



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15067.00.126.00

PAGE

1 di/of 55

TITLE:
IT

AVAILABLE LANGUAGE:

IMPIANTO EOLICO "MACOMER 2"

Relazione impatti da vibrazioni



File: GRE.EEC.R.73.IT.W.15067.00.126.00_Relazione impatti da vibrazioni.docx

00	16/04/24	Nota MASE U.0000245 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	7	3	I	T	W	1	5	0	6	7	0	0	1	2	6	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.....	24
5.1. Inquadramento geologico generale.....	24
5.2. Assetto litostratigrafico locale	29
5.3. Caratterizzazione geotecnica	34
5.4. Comportamento sismico del sottosuolo	35
6. INDIVIDUAZIONE DEI POTENZIALI RICETTORI	37
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	44
8.4. Stima dei livelli vibrazionali ed analisi dei risultati.....	45
8.5. Analisi dei livelli vibrazionali in fase di esercizio.....	45
9. ANALISI DEI LIVELLI VIBRAZIONALI IN FASE DI DISMISSIONE	49
10. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	50
11. BIBLIOGRAFIA	51
12. APPENDICE: TABELLE DI CALCOLO	52

1. PREMESSA

La realizzazione del progetto di impianto eolico denominato *Macomer 2* - nei territori di nei territori di Santu Lussurgiu (OR), Borore (OR) e Macomer (NU) - 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 "*Macomer 2*", 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

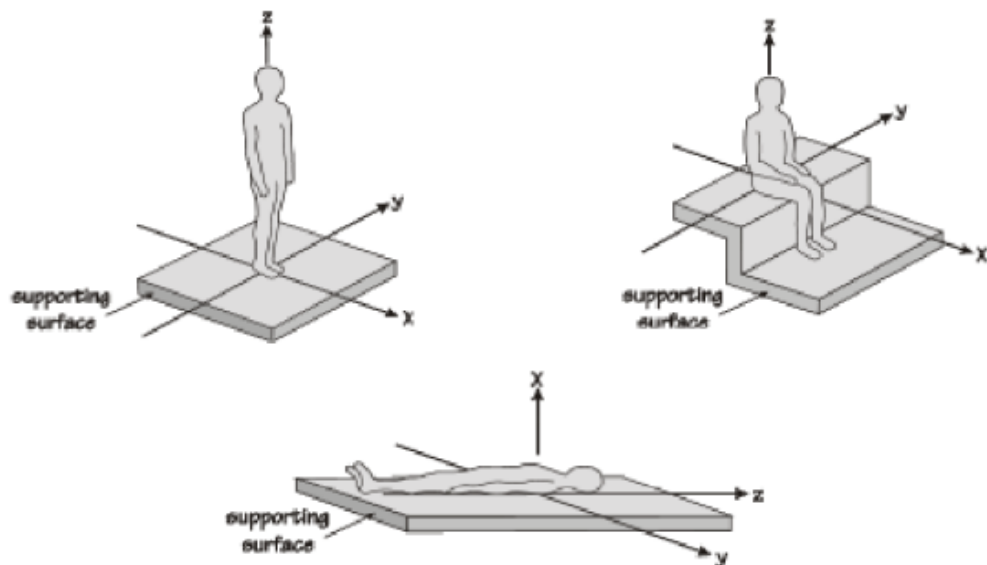


Figura 2.1 - Rappresentazione delle tre componenti in funzione della posizione del corpo

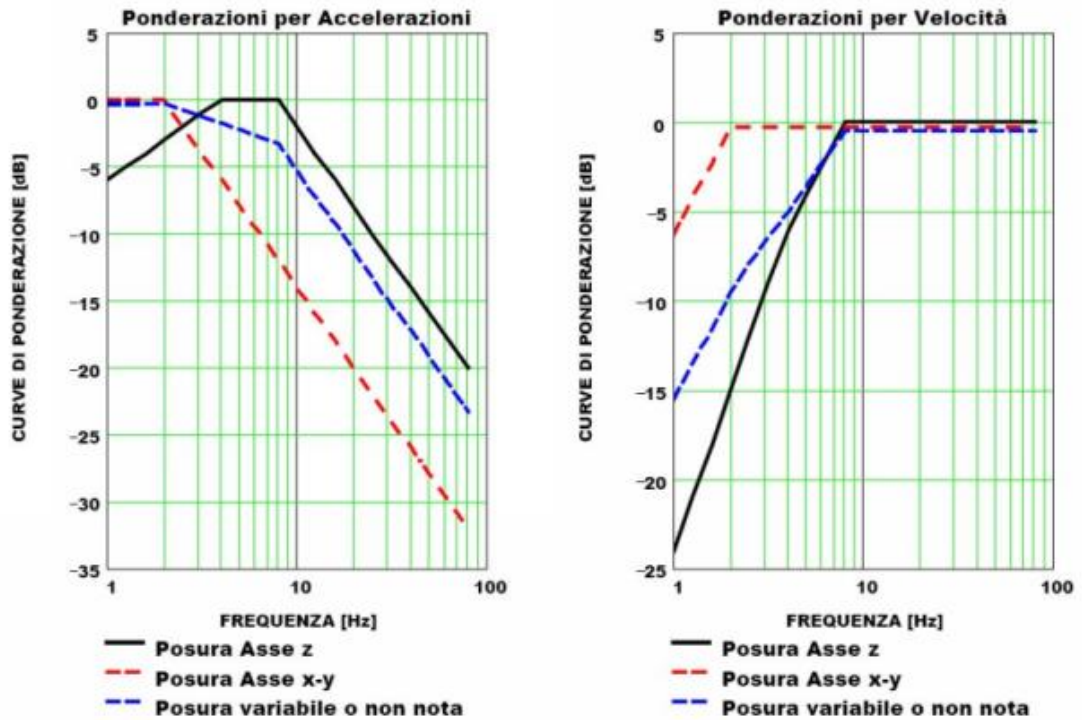


Figura 2.2 – Curve di ponderazione (ISO) per vibrazioni lungo gli assi verticali, orizzontali e per postura non nota nell'intervallo di frequenze 1÷80 Hz

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:

$$L = 20 \cdot \log_{10} \frac{a}{a_0}$$

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:

$$L_W = 10 \cdot \log_{10} \sum_1 10^{\frac{L_{iW}}{10}}$$

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.

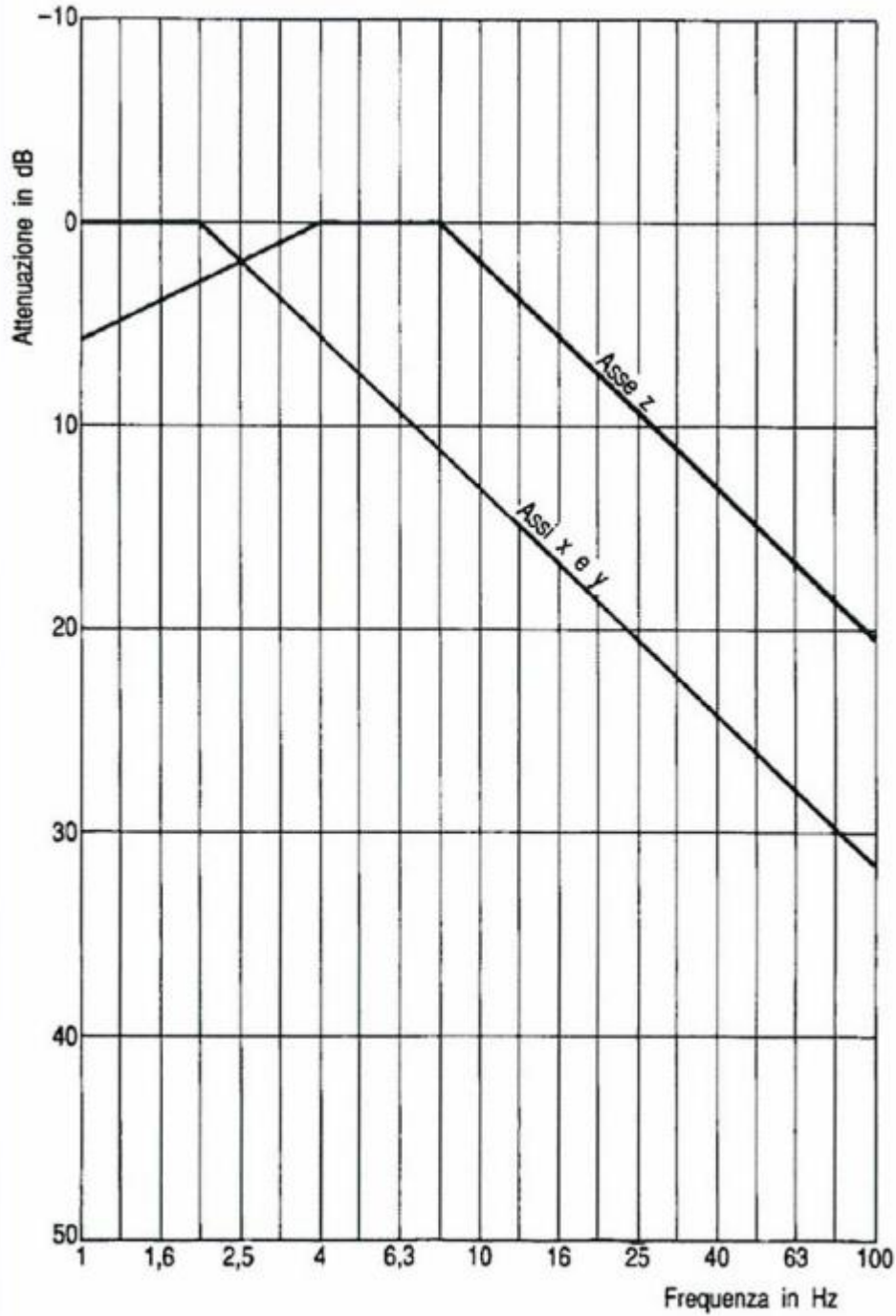


Figura 2.3 – Curve di ponderazione norma UNI 9614:2017

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.

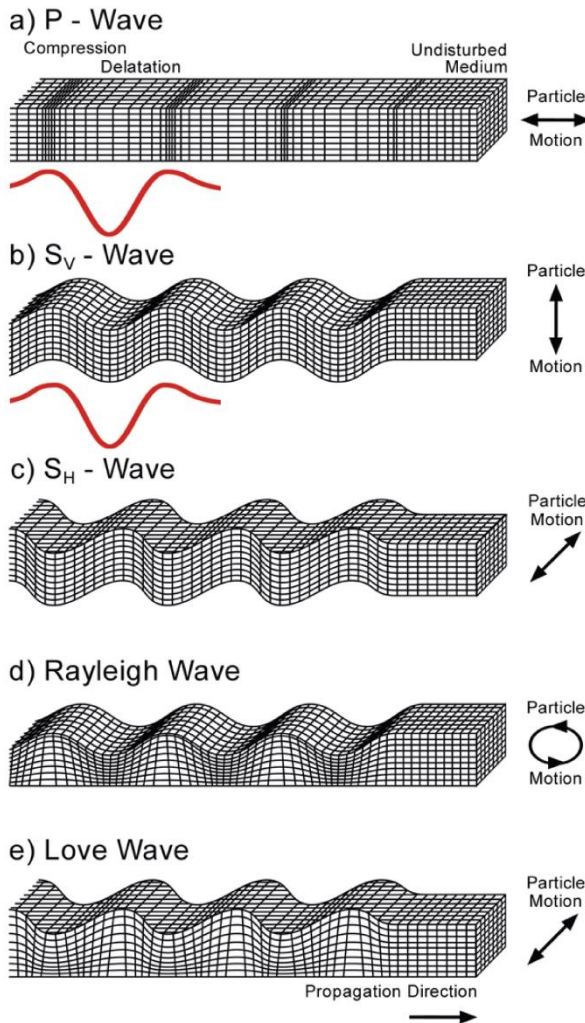


Figura 3.1 - Caratteristiche delle onde sismiche

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.

