

ESCALA Wind Srl

Parco Eolico ESCALA sito nel Comune di Escalaplano

Analisi costi-benefici

Settembre 2023

Regione Autonoma
della Sardegna



Comune di Escalaplano



Committente:

ESCALA Wind Srl

ESCALA Wind Srl

Via Sardegna, 40

00187 Roma

P.IVA/C.F. 16181131000

Titolo del Progetto:

Parco Eolico ESCALA sito nel Comune di Escalaplano

Documento:

Analisi vibrazioni

N° Documento:

IT-VesEsc-CLP-SPE-TR-07

A cura di:

Ing. Giuseppe Frongia



I.A.T. Consulenza e progetti S.r.l. Unipersonale

Sede Legale: Via Giua s.n.c. - Z.I. CACIP - 09122

Cagliari (I)

C.C.I.A.A. Cagliari n. 221254 - P.I.

02748010929

Tel. /Fax +39.070.658297

Email: info@iatprogetti.it

PEC iat@pec.it

Web: www.iatprogetti.it

Rev	Data Revisione	Descrizione	Redatto	Controllato	Approvato
0	Settembre 2023	Revisione per controdeduzioni alla richiesta di integrazioni del MASE	IAT	GF	GF

Sommario

1	Premessa	5
2	Normativa tecnica applicabile.....	5
2.1	Premessa	5
2.2	Norma ISO2631-2	6
2.3	Norma UNI 9614:2017	8
2.4	Norma UNI 9916:2014.....	9
2.5	Grandezze di riferimento e limiti applicabili al caso specifico	10
2.5.1	Valutazione del disturbo.....	10
2.5.2	Danni architettonici	12
2.5.3	Deroghe	13
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.....	17
5	Inquadramento geologico.....	25
5.1	Inquadramento geologico di dettaglio	25
5.2	Assetto litostratigrafico locale.....	27
5.3	Comportamento sismico del sottosuolo	29
6	Individuazione dei potenziali ricettori	30
7	Descrizione sommaria delle principali lavorazioni di cantiere	33
7.1	Opere civili del parco eolico	33
7.2	Fornitura e montaggio degli aerogeneratori.....	34
7.3	Opere per la realizzazione delle linee elettriche MT.....	34
7.4	Opere civili per l'allestimento stazione di utenza MT/AT	34
7.5	Montaggi elettromeccanici della stazione di utenza MT/AT.....	34
7.6	Gestione delle terre e delle rocce da scavo.....	35
8	Analisi previsionale dei livelli di vibrazione in fase di cantiere.....	35
8.1	Il metodo previsionale	35
8.2	Caratterizzazione delle sorgenti	38
8.3	Scenari previsionali di calcolo dei livelli vibrazionali	39
8.4	Stima dei livelli vibrazionali ed analisi dei risultati	39
9	Analisi dei livelli vibrazionali in fase di esercizio	40
10	Analisi dei livelli vibrazionali in fase di dismissione.....	43

11 Considerazioni conclusive 43

12 Bibliografia..... 44

Appendice: Tabelle di calcolo 45

1 Premessa

La realizzazione del progetto di impianto eolico denominato *Escala*, nel territorio di Escalaplano, 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 vibratori 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 "Escala", 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 (esprese in via diretta oppure implicita 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 se stessa (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 e 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

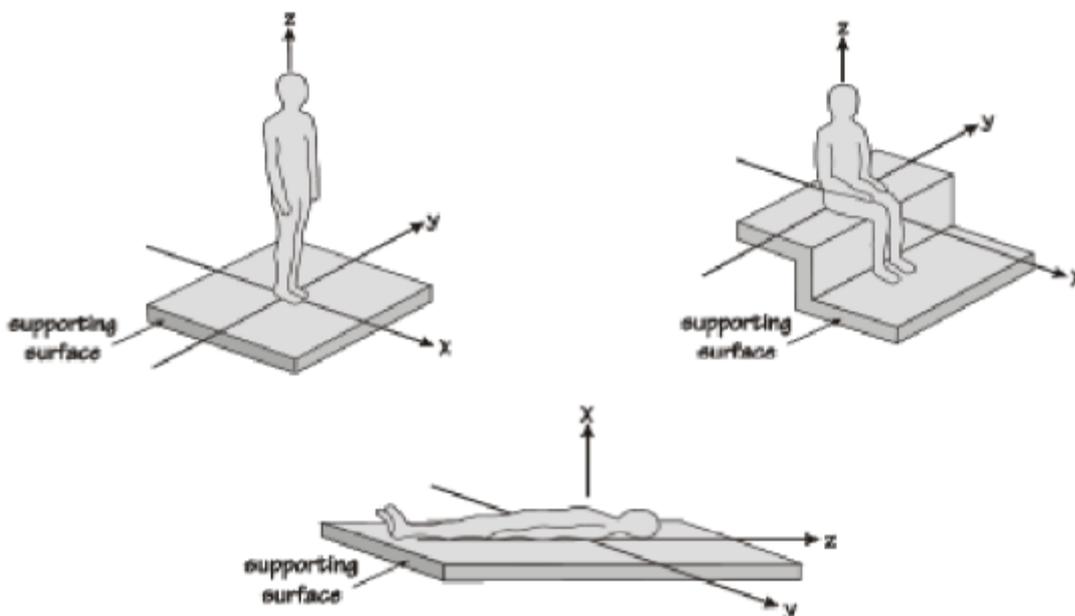


Figura 2.1 - Rappresentazione delle tre componenti in funzione della posizione del corpo

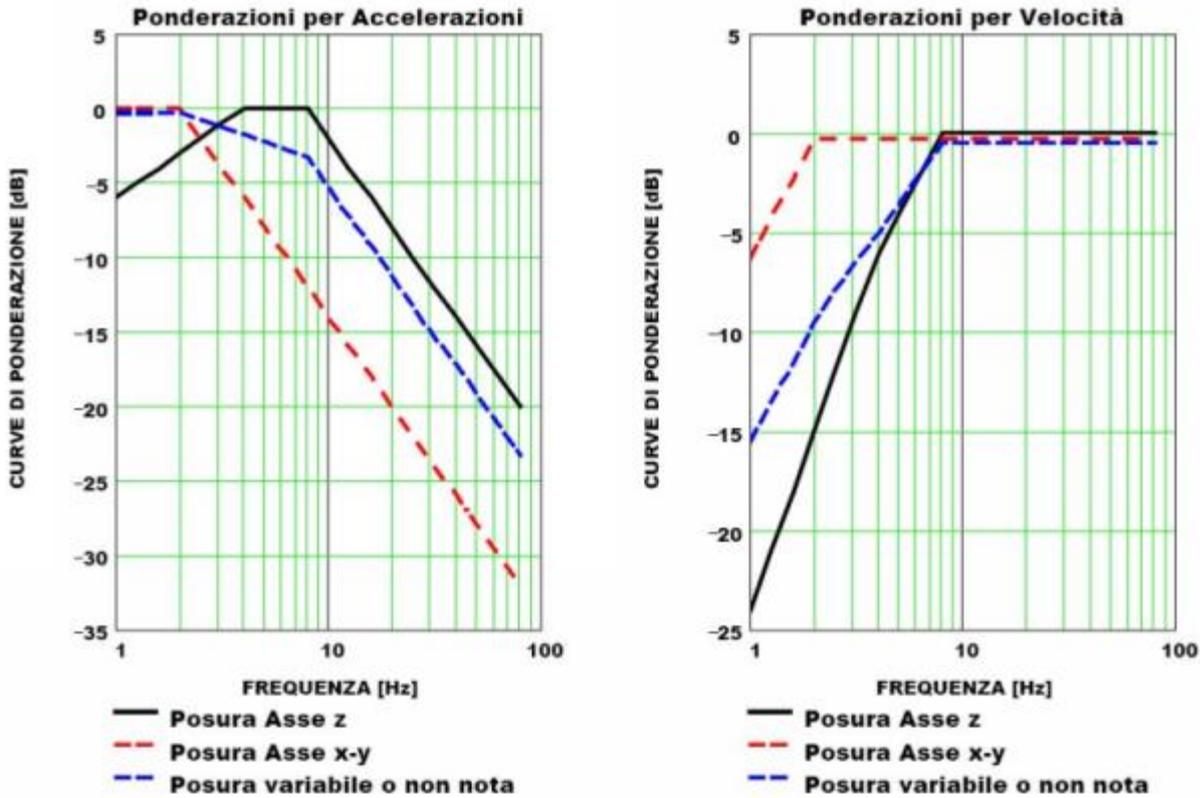


Figura 2.2 – Curve di ponderazione (ISO) per vibrazioni lungo gli assi verticali, orizzontali e per postura non nota nell’intervallo di frequenze 1÷80 Hz

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.

Addirittura, 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'assettamento 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 il suo caso. Per l'applicazione piuttosto complessa della DIN, la UNI 9916 contiene una chiara e dettagliata appendice informativa sul trattamento dei dati e dei segnali. Sempre sulla base dei problemi che si sono manifestati nel passato, la nuova edizione indica con maggiore chiarezza e dettaglio il tipo di strumentazione da utilizzare per le misurazioni, aprendo

alla strumentazione “moderna” quali gli accelerometri MEMS e le schede di acquisizione per computer, non dimenticando di dettagliare i metodi di calcolo e filtraggio per l’ottenimento della velocità (parametro utilizzato per la valutazione della potenzialità di danno) a partire dalla misurazione dell’accelerazione. Metodo, questo, che è di gran lunga il più diffuso grazie alla forte diffusione degli accelerometri piezoelettrici. Tutti gli aspetti metrologici (*in primis* la taratura) sono stati rivisti e talora inseriti ex novo in maniera che le valutazioni possano essere inquadrare correttamente e uniformemente.

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

2.5 Grandezze di riferimento e limiti applicabili al caso specifico

2.5.1 Valutazione del disturbo

In accordo con la norma UNI 9614:2017 la valutazione del disturbo generato da una sorgente deve essere effettuata confrontando il parametro descrittore della vibrazione della sorgente con i limiti di riferimento indicati in Tabella 2-3.

