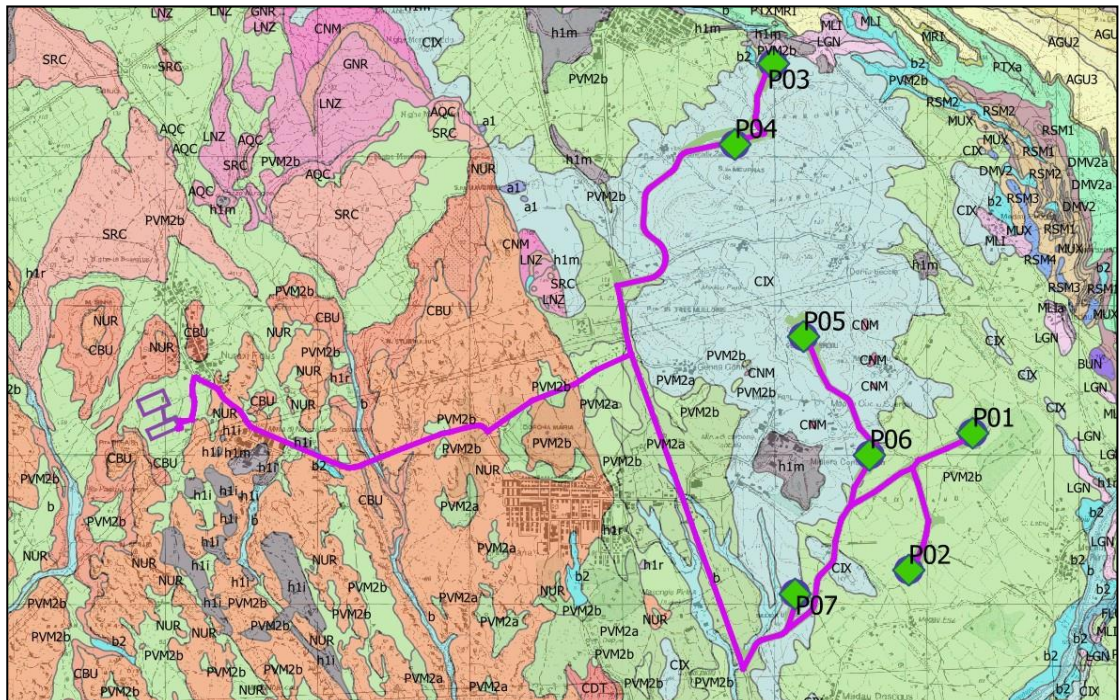


Figura 5.4 - Carta Litologica: Fonte SITR Sardegna ed elaborazione in ambiente GIS. Le sigle indicano le formazioni geologiche, indicate nel corpo del paragrafo

Alla scala di dettaglio le formazioni presenti nell'area e su cui saranno realizzate le WTG di progetto sono le seguenti:

- WTG 1, WTG 2: PVM2b – Sintema di Portovesme-subsintema di Portoscuso – litofacies delle sabbie e arenarie eoliche.

Sabbie e arenarie medie e grossolane di origine eolica con subordinati detriti e depositi alluvionali, con spessori fino a circa 30 m. La stratificazione è incrociata concava e planare, con evidenti superfici di erosione e riattivazione; sono arrangiati in paleo-campi dunari indicanti direzione dei venti dominanti da nord-ovest, talvolta addossate ai rilievi. Tali depositi sono spesso intercalati a sedimenti alluvionali o detritici di altre litofacies del subsintema di Portoscuso.

Tale litotipo caratterizza, oltre che molti tratti di cavidotto, anche l'area di realizzazione della sottostazione utente.



Figura 5.5 - Dintorni dell'area di realizzazione della sottostazione utente, con visibili prodotti prevalentemente sabbiosi rimaneggiati dalle lavorazioni agrarie, appartenenti al subsistema di Portoscuso del Sintema di Portovesme, caratterizzato da sabbie e arenarie di origine eolica. Coordinate 450914.50 m E- 4341051.59 m N



Figura 5.6 - Area immediatamente a sud della WTG P01, con visibili prodotti prevalentemente sabbiosi rimaneggiati dalle lavorazioni agrarie, appartenenti al subsistema di Portoscuso del Sintema di Portovesme, caratterizzato da sabbie e arenarie di origine eolica, e con frazioni eluvio-colluviali. Coordinate 456249.24 m E- 4340910.40 m N

- WTG3, WTG 4, WTG 5, WTG 6, WTG 7: CIX – Formazione del Cixerri

Tale formazione poggia sia direttamente sul basamento metamorfico paleozoico, sia sulle formazioni del Miliolitico e del Lignitifero; essa risulta intrusa da filoni andesitici ipoabissali di età oligo-aquitaniiana ed è ricoperta dalle vulcaniti o dai conglomerati età pleistocenica. Dal basso verso l'alto è stato riconosciuto un trend evolutivo che da depositi in genere medio-fini porta a sedimenti a grana più grossa. Le frazioni conglomeratiche caratterizzano prevalentemente gli orizzonti di tetto. Il contenuto fossilifero è in genere molto scarso e la datazione della formazione possiede un certo grado di incertezza, con parte delle faune di età oligocenica e filoni intrusivi di età prevalentemente aquitaniiana. L'ambiente deposizionale delle porzioni basali è rappresentativo di una piana alluvionale ampia e a meandri, a bassa energia, che passa verso l'alto a un ambiente a canali intrecciati, con maggior energia dell'ambiente deposizionale.

Litologicamente la formazione è quindi caratterizzata da arenarie quarzoso-feldspatiche, marne, calcari, argille siltose e conglomerati poligenici poco evoluto nella parte alta, argille siltose, arenarie quarzose e marne nella parte medio-bassa, alla base conglomerati a clasti di quarzo e liditi, arenarie quarzose e talvolta calcari di ambiente lacustre nella parte bassa. Spessore affiorante complessivo di circa 100 m.

Le WTG6 e WTG7 ricadono nei pressi del contatto con il subsistema di Portoscuso.



Figura 5.7 - Formazione del Cixerri, affiorante a est della WTG P05 (coordinate 455424.16 m E- 4341877.70 m N). Litofacies delle arenarie, qui debolmente cementate



Figura 5.8 - Formazione del Cixerri, affiorante a est della WTG P05. Litofacies delle arenarie, qui ben cementate e in parte conglomeratiche, con buona resistenza meccanica. Coordinate 455422.64 m E- 4341867.38 m N.



Figura 5.9 - Formazione del Cixerri nella litofacies arenacea tenera, affiorante sul terreno denudato a circa 150 m di distanza dalla WTG P06 alle coordinate 455390.54 m E- 4340869.75 m N. La freccia gialla indica la posizione della WTG P06

Per quanto attiene il tracciato dei caviddotti esso ricade sostanzialmente nelle formazioni di origine vulcanica delle Rioliti di Nuraxi, subordinatamente Rioliti di Seruci e raramente nelle Rioliti di Monte Crobu, nonché, in larghi tratti nel già citato Sintema di Portovesme e ovviamente della Formazione del Cixerri.

Le Rioliti di Seruci affiorano diffusamente in tutto il settore compreso fra la strada statale 126 dell'Iglesiente e l'area costiera. Le Rioliti sono costituite da depositi di caduta nella parte

basale e da depositi da flusso in facies ignimbrítica spesso densamente saldati, appartenenti alle ignimbriti di alto grado, che si formano quando il flusso ignimbrítico ha ancora temperatura sufficientemente alta da saldare fra loro buona parte degli ejecta. Si tratta di una formazione complessa, formata da piú flussi ignimbrítici impilati in tempi molto brevi. Le Rioliti di Seruci poggiano sulle Daciti di Acqua Sa Canna, sulla quale giace il corpo principale, litoide e di aspetto massivo, posto al di sopra del livello vitrofirico basale, di spessore molto contenuto (1 m circa). La struttura è eutassitica, in particolare a causa di frammenti pomiceici "a fimma" grigi e nerastri schiacciati e diasproidi, piú evidenti e abbondanti nella porzione superiore. In generale il colore è bruno rossiccio. Verso l'alto aumentano anche i fenocristalli liberi, in particolare di plagioclasio e sanidino. Lo spesso varia da un minimo di circa 9-10 m a un massimo di circa 40 m, sia in affioramento, sia sulla base di dati di perforazione. L'età di tali depositi piroclastici è compresa fra il Burdigaliano superiore e il Langhiano.