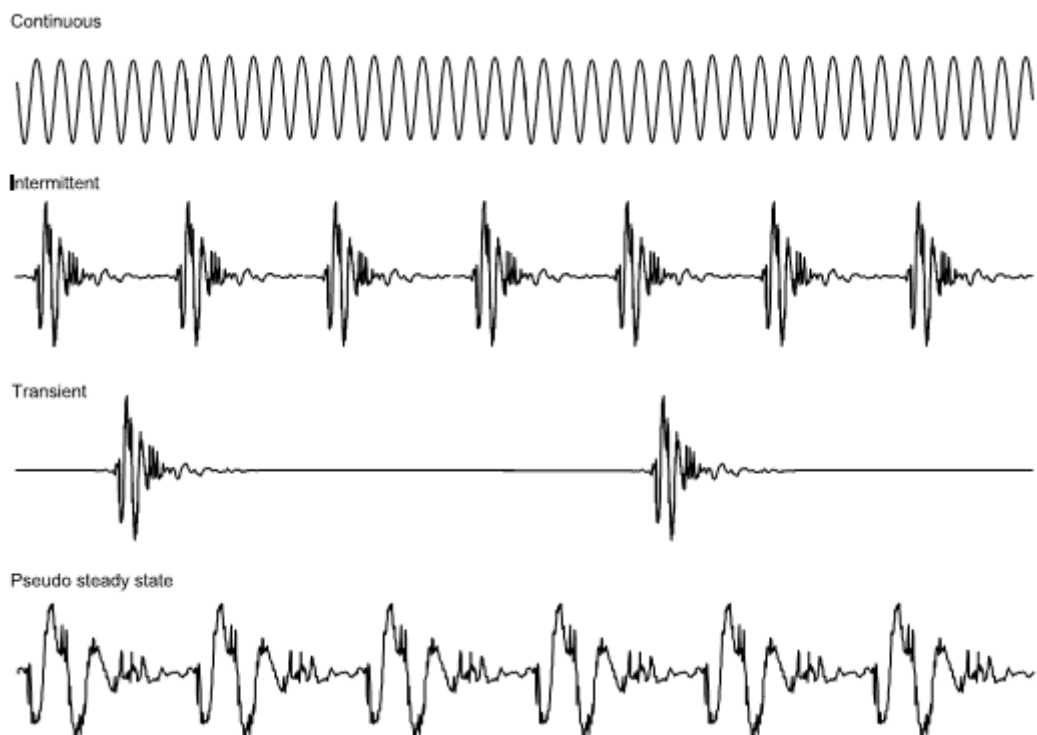


Figura 3.2 – Variazioni temporali delle vibrazioni

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.

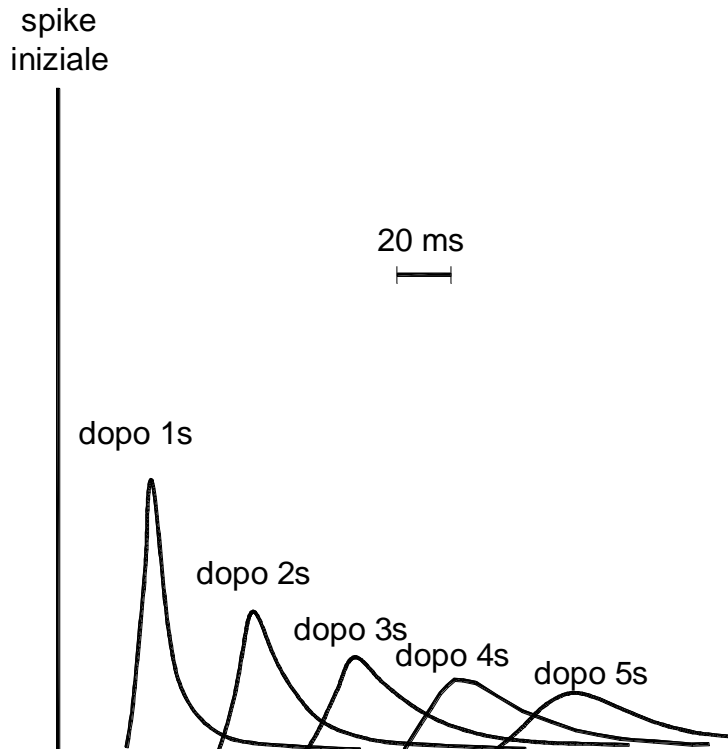


Figura 3.3 - Progressiva variazione della forma d'onda durante la propagazione a causa dell'effetto di attenuazione (Anstey, 1977)

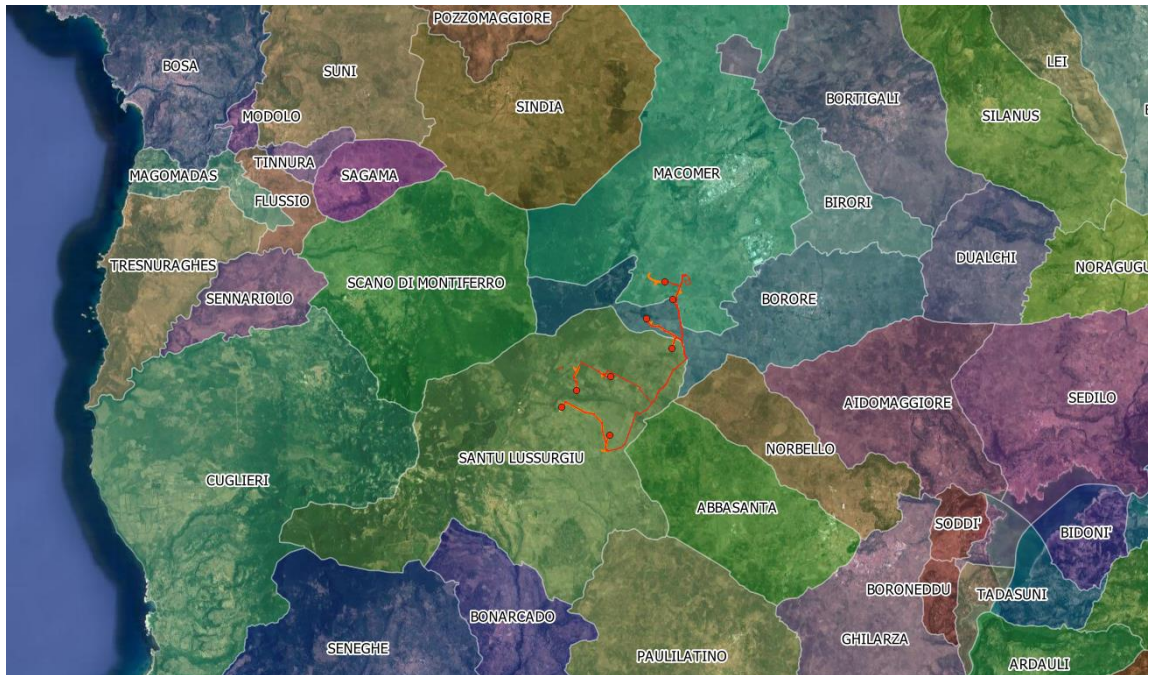
4. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Gli interventi oggetto del presente studio sono situati tra la Catena del *Marghine* e quella del *Montiferru*; in particolare, procedendo da nord verso sud, nei comuni di Macomer, Borore e Santu Lussurgiu.

Si possono distinguere due gruppi di aerogeneratori in base alla loro posizione:

- Il primo gruppo, con quote che vanno dai 470m sino ai 522m, è costituito da quattro aerogeneratori e si trova a ovest del centro urbano di Borore, in particolare: la postazione eolica M2_05 è localizzata a sud del territorio comunale di Macomer a circa 4 km a ovest dell'area industriale di *Tossilo*; gli aerogeneratori M2_04 e M2_03 ricadono all'interno del territorio comunale di Borore ad una distanza dall'asse viario della SS 131, ubicato a est dell'impianto, rispettivamente di 3,6km e 4,8km; l'M2_08 si trova nella porzione nord-est del territorio comunale di Santu Lussurgiu, poco a nord del *Riu Merchis*.

- Il secondo gruppo, con quote che variano tra i 525 e i 622m, è costituito da 4 aerogeneratori tutti situati all'interno del territorio comunale di Santu Lussurgiu in un'area compresa tra la Strada Provinciale 77 a est, che collega il centro urbano di Borore e quello di Santu Lussurgiu, e la Strada Provinciale 20 che collega Macomer e Santo Lussurgiu passando per il borgo di San Leonardo. In particolare: le postazioni eoliche M2_07 e M2_02 si trovano tra le due direttrici ambientali che scorrono in direzione est-ovest del *Riu Merchis*, a nord, e del *Riu di S. Leonardo*, a sud; l'M2_01 è l'aerogeneratore più vicino al piccolo centro di San Leonardo e al parco nel quale è inserito, ad una distanza di circa 1,5km a ovest; l'M2_06, infine, è il più vicino alla SP77 che scorre a ovest dell'impianto a meno di 1 km di distanza e si trova al margine tra il massiccio del *Montiferru*, a ovest, e l'altopiano di Abbasanta a est.



Layout di impianto

- Punti WTG
- Cavidotto
- Sottostazione elettrica (SSE) e Cabina Primaria (CP)

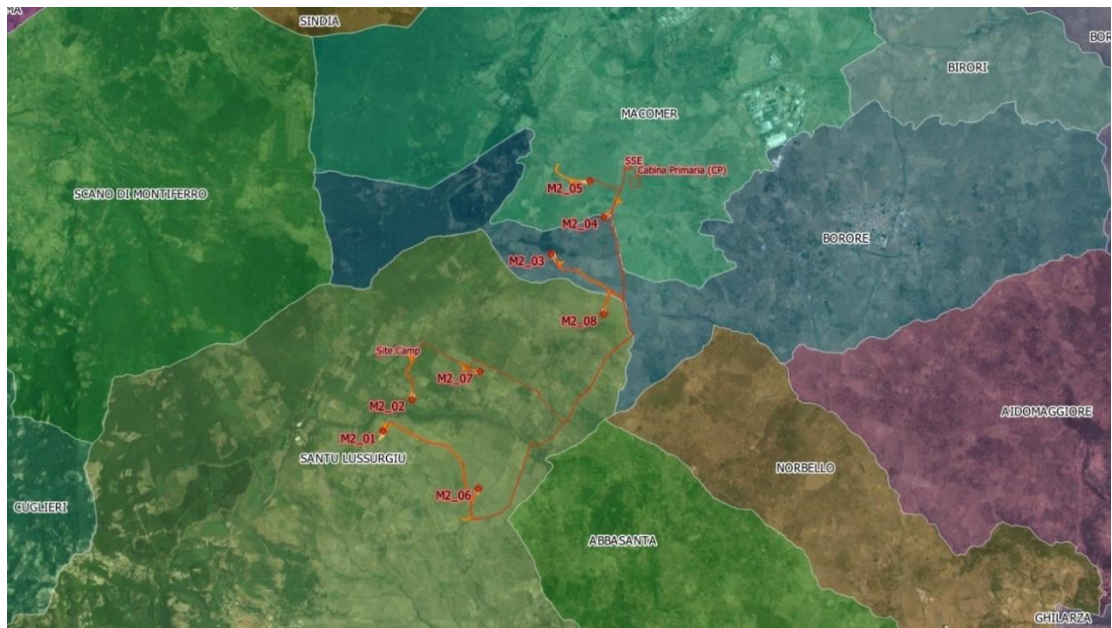
Limiti amministrativi

- Limiti amministrativi provinciali (2001)

Limiti amministrativi comunali

- | | | | |
|--------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| ABBASANTA | ESPORLATU | OTTANA | TIANA |
| AIDOMAGGIORE | FLUSSIO | OVODDA | TINNURA |
| ANELA | FORDONGIANUS | PADRIA | TONARA |
| ARDAULI | GHILARZA | PAULLATINO | TRAMATZA |
| AUSTIS | GIAVE | POZZOMAGGIORE | TRESNURAGHES |
| BAULADU | ILLORAI | RIOLA SARDO | ULA' TIRSO |
| BENETUTTI | LEI | SAGAMA | VILLANOVA MONTELEONE |
| BIDONI' | MACOMER | SAN VERO MILIS | VILLANOVA TRUSCHEDU |
| BIRORI | MAGOMADAS | SANTU LUSSURGIU | |
| BLOTANA | MARA | SARULE | |
| BONARCAO | MILIS | SCANO DI MONTIFERRO | |
| BONO | MODULO | SEDILO | |
| BONORVA | MONTRESTA | SEMESTENE | |
| BORONEDDU | NARBOLIA | SENEGHE | |
| BORORE | NEONELI | SENNARIOLO | |
| BORTIGALI | NORAGUGUME | SILANUS | |
| BOSA | NORBELLO | SINDIA | |
| BOTTIDDA | NUGHEDU SANTA VITTORIA | SODDI' | |
| BULTEI | OLLOLAI | SOLARUSSA | |
| BURGOS | OLZAI | SORGONO | |
| BUSACHI | ONIFERI | SORRADILE | |
| COSSOINE | ORANI | SUNI | |
| CUGLIERI | OROTELLI | TADASUNI | |
| DUALCHI | ORTUERI | TETI | |