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

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

dove a_0 è il valore dell’accelerazione di riferimento, pari a 10^{-6} m/s^2 (normativa ISO 1683).

Gli spettri di vibrazione, nel campo delle frequenze da 1 a 80 Hz, vengono rappresentati per terzi di ottava, con valori centrali di ottava indicati in Tabella 2-3.

Tabella 2-3 – Rappresentazione del campo di frequenza 1÷80 Hz per terzi di ottava

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

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

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

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

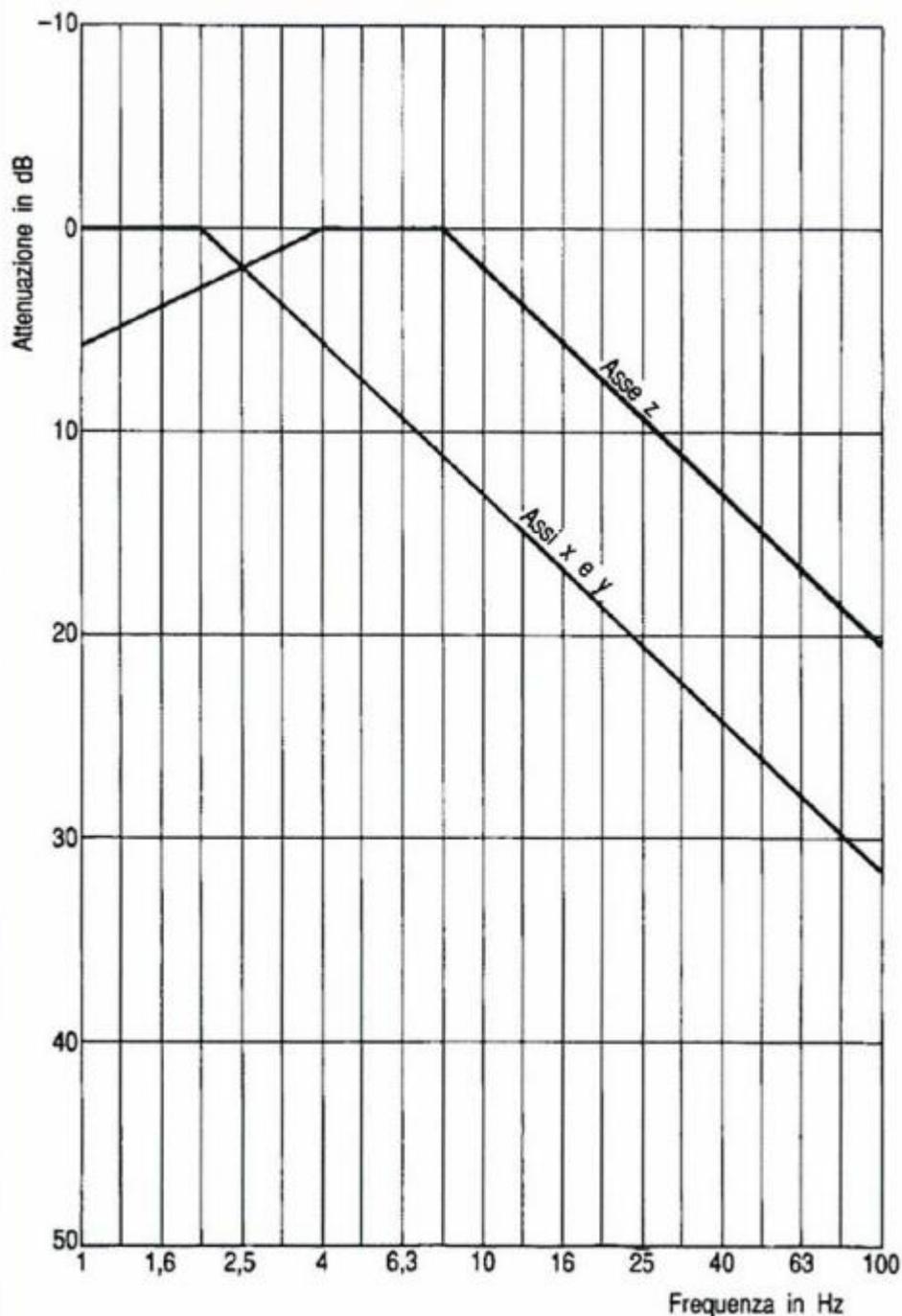


Figura 2.3 – Curve di ponderazione norma UNI 9614:2017

I limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente sono indicati in Tabella 2-4.

Tabella 2-4 - limiti di riferimento per la massima accelerazione ponderata della sorgente

Luogo	A_w [m/s ²]	L_w [dB]
Ospedali	2,00E-03	66
Asili e case di riposo	3,60E-03	71
Abitazioni (notte)	5,00E-03	74
Abitazioni (giorno)	7,20E-03	77

Abitazioni (festivi)	5,40E-03	75
Scuole	5,40E-03	75
Uffici	1,44E-02	83
Fabbriche	2,88E-02	89

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

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

2.5.2 Danni architettonici

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

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

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

I limiti contenuti nella Appendice D della UNI 9916 sono riportati nella Tabella seguente:

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 vibratorii

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:

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

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

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

dove

E = modulo di Young;

μ = modulo di taglio;

λ = costante di Lamé;

v = 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 propagantisì 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.

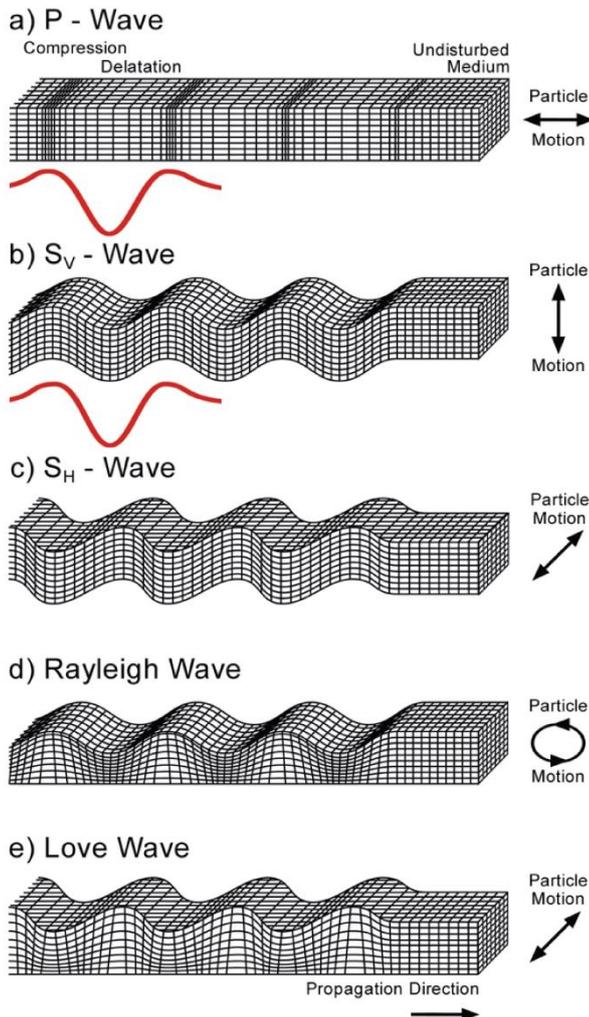


Figura 3.1 – Caratteristiche delle onde sismiche

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 sovrapponga l'arrivo dell'evento successivo.

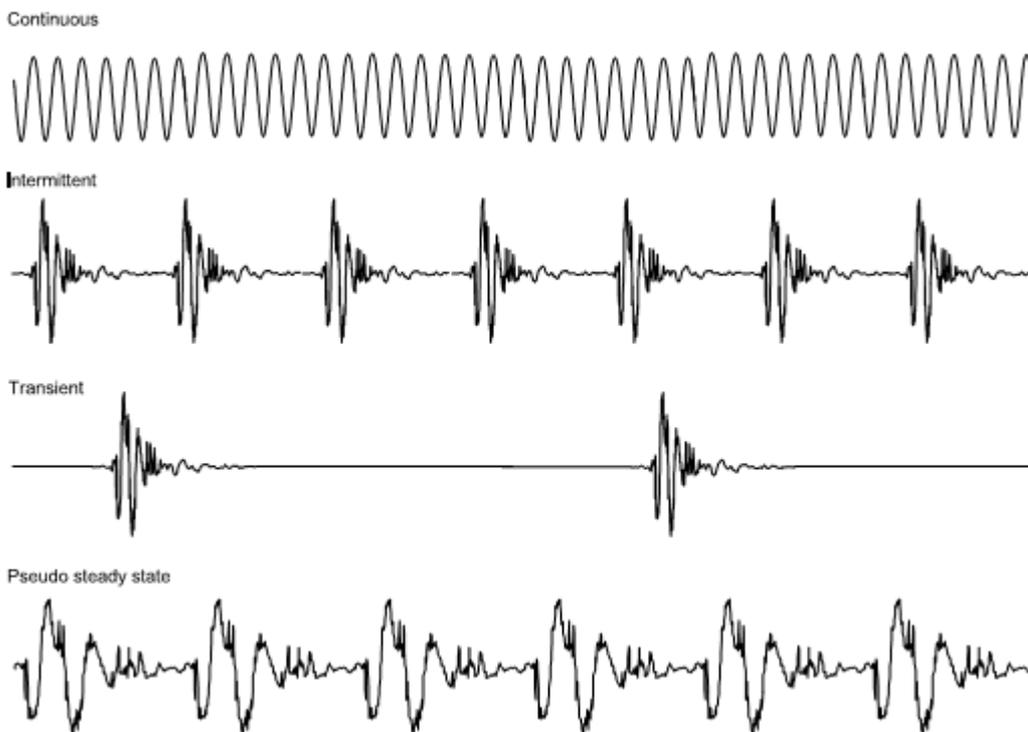


Figura 3.2 – Variazioni temporali delle vibrazioni

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 siano 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.