Le Rioliti di Monte Crobu affiorano diffusamente in larghi settori del Sulcis-Iglesiente, ma hanno importanza in affioramento contenuta nei riguardi del tracciato dei cavidotti, che la intercettano solo per brevi tratti; essa poggia sulle Rioliti di Seruci e presentano solitamente colorazione da bruno giallastra a grigio bruna. In letteratura è ormai riconosciuta come appartenere sostanzialmente a un unico evento piroclastico, con caratteristiche di Ignimbrite di Bassa Temperatura e di Ignimbrite di Alta Temperatura, che da quindi luogo a depositi sia poco saldati sia densamente saldati. La parte basale presenta una matrice non saldata, nerastra e bruna, con cristalli feldspatici liberi numerosi, frammenti litici e pomiceici, nonché tipici "spatter" nerastri vetrosi, anche di dimensione metrica, spesso porfirici e vescicolati. Al di sopra del livello a "spatter" è presente una breccia a clasti vulcanici di 2-3 m di spessore; nella parte superiore la matrice vulcanica appare nuovamente non-saldata, con frammenti litici e pomiceici e litofisi tondeggianti giallastre. Il livello sommitale (circa 2 m) è marcato da un forte aumento del grado di saldatura, dalla struttura eutassitica con abbondante vetro e dalle "fiamme" ossidiane grigie e beige piuttosto appiattite. Lo spessore delle Rioliti di Monte Crobu varia da un minimo di circa 25 m fino a un massimo di circa 100 m e si ritiene che si siano formata a distanza relativamente modesta dai centri eruttivi.



Figura 5.10 - Rioliti di Monte Crobu affioranti in destra idrografica del Riu di Ghilotta alle coordinate 450112.58 m E- 4340929.82 m N. La facies è saldata, ma con un certo grado di alterazione superficiale

Le Rioliti di Nuraxi rappresentano un'unità molto estesa arealmente e quindi di notevole importanza e proprio nelle aree interessate dal tracciato dei cavidotti ha una delle sue

massime espressioni; si tratta inoltre di litotipi molto ben studiati nella letteratura scientifica. Si tratta di un'unità caratterizzata da plateaux ignimbrici con giacitura sub-orizzontale e lieve inclinazione a meridione, indicativi di un'eruzione di tipo esplosivo di notevoli dimensioni. Geometricamente poggiano sulle Rioliti di Monte Crobu e su di essa poggiano le "Comenditi" (rioliti peralcaline). L'unità è costituita alla base da depositi di caduta (cristalli feldspatici liberi, lapilli litici e pomicei) di spessore molto contenuto (10-40 cm) e discontinuo, cui segue un livello vitrofirico di colore scuro (Unità Ignimbrica Inferiore), molto sottile, mediamente di circa 1 m di spessore, con accenno di fessurazione colonnare e cavità da cattura di gas. L'Unità Ignimbrica Superiore è caratterizzata nella parte basale da vescicolature, "fiamme" e impronte da flusso che indicano un centro eruttivo a nord-ovest dell'area; l'aspetto generale è massiccio, ma con frequente foliazione magmatica data da strutture reomorfe sin- e post-deposizionali, che simulano morfologie di flusso lavico. La vescicolazione è spesso molto marcata, mentre la struttura è sostanzialmente equigranulare, eutassitica, fra frammenti pomicei "a fiamme" grigi, con cristalli liberi di plagioclasio e feldsoati alcalini (sanidino soprattutto). Il centro eruttivo aveva caratteri prevalentemente fissurali, con forte componente gassosa ed è stato ipotizzato circa 20-30 km a nord dell'Isola di San Pietro. Nella zona a morfologia piana lo spessore delle Rioliti di Nuraxi è costantemente intorno a circa 20 m di spessore, ma l'effetto di "tappetamento" della topografia ha causato ispessimento anomali molto cospicui, anche fino a 160 m in una perforazione effettuata per ragioni minerarie (foro 19/82 Carbosulcis, in Agus et al., 1994).

L'età dei depositi piroclastici è langhiana, e le determinazioni radiometriche risultano comprese nell'intervallo 15-16 MA. Tale unità è presente in tutto il settore più occidentale.



Figura 5.11 - Rioliti di Nuraxi, facies non saldata (Ignimbriti di bassa temperatura). Coordinate 449343.10 m E- 4342436.11 m N lungo la strada provinciale

In qualche raro caso le strade di accesso e le opere di connessione sono poste in vicinanza di terreni di riporto costituiti dai prodotti delle discariche minerarie, ma in ogni caso non saranno interessati dalle lavorazioni di progetto

5.3. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Non essendo disponibili in tale fase progettuale indagini geognostiche, è possibile fornire per i terreni in oggetto solamente delle valutazioni di larga massima delle caratteristiche geotecniche. In linea generale, per quanto riguarda l'area di impianto, sono presenti due grandi categorie di terreno differenti, corrispondenti alla Formazione del Cixerri e al subsistema di Portoscuso.

Talora si possono avere accumuli localizzati anche significativi di coltrei eluvio-colluviali, in particolare nelle aree depresse o a bassa pendenza.

FORMAZIONE DEL CIXERRI (WTG P03-P04-P05-P06-P07). Argille siltose di colore rossastro, arenarie quarzoso-feldspatiche in bancate con frequenti tracce di bioturbazione, conglomerati eterometrici e poligenici debolmente cementati.

Fondazioni superficiali altamente probabili; in netto subordine fondazioni profonde.

Da valutare le condizioni di pendenza per l'effettiva fattibilità di fondazioni superficiali in particolare per la P03, P04 e P05.

Descrizione	ϕ (°)	C (kPa)	c_u (kPa)	γ (daN/cm ³)	γ_{sat} (daN/cm ³)	E_{edo} (daN/cm ²)	E_{EL} (daN/cm ²)	ν	Dr %
Argille limose	24-26	35	100	1860	1900	1190	3000	0,26	60

Descrizione	ϕ (°)	C (kPa)	c_u (kPa)	γ (daN/cm ³)	γ_{sat} (daN/cm ³)	E_{edo} (daN/cm ²)	E_{EL} (daN/cm ²)	ν	Dr %
Conglomerati-ghiaie	32-38	0	0	1960	2060	32000	20000	0,35	70

Litofacies nel Subsistema di Portoscuso (WTG P01-P02). Sabbie e arenarie eoliche con subordinati detriti e depositi alluvionali.

Fondazioni superficiali probabili; nettamente in subordine fondazioni profonde.

Descrizione	ϕ (°)	C (kPa)	c_u (kPa)	γ (daN/cm ³)	γ_{sat} (daN/cm ³)	E_{edo} (daN/cm ²)	E_{EL} (daN/cm ²)	ν	Dr %
Arenarie-sabbie	30-36	0	0	1960	2060	6667	18000	0,35	70

Diversi tratti di cavidotto attraversano i complessi vulcanici di natura ignimbratica, che molto spesso si presentano ben cementati e molto duri; non è da escludere che in alcune aree siano da utilizzare attrezzature specifiche per la rottura di rocce dure. Tali litotipi hanno un comportamento geotecnico estremamente variabile, che è una funzione diretta del grado di saldatura delle vulcaniti; qualora dovessero essere realizzate opere di fondazioni su tali terreni sono molto probabili le fondazioni superficiali.

In linea generale, come mera indicazione di massima, si riportano le caratteristiche medie per litotipi vulcanoclastici ignimbratici saldati e non-saldati. Le morfologie riscontrate in fase di sopralluogo lasciano intendere che l'alternanza fra litotipi saldati e litotipi non-saldati potrebbe essere irregolare e a breve raggio.

Descrizione	ϕ (°)	C (kPa)	c_u (kPa)	γ (daN/cm ³)	γ_{sat} (daN/cm ³)	E_{edo} (daN/cm ²)	E_{EL} (daN/cm ²)	ν	Dr %
Ignimbriti non saldate	32-34	0	0	1960	2500	7500	20000	0,35	80

Descrizione	ϕ (°)	C (kPa)	c_u (kPa)	γ (daN/cm ³)	γ_{sat} (daN/cm ³)	E_{edo} (daN/cm ²)	E_{EL} (daN/cm ²)	ν	Dr %
Ignimbriti saldate	40-48	200	400	2700	2800	35000	100000	0,30	-

5.4.