Figura 4 - Inquadramento del layout di impianto (in rosso) rispetto ai limiti amministrativi comunali -Elaborazione GIS - Fonte: PPR Sardegna



Layout di impianto

- WTG
- Piazzole
- Cavidotti
- Strade di servizio
- SSE
- Site Camp

Limiti amministrativi

- Limiti amministrativi provinciali (2001)

Limiti amministrativi comunali

- | | |
|--------------|---------------------|
| ABBASANTA | NORBELLO |
| AIDOMAGGIORE | POZZOMAGGIORE |
| BIRORI | SAGAMA |
| BORORE | SANTU LUSSURGIU |
| BORTIGALI | SCANO DI MONTIFERRO |
| BOSA | SENNARIOLO |
| CUGLIERI | SINDIA |
| FLUSSIO | SUNI |
| MACOMER | TINNURA |
| MAGOMADAS | TRESNURAGHES |

Figura 5 - Inquadramento dell'impianto (in rosso) e delle strade di servizio (in arancio) riportante la denominazione di ciascuna WTG su base satellitare – Elaborazione GIS

In sintesi, le postazioni M2_01, M2_02, M2_06, M2_07, M2_08 e il Site Camp ricadono nel Comune di Santu Lussurgiu, la WTG M2_03 ricade nel comune di Borore, la WTG M2_04 ricade sul confine tra i comuni di Borore e Macomer mentre la WTG M2_05 e la sottostazione elettrica (SSE) ricadono interamente nel Comune di Macomer.

L'area di impianto è individuabile sulla cartografia IGM in scala 1:25.000 Foglio 498 Sezione n. 3 e Foglio 515 Sezione n. 4; nella Carta Tecnica Regionale Numerica in scala 1:10.000 alla sezione 498130 – Monte Sant'Antonio e 515010 Casa Sa Codina.

Viene di seguito riportata la descrizione dell'ubicazione del progetto, come definito nel punto 1. Lettera a) dell'All. VII al D.lgs 152/2006.

L'area di impianto è individuabile sulla cartografia IGM in scala 1:25000

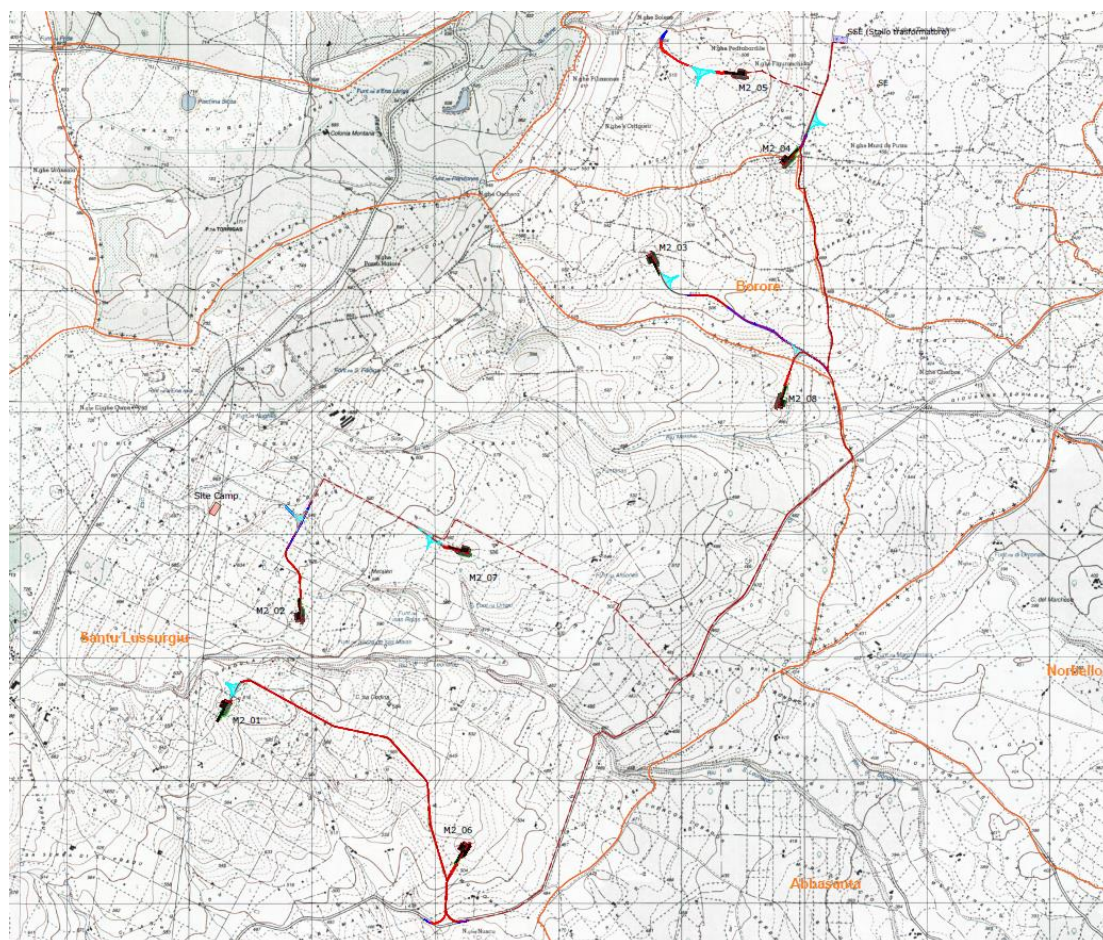


Figura 6 - Inquadramento su cartografia IGM 1:25000 delle aree di impianto e relative opere di connessione

Le coordinate degli aerogeneratori in progetto, espresse nel sistema di riferimento UTM - WGS84 (fuso 32) risultano essere le seguenti:

Tabella 6 - Coordinate delle WTG in progetto

COORDINATE WTG WGS84 UTM 32N		
	EST (m)	NORD (m)
WTG M2_01	473225	4447459
WTG M2_02	473812	4448119
WTG M2_03	476666	4451082
WTG M2_04	477751	4451841
WTG M2_05	477447	4452566
WTG M2_06	475168	4446298
WTG M2_07	475201	4448686
WTG M2_08	477735	4449856

Nella successiva tabella, vengono riportate le distanze delle singole WTG dai centri abitati dei Comuni ove ricade l'impianto.

Tabella 7 – Distanze (espresse in km) delle singole WTG dai centri abitati dei Comuni interessati

Comune	Borore	Macomer	Santu Lussurgiu
WTG M2_01	9,9	9,9	1,7
WTG M2_02	9,2	9,1	2,2
WTG M2_03	5,0	5,7	6,0
WTG M2_04	4,7	3,9	7,3
WTG M2_05	5,2	3,4	7,5
WTG M2_06	8,8	10,0	4,9
WTG M2_07	7,8	7,7	3,6
WTG M2_08	5,8	4,9	6,4

Sotto il profilo geomorfologico l'area oggetto di studio fa parte di un settore collinare e in parte montano, appartenente alla fascia di rilievi compresa fra il massiccio di natura vulcanica del *Montiferru* (massima elevazione della zona il *Monte Urtigu*, in agro di Santu Lussurgiu, con 1050 m) e la catena del *Marghine*. In particolare, gli aerogeneratori sono localizzati in maniera lineare secondo la direzione nord-ovest sud-est nella porzione di territorio dei comuni di Santu Lussurgiu, Borore e Macomer.

L'impianto risulta avere, a ovest, le catene montuose del *Marghine* e del *Montiferru*, mentre a est si trova il sistema delle aree a destinazione agropastorale dell'altopiano di Abbasanta, caratterizzate dalla ormai rada vegetazione arborea, da estese praterie, la cui continuità è interrotta dalle recinzioni in muro a secco, e dalle locali zone di ristagno delle acque meteoriche contraddistinte, in particolare nel periodo primaverile, da una lussureggiante vegetazione igrofila.

Il paesaggio assume una forma blandamente ondulata, nel quale la continuità è interrotta da piccole e medie scarpate, corrispondenti a colate laviche a chimismo basaltico che, a causa dell'erosione differenziale, emergono dal paesaggio circostante.

La dorsale montana separa il bacino del *Tirso* e del lago *Omodeo* a est e il bacino del *Riu Marafe* e del fiume *Temo* rispettivamente a sud-ovest e nord-ovest.

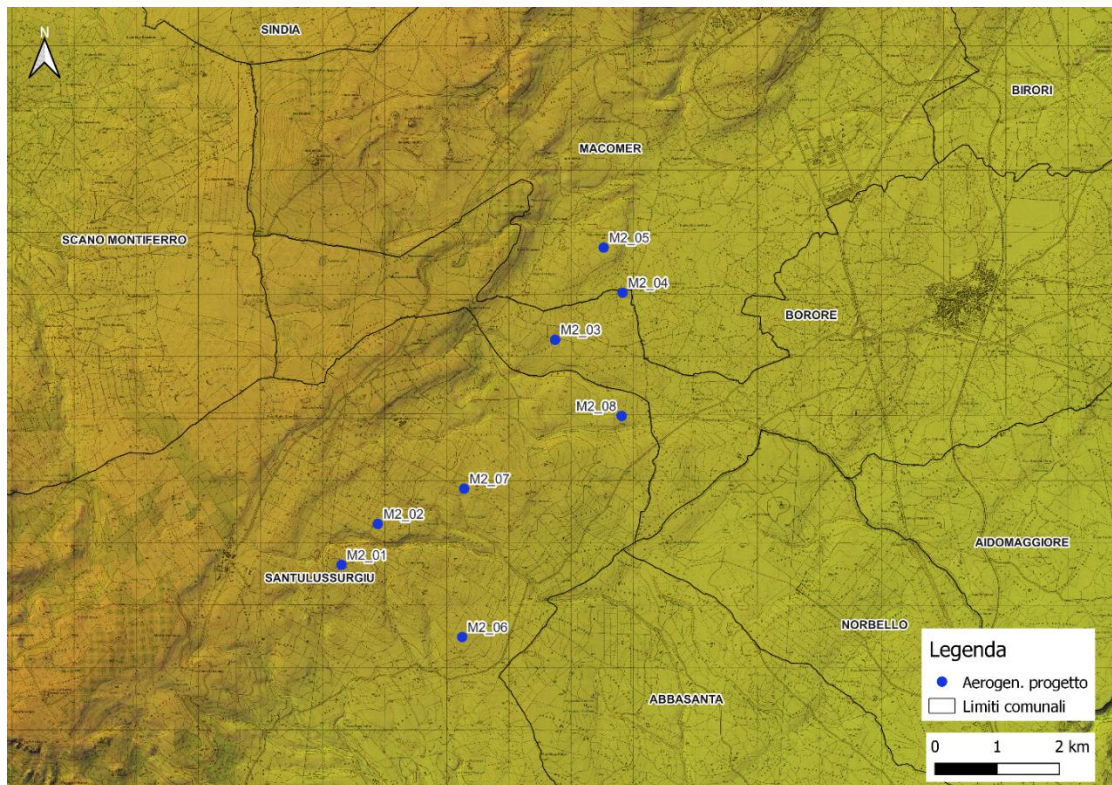


Figura 3 – Assetto morfologico del sito di progetto

5. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Si riporta di seguito una sintesi dell'inquadramento geologico riportato nell'elaborato progettuale GRE.EEC.R.25.IT.W.15067.00.055.00, curato da altri professionisti.

5.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO GENERALE

L'inquadramento geologico che qui segue riprende largamente quanto riportato nelle note illustrative del Foglio Geologico CarG 459, "Sassari" e 528 "Oristano", che sono i fogli della cartografia CarG più prossimi all'area di studio e relativa bibliografia.

La Sardegna è usualmente divisa in tre complessi: il basamento metamorfico ercinico, il complesso intrusivo tardo-ercinico, le coperture sedimentarie e vulcaniche tardo-erciniche, mesozoiche e cenozoiche.