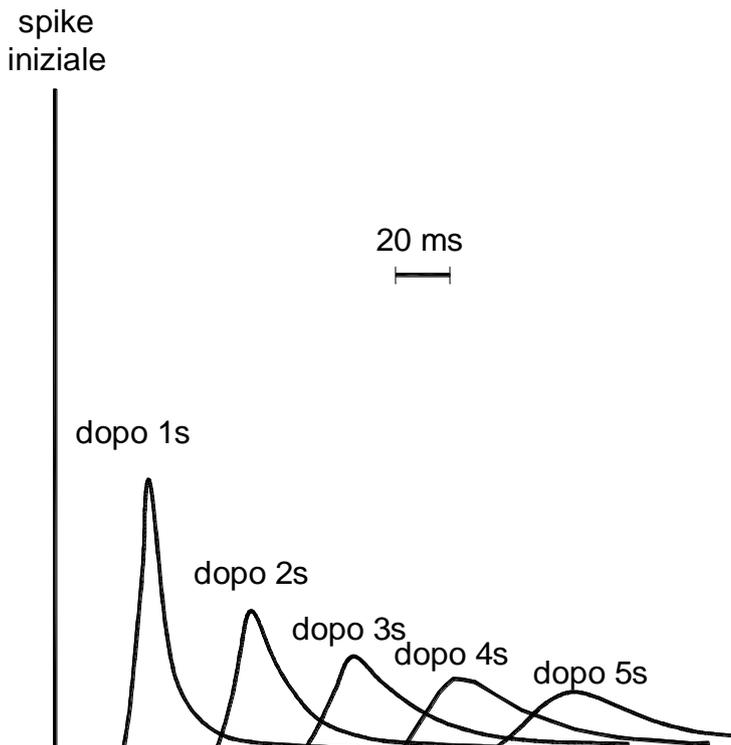


Figura 3.3 - Progressiva variazione della forma d'onda durante la propagazione a causa dell'effetto di attenuazione (Anstey, 1977)

4 Inquadramento territoriale

Il proposto parco eolico, ubicato nella provincia del Sud-Sardegna, ricade nella porzione settentrionale del territorio comunale di Escalaplano e all'interno dei confini della regione storica del *Sarcidano*.

Cartograficamente l'area del parco eolico è individuabile nella Carta Topografica dell'IGMI in scala 1:25000 Foglio 541, Sez. III – Escalaplano.

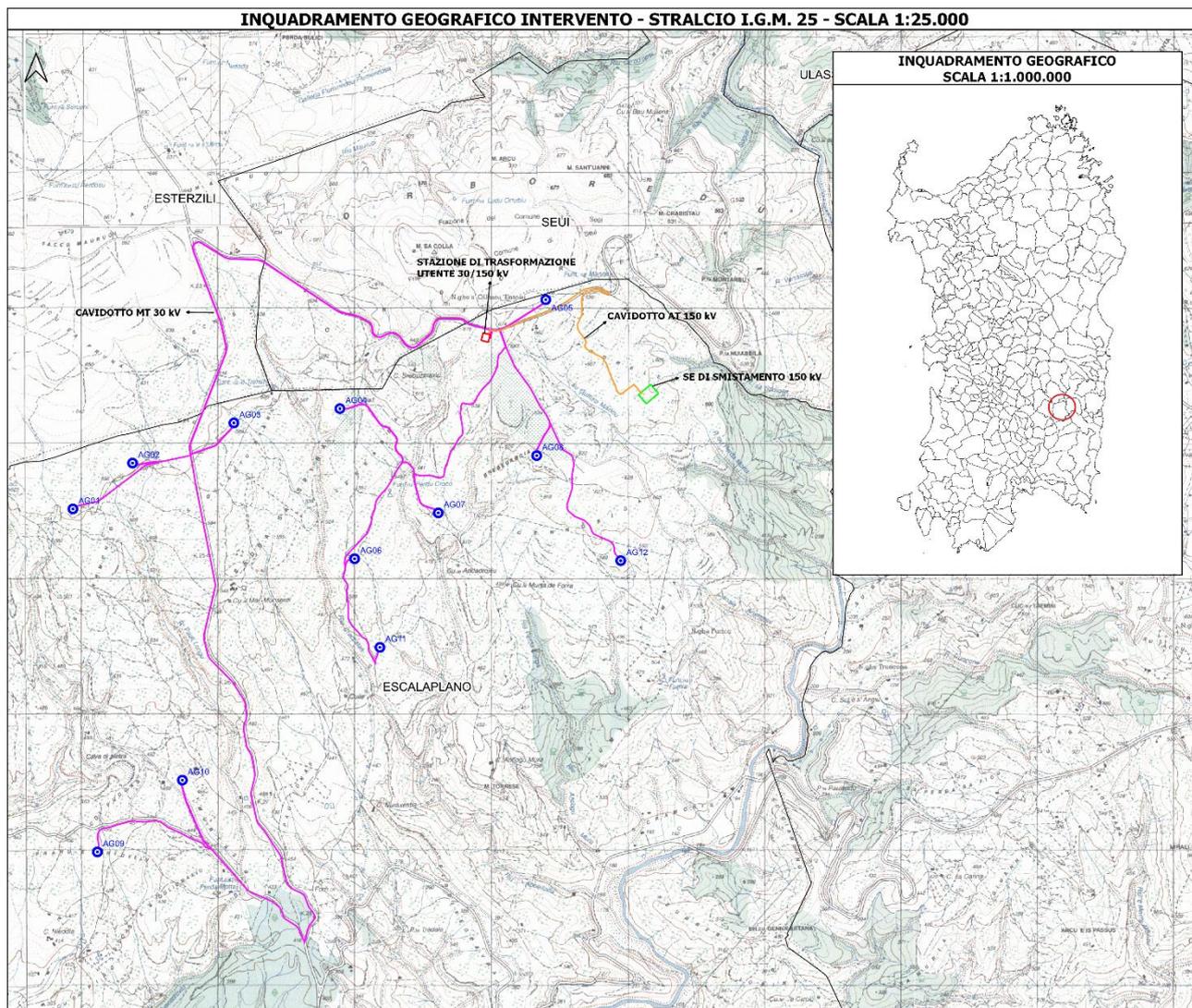


Figura 4.1 - Inquadramento geografico di intervento su IGMI 1:25000

Nella Carta Tecnica Regionale Numerica in scala 1:10000 alla sezione 541090 – Monte Torrese.

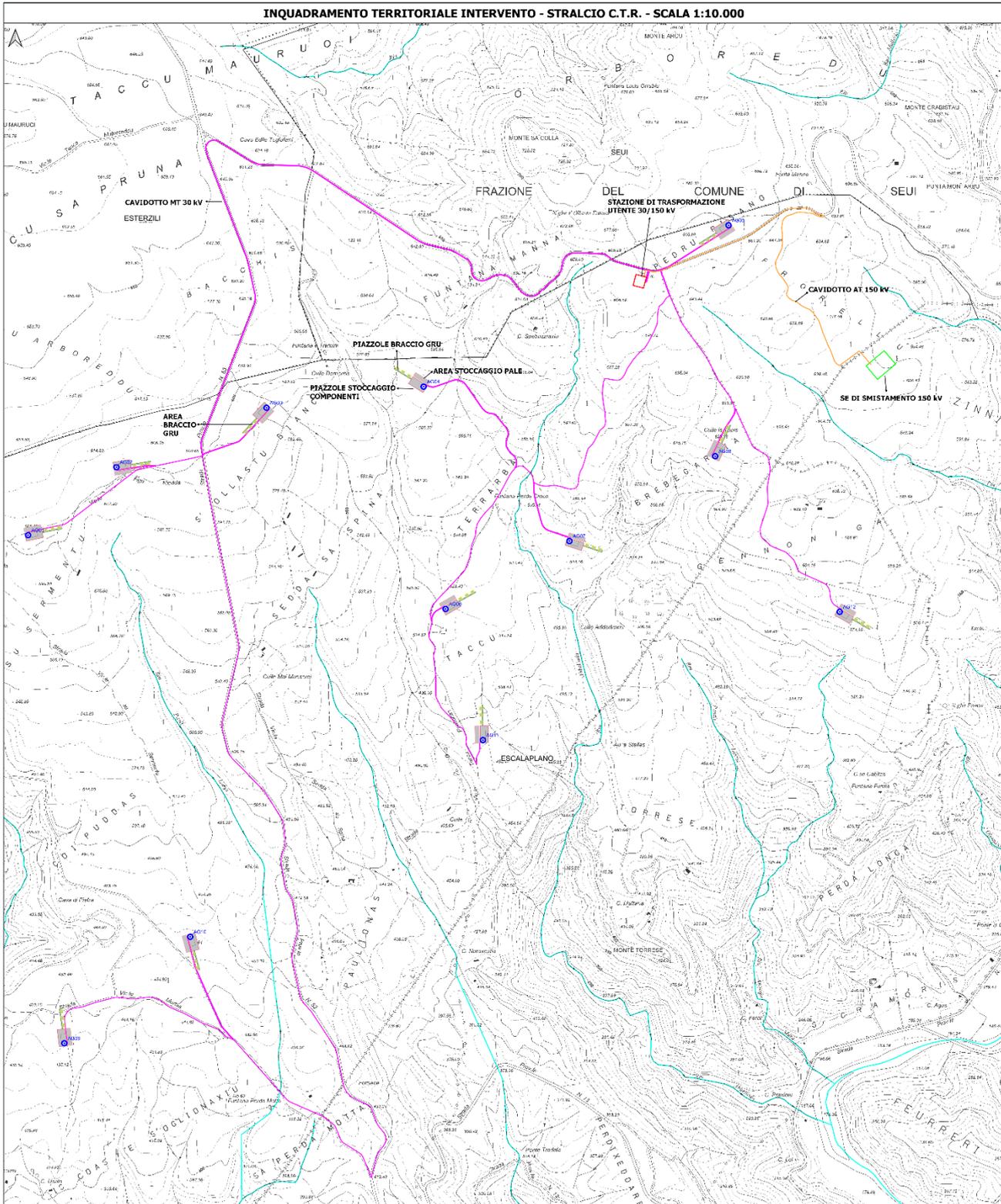


Figura 4.2 - Inquadramento geografico di intervento su CTR 1:10000

L'inquadramento delle postazioni eoliche nei luoghi di intervento, secondo la toponomastica locale, è riportato in Tabella 4-2.