COMPORAMENTO SISMICO DEL SOTTOSUOLO

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella tabella seguente, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio "Vs". I valori di Vs sono ottenuti mediante specifiche prove oppure, con giustificata motivazione e limitatamente all'approccio semplificato, sono valutati tramite relazioni empiriche di comprovata affidabilità con i risultati di altre prove in sito, quali ad esempio le prove penetrometriche dinamiche per i terreni a grana grossa e le prove penetrometriche statiche. La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio V_{seq} (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 dello strato i-esimo,
- $V_{s,i}$ = 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/sec.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato 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.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro $V_{s,30}$, ottenuto ponendo H=30 m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Le categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato sono definite di seguito:

- A]** ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m;
- B]** rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fine 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;
- C]** depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fine mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m,

- caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s;
- D]** depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fine scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s;
- E]** Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Come riportato nell'elaborato di progetto "Relazione geologica sismica": la caratterizzazione di tale importante parametro è demandata alla successiva fase progettuale. Situazioni geologiche similari conducono solitamente a categoria di tipo B per l'area di impianto, ma non è da escludere che possano verificarsi condizioni riferibili alla categoria C (in particolare per le WTG P01 e P02), per cui in prima approssimazione si consiglia di adottare tale categoria per le valutazioni preliminari. Larghi tratti dei percorsi dei cavidotti sono invece caratterizzati probabilmente da categoria A, poiché in tali zone sono presenti spesso orizzonti litoidi del complesso ignimbrico.

Tali asserzioni saranno verificate mediante opportune tecniche geofisiche nelle successive fasi progettuali.

6. INDIVIDUAZIONE DEI POTENZIALI RICETTORI

Al fine di procedere all'individuazione di potenziali ricettori nelle aree più direttamente interessate dalle installazioni eoliche, ricomprese entro una distanza massima di 1.000 m dalle postazioni di macchina, si è proceduto ad una individuazione complessiva dei fabbricati con l'ausilio della cartografia ufficiale di riferimento. Successivamente si è proceduto a verificarne l'effettiva esistenza e consistenza dall'esame di foto aeree e satellitari nonché attraverso specifici sopralluoghi sul campo. In tal modo sono state acquisite le necessarie informazioni preliminari sulle caratteristiche tipologico-costruttive e le condizioni di utilizzo degli edifici. Per completezza di analisi sono stati inclusi nel censimento anche quei fabbricati che, in modo manifesto, non presentavano caratteristiche di potenziali ambienti abitativi (p.e. cabine elettriche, ruderi o depositi). A valle di tali riscontri, è stata inoltre accertata la categoria catastale di appartenenza degli edifici, laddove disponibile.

Tra gli edifici individuati risultano presenti fabbricati appartenenti alle seguenti categorie catastali:

- A/2: Abitazioni di tipo civile;
- A/3: Abitazioni di tipo economico;
- A/4: Abitazioni di tipo popolare;
- A/5: Abitazioni di tipo ultrapopolare;
- A/6: Abitazioni di tipo rurale;
- A/7: Abitazioni in villini;
- B/7: Cappelle ed oratori non destinati all'esercizio pubblico del culto;
- C/2: Magazzini e locali di deposito;
- D/1: Opifici;
- D/7: Fabbricati costruiti o adattati per le speciali esigenze di un'attività industriale e non suscettibili di destinazione diversa senza radicali trasformazioni;
- F/2: Unità collabenti;
- F/6: Fabbricato in attesa di dichiarazione (circolare 1/2009).

Tra questi, in coerenza con i criteri adottati per le finalità di impatto acustico (cfr. Elaborato GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.093.00), sono stati selezionati n. 91 ricettori assimilabili ad ambienti abitativi ed oggetto di frequentazione nel solo periodo diurno e/o nei periodi di riferimento diurno e notturno.

Sulla base delle suddette assunzioni, in Tabella 6.1, per ogni aerogeneratore, si individuano i ricettori più prossimi alle WTG con indicazione delle coordinate dell'edificio e della distanza in metri.

Tabella 6.1 – Ricettori più prossimi agli aerogeneratori in progetto

Aerogeneratore	Ricettore più prossimo ID	Ricettore più prossimo UTM X	Ricettore più prossimo UTM Y	Ricettore più prossimo Distanza [m]
WTG1	460	456624	4340587	554
WTG2	294	455791	4339714	334
WTG3	136	455257	4343361	358
WTG4	56	454190	4342864	472
WTG5	188	455112	4341168	447
WTG6	184	455311	4341087	355
WTG7	249	455248	4340214	376

L'esame della Tabella 6.1 mette in evidenza come i ricettori considerati siano ubicati a distanze superiori a 300 metri dagli aerogeneratori in progetto, in piena coerenza con le misure di mitigazione indicate all'Allegato 4, paragrafo 5.3 del D.M. 10 settembre 2010 ("Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili"), ove si



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.132.00

PAGE

37 di/of 53

suggerisce una "minima distanza di ciascun aerogeneratore da unità abitative munite di abitabilità, regolarmente censite e stabilmente abitate, non inferiore ai 200 m".

7. DESCRIZIONE SOMMARIA DELLE PRINCIPALI LAVORAZIONI DI CANTIERE

Nel seguito saranno individuate le principali fasi operative del processo costruttivo del parco eolico in progetto.

Per maggiori dettagli sulla natura delle opere e sulle modalità realizzative si rimanda all'esame degli elaborati testuali e grafici componenti il progetto definitivo dell'impianto.

7.1. OPERE CIVILI DEL PARCO EOLICO

L'appalto delle opere civili del parco eolico Carbonia comprenderà:

- le attività di realizzazione e finitura delle strade, delle piazzole e degli scavi dell'impianto eolico;
- le opere in cemento armato funzionali alla realizzazione delle fondazioni degli aerogeneratori;
- la realizzazione delle linee MT di collegamento tra gli aerogeneratori e la stazione di utenza MT/AT;
- la realizzazione della stazione elettrica di utenza MT/AT.
- la realizzazione di interventi impiantistici collaterali, funzionali all'entrata in esercizio degli aerogeneratori.

I lavori di tipo civile possono ricondursi alle seguenti attività principali:

1. allestimento del cantiere;
2. locale adattamento della viabilità di accesso al parco eolico funzionale a renderla adeguata al transito dei mezzi di cantiere ed alle operazioni di trasporto della componentistica degli aerogeneratori presso il sito di intervento;
3. adeguamento della viabilità interna del parco eolico al fine di assicurare l'accessibilità di ciascuna postazione eolica ai mezzi d'opera ed ai veicoli di trasporto della componentistica degli aerogeneratori nonché consentire le ordinarie attività di gestione della centrale;
4. approntamento degli interventi funzionali alla regimazione delle acque superficiali;
5. realizzazione degli scavi funzionali all'allestimento delle piazzole nonché alla realizzazione delle fondazioni degli aerogeneratori;
6. realizzazione delle fondazioni degli aerogeneratori e dei collegamenti all'impianto di terra;
7. approntamento delle piazzole funzionali al montaggio degli aerogeneratori;
8. scavo e posa dei cavidotti a 33kV interrati di interconnessione aerogeneratori e collegamento con la stazione di utenza;
9. realizzazione di opere in c.a. (pavimentazioni, basamenti), recinzioni e edifici per consentire l'approntamento della stazione elettrica utente;
10. completamento delle principali opere civili delle piazzole degli aerogeneratori, realizzazione delle opere di ripristino morfologico e ambientale (opere a verde e di rinaturalizzazione e sistemazione finale delle piazzole e della viabilità) dell'area interessata dai lavori;
11. smobilizzo del cantiere.

7.2. FORNITURA E MONTAGGIO DEGLI AEROGENERATORI

I lavori per la fornitura e montaggio degli aerogeneratori possono articolarsi nelle seguenti attività:

1. Trasporto e posizionamento a piè d'opera dei componenti.
2. Preassemblaggio a terra dei singoli tronchi della torre.
3. Montaggio dei tronchi della torre.
4. Posizionamento della navicella.
5. Posizionamento delle pale.
6. Allacciamento alla SSE utente e connessione alla RTN, prove funzionali ed avviamento.

7.3. OPERE PER LA REALIZZAZIONE DELLE LINEE ELETTRICHE

La realizzazione delle linee elettriche interrato si articolerà schematicamente nelle seguenti fasi di lavoro:

1. allestimento del cantiere e/o dell'area di deposito;
2. scavo e posa dei cavidotti interrati nei tratti previsti;
3. realizzazione delle giunzioni e delle prese di terra e successivo riempimento e costipazione del terreno negli scavi;
4. attività propedeutiche alla messa in servizio delle linee distribuzione di energia;
5. opere di ripristino morfologico e ambientale (ripristino al primitivo stato dei terreni) dell'area interessata dai lavori;
6. smobilizzo del cantiere;
7. collaudo e messa in servizio.