Il basamento sardo è un segmento della catena ercinica sud-europea, considerata una catena collisionale, con subduzione di crosta oceanica e metamorfismo di alta pressione a partire dal Siluriano, e collisione continentale con importante ispessimento crostale, metamorfismo e magmatismo durante il Devoniano e il Carbonifero. In Sardegna la geometria collisionale della catena ercinica è ancora ben riconoscibile. Secondo alcuni autori il margine armoricano sovrascorso è rappresentato dal complesso metamorfico di alto grado che affiora nella Sardegna settentrionale, mentre il margine del Gondwana subdotto è rappresentato da un complesso metamorfico di basso e medio grado, a sua volta suddiviso in Falde interne e Falde esterne, che affiora nella Sardegna centrale e sud-orientale. I due complessi sono separati dalla Linea Posada-Asinara, lungo la quale si rinvengono relitti di crosta oceanica.

Alla strutturazione collisionale segue nel tardo-ercinico un'evoluzione caratterizzata da: collasso gravitativo della catena, metamorfismo di alto T/P, messa in posto delle plutoniti che formano il Batolite sardo-corso.

Dopo l'Orogenesi ercinica altri settori di crosta sono stati incorporati nella catena pirenaica, nelle Alpi e nell'Appennino, mentre il settore di crosta che attualmente costituisce il Blocco sardo- corso non è stato coinvolto in eventi orogenici di qualche rilevanza. Le deformazioni più importanti sono di carattere trascorrente e si manifestano tra l'Oligocene ed il Miocene.

La successione stratigrafica attualmente riconosciuta parte dal Mesozoico, tali successioni appartengono alla piattaforma connessa con l'evoluzione del margine passivo sud-europeo, costituita prevalentemente da calcari e da dolomie. I depositi più diffusi, riferiti al Terziario, sono rappresentati da vulcaniti e da sedimenti clastici e carbonatici. Le vulcaniti sono costituite da lave andesitiche alternate a flussi piroclastici saldati e non saldati a chimismo riolitico e riodacitico.



MAGMATISMO POST-ERCINICO

Vulcanismo plio-pleistocenico legato ai processi di oceanizzazione del Mediterraneo occidentale

- | | |
|--|---|
| | <p>– Vulcaniti centrotirreniche, a) Seamounts in prevalenza tholeitici; b) ad affinità non determinata.</p> |
| | <p>– Vulcaniti di margine di bacino (magmi in prevalenza «mediterranei»: sistema toscano-laziale-campano, I. Ponziane, ed I. Eolie p.p. (32); basamento andesitico delle Eolie (Alicudi, Filicudi, Panarea, Lipari p.p., Salina p.p.) (33).</p> |
| | <p>– Vulcaniti basaltiche di piattaforma: Pantelleria, Linosa, Iblei, Etna, Ustica-Anchise, Sardegna p.p. Centri vulcanici sottomarini storici del Canale di Sicilia (Δ).</p> |
| | <p>Magmatismo acido mio-pliocenico appenninico: plutoniti dell'I. d'Elba, I. del Giglio, I. di Montecristo, di Gavorrano e vulcaniti dell'I. di Capraia, di S. Vincenzo e Roccastrada, di Montecatini e Orciatice, della Tolfa, del Ceriti e di Manzianna.</p> |
| | <p>Vulcanismo terziario contemporaneo a fasi compressive alpine: Sardegna p.p. (andesiti-riodaciti); Calabria (limburgiti-andesiti, non cartografate).</p> |

Figura 5.1 - Carta Tettonica d'Italia – Progetto finalizzato GEODINAMICA CNR – sca 1:500.000

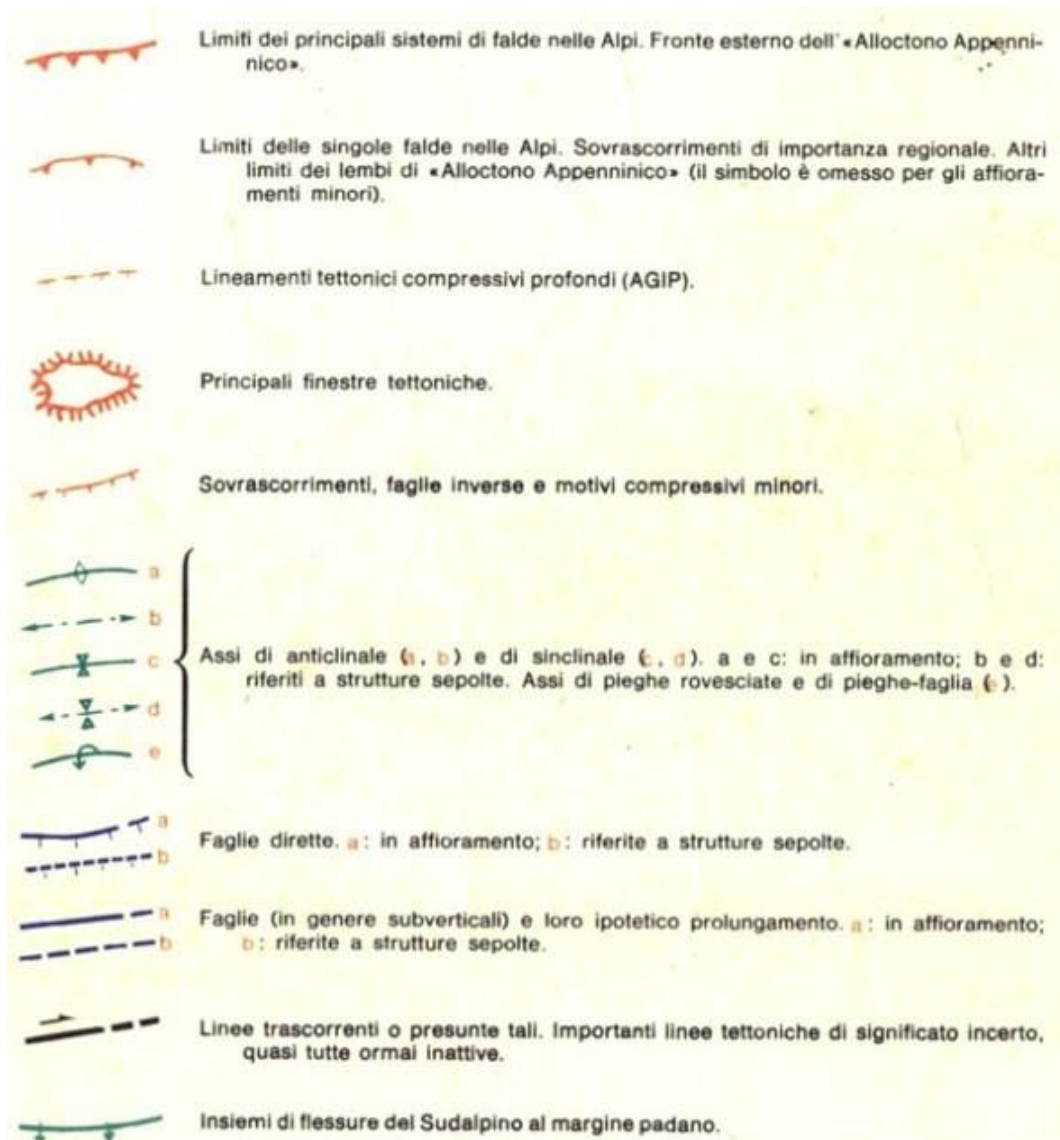


Figura 2 - Legenda Carta Tettonica d'Italia – Progetto finalizzato GEODINAMICA CNR – sca 1:500.000

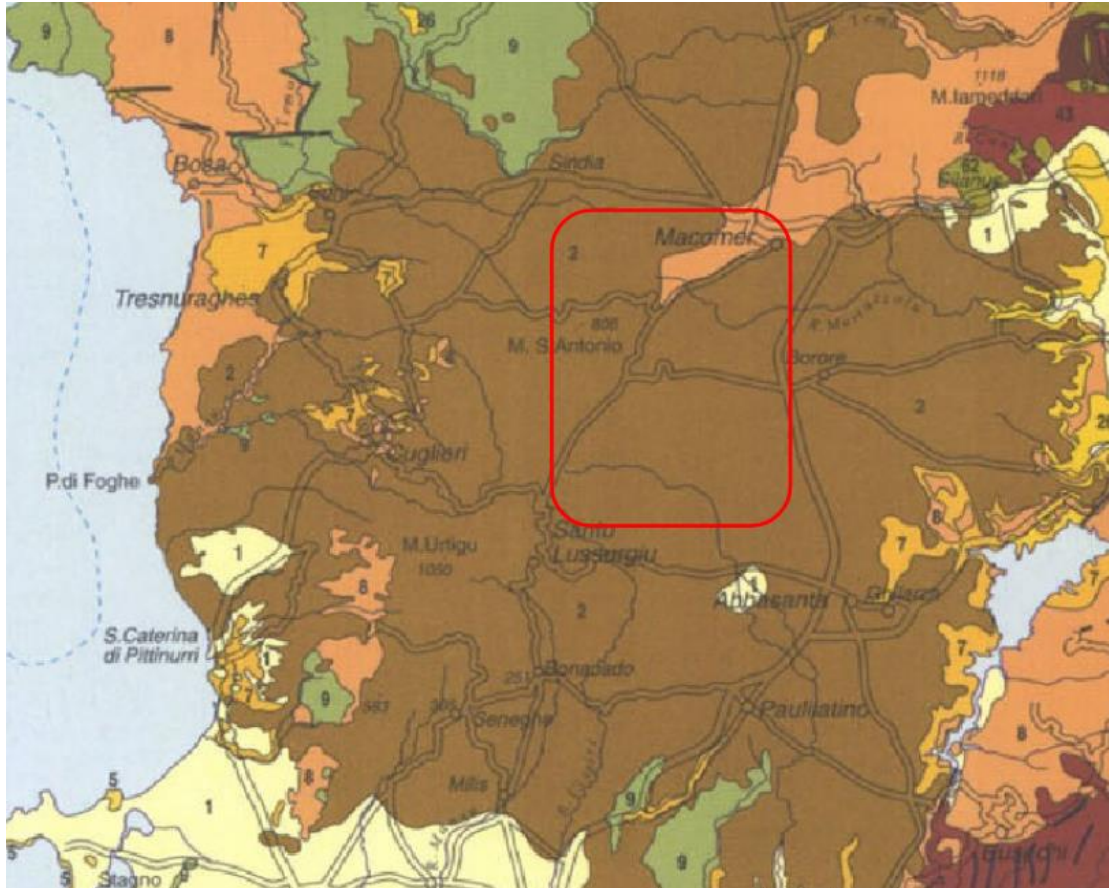


Figura 3 - Stralcio Carta Geologica e strutturale della Sardegna e della Corsica; 1-Depositi alluvionali olocenici, 2-Basalti Alcalini e transizionali del plio-pleistocene, 5-marne e calcari evaporitici messiniani, 7- Conglomerati, breccie e calcareniti burdigaliano-serravalliani, 8-Rioliti e riolaciti ignimbriche burdigaliano- aquitaniane, 9-Andesiti e basalti burdigaliano-aquitani, 26-Conglomerati e breccie, marne, marne arenacee, calcari, tufiti marine del post-Eocene medio-Burdigaliano inferiore-medio, 38-Successioni vulcano- sedimentarie andesitiche, dacitiche e riolitiche del Paleozoico, 39-Leucomonzognanti a biotite del Paleozoico, 57-Paragneiss e micascisti paleozoici.

Come è possibile osservare l'area rientra interamente nella zona caratterizzata dalla serie basaltica del plio- pleistocene

Nella carta geologico-strutturale di Sardegna e Corsica l'area rientra interamente nel settore caratterizzato dalla serie basaltica alcalina e transizionale del Pliocene-Pleistocene, senza ulteriori differenziazioni.

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 5b, ovvero "Basalti alcalini e transizionali, basaniti, trachibasalti e hawaii, talora con noduli peridotitici; andesiti basaltiche e basalti sub-alcalini. Alla base, o intercalati, sono presenti conglomerati, sabbie e argille lacustri" e 5a "Trachiti, trachiti fonolitiche, fonoliti, fonoliti tefritiche in cupole e colate, talora in bancate scoriacee".

