



newgreenenergy

**NEW GREEN ENERGY s.r.l.**

Via Diocleziano, 107 – 80125 NAPOLI

**REGIONE PUGLIA**  
**COMUNI DI ORTA NOVA E CERIGNOLA (FG)**

**PROGETTO DEFINITIVO**  
**PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO NEI TERRITORI**  
**DEI COMUNI DI CERIGNOLA E ORTA NOVA (FG)**  
**IN LOCALITA' "SALICE - LA PADULETTA"**

PROGETTISTI:

**M&M ENGINEERING S.r.l.**

Sede Operativa:  
Via I Maggio, n.4  
71045 Orta Nova (FG) - Italy  
tel./fax (+39) 0885791912 -  
[ing.marianomarseglia@gmail.com](mailto:ing.marianomarseglia@gmail.com)

**Progettisti :**

ing. Mariano Marseglia  
ing. Giuseppe Federico Zingarelli

Consulente:

ing. Donata SILEO

PROPONENTE:

**NEW GREEN ENERGY s.r.l.**

Via Diocleziano, 107  
80125 NAPOLI  
[newgreen@pec.it](mailto:newgreen@pec.it) - [info@newgreen.it](mailto:info@newgreen.it)

ELABORATO	TITOLO	COMMESSA			
<b>ACU-03</b>	<b>VALUTAZIONE PREVISIONALE DELLE VIBRAZIONI</b>	<b>02EOL-2018</b>			
		CODICE ELABORATO			
		<b>EOL-ACU-03</b>			
REVISIONE	Tutte le informazioni tecniche contenute nel presente documento sono di proprietà esclusiva della Studio M&M Engineering S.r.l e non possono essere riprodotte, divulgate o comunque utilizzate senza la sua preventiva autorizzazione scritta. (art. 2575 c.c.)	NOME FILE	PAGINE		
<b>01</b>		<b>EOL-ACU-03.doc</b>	<b>24+ copertina</b>		
REV		DATA	Elaborato	Controllato	Approvato
00	07/11/2019	Prima Emissione - Richiesta integrazione 09/10/2019	Sileo	Marseglia	Angelone
01					
02					
03					
04					
05					
06					

**PARCO EOLICO DA UBICARSI NEI COMUNI  
DI CERIGNOLA E ORTA NOVA  
PROVINCIA DI FOGGIA  
"LOCALITA' SALICE – LA PADULETTA"**

**VALUTAZIONE PREVISIONALE  
DELLE VIBRAZIONI  
IN FASE DI CANTIERE**

<b>REDATTO:</b>	<b>DOTT. ING. DONATA SILEO</b> 
<b>DATA</b>	<b>7 NOVEMBRE 2019</b>
<b>REVISIONE</b>	<b>01</b>
<b>COMMITTENTE</b>	<b>NEW GREEN ENERGY S.R.L. VIA DIOCLEZIANO, 107 80125 NAPOLI</b>

**INDICE**

1.	PREMESSA .....	3
2.	DESCRIZIONE INTERVENTI DI PROGETTO .....	3
3.	INQUADRAMENTO NORMATIVO .....	6
4.	LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI.....	6
5.	METODOLOGIA DI CALCOLO.....	9
6.	VALORI DI RIFERIMENTO DELLA NORMA UNI 9614:2017 .....	13
7.	CARATTERIZZAZIONE GEOLITOLOGICA .....	15
8.	CARATTERIZZAZIONE DELLE SORGENTI .....	15
9.	METODO PREVISIONALE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONE .....	18
10.	RISULTATI DI CALCOLO E VERIFICA LIMITI.....	20
11.	CONCLUSIONI .....	24

## **1. PREMESSA**

La fase di cantierizzazione correlata alla realizzazione dell'impianto eolico da ubicarsi nei territori comunali di Cerignola e Orta Nova (FG) - Località "Salice - La Paduletta" proposto dalla società NEW GREEN ENERGY s.r.l., implica l'utilizzo di mezzi e macchinari che possono essere considerati sorgenti di vibrazioni meccaniche.

L'energia vibratoria così generata si propaga nel terreno a ridosso delle aree di cantiere e può interessare gli edifici situati in prossimità. Tali moti vibratorii, in base alla natura geolitologica dei terreni, interagiscono con le fondazioni e le strutture degli edifici e possono essere percepiti dalle persone che vi abitano (effetti di disturbo) ed anche determinare moti con risposte strutturali e di integrità architettonica (effetti di danno o cosiddetti "cosmetici").

Questi due aspetti sono trattati da norme specifiche, ed in particolare:

- 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".

La complessità fenomenologica del campo vibratorio, a partire dai diversi modi e tipologia di generazione, dalle possibili modalità di propagazione nel terreno ed attenuazione con la distanza, fino alle varie interazioni con strutture edificate (che dipendono da tipologia di costruzione e di fondazione), fa sì che normalmente si ricorre ad un approccio di tipo analitico empirico per la valutazione previsionale.

La presente valutazione è stata predisposta a seguito delle integrazioni richieste alla società NEW GREEN ENERGY s.r.l. ed è stata effettuata dall'Ing. Donata Sileo, iscritta all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Potenza al n. 2176 e riconosciuta Tecnico Competente in Acustica Ambientale dalla Regione Basilicata con D.D. n°72AB.2014/D.00032 del 23/01/2014 e iscritta nell'Elenco nazionale dei tecnici competenti in acustica al n. 2417.

## **2. DESCRIZIONE INTERVENTI DI PROGETTO**

L'impianto eolico da ubicarsi nei territori comunali di Cerignola e Orta Nova (FG) - Località "Salice - La Paduletta" proposto dalla società NEW GREEN ENERGY s.r.l. prevede l'installazione di 14 aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 4,2 MW per una potenza complessiva di 58,80 MW, tutti ubicati nei territori comunali di Orta Nova e Cerignola nonché la realizzazione delle opere di connessione e della Sottostazione Elettrica che ricadono integralmente nel territorio di Cerignola.

Gli aerogeneratori che saranno utilizzati nel parco sono tipo VESTAS V150 da 4.2 MW, ad asse orizzontale costituiti da un sistema tripala, con generatore di tipo asincrono, con diametro del rotore pari 150 m, e altezza mozzo pari a 105 m, per un'altezza massima al tip (punta della pala) pari a 180 m.

Di seguito si riportano per ciascun aerogeneratore le relative coordinate (UTM fuso 33) e le particelle catastali, con riferimento al catasto dei terreni del Comune di Cerignola e Orta Nova.

*Tabella dati geografici e catastali degli Aerogeneratori:*

COORDINATE UTM 33 WGS84			DATI CATASTALI		
WTG	E	N	Comune	foglio n.	part. n.
1	564160	4576134	Ortanova	32	300
2	564914	4575941	Ortanova	37	79
3	565616	4575665	Ortanova	37	484
4	565860	4574951	Ortanova	37	615
5	566745	4574718	Ortanova	35	558
6	567504	4575214	Ortanova	35	178
7	568431	4577147	Ortanova	34	326
8	569220	4576371	Cerignola	99	203
9	568747	4575527	Cerignola	101	253
10	568281	4574738	Cerignola	101	453
11	568004	4573969	Cerignola	101	103
12	568746	4573159	Cerignola	101	851
13	568755	4573915	Cerignola	101	405
14	569202	4574702	Cerignola	101	624

**Figura 1 – Dati aerogeneratori**

Tenuto conto delle componenti dimensionali del generatore, la viabilità di servizio all’impianto e le piazzole andranno a costituire le opera di maggiore rilevanza per l’allestimento del cantiere.