7.4. OPERE CIVILI PER L'ALLESTIMENTO STAZIONE DI UTENZA 33/220 KV

I lavori connessi all'approntamento della stazione di trasformazione 33/220kV sono i seguenti:

1. allestimento del cantiere;
2. realizzazione delle fondazioni e dei basamenti in c.a.;
3. adeguamento recinzione perimetrale in pannelli prefabbricati e grigliato metallico;
4. realizzazione delle vie cavo per cavi 33kV e BT compresi i pozzetti in c.a.
5. realizzazione della rete di terra;
6. smobilizzo del cantiere.

7.5. MONTAGGI ELETTROMECCANICI DELLA STAZIONE DI UTENZA 33/220 KV

I montaggi elettromeccanici della SSE di trasformazione 33/220 kV consisteranno nelle seguenti attività:

1. montaggi elettromeccanici:
 - montaggio passante cavo- aereo AT
 - montaggio interruttori AT;
 - montaggio sezionatori AT;
 - montaggio trasformatore 33/220kV;
 - montaggio trasformatori di misura TVC e TA;
 - montaggio scaricatori di sovratensione AT;
 - montaggio carpenteria a traliccio di stazione;
 - montaggio carpenteria tubolare;
 - montaggio isolatori di sbarra stazione;
 - esecuzione collegamenti AT in corda e/o tubo di alluminio;
2. montaggi dei servizi ausiliari:
 - installazione quadri BT;
 - posa cavi BT;
 - esecuzione collegamenti BT;
 - realizzazione impianto di illuminazione esterna;
 - realizzazione di impianti tecnologici di edificio;
3. montaggi del sistema di protezione, comando e controllo (SPCC):
 - installazione armadi e quadri BT;
 - posa cavi BT e fibra ottica;
 - esecuzione collegamenti BT e fibra ottica;
 - installazione apparati centralizzati di stazione;
 - installazione apparati di telecontrollo;
4. collaudo e messa in servizio della stazione e di tutto l'impianto eolico.

7.6.

GESTIONE DELLE TERRE E DELLE ROCCE DA SCAVO

I lavori per la gestione delle terre e delle rocce da scavo si inseriscono all'interno dei lavori di tipo civile e comporteranno le seguenti attività:

1. Stoccaggio dei materiali di scavo in apposite aree;
2. Riutilizzo in sito per la formazione dei rilevati di strade e/o della piazzola ai sensi dell'art. 185 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.;
3. carico dei mezzi necessari;
4. avvio a smaltimento/recupero dell'eventuale materiale di scavo non recuperabile in cantiere (non previsto per il presente progetto).

Per la descrizione delle attività previste nell'ambito della gestione dei materiali di scavo si rimanda al *Piano preliminare di utilizzo in sito delle terre e rocce da scavo escluse dalla disciplina dei rifiuti* facente parte del progetto definitivo (Elaborato GRE.EEC.R.73.IT.W.15012.00.069.01).

8. ANALISI PREVISIONALE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONE IN FASE DI CANTIERE

8.1. IL METODO PREVISIONALE

Il metodo previsionale adottato ha fatto ricorso a dati di letteratura sulle caratteristiche emissive delle sorgenti ed a simulazioni numeriche. A partire dagli spettri di emissione delle tipologie di macchine operatrici che prevedibilmente saranno impiegate durante il processo costruttivo del Parco eolico *Carbonia* sono state condotte delle simulazioni numeriche volte a definire l'effetto combinato di tali macchinari sotto il profilo dell'impatto da vibrazioni. La stima dei livelli vibrazionali potenzialmente riscontrabili nei ricettori ha dunque previsto:

- l'assunzione di uno spettro di emissione rappresentativo dell'accelerazione indotta nel terreno ad una data distanza di riferimento;
- l'adozione di una funzione di propagazione della vibrazione che esprima, per ogni frequenza considerata, la relazione tra l'ampiezza di vibrazione al ricettore e quella relativa alla sorgente secondo alcune ipotesi semplificative (sorgenti omnidirezionali, mezzo di propagazione omogeneo e isotropo, propagazione superficiale attraverso onde di Rayleigh);
- la combinazione dei livelli di vibrazione in funzione dei livelli associati alle bande di un terzo di ottava negli scenari di progetto ipotizzati;
- relativamente allo scenario modellizzato, l'applicazione di una curva di attenuazione definita per postura non nota;
- un confronto con i livelli di riferimento in condizioni di campo libero.

Nel dettaglio, le stime sono state condotte in accordo con la seguente procedura di calcolo:

- la valutazione dei livelli vibrazionali in corrispondenza delle sorgenti emissive ha fatto ricorso agli spettri di emissione caratteristici dei mezzi di cantiere, utilizzando dati di letteratura e/o di studi previsionali analoghi. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza nota dalla sorgente di vibrazioni e si riferiscono alla sola componente verticale;
- note le caratteristiche emissive delle sorgenti si è proceduto al calcolo del livello di accelerazione non ponderato a distanze crescenti dalla sorgente mediante una nota legge di propagazione. Nel caso di sorgenti superficiali, l'espressione che esprime il fenomeno di propagazione della vibrazione ad una data frequenza f è data dalla seguente equazione 1:

$$\text{equazione 1} \quad a(d, f) = a(d_0, f) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n \cdot e^{-\left\{2 \frac{\pi \cdot f \cdot \eta}{c} (d - d_0)\right\}}$$

Dove:

c = velocità di propagazione delle onde di superficie espressa in m/s;

f = frequenza della vibrazione in Hz;

η = coefficiente adimensionale di perdita del terreno, dovuto a locali fenomeni di isteresi nella microstruttura del terreno, assunto pari a 0.1, valore tipico per sabbie, ghiaie e limi (litologie prevalenti nei livelli superficiali - cfr. par. 5.2), come desunto dai valori riportati in Tabella 8.1.

n = esponente adimensionale di decadimento geometrico, assunto pari a 0.5 per sorgenti superficiali di tipo puntiforme, alle quali possono prevalentemente assimilarsi i contributi associati all'esercizio del cantiere.

- combinazione dei livelli complessivi di accelerazione non ponderati a distanze crescenti dalla sorgente per ciascuna frequenza riferiti a ciascuno dei macchinari previsti. Come legge di combinazione degli spettri è stata adottata la SRSS (*Square Root of the Sum of the Squares*) consistente nel calcolo della radice quadrata della somma dei quadrati delle ordinate spettrali relative alle singole macchine operatrici. Per ciascuna frequenza si è quindi ottenuto un valore complessivo non ponderato di tutte le macchine attive ($A_{TOT, f}$) dato da:

$$A_{TOT, f} = \sqrt{A_1(f, d)^2 + A_2(f, d)^2 + \dots + A_n(f, d)^2}$$

- È stata successivamente applicata la curva di ponderazione definita per postura non nota (o asse generico) indicata dalla UNI 9614 riportata in *Figura 8.1*. Si noti come tale curva non introduca alcuna variazione dei livelli di accelerazione misurati da 1 a 2 Hz, per poi ridurre progressivamente i valori al crescere della frequenza. A partire dalla frequenza di 8 Hz, la curva ha una pendenza di 6 dB/ottava.