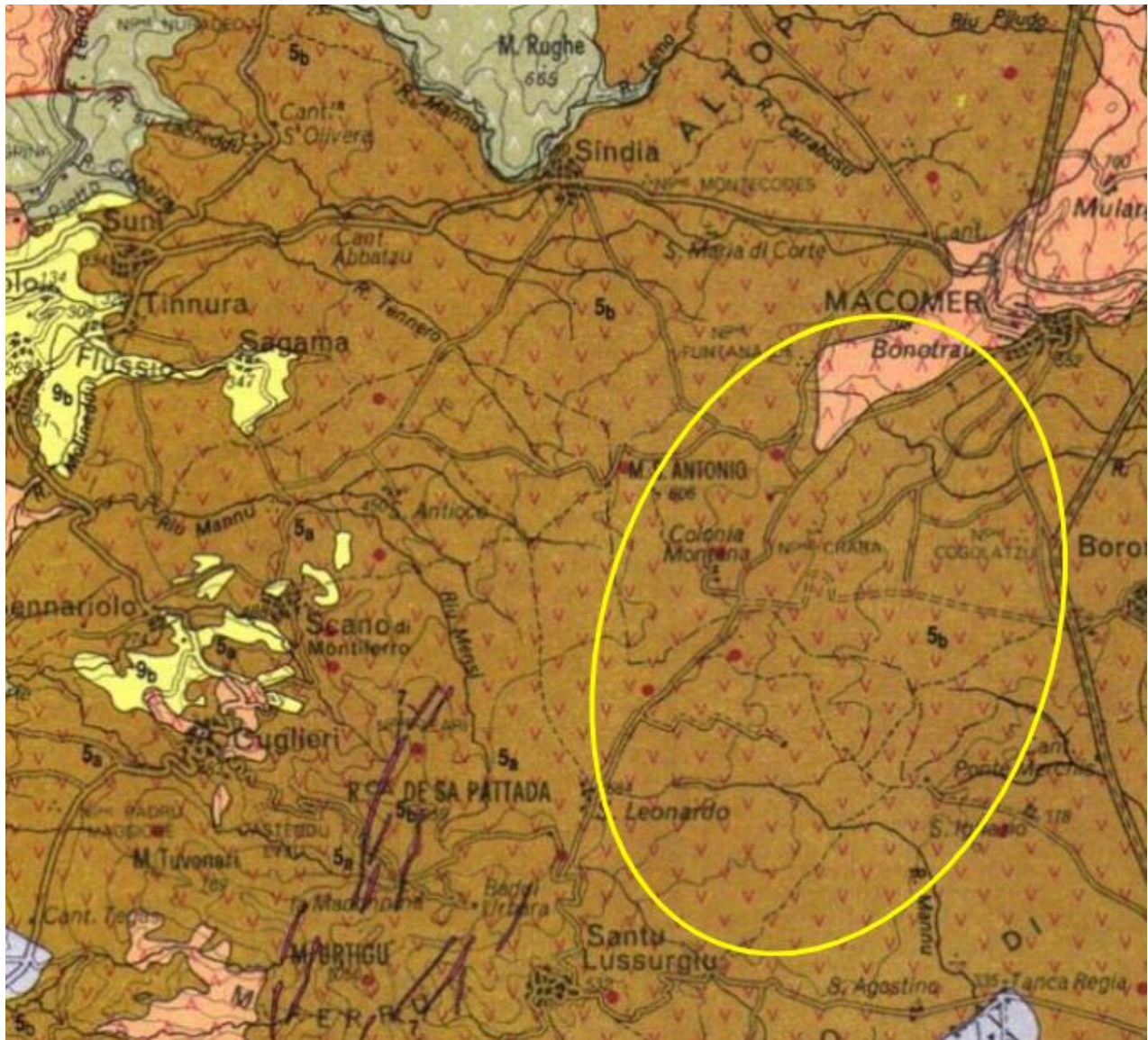
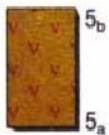


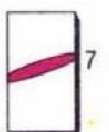
Figura 5.4 - Stralcio Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000. Fonte Cartografia geologica | Ordine Regionale dei Geologi della Sardegna.



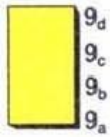
Basalti alcalini e transizionali, basaniti, trachibasalti e hawaiiiti, talora con noduli peridotitici; andesiti basaltiche e basalti subalcalini; alla base, o intercalati, conglomerati, sabbie e argille fluvio-lacustri (es. **Formazione di Nuraghe Casteddu**) (Montiferro; Campeda; Baronie; Orosei; Marmilla: M.te Arci; etc.); coni di scorie basaltiche (Logudoro; etc.) **5_b**. **Pliocene - Pleistocene.**

Trachiti, trachiti fonolitiche, fonoliti, fonoliti tefritiche e tefriti fonolitiche in cupole e colate, talora in bancate scoriacee (Montiferro; Marmilla: M.te Arci; Sarrabus: Capo Ferrato) **5_a**. **Pliocene.**

*Alkaline and transitional basalts, basanites, trachybasalts and hawaiites with peridotitic nodules; basaltic andesites and subalkaline basalts, at the bottom, and between lava flows, fluvial-lacustrine conglomerates, sands and clays (e.g. **Nuraghe Casteddu Formation**) (Montiferro; Campeda; Baronie; Orosei; Marmilla: Monte Arci; etc.); cones of scoriaceous basalts (Logudoro; etc.) **5_b**. **Pliocene - Pleistocene.** Trachytes, phonolitic trachytes, phonolites, tephritic phonolites, phonolitic tephrites in lava domes and scoriaceous lava flows (Montiferro; Marmilla: Monte Arci; Sarrabus: Capo Ferrato) **5_a**. **Pliocene.***



Filoni a composizione trachibasaltica, alcalibasaltica e hawaiiitica (Montiferro) **7**. **Pliocene - Pleistocene.** *Dikes with trachybasaltic, alkalibasaltic and hawaiitic composition (Montiferro) **7**. **Pliocene - Pleistocene.***



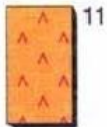
9_d Arenarie marnose, siltiti, calcareniti sublitorali, con Foraminiferi planctonici delle zone N 12 e N 13, Molluschi (*Amusiopecten spinulosus*, *Fiabellipecten fraterculus*, *Pecten benedictus*) (formazione delle Arenarie di Pirri Auct.) (Campidano: Cagliari; Sassarese; Logudoro) 9_d. **Serravalliano medio - ? sup.**

9_b Marne e marne arenacee epibatiali, con Foraminiferi planctonici delle zone N 8 - N 11 / N 12, Molluschi pelagici (*Vaginella austriaca*, *Clio distefanoi*, *C. caralitana*, *C. pulcherrima*), Molluschi bentonici (*Abra longicallus*, *Ficus conditus*), Coralli Bianchi (formazione di Fangario Auct.) (Campidano: Cagliari; Logudoro; Marmilla) 9_b. **Langhiano medio-sup. - Serravalliano inf.**

9_c Marne arenacee e silteose, arenarie, conglomerati, calcareniti e sabbie silicee sublitorali-epibatiali, con Foraminiferi planctonici delle zone N 7 e N 8, Molluschi pelagici (*Vaginella austriaca*, *V. rotundata*, *Clio pulcherrima*), Molluschi bentonici (*Gigantopecten ziziniiae*, *Pecten jossilingi*, *Amusiopecten baranensis*, *Aequipecten submalvinae*, *Ficus conditus*, *Abra longicallus*, etc.), Echinoidi (*Schizaster* sp.), Coralli Bianchi; (formazione delle Marne di Gesturi, formazione della Marmilla p.p. Auct.) (Marmilla, Trexenta, Campidano, Sassarese, Logudoro, Gallura) 9_c. **Burdigaliano sup. - Langhiano medio-sup.**

9_a Conglomerati e sabbie a matrice argillosa, con elementi del basamento ercinico e subordinate vulcaniti terziarie (Logudoro: Oppia Nuova, Tula); conglomerati e arenarie deltizi (Baronie: Orosei) 9_a. **Burdigaliano sup. - ? Serravalliano.**

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 tholeiitica 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 gabbri e gabbronoriti in corpi ipoabissali (Arburese: M. Arcuentu, M. Nureci); quarzodioriti porfiriche (porfiriti di alghero Auct.), (Nurra: Calabona) 12. **Oligocene sup. - Miocene inf.**

Figura 5 - Legenda Carta Geologica della Sardegna in scala 1:200.000; Cartografia geologica | Ordine Regionale dei Geologi della Sardegna.

5.2. ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO LOCALE

Il dettaglio delle condizioni geologiche può essere desunto attraverso la cartografia geologica ufficiale disponibile; in mancanza della cartografia in scala 1:50.000 si farà quindi riferimento alla cartografia in scala 1:100.000, che pur datata, rappresenta comunque la cartografia di riferimento. Nell'area sono affioranti quindi i seguenti terreni, riportandone la nomenclatura come nella cartografia appena citata:

βp² Basalti debolmente alcalini e trachibasalti con microcristalli e noduli olivinici e pirossenici; tale litologia rappresenta quella più diffusa in tutta l'area e costituisce i terreni di riferimento delle WTG M1_01, M1_02, M1_03, M1_04, M1_05, M1_06, M1_07, M1_08, M1_09, M1_11, M1_12, M1_13.

βmp¹ Basalti alcalini e trachibasalti di colore grigio perla a grana fine, con noduli peridotitici; sono presenti all'intorno dell'area di studio, in particolare nell'area di Macomer;

βmp² Basalti alcalini e trachibasalti a grossi fenocristalli di plagioclasti; sono presenti all'intorno dell'area di studio e rappresentano i terreni di riferimento per la WTG M1_10;

τφ Trachiti, trachiti fonolitiche e fonoliti in domi e collate;

ms Arenarie, arenarie calcaree, arenarie marnose e marno-arenacee fossilifere; sono presenti localmente nell'intorno dell'area di studio.

τ13 Rioliti e riodaciti essenzialmente in facies ignimbratica a fiamme, ricche in elementi xenolitici; sono presenti al di fuori dell'area di realizzazione delle WTG, verso ovest;

α³ Andesiti augitico-ipersteniche con intercalati tufi pomicei e arenacei; sono presenti a nord dell'area di studio, in corrispondenza dell'abitato di Sindia