Per quanto riguarda le opere di connessione, gli aerogeneratori saranno collegati tra loro attraverso cavidotto interrato in MT a 30 kV che si sviluppa in direzione nord nel territorio di Escalaplano e Esterzili, per poi proseguire in direzione sud-est nel territorio comunale di Seui e collegare il parco eolico alla stazione di trasformazione utente 30/150 kV di Escalaplano, situata in località *Pedru Pisano*. Questa sarà collegata con un cavo interrato a 150 kV ad una stazione di smistamento della Rete di Trasmissione Nazionale nel Comune di Escalaplano, presso la località *Prorello*, la quale sarà connessa in entra-esci alla linea aerea 150 kV "Goni – Ulassai", che rappresenta il punto di connessione dell'impianto alla RTN.

Il territorio di Escalaplano si estende all'interno della porzione sud-orientale della regione storica del *Sarcidano*, al confine con l'*Ogliastra*, in un'area di cerniera tra il complesso montuoso del *Gennargentu*, i rilievi del *Sarrabus* e l'area pianeggiante della *Trexenta*. All'interno del territorio della regione storica in esame sono presenti, oltre al comune di Escalaplano, altri dodici centri urbani: Seulo, Nuragus, Nurallao, Isili, Villanova Tulo, Sadali, Gergei, Escolca, Serri, Nurri, Esterzili, Orroli.

Il *Sarcidano* si caratterizza, morfologicamente, per la presenza di un territorio collinare regolare ed uniforme, in cui risaltano i profili "a mesa" dei numerosi altopiani basaltici.

L'ambito collinare si è evoluto su formazioni geologiche di natura sedimentaria stratificata in giaciture sub-orizzontali, prevalentemente costituite da formazioni clastiche di deposizione fluviale, o costituenti antichi depositi di versante ascrivibili alla Formazione di Ussana.

La zona in esame presenta la morfologia tipica dei Tacchi, testimoni di un vasto altopiano inciso dall'erosione e dislocato dalla tettonica. L'impianto si sviluppa ad un'altitudine variabile indicativamente nell'intervallo 441÷662 m s.l.m.

Il territorio ha una forte vocazione agropastorale esplicita sulle pendici collinari dal profilo regolare e sulle ampie vallate oggi spesso asciutte, che manifestano una dinamica lenta fortemente dipendente dalla pluviometria, intermittente ed irregolare. Le coperture forestali sono oggi estremamente frammentate e spesso confinate sui versanti più acclivi ed inaccessibili dove la configurazione morfologica limita l'uso agricolo, o sulle superfici strutturali rocciose delle giare e dei *plateaux*, dove appaiono fortemente semplificate e costituiscono pascoli arborati e sugherete aperte.

Con riferimento ai caratteri idrografici, il *Sarcidano* ricade all'interno di due bacini idrografici: quello del *Flumini Mannu* ad ovest e quello del *Flumendosa* ad est. L'area di progetto si trova nella porzione centrale del bacino idrografico del *Flumendosa* e, in parte, all'interno del bacino idrografico secondario denominato *Flumineddu*.

Il bacino idrografico del *Flumendosa* è caratterizzato da un'intensa idrografia, dovuta alle varie tipologie rocciose attraversate. Lungo la porzione centrale, i corsi d'acqua più importanti si sviluppano parallelamente alla linea di costa con andamento pressoché lineare. Gli affluenti drenanti i versanti est e ovest, si mantengono ortogonali alla linea di costa. Il *Flumendosa* ha origine nelle pendici meridionali ed orientali del *Massiccio del Gennargentu*, scavando gli scisti paleozoici e mettendo a nudo il granito in gole tortuose e molto profonde con un percorso assai angolato. Dopo circa 122 km sfocia in mare in prossimità di *Porto Corallo*, nel *Sarrabus*. Nel medio corso il fiume ha andamento regolare caratterizzato dalla presenza di un invaso, il *Lago del Medio Flumendosa*, localizzato a ovest e nord-ovest dell'area di impianto. Da questo invaso e da quello realizzato sul *Rio Mulargia*, affluente in destra del *Flumendosa*, le acque vengono convogliate nella Piana della *Trexenta* per l'irrigazione del *Campidano*.

Nel basso corso, a sud dell'area in esame, il fiume scorre con andamento nord-ovest sud-est e riceve in sinistra il suo maggiore affluente, il *Rio Flumineddu*. Il bacino idrografico secondario del rio citato si estende con una forma allungata in direzione nord-sud dal territorio comunale di Gairo sino alla porzione settentrionale di quello di Armungia. Comprende nella sua porzione sud-occidentale, in corrispondenza del territorio di Escalaplano la parte orientale dell'impianto, con 8 aerogeneratori su 12.

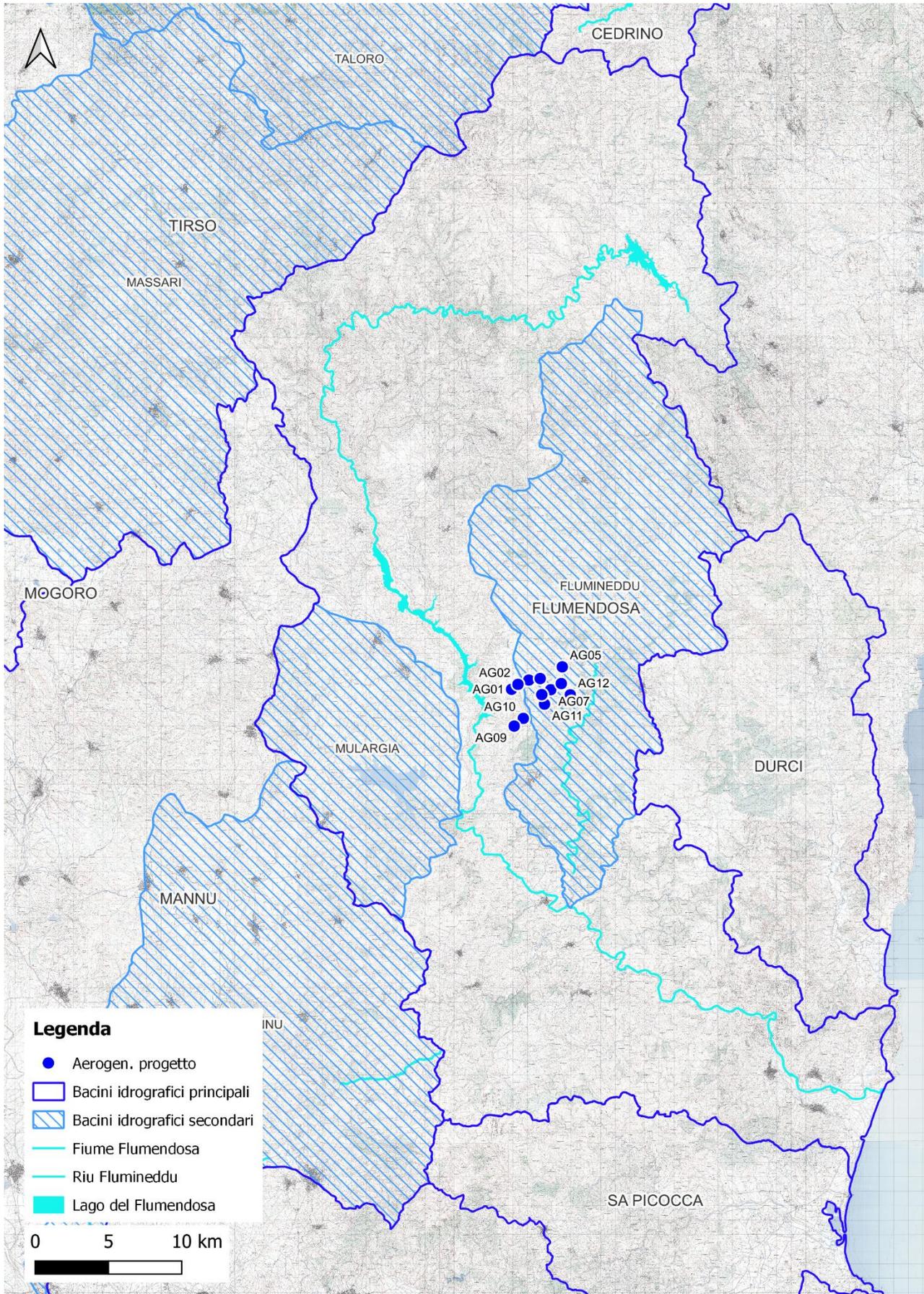


Figura 4.3 - Bacini idrografici di riferimento

Sotto il profilo delle infrastrutture viarie, l'ambito di riferimento è caratterizzato dal passaggio della S.P. 53 che attraversa l'area di impianto. Nell'area vasta l'area in esame è racchiusa tra 4 assi viari: la S.S. 198 di Seui e Lanusei, a nord e ad ovest; la S.P. 11 a nord-est; la S.P. 13 ad est e a sud e, infine, la S.P. 10 a ovest e sud-ovest.

L'impianto sarà servito da una viabilità interna di collegamento tra gli aerogeneratori, prevalentemente incardinata sulla viabilità comunale esistente e funzionale a consentire il processo costruttivo e le ordinarie attività di manutenzione in fase di esercizio.