In corrispondenza di ciascun aerogeneratore sarà realizzata una piazzola, che in fase di cantiere dovrà essere della superficie media di 3.600,00 mq per poter consentire l’installazione della gru principale e delle macchine operatrici, lo stoccaggio delle sezioni della torre, della navicella e del mozzo, ed “ospitare” l’area di ubicazione della fondazione e l’area di manovra degli automezzi; sono inoltre previste 2 aree per il posizionamento delle gru ausiliarie al montaggio del braccio della gru principale.

Alla fine della fase di cantiere le dimensioni delle piazzole saranno ridotte a 50 x 30 m per un totale di 1500 mq, per consentire la manutenzione degli aerogeneratori stessi, mentre la superficie residua sarà ripristinata e riportato allo stato ante-operam.

Da ogni generatore verrà prodotta energia elettrica a bassa tensione (BT) e a frequenza variabile. All’interno di ogni navicella l’impianto di trasformazione MT/BT consentirà l’elevazione della tensione al valore di trasporto 30kV (tensione in uscita dal trasformatore).

La soluzione di connessione alla RTN prevede che l’impianto venga collegato in antenna a 150 kV sulla futura Stazione Elettrica RTN 380/150 kV da collegare in entra-esce alla linea 380 kV “Foggia – Palo del Colle”.

Le apparecchiature AT dell’impianto di rete per la connessione saranno con isolamento in aria e conformi alle specifiche di unificazione Terna e saranno dimensionate per una corrente nominale e per una corrente di cortocircuito a seconda del livello già adottato in stazione RTN.

Le opere utente previste dalla soluzione tecnica di connessione saranno quindi le seguenti:

- ✓ Sottostazione di trasformazione AT/MT;
- ✓ Collegamento AT con sistema di sbarre in tubi di alluminio per il collegamento della sottostazione di trasformazione e consegna AT/MT (SSE AT/MT) utente alla stazione di smistamento RTN.

La connessione dell'impianto alla RTN prevede quindi la realizzazione delle seguenti opere utente:

**Sottostazione elettrica di trasformazione AT/MT (150/30 kV)**, sita nel comune di Cerignola, a cui è collegato il cavidotto MT proveniente dal parco eolico composto da 3 linee provenienti ciascuna da un sotto campo del parco eolico. Nella sezione di trasformazione sarà ubicato un fabbricato contenente tutti i quadri MT, BT e il sistema computerizzato di gestione da locale e da remoto della rete elettrica e degli aerogeneratori, il trasformatore MT/AT e lo stallo AT.

**Rete di cavidotti MT**, eserciti a 30 kV, per il collegamento degli aerogeneratori con la suddetta sottostazione di trasformazione AT/MT. Detti cavidotti saranno installati all'interno di opportuni scavi principalmente lungo la viabilità ordinaria esistente e sulle strade di nuova realizzazione a servizio del parco eolico.

**Rete telematica di monitoraggio**, in fibra ottica per il controllo della rete elettrica e dell'impianto eolico mediante trasmissione dati via modem o satellitare.

Al campo eolico si accederà attraverso la viabilità esistente (strade provinciali, Comunali e poderali), mentre l'accesso alle singole pale avverrà mediante strade di nuova realizzazione e/o su strade interpoderali esistenti, che saranno adeguate al trasporto di mezzi eccezionali.

Nella fattispecie, il sito è servito a Sud dalla complanare della S.S. 16, a Nord-Est dalla S.P.72, a Nord-Ovest dalla Strada Consortile n. 53, ed è attraversato dalla S.P. 68. Laddove necessario tali strade saranno solo localmente adeguate al trasporto delle componenti degli aerogeneratori.

### **3. INQUADRAMENTO NORMATIVO**

A differenza del rumore ambientale, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo e del danno in edifici interessati da fenomeni vibrazionali.

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916:2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866 e in cui vengono richiamate le norme DIN 4150 e BS 7385.

La norma fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

Per quanto riguarda il disturbo vibrazionale per la popolazione, in Italia si fa riferimento alla norma UNI 9614:2017 " Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo" che è in buon accordo con i contenuti di altre norme internazionali ed europee.

La norma definisce il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici e i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi.

La norma si applica a tutti i fenomeni che possono dare origine a vibrazioni negli edifici; a titolo esemplificativo e non esaustivo: traffico su gomma e su rotaia, attività industriali e funzionamento di macchinari, attività stradali e di cantiere di varia natura, esplosioni e scoppi, attività umane di qualsiasi natura.