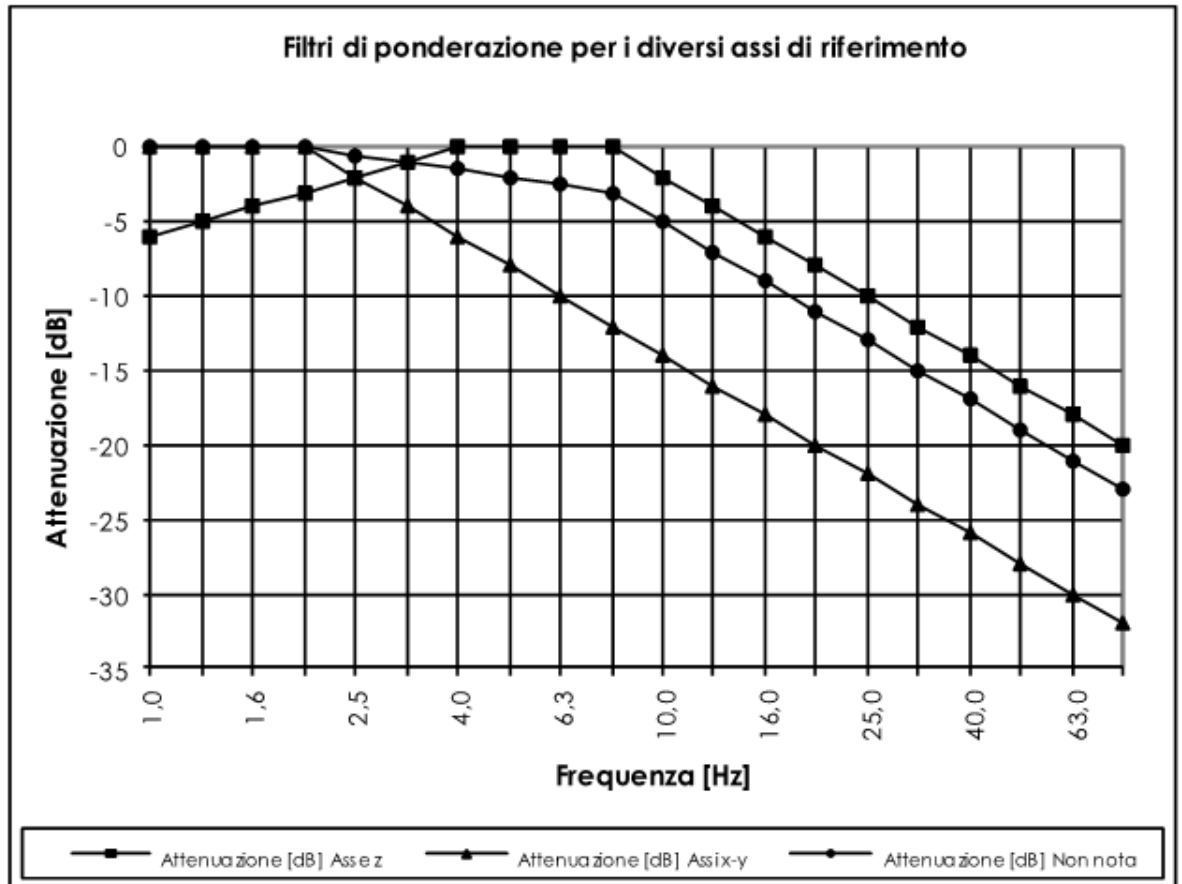


Figura 8.1 – Curve di ponderazione delle vibrazioni indicate dalla UNI 9614:2017 per i diversi assi di riferimento

Sono stati quindi ottenuti i livelli ponderati di accelerazione complessiva per singola frequenza e distanza. Il livello totale di accelerazione ponderata in funzione della distanza $L_{a,w,d}$ è stato ottenuto attraverso la combinazione, per una data distanza dalla sorgente, dei livelli di accelerazione ponderati alle varie frequenze sull'asse Z.

Tabella 8.1 - Valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo (Fonte SIA Ponte sullo stretto di Messina)

TIPO DI TERRENO	DENSITA' [t/m ³]	VELOCITA' DI PROPAGAZIONE [m/s]	FATTORE PERDITA η
Roccia compatta	2.65	3500	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	600	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	1500	0.2÷0.5
Molasse	2.25	1075	0.05
Sabbie e ghiaie di Messina	2.00	834	0.05
Scisti cristallini	2.25	3000	0.05
Depositi alluvionali	1.83	527	0.05
Calcari evaporitici	2.25	3350	0.05

8.2. CARATTERIZZAZIONE DELLE SORGENTI

Le emissioni di vibrazione in fase di costruzione sono ampiamente variabili in relazione al tipo di attrezzatura/macchina operatrice impiegata, al contesto di utilizzazione e all'operatore.

Nel presente studio, in sintonia con quanto contemplato dalla UNI 9614 (Appendice C - punto C.4), sono stati utilizzati sia dati di fonte bibliografica sia dati direttamente acquisiti da studi analoghi predisposti nell'ambito della VIA di importanti opere infrastrutturali realizzate a livello nazionale.

In relazione ai dati bibliografici, si è fatto riferimento a quanto contenuto nel volume L.H. Watkins - "Environmental impact of roads and traffic" - Appl. Science Publ. (pp. 231-241) contenete una serie di dati sperimentali sull'emissione di vibrazioni da parte di svariati tipi di macchine da cantiere, utilizzate nelle costruzioni stradali e ferroviarie. Da tale raccolta di dati sono stati estratti gli spettri di emissione delle macchine operatrici riportate nella *Tabella 8.2*.

Tabella 8.2 – Spettri dell'accelerazione per alcuni mezzi e macchinari di cantiere in mm/s² (distanza di misura 10 metri)

	D [m]	Frequenza (Hz)																			
		1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Camion da cantiere	10	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0	0,12	0,15	0,29	0,5	1,67	1,85	2,5	6	5,5	5,2	4
Camion ribaltabile	10	0	0	0	0	0	0	0	0,11	0,23	0,41	0,5	0,6	1,1	2,99	9	3,9	3,3	4	10	8
Rullo compattatore vibrante	10	0	0	0	0,3	0,3	0,3	0,3	0,8	0,7	0,8	1,1	1	2	1,55	6	29	3	1	1,6	2
Rullo compattatore (non vibrante)	10	0	0	0	1,6	1,7	2	0,85	5,8	11	18	20	40	20	4	12	7	3,7	3,7	5	4
Pala gommata carica	10	0	0	0	0,41	0,41	0,41	0,48	0,52	0,5	0,76	1,1	1,25	2	3	17	17	7,8	15	14	7,8
Pala gommata scarica	20	0	0	0	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,4	1,2	0,9	1,75	1,26	2	5,2	2,6	1,6	1,6	1,5	2
Ruspa cingolata piccola	10	0	0	0	1,1	1,1	1,1	1,1	1,4	1,6	3,2	4,2	8	6	18	24	16	10	9	6	5,5

8.3. SCENARI PREVISIONALI DI CALCOLO DEI LIVELLI VIBRAZIONALI

La verifica circa il rispetto dei valori guida indicati dalla UNI 9614:2017, espressi in livello di accelerazione complessiva ponderata in frequenza, è stata condotta avuto riguardo delle principali attività di costruzione previste nell'ambito della realizzazione dell'impianto eolico in progetto, comportanti l'impiego di mezzi meccanici di movimento terra e di trasporto materiali.

Sotto questo profilo, si è fatto riferimento alle seguenti attività con annesso funzionamento delle macchine operatrici impiegate per le lavorazioni:

Attività di cantiere	Principali macchine operatrici impiegate sorgenti di vibrazioni
Scavi per realizzazione fondazioni aerogeneratori	Escavatore idraulico Camion da cantiere Pala gommata
Realizzazione viabilità di servizio e allestimento sottostazione elettrica	Escavatore idraulico Pala gommata Camion da cantiere Rullo compattatore non vibrante
Scavi e rinterri per posa cavidotti interrati	Escavatore idraulico Camion da cantiere

Le stime dei livelli vibrazionali sono state improntate alla cautela, avendo considerato la condizione più sfavorevole, rappresentata dall'utilizzo simultaneo di tutti i mezzi d'opera prevedibilmente impiegati nelle lavorazioni. Questi ultimi, infatti, non saranno ordinariamente impiegati contemporaneamente, potendosi ritenere estremamente limitati nel tempo i periodi di sovrapposizione. L'effetto delle vibrazioni indotte dalle lavorazioni, inoltre, non sarà continuato durante gli orari di esercizio del cantiere (indicativamente dalle 8:00 alle 13:00 e dalle 14:00 alle 17:00), potendosi ipotizzare quotidianamente alcune fermate temporanee in ragione delle esigenze organizzative del cantiere.

8.4. STIMA DEI LIVELLI VIBRAZIONALI ED ANALISI DEI RISULTATI

Le tabelle in Appendice riportano gli esiti del calcolo effettuato secondo le modalità descritte al paragrafo 8.1.

Ai fini delle verifiche si è assunta la propagazione delle vibrazioni entro un orizzonte superficiale omogeneo di terreno contraddistinto dalla presenza di arenarie, riscontrabili nella Formazione del Cixerri (più diffusamente presenti nel settore del parco eolico) ed assimilabili, per comportamento elastico, anche alle coperture superficiali (sovrastanti il substrato lapideo) rinvenibili lungo il tracciato del cavidotto a 33kV, aventi una velocità stimata delle onde R pari a:

$$V_R = 1075 \text{ m/s}$$

come desunta dalla Tabella 8.1 in relazione alla categoria delle molasse (arenarie tenere).

I prospetti di calcolo si riferiscono all'assunzione delle distanze oltre le quali il livello di vibrazione atteso è risultato inferiore alle soglie indicate dalla UNI 9614 per le abitazioni nel periodo di riferimento diurno (77 dB). Tali distanze sono riepilogate in Tabella 8.3.