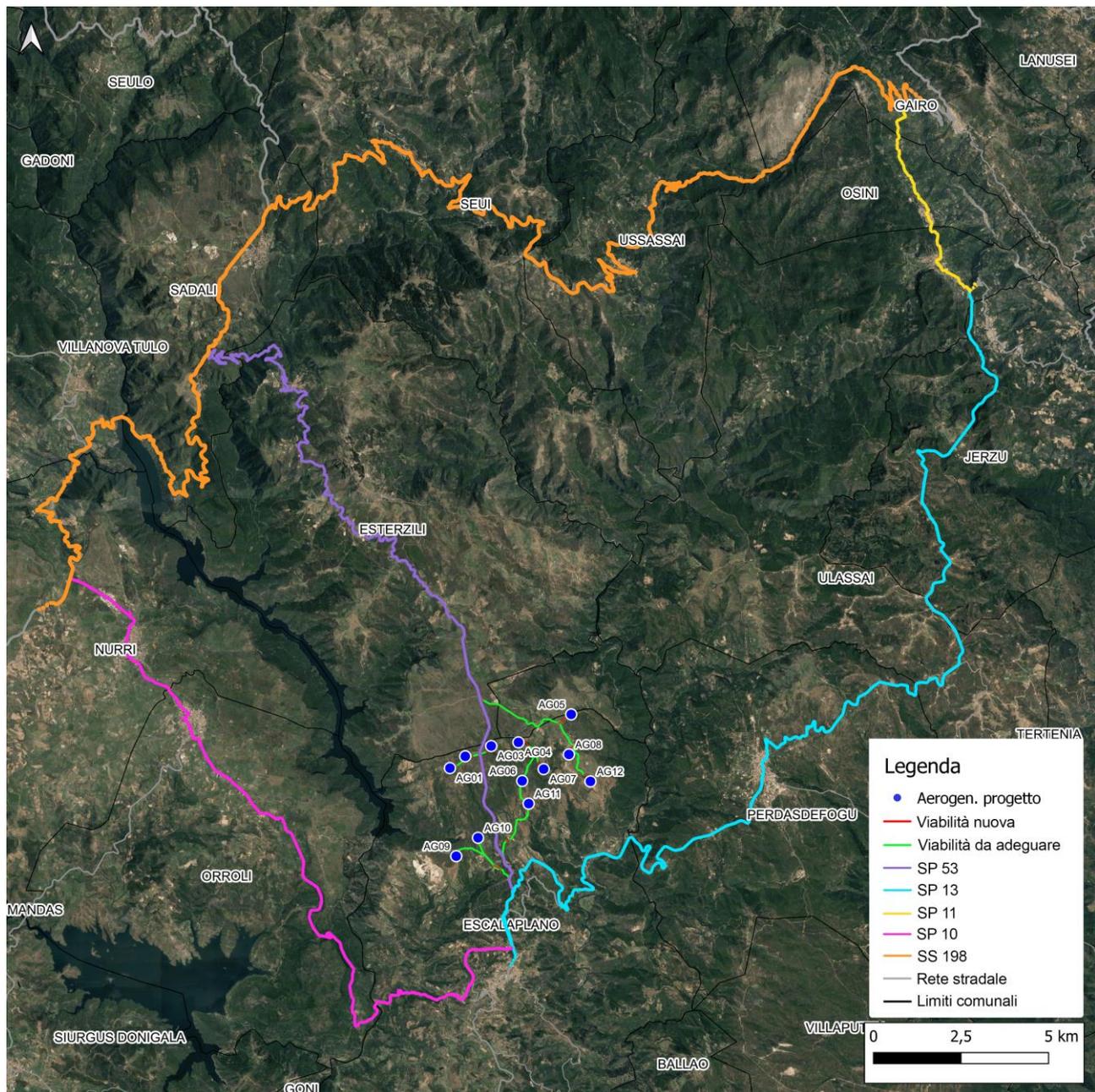


Figura 4.4 - Sistema della viabilità di accesso all'impianto

Rispetto al tessuto edificato degli insediamenti abitativi più vicini (IT-VesEsc-CLP-PAE-DW-04), il sito di intervento presenta, indicativamente, la collocazione indicata in Tabella 4-1

Tabella 4-1 - Distanze degli aerogeneratori rispetto ai più vicini centri abitati

Centro abitato	Posizionamento rispetto al sito	Distanza dal sito (km)
Esterzili	N-N-O	11,5
Nurri	N-O	9,1
Orroli	O	7,0
Siurgus Donigala	S-O	13,7
Escalaplano	S	3,2
Perdasdefogu	E	4,4
Jerzu	N-E	15,8
Ussassai	N	12,6

L'inquadramento catastale delle opere in progetto è riportato negli Elaborati IT-VesEsca-CLP-CW-CD-DW-06.01-Rev.0 ÷ IT-VesNa-CLP-CW-CD-DW-06.03-Rev.0.

Tabella 4-2 – Inquadramento delle postazioni eoliche nella toponomastica locale

ID Aerogeneratore	Località
AG01	<i>Su Sermentu</i>
AG02	<i>Taccu Arboreddu</i>
AG03	<i>S'Ollastu Biancu</i>
AG04	<i>Sedda Sa Spina</i>
AG05	<i>Pedru Pisano</i>
AG06	<i>Taccu</i>
AG07	<i>Brebegargia</i>
AG08	<i>Brebegargia</i>
AG09	<i>Pranu e Saridellu</i>
AG10	<i>Coi Puddas</i>
AG11	<i>Taccu</i>
AG12	<i>Gennoniga</i>

Le coordinate degli aerogeneratori espresse nel sistema Gauss Boaga – Roma 40 sono le seguenti:

Tabella 4-3 - Coordinate aerogeneratori in Gauss Boaga – Roma 40

Aerogeneratore	X	Y
AG01	1 528 883	4 392 340
AG02	1 529 321	4 392 679
AG03	1 530 063	4 392 975
AG04	1 530 839	4 393 081
AG05	1 532 347	4 393 885
AG06	1 530 947	4 391 972
AG07	1 531 560	4 392 311
AG08	1 532 280	4 392 734
AG09	1 529 063	4 389 808
AG10	1 529 685	4 390 338
AG11	1 531 132	4 391 319
AG12	1 532 896	4 391 958

5 Inquadramento geologico

5.1 Inquadramento geologico di dettaglio

L'area che ospiterà il parco eolico in progetto ricade nell'ambito di un altopiano calcareo-dolomitico formatosi nel Giurassico (c.d. "Tacco carbonatico"), debolmente immerge SSW e che si estende per circa 30 km² con direzione NS da Monte Sa Colla 726 m s. l. m. (al limite con l'isola amministrativa del Comune di Seui) fino alla periferia dell'abitato di Escalaplano. Le quote sono comprese tra 700÷350 m s.l.m. mentre le valli che delimitano il rilievo sono rappresentate dalle valli del Flumendosa (ad ovest) e del Flumineddu (ad est) si sviluppano a una quota, rispettivamente di circa 150 m s.l.m. (sotto la diga del Flumendosa) e di 190 m s.l.m. (nella valle del Flumineddu nei pressi del ponte sulla SP che porta a Perdasdefogu).

I siti designati per gli aerogeneratori, dal punto di vista litologico, ricadono nel dominio della Formazione di Dorgali formata di una potente successione calcareo-dolomitica di spessore complessivo pluridecametrico con massimi di circa 80÷100 m. L'ambiente deposizionale è perlopiù marino-litorale e la struttura varia da nettamente stratificata alla base sino a massiva verso il tetto della formazione. Questa unità poggia quasi sempre al di sopra della Formazione di Genna Selole in quanto ne costituisce la naturale evoluzione sedimentaria.

La Formazione di Genna Selole (Figura 5.1) è caratterizzata da un complesso litologico lateralmente discontinuo, a composizione da silicoclastica a mista carbonatico-silicoclastica (0÷20 m), e formato basalmente da conglomerati e microconglomerati quarzosi e arenarie (quarzoruditi e quarzareniti) di ambiente fluviale di energia elevata deposti in ambienti compresi fra la conoide alluvionale ed il fiume intrecciato.

La Formazione di Dorgali (Figura 5.2) dà forma agli altopiani carbonatici del territorio di Escalaplano tra i quali assume importanza maggiore il "Tacco di Orboedu e Sa Pruna". Trattasi di dolomie, calcari dolomitici e calcari (alternanze di calcareniti e calcilutiti), da massicci a ben stratificati, con rare intercalazioni marnose. L'assetto geometrico di questa unità è prevalentemente suborizzontale o debolmente inclinata gradi verso S-SW. Sebbene abbia sostanzialmente conservato integra la sua giacitura originaria e non abbia subito deformazioni tettoniche importanti, la roccia carbonatica risulta interessata da un'intensa fratturazione secondo almeno tre famiglie di discontinuità subverticali orientate circa NW-SE, NE-SW e N-S, oltre la stratificazione suborizzontale.

In superficie è presente una **coltre eluvio-colluviale** (Figura 5.3) originatasi per alterazione in situ della roccia costituente il substrato geologico locale e dal breve trasporto di tali prodotti da parte della gravità e/o del ruscellamento diffuso lungo i versanti generalmente poco acclivi.

Lo spessore è generalmente limitato, variabile tra qualche decina di centimetri (0,20÷0,50 m) ed alcuni metri (1,00÷1,50 m). Sempre in funzione delle caratteristiche del substrato che le origina, queste terre possono avere un contenuto in scheletro clastico più o meno elevato e, spesso, vengono utilizzate ai fini agricoli in quanto interessate da fenomeni pedogenetici: per tale motivo formano una coltre più o meno continua (anche se gli spessori possono limitarsi a pochi decimetri) che spesso non consente l'affioramento dei substrati d'origine.



Figura 5.1 - Substrato litoide nei pressi dell'area di studio: conglomerati e microconglomerati quarzosi della Formazione di Genna Selole.



Figura 5.2 - Substrato litoide nei pressi dell'area di studio: calcari dolomitici della Formazione di Dorgali.



Figura 5.3 - Coltri eluvio-colluviali nei pressi dell'area di studio.

5.2 Assetto litostratigrafico locale

La stratigrafia dell'ambito di intervento, che comprende il parco eolico, la Stazione RTN e la Sottostazione di utenza, a partire dalle unità litostratigrafiche più recenti è richiamata nell'immagine in Figura 5.5, direttamente estratta dalla legenda della cartografia geologica edita dell'APAT di cui uno stralcio è restituito nella Figura 5.4, integrata da ulteriori informazioni provenienti dal rilievo geologico di campagna mirato in particolare a definire la distribuzione delle coperture detritico-alluvionali quaternarie.