### **4. LA PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI**

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

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

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

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

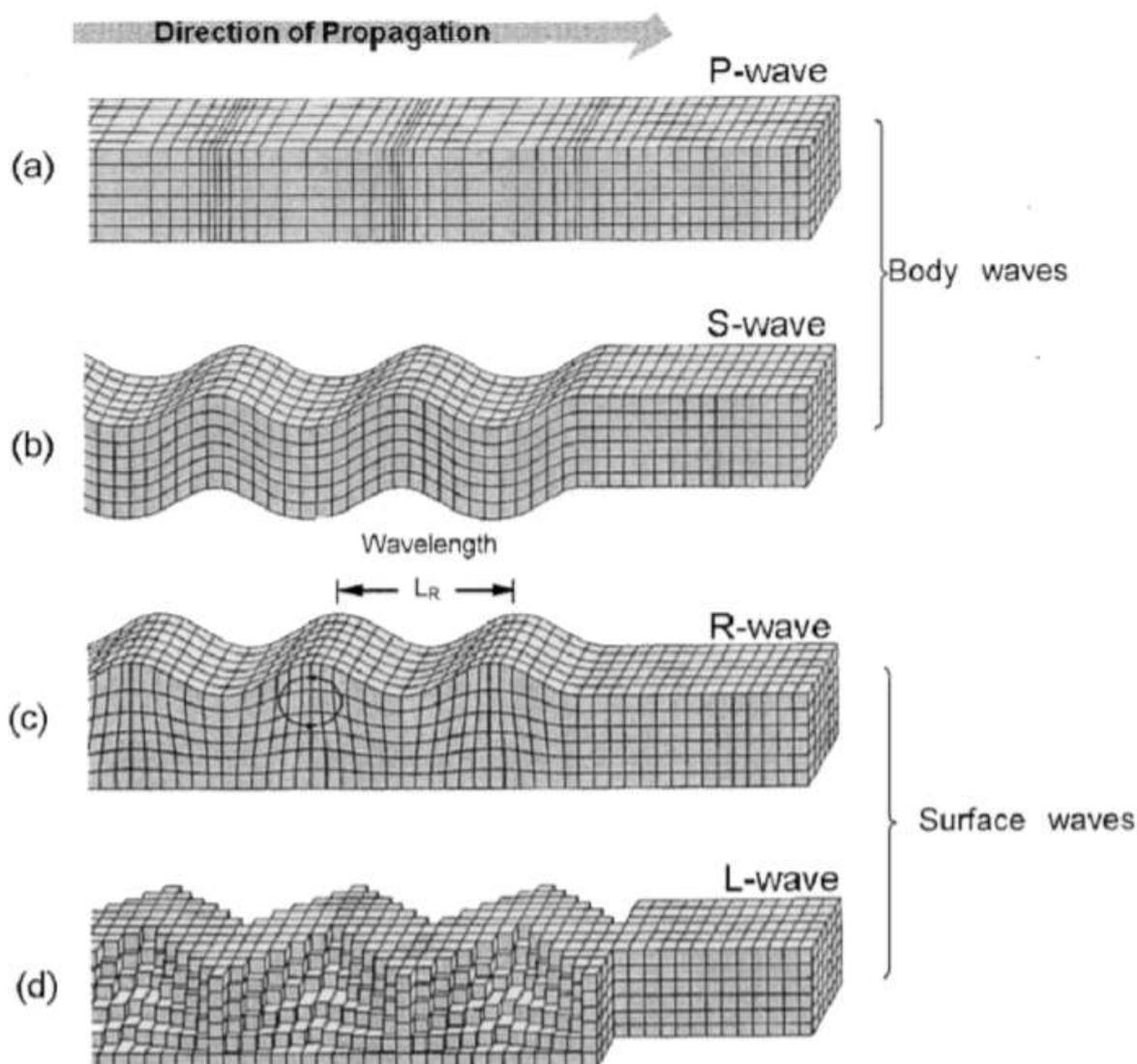


Figura 2 - Tipi di onde

Va anche osservato che il tipo d) (onde L) non è facilmente eccitato dal transito veicolare, in quanto richiederebbe l'imposizione di moti orizzontali alla fonte delle vibrazioni. Nella pratica, in caso di fondazioni dirette (linea a raso o in rilevato, o nel caso dei viadotti con fondazioni superficiali dirette), si può ritenere un predominio delle onde di superficie, in particolare di tipo R che corrono sull'interfaccia suolo-aria. Nel caso invece di fondazioni profonde (ad es. Pali) si hanno anche onde di compressione e di taglio e le onde di superficie R tendono a correre sulle superfici di separazione fra strati diversi del terreno.

Le onde di compressione sono le più veloci, mentre le onde di taglio e di superficie decadono più lentamente con la distanza.

Per quanto riguarda il terreno la velocità di propagazione superficiale varia in un campo tra 60 e 150 m/s.

In un mezzo isotropo l'energia sviluppata da un impulso verticale si trasmette per il:

- ✓ 67% come onda superficiale
- ✓ 6% come onda di taglio

✓ 7 % come onda di compressione

Da questi dati si comprende che è l'onda di superficie quella che va maggiormente ad interessare le fondazioni di edifici posti nelle vicinanze di una forza impulsiva.

Vi è una relazione dispersiva tra le frequenze e la velocità di propagazione; si può dimostrare come un'onda di superficie nella sua propagazione non mantiene la stessa forma, e come un'onda ad alta frequenza si propaga più velocemente di una a bassa frequenza.

Come ordine di grandezza si consideri che le frequenze per un'onda superficiale in un terreno medio variano tra i 5 e i 35 Hz e che le ampiezze delle accelerazioni prodotte si attenuano disperdendosi nel suolo fino a diventare inefficaci per valori prossimi a  $0.02\text{m/s}^2$ . Questo limite può ottenersi per una distanza dalla sorgente compresa tra i 40 e 80 m.

## 5. METODOLOGIA DI CALCOLO

Le verifiche nel seguito esposte sono basate sul calcolo previsionale della propagazione delle vibrazioni tra sorgente e ricettore, considerando le caratteristiche di smorzamento del terreno e i fenomeni primari di amplificazione e attenuazione all'interno dell'edificio.

Il modello di propagazione impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) è basato sulla seguente formulazione:

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

dove:

$\eta$  = fattore di perdita del terreno;

$c$  = velocità di propagazione in m/s

$f$  = frequenza in Hz;

$d$  = distanza in m;

$d_0$  = distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

L'equazione tiene conto dei meccanismi di attenuazione geometrica e di dissipazione che l'onda vibrazionale subisce propagandosi nel terreno. L'attenuazione geometrica è espressa dal seguente termine:

$$a(d_0, f) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^n$$

la sua applicazione implica che sia nota l'ampiezza della vibrazione alla distanza  $d_0$  e sia definita la localizzazione e il tipo di sorgente (sorgente puntuale o lineare, in superficie o in profondità) e il tipo di onda vibrazionale (di volume o di superficie).

Nella seguente tabella vengono riportati i valori che assume l'esponente "n" al variare del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni considerata.

Localizzazione della sorgente	Tipo di sorgente	Onde indotte	n
SUPERFICIALE	Puntiforme	Di volume	2.0
		Di superficie	0.5
	Lineare indefinita	Di volume	1.0
		Di superficie	0
IN PROFONDITA'	Puntiforme	Di volume	1.0
	Lineare indefinita		1.5

**Figura 3 – Valori dell'esponente "n" al variare del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni considerata**

Considerando che, con riferimento all'ottenimento dei livelli massimi, si deve sempre prendere in considerazione una sorgente concentrata, si ha che l'esponente  $n$  vale 0.5 per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie) e 1 per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda, come nel caso di fondazione su pali).

L'attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno è espressa dal seguente coefficiente:

$$\frac{2\pi \cdot f \cdot \eta}{c}$$

dove  $\eta$  è il fattore di perdita del terreno,  $c$  è la velocità di propagazione in m/s,  $f$  è la frequenza di Hz. Tale coefficiente dipende dal tipo di terreno e cresce linearmente con la frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori.

La velocità di propagazione delle onde orientativamente può assumere valori dell'ordine di:

- 1.500 m/s per le onde di compressione in argilla
- 800 m/s per le onde di compressione in terreno sciolto sedimentario
- 500 m/s per le onde di compressione in sabbie e limi
- 1.800 m/s per le onde di compressione in tufi
- 1.500 m/s per le onde di compressione in gessi
- 150 m/s per le onde di taglio in argilla
- 260 m/s per le onde di taglio in terreno sciolto sedimentario
- 150 m/s per le onde di taglio in sabbie e limi
- 600 m/s per le onde di taglio in tufi

I valori tipici di densità e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo, sono riassunti in Tabella:

TIPO DI TERRENO	DENSITA' [t/m <sup>3</sup> ]	FATTORE PERDITA $\eta$
Roccia compatta	2.65	0.01
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1.6	0.1
Argilla, terreni argillosi	1.7	0.2÷0.5
Molasse	2.25	0.05
Scisti cristallini	2.25	0.05
Depositi alluvionali	1.83	0.05
Calcarei evaporitici	2.25	0.05

**Figura 4 - Valori tipici di densità e fattore di perdita per alcune classi geologiche**

## **5.1 INTERAZIONE CON GLI EDIFICI**

La propagazione delle vibrazioni negli edifici e la risposta di pareti e solai dipendono anche dalle caratteristiche costruttive dell'edificio. Al fine delle valutazioni è importante separare due aspetti fondamentali del fenomeno:

- l'interazione suolo-fondazioni;
- la propagazione nel corpo dell'edificio.

Il primo aspetto è legato al fatto che la mancanza di solidarietà all'interfaccia terreno-struttura dà luogo a fenomeni dissipativi, configurandosi come un fenomeno favorevole. Detto fenomeno è perciò condizionato dalla tipologia delle fondazioni (fondazioni a platea, fondazioni su plinti isolati, pali di fondazioni, ecc.).