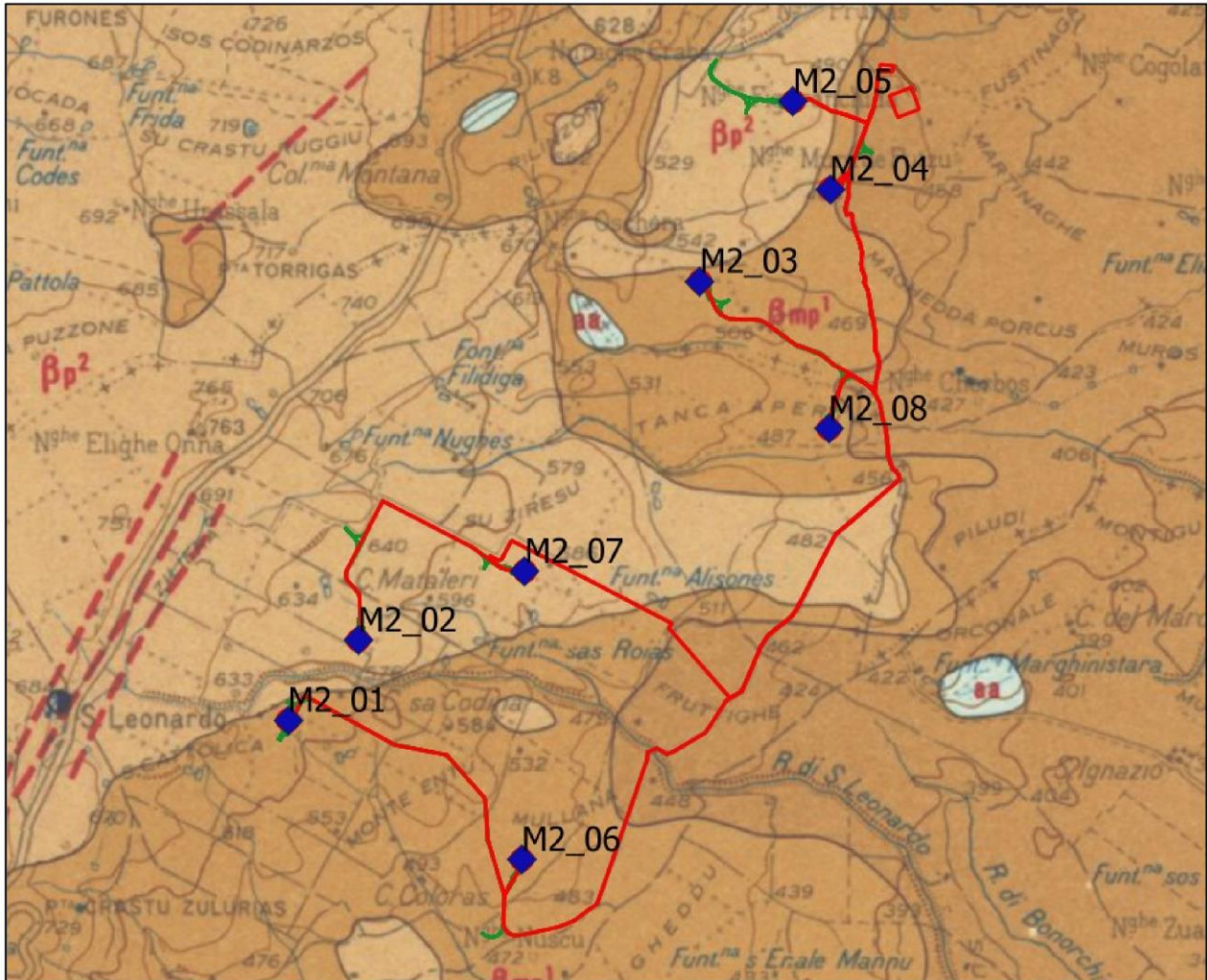


Figura 5.6 - Stralcio carta geologica d'Italia, foglio 205-206 "Capo Mannu-Macomer"; (fonte CartoWeb (isprambiente.it)). Caviddotti MT in rosso, caviddotto AT in marrone

Tali carte geologiche, ad ampia scala, non tengono conto di eventuali coperture e orizzonti colluviali, che localmente possono avere spessore cospicuo e che possono avere una certa importanza per la realizzazione delle strutture di fondazione. Dalle cartografie non si evince inoltre lo stato di alterazione/fratturazione delle serie effusive.

Il maggior dettaglio delle conoscenze geologiche dell'area proviene dai tematismi digitalizzati disponibili nei database geotopografici della Regione Sardegna, che rende disponibili in formato vettoriale i tematismi litologici alla scala 1:50.000.

Tutta l'area di impianto ricade nell'Unità nell'Unità dei Basalti dei Plateau e quasi totalmente nella Subunità di Funtana di Pedru Oe (BASALTI DELLA CAMPEDA-PLANARGIA): basalti debolmente alcalini e trachibasalti, a grana minuta, porfirici per fenocristalli di Plagioclasio, Olivina, Pirosseno; in estese colate. Tutte le WTG ricadono in questa Subunità, eccettuata la M2_05, che ricade nella Subunità di Sindia (BASALTI DELLA CAMPEDA-PLANARGIA): Basalti debolmente alcalini olocristallini, porfirici per fenocristalli di Olivina, Plagioclasio, e rari xenocristalli quarzosi; in colate. Presenti inoltre trachibasalti, trachibasalti debolmente alcalini, da olocristallini ad ipocristallini.

Più a est dell'area di impianto affiorano i terreni della Subunità di Dualchi (BASALTI DELLA CAMPEDA-PLANARGIA): Andesiti basaltiche subalcaline, porfiriche per fenocristalli di Plagioclasio, Clinopirosseno, Ortopirosseno, Olivina; in estesi espandimenti. Trachibasalti e basalti debolmente alcalini, porfirici per fenocristalli di Plagioclasio, Clinopirosseno, Olivina.

Sono anche presenti affioramenti, poco estesi, dell'UNITÀ DI NURAGHE GENNA UDA: andesiti basaltiche subalcaline (Genna Uda, M.te Urtigu, N.ghe Aranzola e N.ghe Tradori). Plio-Pleistocene.

I terreni più recenti sono rappresentati dai depositi delle coltri eluvio-colluviali: detriti immersi in matrice fine, talora con intercalazioni di suoli più o meno evoluti, arricchiti in frazione organica. OLOCENE.

Di seguito si riportano gli stralci elaborati in ambiente GIS della carta geologica costruita con i tematismi della Regione Sardegna.

Nelle figure le sigle si riferiscono alle seguenti Unità o Subunità: b2 Coltri eluvio-colluviali

BPL2 Subunità di Dualchi (BASALTI DELLA CAMPEDA-PLANARGIA): Andesiti basaltiche subalcaline, porfiriche;

BPL3 Subunità di Funtana di Pedru Oe (BASALTI DELLA CAMPEDA- PLANARGIA): basalti debolmente alcalini e trachibasalti, a grana minuta, porfirici;

BPL4 Subunità di Sindia (BASALTI DELLA CAMPEDA-PLANARGIA): Basalti debolmente alcalini olocristallini, porfirici;

GUD UNITÀ DI NURAGHE GENNA UDA (APPARATO VULCANICO DEL MONTIFERRO): andesiti basaltiche subalcaline

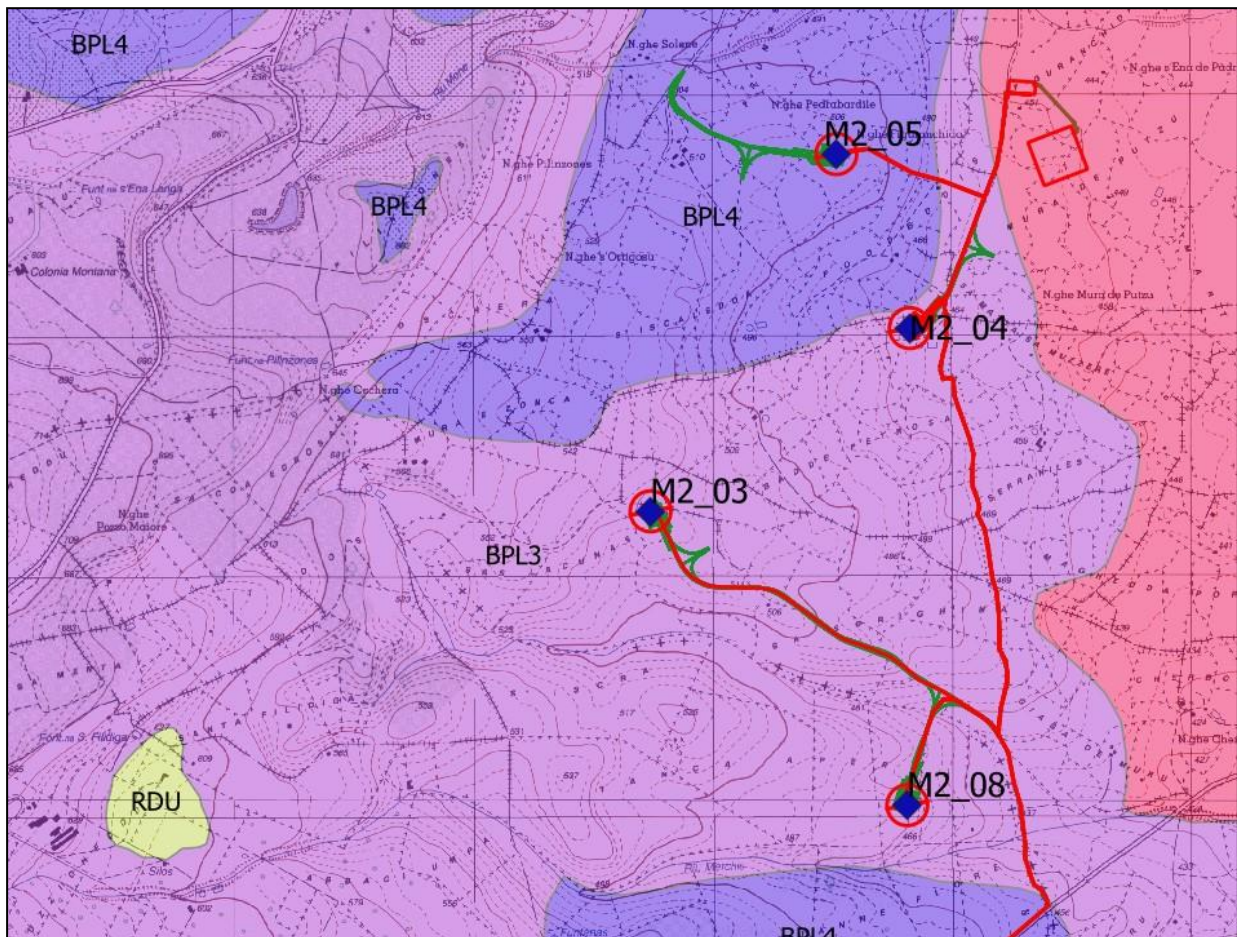


Figura 5.7 - Carta Litologica: Subunità di Funtana di Pedru Oe (BPL3) e Subunità di Sindia (BPL4). Fonte SITR Sardegna ed elaborazione in ambiente GIS

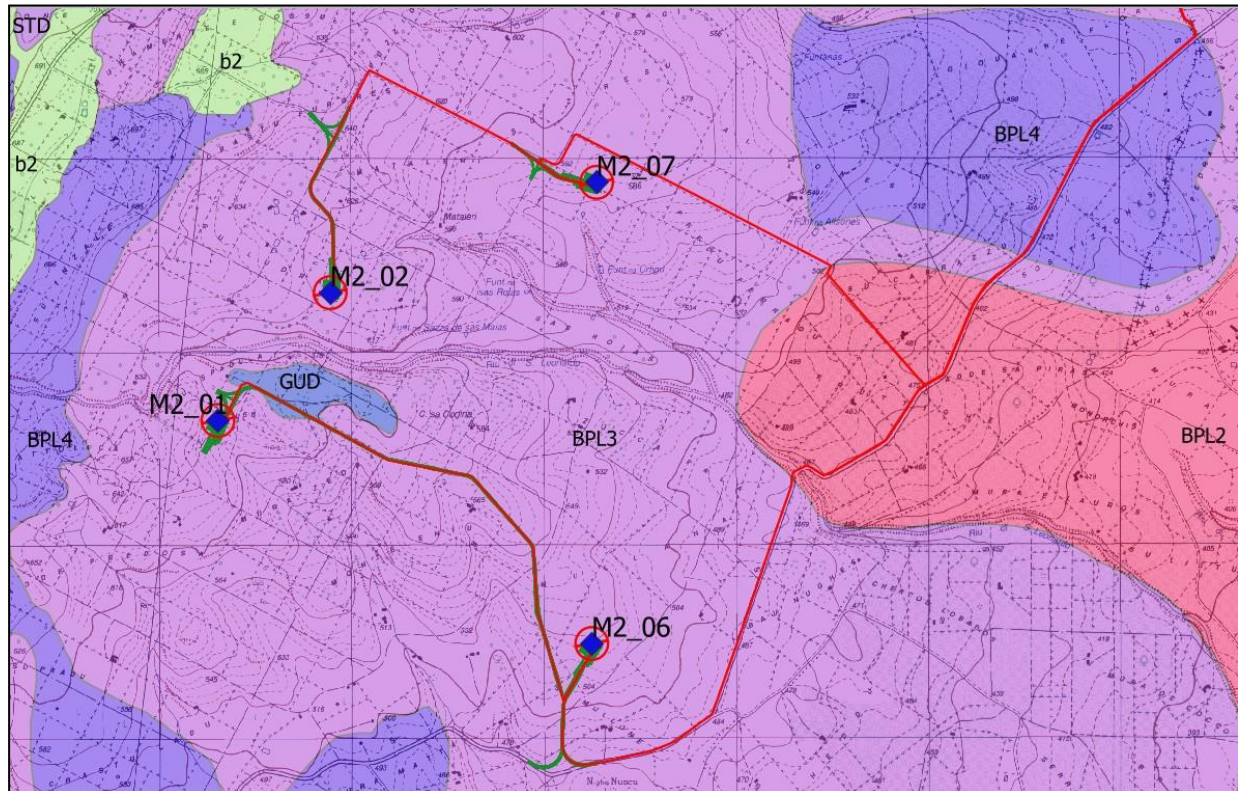


Figura 5.8 - Subunità di Funtana di Pedru Oe (BPL3), Subunità di Sindia (BPL4), depositi eluvio-colluviali (b2) e Unità di Nuraghe Genna Uda. Fonte SITR Sardegna ed elaborazione in ambiente GIS.