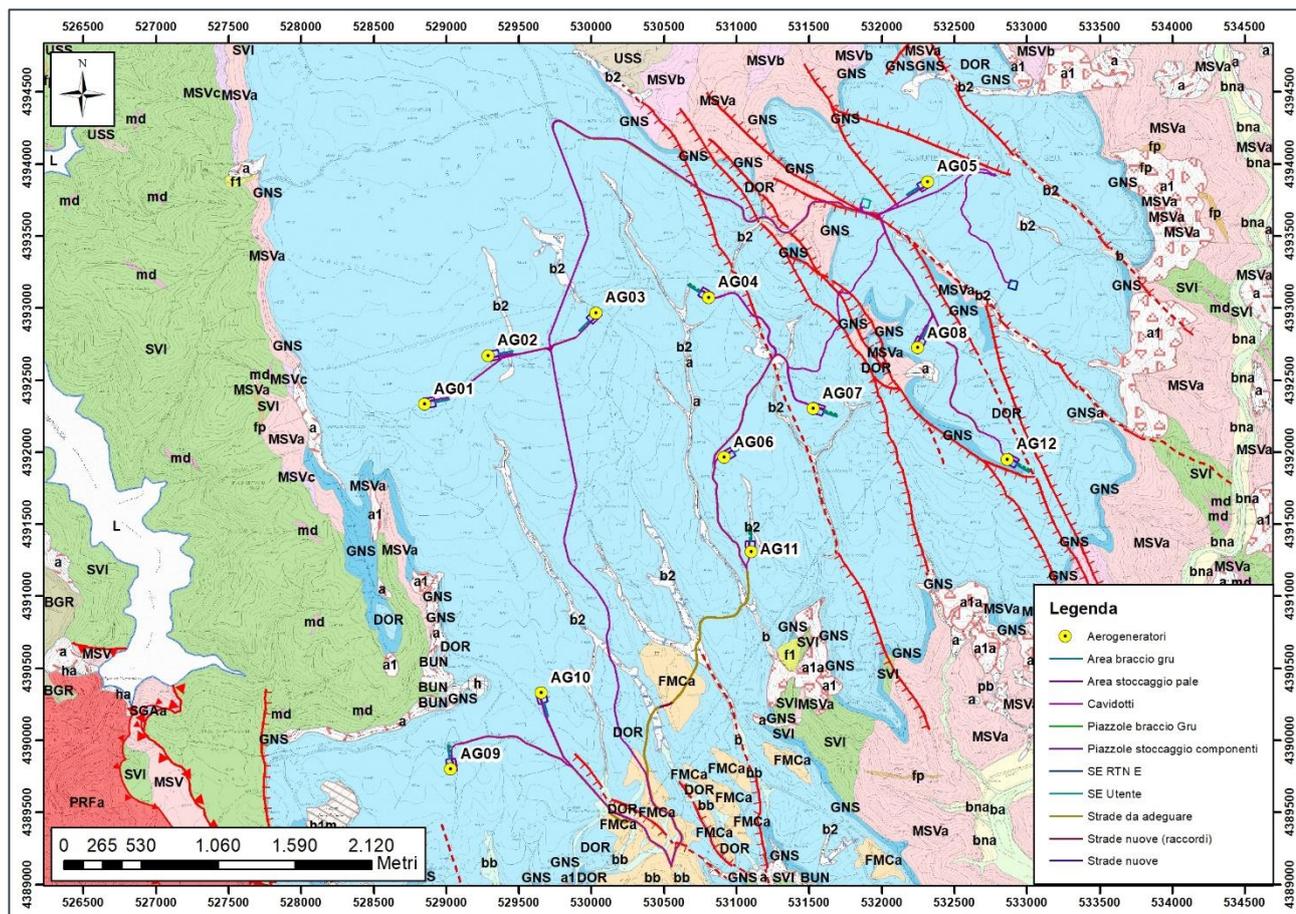


Figura 5.4 – Carta geologica dell’area di studio, edita dall’APAT [Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi geologici e Dipartimento Difesa del Suolo – Servizio Geologico d’Italia] con modifiche.



Figura 5.5 – Legenda della carta geologica dell’area di studio, edita dell’APAT [Agenzia per la protezione dell’ambiente e per i servizi geologici e Dipartimento Difesa del Suolo – Servizio Geologico d’Italia] con modifiche.

5.3 Comportamento sismico del sottosuolo

Per la valutazione delle azioni sismiche di progetto, ai sensi del D.M. del 1701.2018, deve essere valutata l’influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto nel suolo superficiale. Per tale motivo

si esegue una classificazione dei terreni compresi fra il piano di campagna ed il “bedrock” attraverso la stima delle velocità medie delle onde di taglio (V_s).

Con l’approccio semplificato, la classificazione del sottosuolo si effettua in base alla configurazione stratigrafica ed i valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definita dall’espressione:

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

essendo:

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 V_s non inferiore a 800 m/sec.

Per le fondazioni superficiali, la profondità del substrato viene riferita al piano di imposta delle stesse, mentre per le fondazioni su pali alla testa dei pali. Per depositi con profondità del substrato > 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{s,eq}$ è definita dal parametro V_{s30} ottenuto ponendo $H = 30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

Ai fini della definizione delle azioni sismiche secondo le «*Norme Tecniche per il progetto sismico di opere di fondazione e di sostegno dei terreni*», un sito può essere classificato attraverso il valore delle $V_{s,eq}$ con l’appartenenza alle differenti categorie sismiche; ovvero:

- 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.

Benché in corrispondenza dell’area che ospiterà il parco eolico è acclarata la presenza del substrato roccioso subaffiorante o sotto una copertura terrigena di spessore submetrico, non disponendo di riscontri sperimentali sito-specifici, in questa fase è opportuno adottare cautelativamente una **categoria di sottosuolo di tipo “B”**.

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 1000m¹ dalle postazioni di macchina, si è proceduto ad una individuazione complessiva dei fabbricati con l’ausilio della cartografia ufficiale di riferimento (Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000). Successivamente è stata verificata l’effettiva esistenza e consistenza dall’esame di foto aeree e satellitari nonché attraverso specifici sopralluoghi e riscontri sul campo. In tal modo sono state acquisite le necessarie informazioni preliminari sulle caratteristiche tipologico-costruttive e le condizioni di utilizzo degli edifici. A valle di tali riscontri, è stata inoltre accertata la categoria catastale di appartenenza degli edifici, laddove disponibile.

¹ La distanza di 1000m dagli aerogeneratori, ai fini dell’individuazione dei ricettori, è pari al doppio di quella indicata dalla norma UNI/TS 11143-7 per descrivere l’“area di influenza” di un parco eolico.

L'Elaborato IT-VesEsc-CLP-GEN-TR-05 (*Report dei fabbricati censiti*) riporta l'individuazione dei fabbricati in accordo con la metodologia precedentemente indicata.

Nel suddetto Report sono contenuti lo stralcio della ripresa aerea zenitale, la categoria catastale di appartenenza ed una fotografia prospettica degli edifici.

Il censimento ha condotto all'individuazione di n. 55 edifici, o complessi di fabbricati agricoli; tra questi è stata riscontrata la prevalente presenza di corpi edilizi a servizio di attività del settore terziario come: magazzini e locali di deposito o immobili speciali a destinazione produttiva o terziaria. La frequentazione di tali edifici è saltuaria e, in prossimità dell'area di impianto, principalmente legata alle esigenze di conduzione dei fondi agricoli.

È stata peraltro verificata la presenza di 3 edifici di "Categoria 1", riferibile a "Case rurali ad utilizzazione residenziale (Categoria catastale A) e/o corpi di fabbrica con tipologia costruttiva equiparabile".

Rispetto a tali fabbricati - selezionati e identificati con le sigle F19, F26, e F49 - in accordo con le indicazioni della D.G.R. RAS 59/90 del 2020, il posizionamento degli aerogeneratori ha assicurato una distanza minima di 500m.

Il fabbricato F26, quantunque al momento non presente al catasto fabbricati, è stato prudenzialmente ricondotto alla fattispecie degli edifici riferibili a case rurali a utilizzazione residenziale, avuto riguardo delle caratteristiche tipologico-costruttive accertate nell'ambito dei sopralluoghi.

Gli ulteriori edifici individuati al momento della ricognizione dei fabbricati, entro i 1000 metri dagli aerogeneratori in progetto, non sono presenti al catasto Fabbricati; pertanto, la relativa destinazione catastale riportata nel "Report dei fabbricati censiti" è quella del "Catasto Terreni".

In definitiva, ai fini dell'individuazione dei ricettori di interesse per le finalità del presente Studio, in accordo con gli enunciati criteri della DGR 59/90 del 2020, sono stati ricondotti alla Categoria 1:

- gli edifici F19 e F49, catastalmente classificati come A4 (Abitazioni di tipo popolare) e A3 (Abitazioni di tipo economico) rispettivamente, assumendo prudenzialmente la presenza continuativa di persone in periodo diurno e notturno;
- Un fabbricato non appartenente alla categoria catastale "A" (F26 - non presente al catasto fabbricati) che, in ragione della tipologia costruttiva e per informazioni acquisite sul territorio, è stato prudenzialmente ritenuto assimilabile ad ambiente abitativo.

Nella Tabella 6-2 sono riportate le caratteristiche dei ricettori presi in considerazione per le verifiche previste dalla normativa mentre la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** riporta un quadro sinottico delle distanze degli aerogeneratori in progetto rispetto ai ricettori individuati.