La differenza tra il livello di vibrazione nel terreno e quello della fondazione è detta Coupling Loss (attenuazione per perdita di accoppiamento); nella seguente tabella sono forniti i valori sperimentali medi della perdita di accoppiamento in funzione di alcuni tipi caratteristici di fondazione:

Edificio	FREQUENZA C.B. 1/3 OTTAVA [HZ]														
	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
Perdita di Accoppiamento [dB]															
Edifici in muratura su pali nel terreno	5.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10	11	12	13	14	14.5	14.5	15	14
Edifici in muratura	12	13	13.5	14.5	15	15	15	15	14	13	13.5	13	12.5	12	11.5
Edifici con telaio in C.A. e muratura, plinti	10	11	11.5	12.5	13	13	13	13	12.5	12.5	12	11	9.5	8.5	8

**Figura 5 –Valori di attenuazione per perdita di accoppiamento – Coupling Loss**

La propagazione nel corpo dell'edificio è determinante sia per gli abitanti sia per le strutture in quanto i pavimenti, pareti e soffitti degli edifici sono soggetti a significative amplificazioni delle vibrazioni rispetto a quelle trasmesse dalle fondazioni. In molti casi la risonanza delle strutture orizzontali può causare un'amplificazione delle vibrazioni nel campo di frequenze comprese tra 10 e 30 Hz. I problemi maggiori si verificano quando la frequenza di risonanza dei solai coincide con la frequenza di picco dello spettro di vibrazione del terreno.

Per quanto riguarda invece le caratteristiche strutturali degli edifici che influiscono sulla propagazione, si considera l'attenuazione dovuta alla componente della propagazione da piano a piano. Valori empirici in funzione della frequenza sono riportati nella seguente figura:

Piano	SPETTRO DI ATTENUAZIONE PER PROPAGAZIONE DA PIANO A PIANO (RE 10-6 M/S2) [DB]														
	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250	315
1° ORIZZONTAMENTO	-2	-2	-2	-2	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-	-	-
2° ORIZZONTAMENTO	-4	-2	-2	-4	-5	-5	-5	-5.5	-6	-6	-6	-6	-	-	-
3° ORIZZONTAMENTO	-6	-6	-6	-6	-7	-7	-7	-7	-7.5	-8	-9	-9	-	-	-

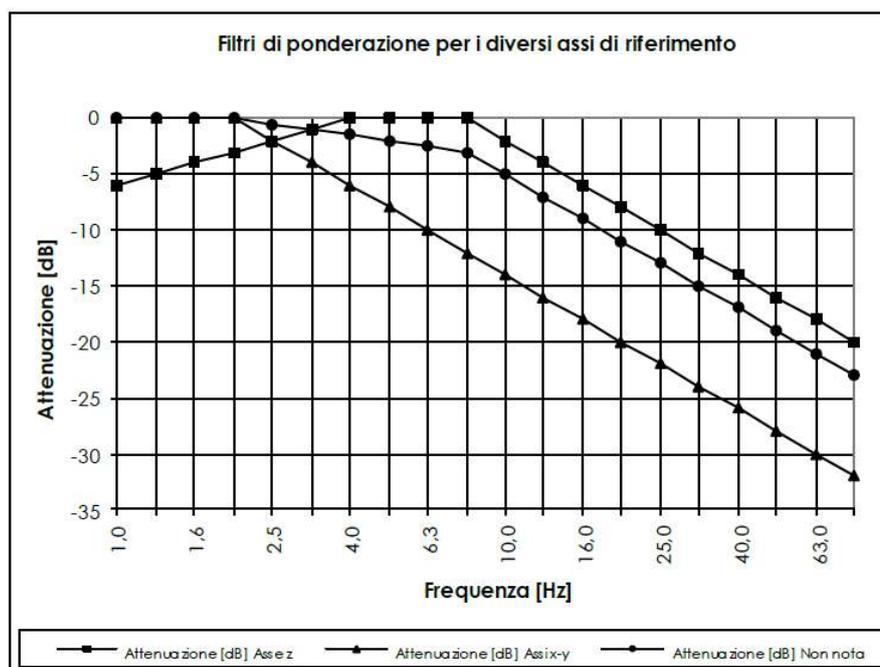
**Figura 6 –Valori di attenuazione per propagazione da piano a piano**

## 5.2 VALUTAZIONE DEL DISTURBO ALLE PERSONE

Per i livelli di vibrazione al fine di valutare il disturbo alle persone, è necessario effettuare il calcolo del valore efficace complessivo ponderato in termini di accelerazione, nel campo 1 ÷ 80 Hz delle bande a terzi di ottava, in accordo alla UNI 9614.

A partire dallo spettro di vibrazione in accelerazione così calcolato, si calcola quindi il valore efficace globale dell'accelerazione attraverso la messa in conto di tutte le componenti spettrali (radice quadrata della somma dei quadrati delle singole componenti) e considerando la curva di ponderazione per postura variabile o non nota (UNI 9614).

Considerando cumulativo l'effetto di tutte le componenti di accelerazione per frequenze da 1 a 80 Hz, sono introdotti filtri di ponderazione che rendano tali componenti equivalenti dal punto di vista della percezione da parte dell'individuo e che dipendono dalla postura della persona:



**Figura 7 -Ponderazione per i limiti sulle persone**

## **6. VALORI DI RIFERIMENTO DELLA NORMA UNI 9614:2017**

La norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo" individua i limiti di soglia in funzione della destinazione d'uso degli edifici. Il superamento di tali limiti può costituire una fonte di disturbo per le persone esposte riducendone il loro benessere di vita. Vengono in particolare distinti quattro tipi di ricettori:

1. Aree critiche
2. Abitazioni
3. Uffici
4. Fabbriche

I valori di riferimento - soglie di accettabilità in riferimento al disturbo sulle persone ("annoyance") - dipendono in misura variabile dall'intensità e frequenza dell'evento vibratorio e dal tipo di attività svolta. I limiti sono espressi in base al livello di accelerazione in dB:

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

Dove  $a_0$  è il valore dell'accelerazione di riferimento, pari a  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>. Gli spettri di vibrazione, nel campo di frequenze da 1 a 80 Hz, vengono rappresentati per terzi di ottava. Il livello dell'accelerazione complessiva ponderata in frequenza  $L_w$  è fornito dalla relazione:

$$L_w = 10 \log \sum_1 10^{L_{i,w}/10}$$

dove  $L_{i,w}$  sono i livelli di vibrazione in accelerazione calcolati per terzi di ottava, ponderati in frequenza secondo il filtro di cui alla figura precedente.

I valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza per postura "non nota" (per vibrazioni di tipo continuo) sono:

<b>Luogo</b>	<b>A [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>L [dB]</b>
Aree critiche	3.3 * 10 <sup>-3</sup>	71
Abitazioni (notte)	5.0*10 <sup>-3</sup>	74
<b>Abitazioni (giorno)</b>	<b>7.2*10<sup>-3</sup></b>	<b>77</b>
Uffici	14.4*10 <sup>-3</sup>	83
Fabbriche	28.8*10 <sup>-3</sup>	89

**Figura 8 -Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza per postura non nota norma UNI 9614**

E' da evidenziare che i sopra citati livelli massimi di vibrazione imposti per la limitazione del disturbo sulla persona (norma UNI 9614) sono generalmente più restrittivi di quelli relativi al danneggiamento degli edifici (normativa ISO 4866 e UNI 9916). Quindi, si può ragionevolmente

assumere che, nel caso la vibrazione non superi in maniera sostanziale i limiti fissati per il disturbo sugli individui, non si abbiano effetti seppur minimi di danneggiamento sugli edifici.