Figura 5.9 - Basalti-trachibasalti della Subunità di Funtana di Pedro Oe, qui in parte fortemente vescicolati; circa 700 m dalla WTG M2_06.



Figura 5.10 - Basalti-trachibasalti della Subunità di Funtana di Pedro Oe, qui in parte molto fratturati, con fratturazione irregolare a circa 700 m dalla WTG M2_06.



Figura 5.11 - Trachibasalti della Subunità di Funtana di Pedro Oe, molto fratturati, parzialmente alterati, con fratturazione irregolare, posti a circa 490 m dalla WTG M2_08



Figura 12 - Suolo rosso piuttosto evoluto su *parental material* basaltico a circa 550 m dalla WTG M2_02

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 sono presenti due grandi categorie di terreno differenti, una afferente alla grande famiglia delle rocce di origine vulcanica, ovvero i basalti, le daciti, le riodaciti, ecc., mentre la seconda categoria è quella dei terreni sedimentari olocenici, rappresentati dalle alluvioni fluviali e dai prodotti eluvio-colluviali.

le rocce vulcaniche sono inoltre interessate dai fenomeni di alterazione superficiale (weathering) e non si presentano quindi sempre nella forma litoide originaria; quando l'alterazione è sufficientemente profonda esse perdono l'aspetto di una roccia e si comportano geotecnicamente come una terra. Sarà precipuo compito delle indagini geognostiche verificare anche lo stato di alterazione dei litotipi vulcanici per verificarne il comportamento geotecnico. Di seguito viene riportata una tabella con i principali valori geotecnici per i terreni previsti. Sulla base della cartografia geologica solo la WTG M1-11 rientra in terreni eluvio-colluviali, ma si possono avere accumuli localizzati anche significativi anche in altri settori, in particolare nelle aree depresse o a bassa pendenza.

Tabella 8 – Parametri geotecnici di massima

Complesso	Descrizione	ϕ (°)	C (kPa)	c_u (kPa)	γ (t/m ³)	Modulo elastico E (Mpa)
Vulcanico integro/poco alterato	Basalti, andesiti, trachibasalti poco o nulla alterati, a consistenza litoide	36-42	100	250	2,7	95.000
Vulcanico molto alterato	Basalti, andesiti, trachibasalti molto alterati, privi di consistenza litoide	30-34	10	20	2,2	100
Coltri eluvio- colluviali	Coltri eterogranulari, molto variabili, mediamente limoso-sabbiose e in parte ghiaioso-argillose	22	5	12	1,7	9

Sulla scorta di quanto verificato in base alla cartografia ufficiale disponibile è possibile ipotizzare l'adozione di fondazioni superficiali per tutte le postazioni eoliche. Tale circostanza dovrà essere puntualmente verificata a seguito delle risultanze delle necessarie indagini in situ.

5.4. COMPORTAMENTO 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 situ, 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 stato 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 simili conducono solitamente a categoria di tipo B se con copertura rilevante oppure A se l'ammasso vulcanico è in affioramento o quasi; decisamente meno probabile che si possa ottenere una categoria "C". Tali asserzioni saranno verificate mediante opportune tecniche geofisiche.

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/3: Abitazioni di tipo economico;
- A/4: Abitazioni di tipo popolare;
- D/1: Opifici;
- D/10: Fabbricati per funzioni produttive connesse alle attività agricole.

Tra questi, in coerenza con i criteri adottati per le finalità di impatto acustico (cfr. Elaborato GRE.EEC.R.26.IT.W.15067.00.091.00), sono stati selezionati n. 14 ricettori assimilabili ad ambienti abitativi (categorie catastali A3 e A4).

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 abitativo più prossimo ID	Ricettore più prossimo UTM X	Ricettore più prossimo UTM Y	Ricettore abitativo più prossimo Distanza [m]
WTG1	61	472647	4447668	621
WTG2	58	473869	4448582	468
WTG3	24	477125	4451458	591
WTG4	24	477125	4451458	737
WTG5	16	476865	4452637	592
WTG6	69	475751	4446441	596
WTG7	49	475627	4448201	640
WTG8	41	478450	4449331	882

L'esame della Tabella 6.1 mette in evidenza come i ricettori abitativi considerati siano ubicati a distanze superiori a 470 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 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 Macomer 2 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 33kV di collegamento tra gli aerogeneratori e la stazione di utenza 33/150kV;
- la realizzazione della stazione elettrica di utenza 33/150kV.
- 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 33/150 KV

I lavori connessi all'approntamento della stazione di trasformazione 33/150kV 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 33/150 KV

I montaggi elettromeccanici della SSE di trasformazione 33/150 kV consisteranno nelle seguenti attività:

1. montaggi elettromeccanici:
 - montaggio passante cavo- aereo AT
 - montaggio interruttori AT;
 - montaggio sezionatori AT;
 - montaggio trasformatore 33/150kV;
 - 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.15067.00.067.01).

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 *Macomer 2* 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 0.05, avuto riguardo della presenza superficiale di suoli (anche evoluti) e dello stato di fratturazione e alterazione della facies basaltica affiorante e sub-affiorante (cfr. *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.

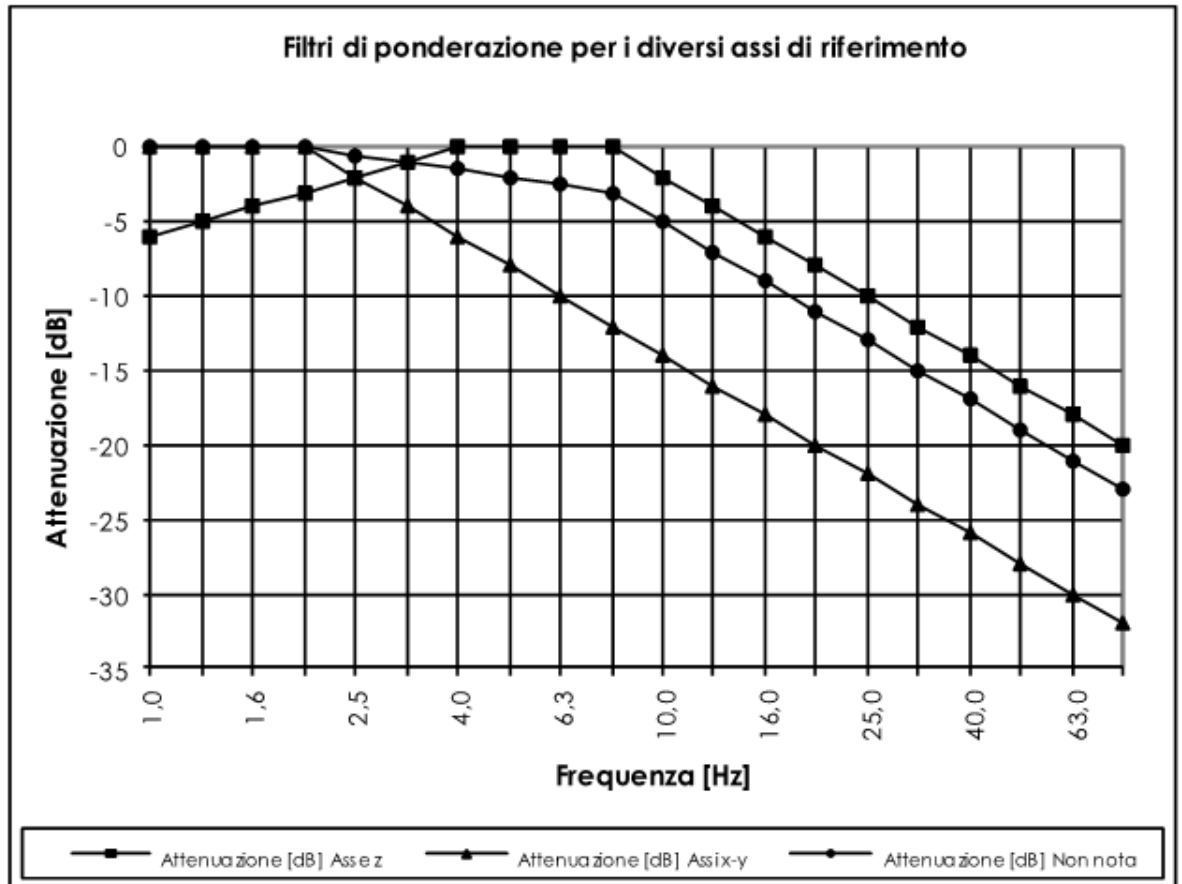


Figura 8.1 – Curve di ponderazione delle vibrazioni indicate dalla UNI 9614:2017 per i diversi assi di riferimento

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

In Tabella 3 si riportano, inoltre, alcuni dati sperimentali relativi alla componente verticale delle vibrazioni generate da un martello demolitore idraulico, tratti da studio previsionale analogo. I dati dello spettro, riferiti ad una distanza dalla sorgente pari a 5 metri ed espressi in dB, sono stati convertiti in valori di accelerazione in mm/s² (cfr. par. 2.3).

Tabella 3 - Spettro del livello vibrazionale afferente alla componente verticale relativo ad un martello demolitore idraulico (misura a distanza di 5 metri dalla sorgente)

Frequenza centrale [Hz]	L [dB]	A [m/s^2]	A [mm/s^2]
1	68	0,0025	2,51
1,25	68	0,0025	2,51
1,6	70	0,0032	3,16
2	71	0,0035	3,55
2,5	72	0,0040	3,98
3,15	77	0,0071	7,08
4	77	0,0071	7,08
5	81	0,0112	11,22
6,3	88	0,0251	25,12
8	99	0,0891	89,13
10	88	0,0251	25,12
12,5	85	0,0178	17,78
16	100	0,1000	100,00
20	95	0,0562	56,23
25	98	0,0794	79,43
31,5	101,5	0,1189	118,85
40	101	0,1122	112,20
50	102	0,1259	125,89
63	102	0,1259	125,89
80	101	0,1122	112,20

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 Escavatore con martellone 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 conservativamente la propagazione delle vibrazioni entro un orizzonte superficiale omogeneo di terreno contraddistinto dalla presenza superficiale di suoli di copertura su un substrato lapideo composto da vulcaniti aventi una velocità stimata delle onde R pari a:

$$V_R = 3500 \text{ m/s}$$

come desunta dalla Tabella 8.1 in relazione alla categoria delle rocce compatte.

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 8.4.

Tabella 8.4 – 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: vulcaniti
Realizzazione fondazioni	350
Realizzazione strade e approntamento stazione elettrica	130
Realizzazione cavidotti	10

Dall'esame dei risultati riportati in *Tabella 8.4* si evince come le lavorazioni potenzialmente più critiche siano riferibili alla realizzazione delle opere di fondazione degli aerogeneratori, dovendosi ragionevolmente prevedere l'ausilio di un martello demolitore per l'escavazione su roccia. Per tali lavorazioni, le ampiezze delle aree interessate da un impatto vibrometrico potenzialmente disturbante per gli occupanti edifici residenziali sono state stimate in circa 350 metri. Peraltro, poiché nell'area di intervento i più prossimi ricettori abitativi si trovano a distanze ben superiori alle proposte installazioni eoliche (l'abitazione più vicina (ID 58) si posiziona a circa 470 m dal più vicino aerogeneratore), sussistono ampi margini di sicurezza per ritenere tale impatto non significativo.

D'altro canto, le opere lineari con sviluppo maggiormente esteso, riferibili alla costruzione dei cavidotti MT, interessando i primi orizzonti di terreno più teneri, potranno essere realizzati con l'impiego di escavatori meccanici, determinando un impatto vibrazionale scarsamente 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 vibratorii 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 similari 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 dalla presenza di vulcaniti, 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 8.5 - 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	Suoli di copertura /Vulcaniti
Fattore di perdita del substrato	0,05
Velocità di propagazione [m/s]	3500
Densità [t/m ³]	2,0
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 8.6 - 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 8.6, 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.