Tabella 8.3 – Distanze di conformità dei livelli vibrazionali originati dalle lavorazioni di cantiere rispetto al criterio di disturbo alle persone di cui alla UNI 9614:2017

Attività	Distanza di conformità per abitazioni [m]
	Contesto geologico: arenarie
Realizzazione fondazioni	10
Realizzazione strade e approntamento stazione elettrica	100
Realizzazione cavidotti	10

Dall'esame dei risultati riportati in *Tabella 8.3* si evince come le lavorazioni potenzialmente più critiche siano riferibili alla realizzazione delle strade di servizio, potendosi assumere l'impiego del rullo vibrante, sorgente contraddistinta da significativa energia vibrazionale. Per tali lavorazioni, le ampiezze delle aree interessate da un impatto vibrometrico potenzialmente disturbante per gli occupanti edifici residenziali si estendono per circa 100 metri. Peraltro, poiché nell'area di intervento i più prossimi ricettori abitativi si trovano generalmente a distanze superiori ai 100 metri rispetto alla nuova viabilità di progetto, considerata inoltre la transitorietà del potenziale disturbo, si può ragionevolmente ritenere tale impatto scarsamente apprezzabile.

La realizzazione delle fondazioni e dei cavidotti a 33kV determinerà prevedibilmente un impatto vibrazionale meno significativo. Le distanze di conformità delle vibrazioni per tale lavorazione, infatti, possono prudenzialmente assumersi pari a 10 metri, ossia in sostanziale corrispondenza delle aree di cantiere.

In relazione al potenziale danno strutturale a carico degli edifici, si sottolinea, come già evidenziato in premessa, che le soglie indicate dalla UNI 9916:2014, mutate dalla DIN 4150, sono significativamente superiori a quelle di riferimento per il disturbo alle persone. Ne consegue, pertanto, che la positiva verifica del rispetto dei valori guida stabiliti dalla UNI 9614:2117 consente ragionevolmente di escludere il verificarsi di effetti dannosi a carico delle strutture dei più prossimi fabbricati.

8.5. ANALISI DEI LIVELLI VIBRAZIONALI IN FASE DI ESERCIZIO

Il rumore e le vibrazioni 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 bilanciati 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 deboli vibrazioni prodotte dalle turbine eoliche risulta sostanzialmente poco distinguibile rispetto al rumore di fondo.

Concentrando l'attenzione sui fenomeni vibratori è possibile analizzare come le vibrazioni si propagano attraverso la struttura metallica della torre, sino alle fondazioni, quindi nel terreno. Come in ogni altro fenomeno vibratorio, anche in quello relativo agli aerogeneratori, le onde perdono energia durante la propagazione nel terreno e la loro ampiezza diminuisce con l'aumentare della distanza dalla sorgente.

Al fine di valutare in termini quantitativi la distanza oltre la quale l'entità delle vibrazioni generate dal funzionamento a regime del parco eolico possa ritenersi tale da non arrecare disturbo alle attività circostanti, alla popolazione umana ed ai recettori in generale, è applicabile il modello di calcolo esposto nel paragrafo 8.1 e esplicitato dalla equazione 1 confrontando il risultato con le soglie individuate dalla citata norma UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo". I dati di input sono mutuati da impianti simili congruenti con il modello di aerogeneratore in progetto.

Ai fini della ricostruzione del fenomeno di propagazione delle vibrazioni, in funzione della tipologia di substrato litologico del sito, caratterizzato da coperture sabbioso-ghiaiose, si assumono i valori indicati in Tabella 8.1; i livelli vibrazionali di riferimento per la sorgente in esercizio sono stati ricavati da valori di accelerazione misurati presso strutture analoghe.

In particolare, i valori r.m.s di accelerazione (non ponderati in frequenza) in corrispondenza della torre di sostegno lungo i tre assi (x, y, z) misurati presso aerogeneratori di grande taglia in esercizio ed assunti ai fini delle presenti stime sono i seguenti:

$$a_x(d_0, f) = 0.0224 \left[\frac{m}{s^2} \right]; a_y(d_0, f) = 0.01333 \left[\frac{m}{s^2} \right]; a_z(d_0, f) = 0.0272 \left[\frac{m}{s^2} \right];$$

Nel dettaglio, al fine di eseguire il calcolo del potenziale possibile disturbo presso i ricettori, sono stati assunti i parametri di input come esplicitati nella tabella seguente riferiti alla situazione più gravosa (Asse z).

Tabella 8.4 - Valori di input per il calcolo quantitativo delle vibrazioni indotte da un aerogeneratore in esercizio

	Asse z
Vibrazione alla sorgente [dB]	88,7
Accelerazione alla sorgente [mm/s ²]	27,22
Distanza alla sorgente [m]	1
Coeff. Attenuazione geometrica	0,5
Tipologia substrato	Sabbie
Fattore di perdita del substrato	0,05
Velocità di propagazione [m/s]	600
Densità [t/m ³]	1,6
Velocità di rotazione di riferimento [rpm]	12
Frequenza onda di vibrazione [hz]	0,6
Pulsazione d'onda [rad/s]	3,768

Di seguito i risultati ottenuti in termini di distanza minima di rispetto dei valori soglia della norma UNI 9614. Poiché il fenomeno riguarda l'esercizio di macchine la cui vita utile è ultraventennale con funzionamento anche notturno, si riporta anche la distanza minima del valore raccomandato per i ricettori sensibili (ospedali), che può essere assunto come riferimento ai fini della preservazione della quiete in aree particolarmente delicate.

Tabella 8.5 - Distanze in m oltre le quali si verifica il rispetto dei limiti UNI 9614

	Valore rif. 77 dB
Distanza di rispetto UNI 9614 (abitazioni giorno) [m]	15
	Valore rif. 74 dB
Distanza di rispetto UNI 9614 (abitazioni notte) [m]	30
	Valore rif. 66 dB
Distanza di rispetto UNI 9614 (Ospedali) [m]	200

Poiché gli aerogeneratori di progetto sono distanti tra loro non meno di 500 m ed il primo ricettore risulta dislocato a distanze sensibilmente superiori rispetto a quelle indicate nella Tabella 8.5, si può senz'altro affermare che l'impatto causato dalle vibrazioni generate dal parco eolico in oggetto sarà trascurabile e che nessun ricettore individuato sarà esposto a un fenomeno vibrazionale di intensità tale da ingenerare disturbo.

Nella **Figura 8.2** si riporta, a titolo esemplificativo, l'andamento del decadimento delle vibrazioni calcolate per l'asse z applicando l'equazione 1) al par. 8.1.

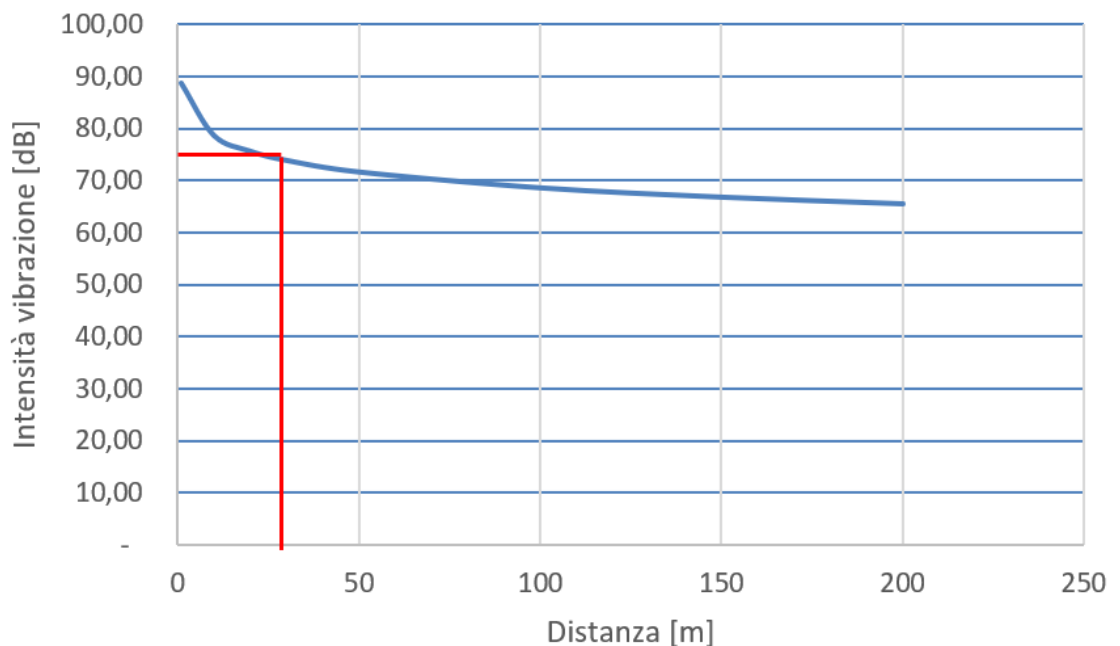


Figura 8.2 – Decadimento dell'intensità vibrazionale lungo l'asse z rispetto alla distanza dalla sorgente con evidenza della soglia di 74 dB suggerita dalla UNI9614 per le "abitazioni notte", rispettata ad una distanza di circa 30 m

Come evidenziato in precedenza i valori soglia raccomandati per le abitazioni di notte sono rispettati ad una distanza di circa 30 m. Ad una distanza di circa 200 m dagli aerogeneratori risultano rispettati anche i valori raccomandati per le aree sensibili.