## 7. CARATTERIZZAZIONE GEOLITOLOGICA

La caratterizzazione sismica dell'area oggetto di studio ai sensi delle NTC 2018, finalizzata alla determinazione della categoria di sottosuolo, oltre che ai moduli elasto-dinamici, è stata eseguita mediante prospezioni sismiche a rifrazione con onde P e prospezioni Masw.

La descrizione dettagliata delle indagini eseguite è riportata nella "RELAZIONE SISMICA E GEOTECNICA" predisposta per il progetto in esame.

In particolare, dalla stessa si evince che, le indagini sismiche eseguite, hanno consentito di determinare le caratteristiche elasto-dinamiche dei terreni investigati e definire la categoria del sottosuolo di fondazione.

Le velocità equivalenti di propagazione delle onde di taglio calcolate, per le due prospezioni Masw eseguite sono risultate essere, pari a:

$V_{s, eq} = 357 \text{ m/s}$  (Prospezione Masw 1)

$V_{s, eq} = 327 \text{ m/s}$  (Prospezione Masw 2)

Pertanto, con riferimento al piano campagna, sulla base del valore  $V_{s, eq}$  il sottosuolo è riferibile alla categoria "C" (tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato), riguarda perciò: *"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."*

Le esplorazioni dirette del sottosuolo, hanno permesso di definire i caratteri litostratigrafici del primo sottosuolo. In particolare, i terreni su cui insisteranno le opere in progetto possono essere suddivisi in unità litologiche di seguito denominate U.L.; sono stati definiti quattro orizzonti litologici a partire dalla quota di riferimento 0.00 (piano campagna):

- U.L.M. 1 – TERRENO ORGANICO LIMOSO;
- U.L.M. 2 – ARGILLA GRIGIASTRA E LIMO ARGILLOSO-SABBIOSO;
- U.L.M. 3 – SABBIA LIMOSA ADDENSATA;
- U.L.M. 4 – LIMO ARGILLOSO CON INTERCALAZIONI SABBIOSE.

## 8. 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 sono stati utilizzati sia dati di fonte bibliografica sia dati direttamente acquisiti nel corso di misure svolte in cantieri di grandi opere realizzate in Italia.

Per quanto riguarda i dati bibliografici, è stato in particolare utilizzato il volume L.H. Watkins - "Environmental impact of roads and traffic" - Appl. Science Publ., che alle pagine 231-241 riporta una serie di dati sperimentali sull'emissione di vibrazioni da parte di svariati tipi di macchine da cantiere. Da tale raccolta di dati sono stati estratti gli spettri di emissione delle macchine riportate nelle seguenti figure.

Macchina / Attrezzatura	Camion da cantiere	Camion ribaltabile	Rullo compattatore vibrante	Rullo compattatore pesante (non vibrante)	Pala gommata carica	Pala gommata scarica	Ruspa cingolata piccola
Distanza	10	10	10	10	10	20	10
1	0	0	0	0	0	0	0
1.25	0	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0.3	1.6	0.41	0.35	1.1
2.5	0	0	0.3	1.7	0.41	0.35	1.1
3.15	0	0	0.3	2	0.41	0.35	1.1
4	0	0	0.3	0.85	0.48	0.35	1.1
5	0.15	0.11	0.8	5.8	0.52	0.35	1.4
6.3	0	0.23	0.7	11	0.50	0.4	1.6
8	0.12	0.41	0.8	18	0.76	1.2	3.2
10	0.15	0.5	1.1	20	1.10	0.9	4.2
12.5	0.29	0.6	1	40	1.25	1.75	8
16	0.5	1.1	2	20	2	1.26	6
20	1.67	2.99	1.55	4	3	2	18
25	1.85	9	6	12	17	5.2	24
31.5	2.5	3.9	29	7	17	2.6	16
40	6	3.3	3	3.7	7.8	1.6	10
50	5.5	4	1	3.7	15	1.6	9
63	5.2	10	1.6	5	14	1.5	6
80	4	8	2	4	7.8	2	5.5