Tabella 6-1 – Fabbricati di interesse ai fini delle valutazioni previsionali di impatto acustico

FABBRICATO	COMUNE	CATEGORIA CATASTALE	CATEGORIA EX DGR 59/90
F19	Escalaplano	A4	Cat.1
F26	Escalaplano	Pascolo	Cat.1
F49	Escalaplano	A3	Cat.1

Tabella 6-2 – Potenziali ricettori rappresentativi esposti alla rumorosità dell’impianto eolico, ubicati entro una distanza di 1000m dagli aerogeneratori in progetto

RICETTORE	COMUNE	COORD. GB EST	COORD. GB NORD	WTG PIU' PROSSIMO	DISTANZA DALLA TORRE EOLICA (m)	CLASSE ACUSTICA	LIMITE IMMISSIONE	
							DIURNO	NOTTURNO
F19	Escalaplano	1532812	4392504	AG12	553	III	60	50
F26	Escalaplano	1530904	4390798	AG11	569	III	60	50
F49	Escalaplano	1530275	4389846	AG10	768	III	60	50

L’esame della Tabella 6-2 mette in evidenza come i ricettori considerati per le valutazioni degli aspetti ambientali di interesse, tra cui quello riferibile all’analisi delle vibrazioni, siano ubicati a distanze superiori ai 500 metri dagli aerogeneratori in progetto, in accordo con i criteri indicati dalla DGR 59/90 del 2020.

La soluzione progettuale proposta si ritiene del tutto in linea, e più cautelativa, 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 200m”, rispettata con ampio margine in riferimento a tutti i ricettori considerati.

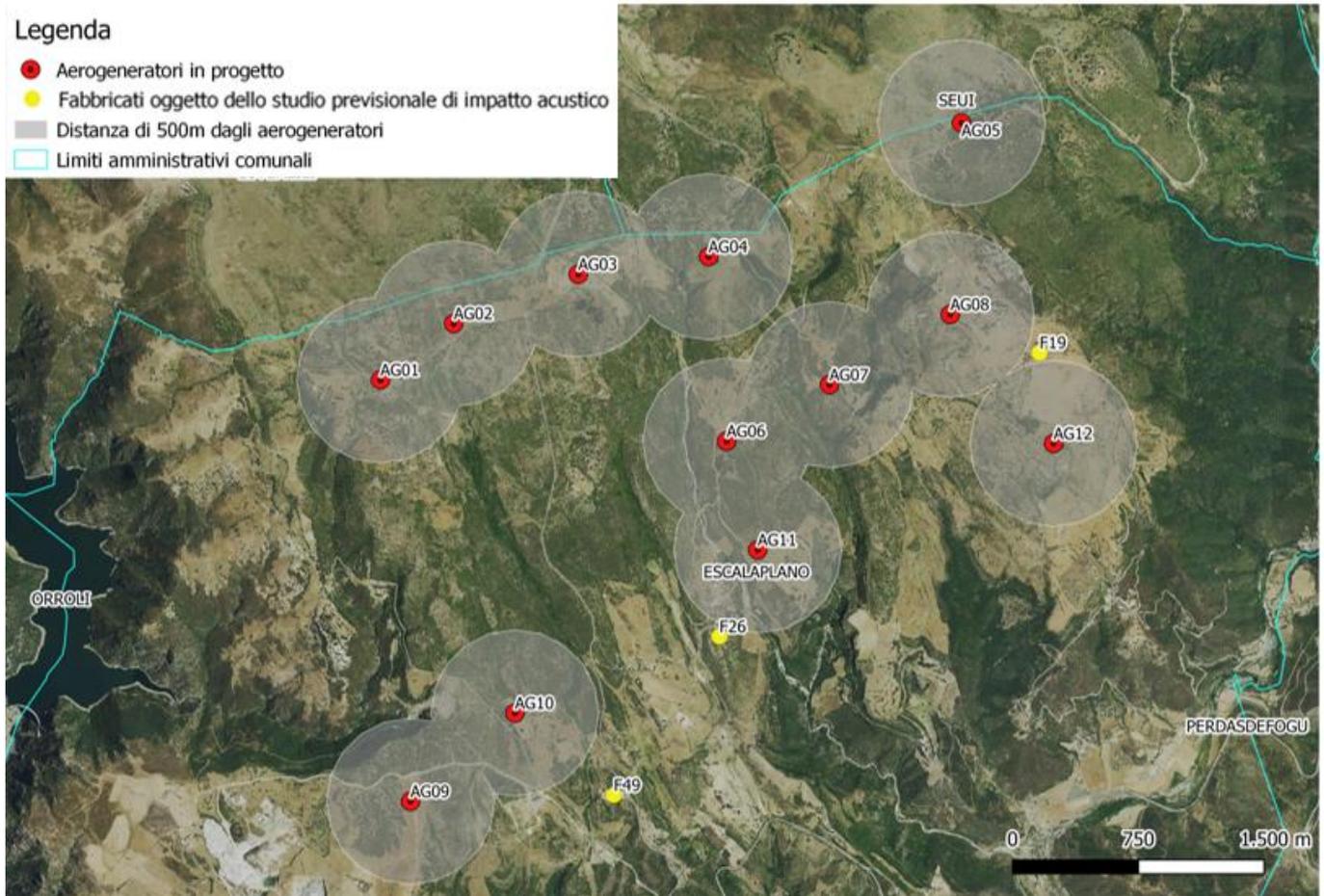


Figura 6.1 - Individuazione planimetrica dei ricettori

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 Escala comprenderà:

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

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

1. allestimento del cantiere;
2. locale adattamento della viabilità di accesso al parco eolico funzionale a renderla adeguata al transito dei mezzi di cantiere ed alle operazioni di trasporto della componentistica degli aerogeneratori presso il sito di intervento;
3. adeguamento della viabilità interna del parco eolico al fine di assicurare l'accessibilità di ciascuna postazione eolica ai mezzi d'opera ed ai veicoli di trasporto della componentistica degli aerogeneratori nonché consentire le ordinarie attività di gestione della centrale;
4. approntamento degli interventi funzionali alla regimazione delle acque superficiali;

5. realizzazione degli scavi funzionali all'allestimento delle piazzole nonché alla realizzazione delle fondazioni degli aerogeneratori;
6. realizzazione delle fondazioni degli aerogeneratori e dei collegamenti all'impianto di terra;
7. approntamento delle piazzole funzionali al montaggio degli aerogeneratori;
8. scavo e posa dei cavidotti MT 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 MT

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

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

7.4 Opere civili per l'allestimento stazione di utenza MT/AT

I lavori connessi all'approntamento della stazione di trasformazione MT/AT 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 MT 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 MT/AT

I montaggi elettromeccanici della SSE di trasformazione MT/AT consisteranno nelle seguenti attività:

1. montaggi elettromeccanici:
 - montaggio passante cavo- aereo AT
 - montaggio interruttori AT;
 - montaggio sezionatori AT;
 - montaggio trasformatore MT/AT;
 - 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.

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 *Escala* 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 emmissive 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 emmissive 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:

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

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, valore tipico per i calcari, come desunto dai valori riportati in Tabella 8-1.

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

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

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

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

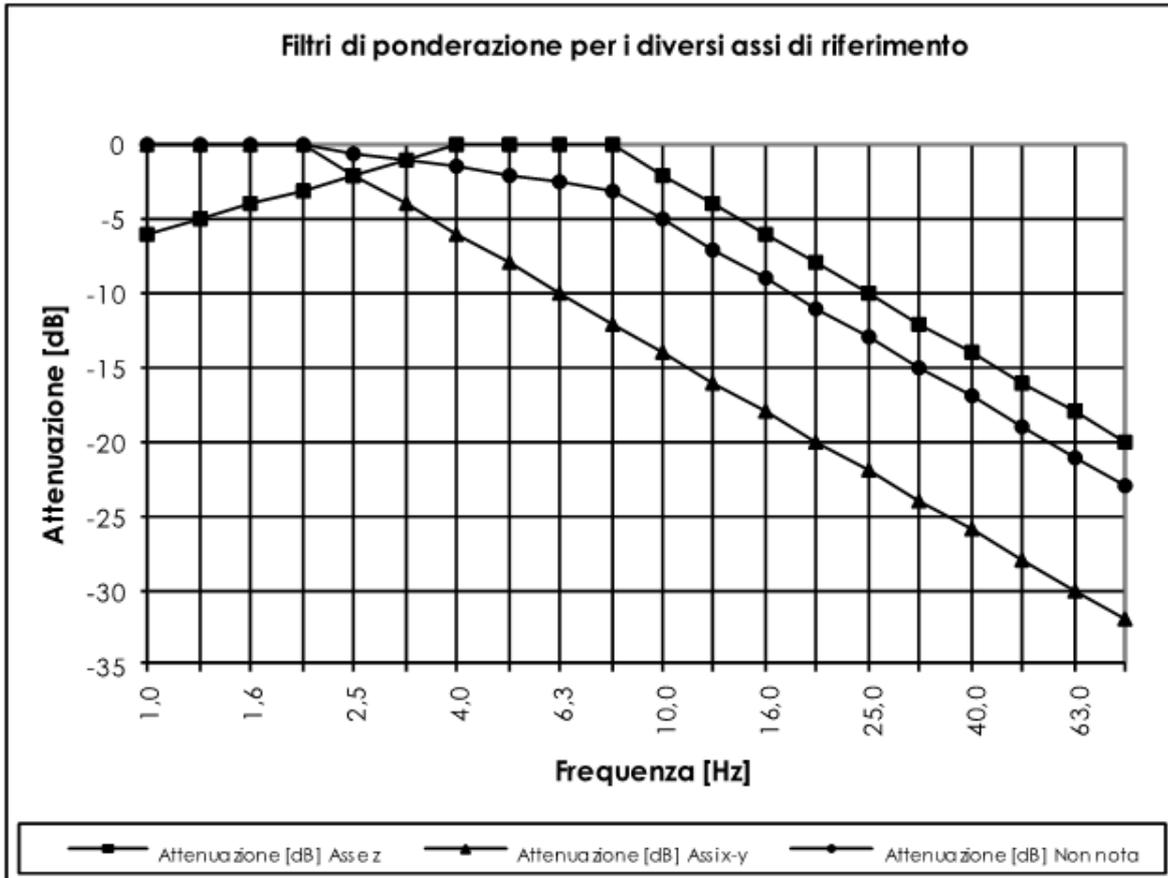


Figura 8.1 – Curve di ponderazione delle vibrazioni indicate dalla UNI 9614:2017 per i diversi assi di riferimento