In relazione al potenziale danno strutturale a carico degli edifici, nel rimandare alle considerazioni espresse in precedenza a proposito della fase di cantiere, si ribadisce che la positiva verifica del rispetto dei valori guida stabiliti dalla UNI 9614:2117 consente ragionevolmente di escludere il verificarsi di effetti dannosi a carico delle strutture dei più prossimi fabbricati.



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.132.00

PAGE

47 di/of 53

9.

ANALISI DEI LIVELLI VIBRAZIONALI IN FASE DI DISMISSIONE

Con riferimento alla fase di dismissione dell'impianto eolico, prevista al termine del ciclo di vita della centrale, valutato che le caratteristiche delle lavorazioni previste saranno alquanto simili a quelle della fase di realizzazione, con particolare riferimento alle modalità di esecuzione degli scavi con mezzi meccanici, si ritengono ragionevolmente trasponibili le conclusioni formulate circa il rispetto con ampio margine dei valori guida in riferimento al disturbo delle persone e al potenziale danno strutturale agli edifici.

10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente documento, facente parte integrante dello Studio di impatto ambientale del progetto di parco eolico denominato "Carbonia", ha analizzato le dinamiche di propagazione di vibrazioni in prossimità delle aree di progetto pervenendo ad una stima dell'entità delle stesse e, in definitiva, ad una verifica dell'accettabilità degli effetti attesi in corrispondenza dei più prossimi ricettori. Quanto precede avuto riguardo delle soglie di riferimento indicate nelle seguenti norme tecniche:

- 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 sugli edifici".

In relazione al potenziale danno strutturale a carico degli edifici, va rilevato come le soglie indicate dalla UNI 9916:2014, mutuata dalla DIN 4150, siano significativamente superiori a quelle di riferimento per il disturbo alle persone. Ne consegue, pertanto, che una positiva verifica del rispetto dei valori guida stabiliti dalla UNI 9614:2017 consente ragionevolmente di escludere il manifestarsi di effetti dannosi a carico degli edifici.

L'analisi circa il rispetto dei valori guida indicati dalla UNI 9614:2017, espressi in livello di accelerazione complessiva ponderata in frequenza, è stata condotta avuto riguardo delle principali attività di costruzione previste nell'ambito della realizzazione dell'impianto eolico in progetto, comportanti l'impiego di mezzi meccanici di movimento terra e di trasporto materiali.

Le emissioni di vibrazione in fase di costruzione sono ampiamente variabili in relazione al tipo di attrezzatura/macchina operatrice impiegata, al contesto di utilizzazione e all'operatore. Nel presente studio, in sintonia con quanto contemplato dalla UNI 9614 (Appendice C - punto C.4), sono stati utilizzati sia dati di fonte bibliografica sia dati direttamente acquisiti da studi analoghi predisposti nell'ambito della VIA di importanti opere infrastrutturali realizzate a livello nazionale.

Le verifiche numeriche sono state condotte ricorrendo a note espressioni che interpretano il fenomeno della propagazione della vibrazione ad una data frequenza, avuto riguardo dei fenomeni di attenuazione dell'energia sismica all'aumentare della distanza dalla sorgente.

L'analisi ha mostrato come le lavorazioni potenzialmente più critiche siano riferibili alla realizzazione delle strade di servizio, potendosi assumere l'impiego del rullo vibrante, sorgente contraddistinta da significativa energia vibrazionale. Per tali lavorazioni, le ampiezze delle aree interessate da un impatto vibrometrico potenzialmente disturbante per gli occupanti edifici residenziali si estendono per circa 100 metri. Peraltro, poiché nell'area di intervento i più prossimi ricettori abitativi si trovano generalmente a distanze superiori ai 100 metri rispetto alla nuova viabilità di progetto, considerata inoltre la transitorietà del potenziale disturbo, si può ragionevolmente ritenere tale impatto scarsamente apprezzabile.

La realizzazione delle fondazioni e dei cavidotti a 33kV determinerà prevedibilmente un impatto vibrazionale meno significativo. Le distanze di conformità delle vibrazioni per tale lavorazione, infatti, possono prudenzialmente assumersi pari a 10 metri, ossia in sostanziale corrispondenza delle aree di cantiere.

Infine, le stime condotte in relazione ai potenziali effetti vibrazionali indotti dal funzionamento del parco eolico inducono a ritenere che nessun ricettore individuato sarà esposto a un fenomeno vibrazionale di intensità tale da ingenerare disturbo.

11.

BIBLIOGRAFIA

Bottio, R. Acustica e vibrazioni: riduzione del disturbo, miglioramento del comfort – in Dossier UNI, U&C n. 4 aprile 2018.

Farina A. Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali

D M Hiller, G I Crabb. Groundborne vibration caused by mechanised construction works. UK Transport Research Laboratory, 2000.

Pisani R. Origine, propagazione e modelli previsionali delle vibrazioni dei mezzi di trasporto EUROLINK S.C.p.A. Ponte sullo Stretto di Messina - Progetto Definitivo – Studio sulle vibrazioni, 2011.

ISPRA. Dispense corso di Formazione su Valutazione d’Impatto Ambientale (VIA). Roma, ottobre-novembre 2012.



Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.132.00

PAGE

50 di/of 53

12. APPENDICE: TABELLE DI CALCOLO



Green Power

Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.26.IT.W.15012.00.132.00

PAGE

51 di/of 53

Contesto geologico
Lavorazione
Sabbie e arenarie
Realizzazione fondazioni

Verifica distanza di conformità per abitazioni (giorno) secondo la UNI 9614:2017

Macchinari	Escav. Cingolato	Camion da cantiere	Pala gommata	Escav. Cingolato	Camion da cantiere	Pala gommata	Spettro combinato	Spettro combinato	Ponderazione	Livello finale ponderato
f [Hz]	a(d0,f) [mm/s ²]	a(d,f) [mm/s ²]	a(d0,f) [mm/s ²]	a(d,f) [mm/s ²]	a(d,f) [mm/s ²]	a(d,f) [mm/s ²]	[A _{non,f,d}] [mm/s ²]	[L _(a,w,f)] [dB]	[dB]	[dB]
1	0,02	0	0	2,23E-02	0,00E+00	0,00E+00	2,23E-02	27	0,00	27
1,25	0,01	0	0	1,41E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,41E-02	23	0,00	23
1,6	0,01	0	0	1,41E-02	0,00E+00	0,00E+00	1,41E-02	23	0,00	23
2	0,01	0	0,41	7,90E-03	0,00E+00	0,00E+00	4,10E-01	52	0,00	52
2,5	0,01	0	0,41	1,40E-02	0,00E+00	0,00E+00	4,10E-01	52	-0,50	52
3,15	0,02	0	0,41	1,76E-02	0,00E+00	0,00E+00	4,10E-01	52	-1,50	51
4	0,02	0	0,48	1,76E-02	0,00E+00	0,00E+00	4,80E-01	54	-2,00	52
5	0,02	0,15	0,52	1,76E-02	1,50E-01	5,20E-01	5,41E-01	55	-2,50	52
6,3	0,02	0	0,5	1,96E-02	0,00E+00	5,00E-01	5,00E-01	54	-2,00	52
8	0,02	0,12	0,76	1,96E-02	1,20E-01	7,60E-01	7,70E-01	58	-3,00	55
10	0,07	0,15	1,1	6,91E-02	1,50E-01	1,10E+00	1,11E+00	61	-5,00	56
12,5	0,14	0,29	1,25	1,37E-01	2,90E-01	1,25E+00	1,29E+00	62	-7,00	55
16	0,68	0,5	2	6,81E-01	5,00E-01	2,00E+00	2,17E+00	67	-9,00	58
20	0,85	1,67	3	8,49E-01	1,67E+00	3,00E+00	3,54E+00	71	-11,00	60
25	1,19	1,85	17	1,19E+00	1,85E+00	1,70E+01	1,71E+01	85	-13,00	72
31,5	0,83	2,5	17	8,27E-01	2,50E+00	1,70E+01	1,72E+01	85	-15,00	70
40	0,81	6	7,8	8,11E-01	6,00E+00	7,80E+00	9,87E+00	80	-17,00	63
50	1,77	5,5	15	1,77E+00	5,50E+00	1,50E+01	1,61E+01	84	-19,00	65
63	3,06	5,2	14	3,06E+00	5,20E+00	1,40E+01	1,52E+01	84	-21,00	63
80	0,52	4	7,8	5,22E-01	4,00E+00	7,80E+00	8,78E+00	79	-23,00	56
									Livello totale (LW)	75,44
									Livello totale (LW)	91

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	10	m
(d-d0)	0	m
η	0,05	adim.
c	1075	m/s
n	0,5	adim.