Figura 9 – Spettri di emissione delle macchine/attrezzature

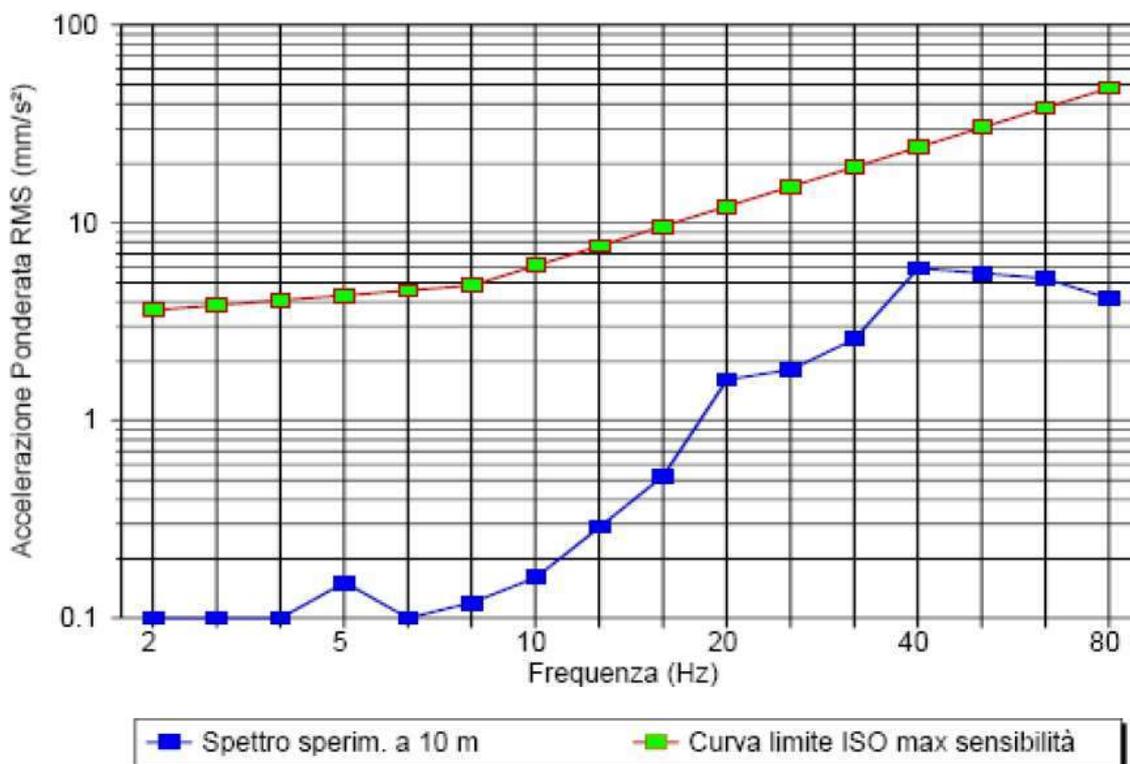


Figura 10 – Spettro: camion da cantiere

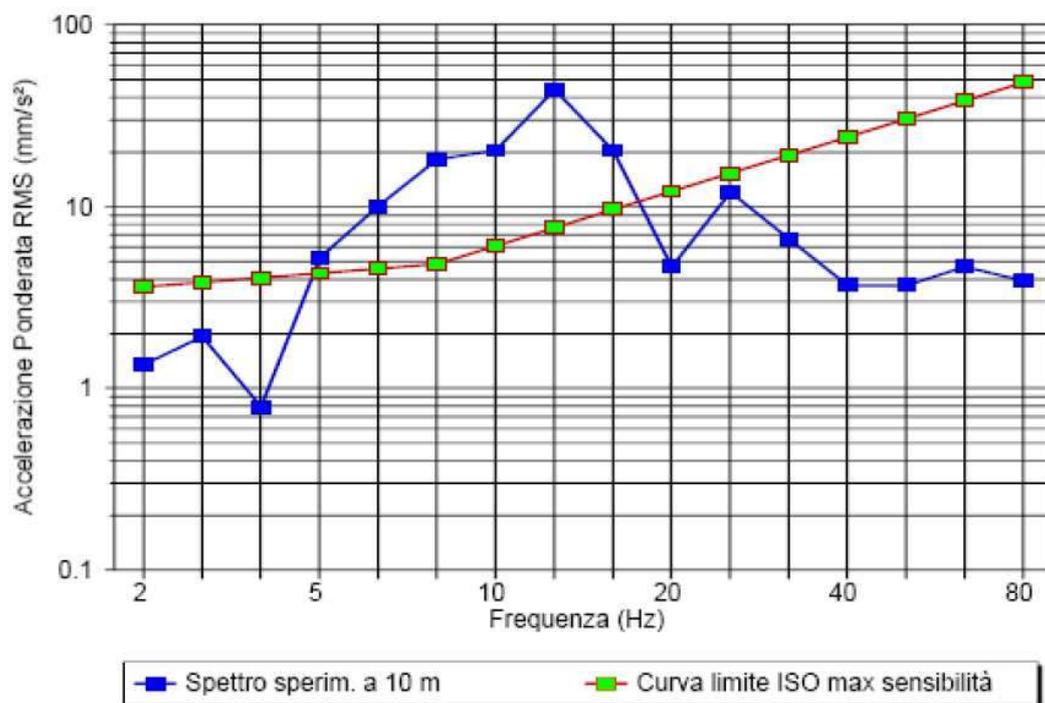


Figura 11 - Spettro: Rullo compattatore

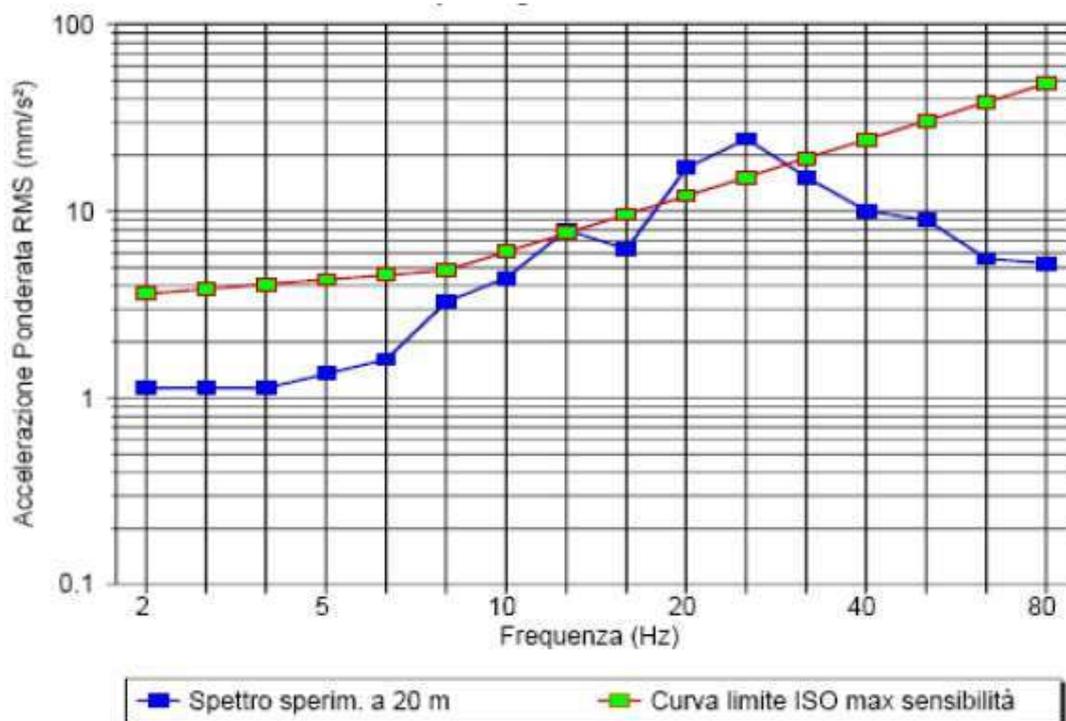


Figura 12 - Spettro: Ruspa cingolata

Altri dati sperimentali sono riportati di seguito:

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
Realizzazione Pali - distanza di riferimento 4 m																				
dB	77,1	75,3	74,4	72,9	71,7	70,7	69,6	68,9	67,8	66,8	66,4	69,0	69,7	72,5	79,9	87,1	96,5	110,6	105,9	101,2

Figura 13 - Spettri di emissione della macchina utilizzata per la realizzazione dei Pali di fondazione

## 9. METODO PREVISIONALE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONE

Il metodo previsionale dei livelli di vibrazione ha impiegato congiuntamente misure sperimentali e simulazioni numeriche. A partire dagli spettri di emissione del modello di macchina operatrice previsto dal progetto (dati di letteratura) sono state eseguite delle simulazioni numeriche volte a definire l'effetto combinato di tali macchinari in corrispondenza di ricettori (persone o edifici) posti nell'intorno dell'areale di lavorazione. La valutazione dei livelli vibrazionali indotti ai ricettori ha pertanto richiesto la definizione di:

- ✓ uno spettro di emissione rappresentativo della variazione in frequenza dell'accelerazione indotta nel terreno ad una distanza di riferimento (problema sorgente);
- ✓ una funzione di trasferimento che esprima, al variare della frequenza, il rapporto tra l'ampiezza di vibrazione al piede del ricettore in condizioni di campo libero e l'ampiezza dello spettro di accelerazione alla sorgente per ciascun transito (problema di propagazione);
- ✓ una legge di combinazione degli spettri di accelerazione indotti al ricettore in condizioni di campo libero dai macchinari presenti nei vari scenari di progetto ipotizzati;
- ✓ un confronto con i livelli di riferimento in condizioni di campo libero.