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

Tabella 8-1 - Valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo (Fonte SIA Ponte sullo stretto di Messina)

TIPO DI TERRENO	DENSITA' [t/m ³]	VELOCITA' DI PROPAGAZIONE [m/s]	FATTORE PERDITA η
Roccia compatta	2.65	3500	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	600	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	1500	0.2÷0.5
Molasse	2.25	1075	0.05
Sabbie e ghiaie di Messina	2.00	834	0.05
Scisti cristallini	2.25	3000	0.05
Depositi alluvionali	1.83	527	0.05
Calcarei 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 8-3 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 8-3 – 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

Frequenza centrale [Hz]	L [dB]	A [m/s ²]	A [mm/s ²]
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	<ul style="list-style-type: none"> — Escavatore — Escavatore con martellone idraulico — Camion da cantiere — Pala gommata
Realizzazione viabilità di servizio e allestimento sottostazione elettrica	<ul style="list-style-type: none"> — Escavatore idraulico — Pala gommata — Camion da cantiere — Rullo compattatore non vibrante
Scavi e rinterrati per posa cavidotti interrati	<ul style="list-style-type: none"> — Escavatore — Camion da cantiere

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

8.4 Stima dei livelli vibrazionali ed analisi dei risultati

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

Ai fini delle verifiche si è assunta la propagazione delle vibrazioni entro un orizzonte superficiale omogeneo di terreno contraddistinto dalla massima velocità stimata onde R entro la profondità indicativa da 0.00 m a -3.00 m dal piano di campagna, ossia quella interessata dalle lavorazioni, pari a:

$V_R = 3350$ m/s per i calcari dolomitici (Tabella 8-1);

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: calcari
Realizzazione fondazioni	350
Realizzazione strade e approntamento stazione elettrica	140
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 prevedere l'impiego di martello demolitore per l'escavazione su roccia compatta. Per tali lavorazioni, le ampiezze delle aree interessate da un impatto vibrometrico potenzialmente disturbante per gli occupanti edifici residenziali si estendono 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 (F19) si posiziona a circa 550 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 e roccia alterata, 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 indicativamente 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, mutuata 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.

9 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 simili congruenti con il modello di aerogeneratore in progetto.

Ai fini della ricostruzione del fenomeno di propagazione delle vibrazioni, in funzione della tipologia di substrato litologico del sito, caratterizzato da calcari miocenici, 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 9-1 - 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	Calcari
Fattore di perdita del substrato	0,05
Velocità di propagazione [m/s]	3350
Densità [t/m ³]	2,25
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 9-2 - 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 9-2, 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 9.1** si riporta, a titolo esemplificativo, l'andamento del decadimento delle vibrazioni calcolate per l'asse z applicando l'equazione 1) al par. 8.1.

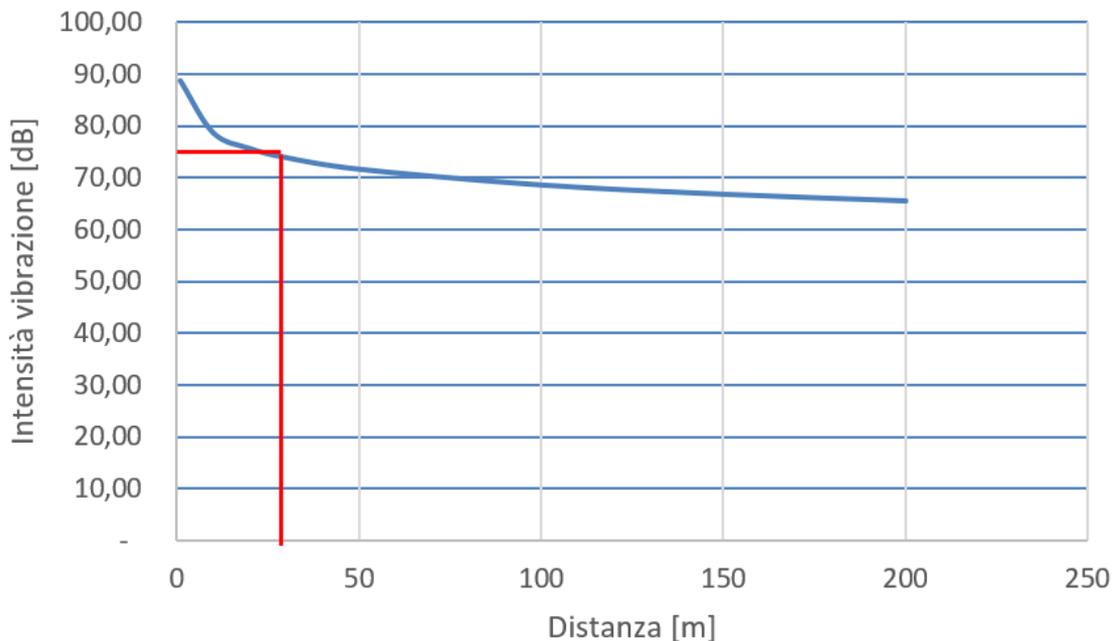


Figura 9.1 – Decadimento dell'intensità vibrazionale lungo l'asse z rispetto alla distanza dalla sorgente con evidenza della soglia di 74 dB suggerita dalla UNI9614 per le "abitazioni notte", rispettata ad una distanza di circa 30 m

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

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

10 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.

11 Considerazioni conclusive

Il presente documento, facente parte integrante dello Studio di impatto ambientale del progetto di parco eolico nel territorio di Escalaplano, denominato "Escala", ha analizzato le dinamiche di propagazione di 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 in corrispondenza dei più prossimi fabbricati. 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 9614:2117 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 si estendono circa 350 metri. Peraltro, poiché nell'area di intervento i più prossimi ricettori abitativi si trovano a distanze ben superiori alle 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 MT, interessando i primi orizzonti di terreno e roccia alterata, potranno essere realizzati con l'impiego di escavatori meccanici, determinando un impatto vibrazionale scarsamente significativo anche per gli edifici più prossimi (Uffici

Sardegna). 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.

12 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.

Appendice: Tabelle di calcolo

Contesto geologico
Lavorazione

Calcari
Realizzazione viabilità

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

Macchinari	Rullo compattatore	Escav. Cingolato	Camion da cantiere	Pala gommata	Rullo vibrante	Escav. Cingolato	Camion da cantiere	Pala gommata	Spettro combinato	Spettro combinato	Ponderazione	Livello finale ponderato
f [Hz]	a(d0,f) [mm/s ²]	a(d,f) [mm/s ²]	(A _{10T,f,d}) [mm/s ²]	L(a,w,f) [dB]	[dB]	[dB]						
1	0	0,02	0	0	0,00E+00	5,89E-03	0,00E+00	0,00E+00	5,89E-03	15	0,00	15
1,25	0	0,01	0	0	0,00E+00	3,70E-03	0,00E+00	0,00E+00	3,70E-03	11	0,00	11
1,6	0	0,01	0	0	0,00E+00	3,68E-03	0,00E+00	0,00E+00	3,68E-03	11	0,00	11
2	1,6	0,01	0	0,41	4,17E-01	2,06E-03	0,00E+00	1,07E-01	4,31E-01	53	0,00	53
2,5	1,7	0,01	0	0,41	4,41E-01	3,64E-03	0,00E+00	1,07E-01	4,54E-01	53	-0,50	53
3,15	2	0,02	0	0,41	5,14E-01	4,53E-03	0,00E+00	1,07E-01	5,25E-01	54	-1,50	53
4	0,85	0,02	0	0,48	2,16E-01	4,48E-03	0,00E+00	1,27E-01	2,51E-01	48	-2,00	46
5	5,8	0,02	0,15	0,52	1,46E+00	4,41E-03	3,77E-02	1,29E-01	1,46E+00	63	-2,50	61
6,3	11	0,02	0	0,5	2,72E+00	4,86E-03	0,00E+00	1,17E-01	2,73E+00	69	-2,00	67
8	18	0,02	0,12	0,76	4,36E+00	4,74E-03	2,91E-02	1,63E-01	4,37E+00	73	-3,00	70
10	20	0,07	0,15	1,1	4,73E+00	1,63E-02	3,55E-02	2,30E-01	4,74E+00	74	-5,00	69
12,5	40	0,14	0,29	1,25	9,18E+00	3,14E-02	6,66E-02	2,05E-01	9,18E+00	79	-7,00	72
16	20	0,68	0,5	2	4,40E+00	1,50E-01	1,10E-01	4,19E-01	4,42E+00	73	-9,00	64
20	4	0,85	1,67	3	8,38E-01	1,78E-01	3,50E-01	7,64E-01	1,20E+00	62	-11,00	51
25	12	1,19	1,85	17	2,36E+00	2,34E-01	3,65E-01	3,93E+00	4,60E+00	73	-13,00	60
31,5	7	0,83	2,5	17	1,27E+00	1,51E-01	4,55E-01	4,17E+00	4,39E+00	73	-15,00	58
40	3,7	0,81	6	7,8	6,07E-01	1,33E-01	9,85E-01	1,99E+00	2,31E+00	67	-17,00	50
50	3,7	1,77	5,5	15	5,38E-01	2,58E-01	7,99E-01	3,83E+00	3,96E+00	72	-19,00	53
63	5	3,06	5,2	14	6,20E-01	3,79E-01	6,45E-01	3,52E+00	3,65E+00	71	-21,00	50
80	4	0,52	4	7,8	4,03E-01	5,26E-02	4,03E-01	1,99E+00	2,07E+00	66	-23,00	43
										84	Livello totale (LW)	76,50

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	140	m
(d-d0)	130	m
η	0,05	adim.
c	3350	m/s
n	0,5	adim.

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

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

Contesto geologico
Lavorazione

Calcari
Realizzazione cavidotti

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

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

Parametri	Valore	U.M.
d0	10	m
d	10	m
(d-d0)	0	m
η	0,05	adim.
c	3350	m/s
n	0,5	adim.

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

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

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