Espressione che esprime il fenomeno di propagazione della vibrazione alla frequenza f

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

Limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente

Luogo	A _w [m/s ²]	L _w [dB]
Ospedali	2,00E-03	66
Asili e case di riposo	3,00E-03	71
Abitazioni (notte)	5,00E-03	74
Abitazioni (giorno)	7,20E-03	77
Abitazioni (festivi)	5,40E-03	75
Suole	5,40E-03	75
Uffici	1,44E-02	83
Fabbriche	2,88E-02	89

Contesto geologico
Lavorazione

Sabbie e arenarie
Realizzazione viabilità

Verifica distanza di conformità per abitazioni (giorno) secondo la UNI 9614:2017

Machinari	Rullo compattatore	Escav. Cingolato	Camion da cantiere	Pala gommata	Rullo vibrante	Escav. Cingolato	Camion da cantiere	Pala gommata	Spettro combinato	Spettro combinato	Ponderazione	Livello finale ponderato
f [Hz]	a(d0,f) [mm/s²]	a(d0,f) [mm/s²]	a(d0,f) [mm/s²]	a(d0,f) [mm/s²]	a(d,f) [mm/s²]	a(d,f) [mm/s²]	a(d,f) [mm/s²]	a(d,f) [mm/s²]	(A _{ovr} ,f,d) [mm/s²]	L(a,w,f) [dB]	[dB]	[dB]
1	0	0,02	0	0	0,00E+00	6,87E-03	0,00E+00	0,00E+00	6,87E-03	17	0,00	17
1,25	0	0,01	0	0	0,00E+00	4,30E-03	0,00E+00	0,00E+00	4,30E-03	13	0,00	13
1,6	0	0,01	0	0	0,00E+00	4,26E-03	0,00E+00	0,00E+00	4,26E-03	13	0,00	13
2	1,6	0,01	0	0,41	4,00E-01	2,37E-03	0,00E+00	1,24E-01	4,96E-01	54	0,00	54
2,5	1,7	0,01	0	0,41	5,00E-01	4,15E-03	0,00E+00	1,24E-01	5,18E-01	54	-0,50	54
3,15	2	0,02	0	0,41	5,82E-01	5,13E-03	0,00E+00	1,23E-01	5,95E-01	55	-1,50	54
4	0,85	0,02	0	0,48	2,42E-01	5,01E-03	0,00E+00	1,48E-01	2,84E-01	64	-2,00	47
5	5,8	0,02	0,15	0,52	1,61E+00	4,87E-03	4,16E-02	1,41E-01	1,61E+00	69	-2,50	62
6,3	11	0,02	0	0,5	2,95E+00	5,26E-03	0,00E+00	1,18E-01	2,95E+00	69	-2,00	67
8	18	0,02	0,12	0,76	4,61E+00	5,01E-03	3,07E-02	1,50E-01	4,61E+00	73	-3,00	70
10	20	0,07	0,15	1,1	4,86E+00	1,68E-02	3,65E-02	2,06E-01	4,87E+00	74	-5,00	69
12,5	40	0,14	0,29	1,25	9,10E+00	3,12E-02	6,60E-02	1,38E-01	9,11E+00	79	-7,00	72
16	20	0,68	0,5	2	4,15E+00	1,41E-01	1,04E-01	3,74E-01	4,17E+00	72	-9,00	63
20	4	0,85	1,67	3	7,47E-01	1,59E-01	3,12E-01	8,54E-01	1,19E+00	61	-11,00	50
25	12	1,19	1,85	17	1,97E+00	1,94E-01	3,03E-01	3,92E+00	4,40E+00	73	-13,00	60
31,5	7	0,83	2,5	17	9,67E-01	1,14E-01	3,45E-01	4,47E+00	4,59E+00	73	-15,00	58
40	3,7	0,81	6	7,8	4,09E-01	8,95E-02	6,63E-01	2,24E+00	2,37E+00	67	-17,00	50
50	3,7	1,77	5,5	15	3,14E-01	1,50E-01	4,67E-01	4,30E+00	4,34E+00	73	-19,00	54
63	5	3,06	5,2	14	3,02E-01	1,84E-01	3,14E-01	3,88E+00	3,91E+00	72	-21,00	51
80	4	0,52	4	7,8	1,54E-01	2,01E-02	1,54E-01	2,22E+00	2,23E+00	67	-23,00	44
										84		76,71

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	100	m
d0/d	0,1	
η	0,05	adim.
c	1075	m/s
n	0,5	adim.

Espressione che esprime il fenomeno di propagazione della vibrazione alla frequenza f

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

Limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente

Luogo	Aw [m/s²]	Lw [dB]
Ospedali	2,00E-03	66
Asili e case di riposo	3,60E-03	71
Abitazioni (notte)	5,00E-03	74
Abitazioni (giorno)	7,20E-03	77
Abitazioni (festivi)	5,40E-03	75
Scuole	5,40E-03	75
Uffici	1,44E-02	83
Fabbriche	2,88E-02	89

Contesto geologico
Lavorazione
Sabbie e arenarie
Realizzazione cavidotti

Verifica distanza di conformità per abitazioni (giorno) secondo la UNI 9614:2017

Macchinari f [Hz]	Escav. Cingolato a(d0,f) [mm/s²]	Camion da cantiere a(d0,f) [mm/s²]	Escav. Cingolato a(d,f) [mm/s²]	Camion da cantiere a(d,f) [mm/s²]	Spettro combinato (A _{cor,f,d}) [mm/s²]	Spettro combinato L(a,w,f) [dB]	Ponderazione [dB]	Livello finale ponderato [dB]
1	0,02	0	2,23E-02	0,00E+00	2,23E-02	27	0,00	27
1,25	0,01	0	1,41E-02	0,00E+00	1,41E-02	23	0,00	23
1,6	0,01	0	1,41E-02	0,00E+00	1,41E-02	23	0,00	23
2	0,01	0	7,90E-03	0,00E+00	7,90E-03	18	0,00	18
2,5	0,01	0	1,40E-02	0,00E+00	1,40E-02	23	-0,50	22
3,15	0,02	0	1,76E-02	0,00E+00	1,76E-02	25	-1,50	23
4	0,02	0	1,76E-02	0,00E+00	1,76E-02	25	-2,00	23
5	0,02	0,15	1,76E-02	1,50E-01	1,51E-01	44	-2,50	41
6,3	0,02	0	1,96E-02	0,00E+00	1,96E-02	26	-2,00	24
8	0,02	0,12	1,96E-02	1,20E-01	1,22E-01	42	-3,00	39
10	0,07	0,15	6,91E-02	1,50E-01	1,65E-01	44	-5,00	39
12,5	0,14	0,29	1,37E-01	2,90E-01	3,21E-01	50	-7,00	43
16	0,68	0,5	6,81E-01	5,00E-01	8,45E-01	59	-9,00	50
20	0,85	1,67	8,49E-01	1,67E+00	1,87E+00	65	-11,00	54
25	1,19	1,85	1,19E+00	1,85E+00	2,20E+00	67	-13,00	54
31,5	0,83	2,5	8,27E-01	2,50E+00	2,63E+00	68	-15,00	53
40	0,81	6	8,11E-01	6,00E+00	6,05E+00	76	-17,00	59
50	1,77	5,5	1,77E+00	5,50E+00	5,78E+00	75	-19,00	56
63	3,06	5,2	3,06E+00	5,20E+00	6,03E+00	76	-21,00	55
80	0,52	4	5,22E-01	4,00E+00	4,03E+00	72	-23,00	49
						81		63,81

Limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente

Luogo	A _w [m/s²]	L _w [dB]
Ospedali	2,00E-03	66
Asili e case di riposo	3,60E-03	71
Abitazioni (notte)	5,00E-03	74
Abitazioni (giorno)	7,20E-03	77
Abitazioni (festivi)	5,40E-03	75
Scuole	5,40E-03	75
Uffici	1,44E-02	83
Fabbriche	2,88E-02	89

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	10	m
d0/d	1	
η	0,05	adim.
c	1075	m/s
n	0,5	adim.

Espressione che esprime il fenomeno di propagazione della vibrazione alla frequenza f

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