In dettaglio si illustrano i passi seguiti nell'elaborazione:

- ✓ la valutazione dei livelli vibrazionali è stata condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei fenomeni considerati (mezzi di cantiere), utilizzando dati bibliografici disponibili. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza nota dalla sorgente vibratoria, e sono afferenti alla sola componente verticale.
- ✓ dagli spettri delle sorgenti si è ottenuto il livello di accelerazione non ponderato a distanze crescenti dalla sorgente mediante una legge di propagazione. Nel caso di sorgenti superficiali, ad esempio, si precisa che l'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza  $d$  è basata sulla seguente formulazione:

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

- ✓ i livelli complessivi di accelerazione non pesati a distanze crescenti dalla sorgente corrispondenti agli scenari analizzati sono dati dalla combinazione, frequenza per frequenza, degli spettri di vibrazione relativi alle singole macchine previste. Come legge di combinazione degli spettri è stata adottata la regola SRSS (Square-Root-of-the-Sum-of-the-Squares) che consiste nell'eseguire la radice quadrata della somma dei quadrati delle ordinate spettrali relative alle singole macchine. Per ciascuna frequenza si è quindi ottenuto quindi un valore complessivo non pesato di tutte le macchine attive ( $A_{TOT,f}$ ) sottoforma di matrice:

$$A_{TOT,f} = \sqrt{A_1(f,d)^2 + A_2(f,d)^2 + \dots + A_N(f,d)^2} \quad (\text{SRSS})$$

- ✓ è stata poi applicata la curva di attenuazione definita per postura non nota (o asse generico) dalla UNI 9614 riportata nella seguente figura:

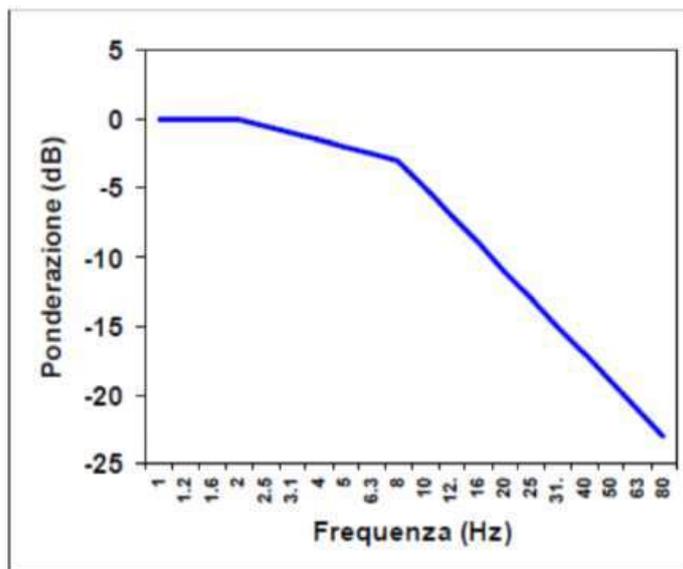


Figura 14 -Ponderazione per i limiti sulle persone per postura non nota

- ✓ si è quindi ottenuta la matrice dei 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 sommando tutti i corrispondente valori per frequenza  $A_{TOT,f}$  espresso in dB pesati. Il numero ottenuto è rappresentativo dell'accelerazione complessiva ponderata su asse Z ad una determinata distanza.

## **9.1 SCENARI DI CALCOLO**

La verifica del rispetto dei valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza è stata eseguita considerando le seguenti principali attività di cantiere relative alla realizzazione dell'impianto oggetto di studio, in quanto maggiormente impattati:

- Realizzazione viabilità;
- Realizzazione fondazioni aerogeneratori;
- Realizzazione linea di connessione.

Per le suddette attività sono stati considerati i principali macchinari fonti di vibrazioni:

<b>ATTIVITÀ</b>	<b>PRINCIPALI MACCHINARI FONTI DI VIBRAZIONI</b>
Realizzazione viabilità	Ruspa cingolata Rullo compattatore Camion da cantiere
Realizzazione Cavidotto	Ruspa cingolata Camion da cantiere
Realizzazione Fondazioni aerogeneratori	Macchina pali

**Tabella 1 - Principali macchinari fonti di vibrazioni per attività di cantiere**

La verifica ha interessato i ricettori più prossimi alle aree di cantiere in quanto maggiormente impattati:

<b>ATTIVITÀ</b>	<b>RICETTORI MAGGIORMENTE IMPATTATI</b>	<b>DISTANZA DALLE AREE DI CANTIERE [m]</b>
Realizzazione viabilità	R2	125
Realizzazione Fondazioni aerogeneratori	R5	250
Realizzazione Cavidotto	R15	12

**Tabella 2: Ricettori maggiormente impattati dal punto di vista vibrazionale dalle diverse attività di cantiere ipotizzate per la realizzazione delle opere del parco eolico**

Difatti se per tali ricettori le simulazioni evidenzieranno il rispetto dei limiti normativi tale risultato potrà di conseguenza essere associato anche a tutti i restanti ricettori.

## **10. RISULTATI DI CALCOLO E VERIFICA LIMITI**

Nelle tabelle a seguire si riportano i risultati del calcolo effettuato per i ricettori maggiormente esposti durante le fasi più impattanti delle lavorazioni di cantiere. Dai risultati è evidente che il Livello totale (LW) filtrato con la curva di ponderazione per postura non nota è sempre inferiore al valore limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza per le abitazioni in periodo diurno pari a 77 dB (Norma UNI 9614).

**Valutazione Previsionale delle Vibrazioni in fase di cantiere Futuro Impianto Eolico da realizzarsi nei Comuni di Cerignola e Orta Nova (FG) in località "Salice-La Paduletta"**

Attività Realizzazione viabilità  
 Ricettore R2

Macchinari	Ruspa cingolata a (d0, f)	Rullo compattatore a (d0, f)	Camion da cantiere a (d0, f)	Ruspa cingolata a(d,f)	Rullo compattatore a(d,f)	Camion da cantiere a(d,f)	Spettro combinato (A <sub>TOT,f</sub> )	Fattori di attenuazione		Spettro combinato (La,w,f)	Ponderazione	Livello finale ponderato
								Coupling Loss	Attenuazione da piano a piano			
1	0	0	0	0	0	0	0				0	
1,25	0	0	0	0	0	0	0				0	
1,6	0	0	0	0	0	0	0				0	
2	1,1	1,6	0	0,093367	0,135806071	0	0,164804808			44,33939754	0	44,34
2,5	1,1	1,7	0	0,069104	0,106797645	0	0,127205147			42,09009365	-0,5	41,59
3,15	1,1	2	0	0,046732	0,084967016	0	0,09697041			39,73278467	-1,5	38,23
4	1,1	0,85	0	0,028019	0,02165072	0	0,035408959			30,98226324	-2	28,98
5	1,4	5,8	0,15	0,019535	0,080929808	0,002093012	0,083280383			38,41085425	2,5	40,91
6,3	1,6	11	0	0,01021	0,070192132	0	0,070930774			37,01669401	-2	35,02
8	3,2	18	0,12	0,00734	0,041288997	0,00027526	0,041937293			32,45200789	-3	29,45
10	4,2	20	0,15	0,002891	0,013767213	0,000103254	0,014067884			22,96457557	-5	17,96
12,5	8	40	0,29	0,001223	0,006115666	4,43386E-05	0,006236938		12	15,89942866	-7	
16	6	20	0,5	0,000112	0,000372056	9,30141E-06	0,00038855		13	-8,211072352	-9	
20	18	4	1,67	3,02E-05	6,70111E-06	2,79772E-06	3,1017E-05		13,5	-30,1679909	-11	
25	24	12	1,85	1,98E-06	9,91754E-07	1,52895E-07	2,22289E-06		14,5	-53,06162785	-13	
31,5	16	7	2,5	2,64E-08	1,15717E-08	4,13275E-09	2,91644E-08		15	-90,70293082	-15	
40	10	3,7	6	9,92E-11	3,67139E-11	5,95361E-11	1,21402E-10		15	-138,3154888	-17	
50	9	3,7	5,5	2,17E-13	8,93515E-14	1,3282E-13	2,6993E-13		15	-191,3749808	-19	
63	6	5	5,2	5,8E-17	4,83084E-17	5,02407E-17	9,06552E-17		15	-260,8521484	-21	
80	5,5	4	4	1,91E-21	1,39243E-21	1,39243E-21	2,74652E-21		14	-351,2243397	-23	
<b>Parametri</b>	<b>Valore</b>	<b>Unità misura</b>										
d-d0	115	m										
η	0,3	adimensionale										
c	360	m/s										
d	125	m										
d0	10	m										
n	0,5	adimensionale										
											<b>Livello totale (LW)</b>	<b>48,16</b>