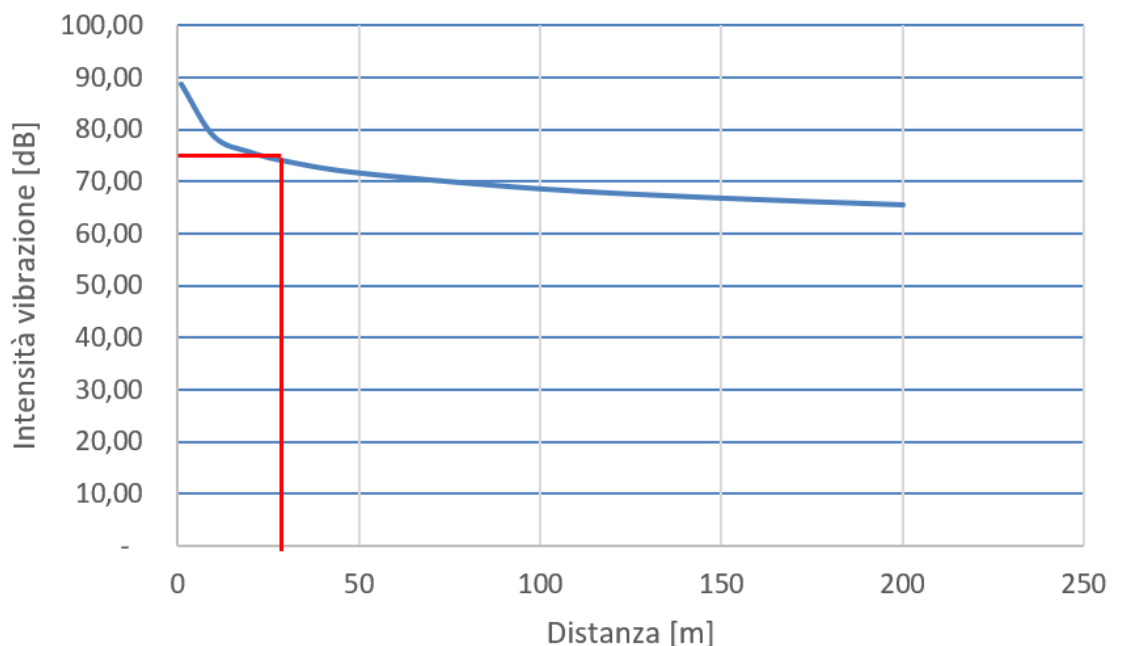


Figura 8.2 - Decadimento dell'intensità vibrazionale lungo l'asse z rispetto alla distanza dalla sorgente con evidenza della soglia di 74 dB suggerita dalla UNI9614 per le "abitazioni notte", rispettata ad una distanza di circa 30 m

Come evidenziato in precedenza i valori soglia raccomandati per le abitazioni di notte sono



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15067.00.126.00

PAGE

48 di/of 55

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.

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 "Macomer 2", 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 opere di fondazione degli aerogeneratori, dovendosi prevedere l'impiego di importanti sorgenti vibrazionali (martello demolitore idraulico). Per tali lavorazioni, le ampiezze delle aree interessate da un impatto vibrometrico potenzialmente disturbante per gli occupanti edifici residenziali sono state stimate circa 350 metri. Peraltro, poiché nell'area di intervento i più prossimi ricettori abitativi si trovano a distanze ben superiori dalle proposte installazioni eoliche, sussistono ampi margini di sicurezza per ritenere tale impatto non significativo.

D'altro canto, le opere lineari con sviluppo maggiormente esteso, riferibili alla costruzione dei cavidotti 33kV, interessando i primi orizzonti di suolo o roccia alterata, potranno auspicabilmente essere realizzati con l'impiego di escavatori meccanici, determinando un impatto vibrazionale scarsamente significativo anche per gli edifici più prossimi. Le distanze di conformità delle vibrazioni per tale lavorazione, infatti, possono indicativamente assumersi pari a 10 metri, ossia sostanzialmente coincidenti con le aree occupate dal 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.



Green Power

Engineering & Construction



CONSULENZA
E PROGETTI

GRE CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15067.00.126.00

PAGE

52 di/of 55

12. APPENDICE: TABELLE DI CALCOLO

Contesto geologico
Lavorazione

Vulcaniti
Realizzazione fondazioni

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

Macchinari f [Hz]	Martello idraulico a(d0,f) [mm/s ²]	Escav. Cingolato a(d0,f) [mm/s ²]	Camion da cantiere a(d0,f) [mm/s ²]	Pala gommata a(d0,f) [mm/s ²]	Martello idraulico a(d,f) [mm/s ²]	Escav. Cingolato a(d,f) [mm/s ²]	Camion da cantiere a(d,f) [mm/s ²]	Pala gommata a(d,f) [mm/s ²]	Spettro combinato (A _{op,r,d}) [mm/s ²]	Spettro combinato L(a,w,f) [dB]	Ponderazione [dB]	Livello finale ponderato [dB]
1	1,77	0,02	0	0	2,91E-01	3,66E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,91E-01	49	0,00	49
1,25	1,77	0,01	0	0	2,88E-01	2,29E-03	0,00E+00	0,00E+00	2,88E-01	49	0,00	49
1,6	2,23	0,01	0	0	3,59E-01	2,26E-03	0,00E+00	0,00E+00	3,59E-01	51	0,00	51
2	2,50	0,01	0	0,41	3,97E-01	1,26E-03	0,00E+00	6,42E-02	4,02E-01	52	0,00	52
2,5	2,80	0,01	0	0,41	4,38E-01	2,20E-03	0,00E+00	6,36E-02	4,43E-01	53	-0,50	52
3,15	4,97	0,02	0	0,41	7,63E-01	2,71E-03	0,00E+00	5,96E-02	7,65E-01	58	-1,50	56
4	4,96	0,02	0	0,48	7,42E-01	2,63E-03	0,00E+00	6,97E-02	7,45E-01	57	-2,00	55
5	7,84	0,02	0,15	0,52	1,14E+00	2,55E-03	2,18E-02	6,92E-02	1,14E+00	61	-2,50	59
6,3	17,50	0,02	0	0,5	2,44E+00	2,74E-03	0,00E+00	4,95E-02	2,44E+00	68	-2,00	66
8	61,85	0,02	0,12	0,76	8,19E+00	2,59E-03	1,59E-02	1,95E-02	8,19E+00	78	-3,00	75
10	17,35	0,07	0,15	1,1	2,16E+00	8,60E-03	1,87E-02	1,09E-01	2,16E+00	67	-5,00	62
12,5	12,21	0,14	0,29	1,25	1,41E+00	1,58E-02	3,35E-02	1,46E-01	1,42E+00	63	-7,00	56
16	68,11	0,68	0,5	2	7,06E+00	7,06E-02	5,19E-02	4,23E-02	7,07E+00	77	-9,00	68
20	37,94	0,85	1,67	3	3,48E+00	7,80E-02	1,53E-01	1,59E-01	3,49E+00	71	-11,00	60
25	52,97	1,19	1,85	17	4,17E+00	9,35E-02	1,46E-01	5,71E-01	4,22E+00	73	-13,00	60
31,5	78,06	0,83	2,5	17	5,05E+00	5,34E-02	1,62E-01	2,65E-01	5,06E+00	74	-15,00	59
40	72,24	0,81	6	7,8	3,60E+00	4,04E-02	2,99E-01	1,45E-01	3,63E+00	71	-17,00	54
50	79,17	1,77	5,5	15	2,93E+00	6,51E-02	2,02E-01	2,26E-01	2,93E+00	69	-19,00	50
63	76,80	3,06	5,2	14	1,90E+00	7,56E-02	1,29E-01	2,27E-01	1,92E+00	66	-21,00	45
80	65,77	0,52	4	7,8	9,68E-01	7,69E-03	5,88E-02	1,77E-01	9,85E-01	60	-23,00	37
										83		Livello totale (LW)
												77,05

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	350	m
(d-d0)	340	m
h	0,05	adm.
c	3500	m/s
n	0,5	adm.

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

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

Luogo	Aw [m/s ²]	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

Vulcaniti
Realizzazione viabilità

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

Macchinari	Rullo compatatore a(d0,f) [mm/s²]	Escav. Cingolato a(d0,f) [mm/s²]	Camion da cantiere a(d0,f) [mm/s²]	Pala gommata a(d0,f) [mm/s²]	Rullo vibrante a(d,f) [mm/s²]	Escav. Cingolato a(d,f) [mm/s²]	Camion da cantiere a(d,f) [mm/s²]	Pala gommata a(d,f) [mm/s²]	Spettro combinato (A _{tot} ,f) [mm/s²]	Spettro combinato (L _{p,w,f}) [dB]	Ponderazione [dB]	Livello finale ponderato [dB]
1	0	0,02	0	0	0,00E+00	6,12E-03	0,00E+00	0,00E+00	6,12E-03	16	0,00	16
1,25	0	0,01	0	0	0,00E+00	3,85E-03	0,00E+00	0,00E+00	3,85E-03	12	0,00	12
1,6	0	0,01	0	0	0,00E+00	3,85E-03	0,00E+00	0,00E+00	3,85E-03	12	0,00	12
2	1,6	0,01	0	0,41	4,34E-01	2,14E-03	0,00E+00	1,12E-01	4,48E-01	53	0,00	53
2,5	1,7	0,01	0	0,41	4,59E-01	3,79E-03	0,00E+00	1,12E-01	4,72E-01	53	-0,50	53
3,15	2	0,02	0	0,41	5,36E-01	4,73E-03	0,00E+00	1,11E-01	5,48E-01	55	-1,50	53
4	0,85	0,02	0	0,48	2,26E-01	4,67E-03	0,00E+00	1,32E-01	2,62E-01	48	-2,00	46
5	5,8	0,02	0,15	0,52	1,52E+00	4,61E-03	3,94E-02	1,35E-01	1,53E+00	64	-2,50	61
6,3	11	0,02	0	0,5	2,85E+00	5,09E-03	0,00E+00	1,23E-01	2,85E+00	69	-2,00	67
8	18	0,02	0,12	0,76	4,58E+00	4,98E-03	3,05E-02	1,24E-01	4,58E+00	73	-3,00	70
10	20	0,07	0,15	1,1	4,98E+00	3,72E-02	3,74E-02	2,46E-01	4,98E+00	74	-5,00	69
12,5	40	0,14	0,29	1,25	9,70E+00	3,32E-02	7,05E-02	2,25E-01	9,70E+00	80	-7,00	73
16	20	0,68	0,5	2	4,67E+00	1,59E-01	1,17E-01	4,47E-01	4,69E+00	73	-9,00	64
20	4	0,85	1,67	3	8,94E-01	1,90E-01	3,73E-01	7,97E-01	1,27E+00	62	-11,00	51
25	12	1,19	1,85	3	2,54E+00	2,51E-01	3,92E-01	4,14E-00	4,88E+00	74	-13,00	61
31,5	7	0,83	2,5	17	1,38E+00	1,63E-01	4,94E-01	4,37E-00	4,62E+00	73	-15,00	58
40	3,7	0,81	6	7,8	6,67E-01	1,46E-01	1,08E+00	2,08E+00	2,44E+00	68	-17,00	51
50	5	1,77	5,5	15	5,99E-01	2,87E-01	8,90E-01	4,00E+00	4,15E+00	72	-19,00	53
63	4	3,06	5,2	14	7,04E-01	4,30E-01	7,32E-01	3,68E+00	3,84E+00	67	-21,00	51
80	4	0,52	4	7,8	4,69E-01	6,12E-02	4,69E-01	2,07E+00	2,18E+00	62	-23,00	44
										84		Livello totale (LW) 76,95

Parametri	Valore	U.M.
d	10	m
d	130	m
(g-t0)	120	m
t1	0,05	acim.
c	3500	m/s
n	0,5	acim.

$$a(d, f) = a(d_0, f) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n \cdot e^{-2 \cdot \pi \cdot f \cdot t_1 / c} \cdot (d - d_0)$$

Tabella 2.4 - 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 (festivo)	5,40E-03	75
Scuole	5,40E-03	75
Uffici	1,44E-02	83
Fabbriche	2,88E-02	89

Contesto geologico
Lavorazione

Vulcaniti
Realizzazione cavidotti

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

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

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	10	m
(d-d0)	0	m
η	0,05	adim.
c	3500	m/s
n	0,5	adim.

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

Tab. 2.4 - 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