**Valutazione Previsionale delle Vibrazioni in fase di cantiere Futuro Impianto Eolico da realizzarsi nei Comuni di Cerignola e Orta Nova (FG) in località "Salice-La Paduletta"**

**Attività** Realizzazione cavidotto  
**Ricettore** R15

Macchinari	Ruspa cingolata	Camion da cantiere		Ruspa cingolata	Camion da cantiere		Spettro combinato ( $A_{TOT,f}$ )	Fattori di attenuazione		Spettro combinato ( $L_a, w, f$ )	Ponderazione	Livello finale ponderato
	a (d0, f)	a (d0, f)	a (d, f)	a (d, f)	Coupling Loss	Attenuazione da piano a piano						
1	0	0	0	0	0	0	0				0	
1,25	0	0	0	0	0	0	0				0	
1,6	0	0	0	0	0	0	0				0	
2	1,1	0	0	0,983356134	0	0,983356134	59,85421662				0	59,85
2,5	1,1	0	0	0,978223346	0	0,978223346	59,80876046				-0,5	59,31
3,15	1,1	0	0	0,971590754	0	0,971590754	59,74966746				-1,5	58,25
4	1,1	0	0	0,962985172	0	0,962985172	59,672392				-2	57,67
5	1,4	0,15	0,15	1,212856262	0,129948885	1,219797944	61,72575794				2,5	64,23
6,3	1,6	0	0	1,367388684	0	1,367388684	62,71783963				-2	60,72
8	3,2	0,12	0,12	2,686546925	0,10074551	2,68843524	68,58999159				-3	65,59
10	4,2	0,15	0,15	3,453047175	0,123323113	3,455248671	70,76958617				-5	65,77
12,5	8	0,29	0,29	6,407360643	0,232266823	6,411569097	76,13928654	12	2		-7	55,14
16	6	0,5	0,5	4,632663739	0,386055312	4,648721547	73,34667066	13	2		-9	49,35
20	18	1,67	1,67	13,32814075	1,236555281	13,38538027	82,53261427	13,5	2		-11	56,03
25	24	1,85	1,85	16,86476249	1,299992108	16,91479214	84,56533331	14,5	2		-13	55,07
31,5	16	2,5	2,5	10,50370386	1,641203729	10,63114973	80,53160469	15	3		-15	47,53
40	10	6	6	6,005992062	3,603595237	7,004130159	76,90708416	15	3		-17	41,91
50	9	5,5	5,5	4,868230216	2,975029576	5,705301606	75,12557216	15	3		-19	38,13
63	6	5,2	5,2	2,832610404	2,454929017	3,748380741	71,47687396	15	3		-21	32,48
80	5,5	4	4	2,173315715	1,580593247	2,687299055	68,58631999	14	3		-23	28,59
											<b>Livello totale (LW)</b>	<b>71,90</b>

Parametri	Valore	Unità misura
d-d0	115	m
$\eta$	0,3	adimensionale
c	360	m/s
d	12	m
d0	10	m
n	0,5	adimensionale

**Valutazione Previsionale delle Vibrazioni in fase di cantiere Futuro Impianto Eolico da realizzarsi nei Comuni di Cerignola e Orta Nova (FG) in località "Salice-La Paduletta"**

**Attività** Realizzazione Fondazioni Aerogeneratori  
**Ricettore** R5

Macchinari	Macchina Pali		Spettro combinato ( $A_{TOTI,r}$ )	Spettro combinato ( $L_{a,w,f}$ )	Fattori di attenuazione		Ponderazione	Livello finale ponderato
	a (d0, f)	a(d,f)			Coupling Loss	Attenuazione da piano a piano		
1	7,2	0,249985394	0,249985394	47,95829271			0	47,96
1,25	5,8	0,147288496	0,147288496	43,36337653			0	43,36
1,6	5,2	0,084621809	0,084621809	38,54964614			0	38,55
2	4,4	0,042541095	0,042541095	32,57617331			0	32,58
2,5	3,8	0,019466009	0,019466009	25,78553856			-0,5	25,29
3,15	3,4	0,007513809	0,007513809	17,5172032			-1,5	16,02
4	3,0	0,002216076	0,002216076	6,911691772			-2	4,91
5	2,8	0,000564283	0,000564283	-4,970061853			2,5	
6,3	2,5	9,32526E-05	9,32526E-05	-20,60678315			-2	
8	2,2	9,31481E-06	9,31481E-06	-40,61651819			-3	
10	2,1	6,77522E-07	6,77522E-07	-63,38152709			-5	
12,5	2,8	3,65734E-08	3,65734E-08	-88,73669686		12	2	
16	3,1	4,37773E-10	4,37773E-10	-127,1750272		13	2	
20	4,2	3,50612E-12	3,50612E-12	-169,1034598		13,5	2	
25	9,9	1,3161E-14	1,3161E-14	-217,6142217		14,5	2	
31,5	22,6	6,99913E-18	6,99913E-18	-283,0991202		15	3	
40	66,8	3,65279E-22	3,65279E-22	-368,7475115		15	3	
50	338,8	4,74761E-27	4,74761E-27	-466,470502		15	3	
63	197,2	1,48965E-34	1,48965E-34	-616,5383113		15	3	
80	114,8	2,71144E-44	2,71144E-44	-811,3359868		14	3	
							<b>Livello totale (LW)</b>	<b>49,70</b>

Parametri	Valore	Unità misura
d-d0	115	m
$\eta$	0,3	adimensionale
c	360	m/s
d	250	m
d0	4	m
n	0,5	adimensionale

## **11.CONCLUSIONI**

Alla luce delle verifiche effettuate per la valutazione previsionale dell'impatto da vibrazioni meccaniche delle attività di cantiere connesse alla realizzazione del futuro Parco eolico da realizzarsi nella Provincia di Foggia, nei territori comunali di Cerignola e Orta Nova - Località "Salice - La Paduletta" si evince che:

- il livello di vibrazione stimato con ipotesi precauzionali sui ricettori maggiormente esposti durante le fasi più impattanti delle lavorazioni di cantiere è sempre risultato largamente inferiore al valore limite di valutazione del disturbo per le abitazioni in periodo diurno pari a 77 dB (UNI 9614); di conseguenza sono da escludersi anche potenziali effetti di danno strutturale ed estetico allo stesso edificio (UNI 9916).

Essendo tutti gli altri edifici a distanze maggiori rispetto ai ricettori considerati nei calcoli, anche per essi valgono le considerazioni di cui sopra.

Si precisa, che sarà assicurata la conformità dei macchinari utilizzati a quanto previsto dalla normativa della Unione europea e che si farà ricorso a tutte le misure necessarie a ridurre ulteriormente il disturbo. Da evidenziare infine che l'impatto massimo sul quale sono state effettuate le valutazioni nel presente studio e il relativo disturbo ha una breve durata, per lo più qualche giorno, e decade rapidamente all'allontanarsi del fronte avanzamento lavori.

Le valutazioni espresse nella presente relazione tecnica mantengono validità finché permangono invariate le ipotesi assunte sulle attività di cantiere e sulla tipologia di macchinari utilizzati.

**Dott. Ing. Donata Sileo**

**Data: 07/11/2019**

