



## PROGETTO AdSP n. 1951

*Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste*


CUP: C94E21000/ 60001

### Progetto di Fattibilità Tecnico Economica Fascicolo A– intervento PNC da autorizzare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:		
arch. Gerardo Nappa	AdSP MAO	Responsabile dell'integrazione e Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione
arch. Sofia Dal Piva	AdSP MAO	Progettazione generale
arch. Stefano Semenic	AdSP MAO	Progettazione generale
ing. Roberto Leoni	BITECNO S.r.l.	Sistema di trazione elettrica ferroviaria
ing. Saturno Minnucci	MINNUCCI ASSOCIATI S.r.l.	Impianti speciali e segnalamenti ferroviari
ing. Dario Fedrigo	ALPE ENGINEERING S.r.l.	Progettazione strutturale oo.cc. ferrovia e strade
ing. Andrea Guidolin p.i. Furio Benci	SQS S.r.l.	Progettazione della sicurezza
ing. Sara Agnoletto	HMR Ambiente S.r.l.	Progettazione MISP e cassa di colmata
p.i. Trivellato, dott. G. Malvasi, dott. S. Bartolomei	p.i. Antonio Trivellato d.i.	Modellazione rumore, atmosfera, vibrazioni
dott. Gabriele Cailotto ing. Anca Tamasan	NEXTECO S.r.l.	Studio di impatto ambientale e piano di monitoraggio ambientale
ing. Sebastiano Cristoforetti	CRISCON S.r.l.s.	Relazione di sostenibilità
ing. Tommaso Tassi	F&M Ingegneria S.p.A.	Progettazione degli edifici pubblici nel contesto dell'ex area "a caldo"
ing. Michele Titton	ITS s.r.l.	Connessione stradale alla GVT
RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: ing. Paolo Crescenzi		

NOME FILE: 1GNR_P-1GE-D-AMB-961-02-00.odt	SCALA: ---
TITOLO ELABORATO: <b>VALUTAZIONE PREVISIONALE DEL LIVELLO VIBRATORIO</b>	ELABORATO: <b>1GNR_P-1GE-D-AMB-961-02-00</b>

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	01/02/2023	Definitivo	S.Bartolomei	S.Dal Piva	G.Nappa

	Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001	
---	---	--

## **NOTA INTRODUTTIVA**

Il presente PFTE oggetto di autorizzazione, secondo procedura speciale ex art. 44 D.Lgs. 77.2021, relativo ai seguenti ambiti inseriti nel fascicolo A:

1. MISP;
2. Stazione ferroviaria commerciale Nuova Servola, Connessione alla GVT e altre opere viarie;
3. Edifici pubblici funzionali al Porto di Trieste.

è parte di un più ampio contesto che prevede opere progettuali anche per i seguenti ulteriori ambiti non oggetto di autorizzazione inseriti nel fascicolo B:

1. Cassa di Colmata,
2. Molo VIII,
3. Rampa Arvedi,
4. Opere ferroviarie su asset RFI.

Nel presente elaborato sono trattate anche queste ultime per contestualizzare le opere PNC nello sviluppo complessivo ed unitario del Punto Franco Nuovo all'interno del Sistema Portuale.



## Sommario

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>RIFERIMENTI NORMATIVI.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>INFORMAZIONI IDENTIFICATIVE E DI CARATTERE GENERALE.....</b>	<b>19</b>
3.1	DESCRIZIONE DELL'AREA IN ESAME.....	19
3.2	CLASSIFICAZIONE VIBRATORIA.....	21
3.3	OSSERVAZIONI SUGLI INTERVENTI DA REALIZZARE.....	21
<b>4</b>	<b>METODICA PREVISIONALE DEL LIVELLO VIBRAZIONALE.....</b>	<b>22</b>
4.1	CARATTERISTICHE GEOLOGICHE DEI TERRENI DELL'AREA.....	22
4.2	STUDI GEOGNOSTICI UTILI ALLA CARATTERIZZAZIONE DEL MODELLO.....	24
1.1.1	<i>Elementi base dello studio dei fenomeni vibratorii.....</i>	<i>24</i>
1.1.2	<i>Propagazione delle vibrazioni nel terreno.....</i>	<i>26</i>
1.1.3	<i>Fattore di smorzamento viscoso dei terreni da prove sismiche.....</i>	<i>28</i>
4.3	VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLE VIBRAZIONI.....	29
4.4	METODICA DI STUDIO DEL MODELLO PREVISIONALE DI PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI.....	30
4.5	PROPAGAZIONE DELLE VIBRAZIONI NELLE STRUTTURE EDILIZIE.....	32
4.6	ACCOPPIAMENTO TERRENO – FONDAZIONI EDIFICIO.....	33
4.7	RISONANZE STRUTTURALI DEI SOLAI .....	34
4.8	INDIVIDUAZIONE DELLE VIBRAZIONI TRASMESSE AI RICETTORI E STIMA DELLA RISPOSTA VIBRAZIONALE	37
4.9	MODELLO UTILIZZATO.....	39
1.1.4	<i>Specifiche generali di calcolo.....</i>	<i>39</i>
1.1.5	<i>Specifiche di calcolo vibrazioni realizzazione setti trivellati .....</i>	<i>40</i>
<b>5</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA ATTORNO AL MOLO.....</b>	<b>43</b>
5.1	IDENTIFICAZIONE DELLE PRINCIPALI SORGENTI VIBRATORIE.....	43
1.1.6	<i>Traffico stradale.....</i>	<i>43</i>
1.2	<i>Traffico ferroviario.....</i>	<i>43</i>
1.3	<i>Realizzazione setti trivellati.....</i>	<i>44</i>
1.4	<i>Attività di cantiere.....</i>	<i>44</i>
5.2	IDENTIFICAZIONE DEI RICETTORI .....	45
5.3	MAPPA RICETTORI.....	46
5.4	STIMA DEI LIVELLI VIBRATORI AI RICETTORI NELLE CONDIZIONI ATTUALI CON SORGENTE: FERROVIA E STRADA.....	48
5.5	STIMA DEI LIVELLI VIBRATORI AI RICETTORI NELLE CONDIZIONI ATTUALI CON SORGENTE: ATTIVITÀ DI TRIVELLAZIONE SETTO.....	54



5.6 STIMA DEI LIVELLI VIBRATORI AI RICETTORI NELLE CONDIZIONI ATTUALI CON SORGENTE: ATTIVITÀ DI CANTIERE.....	57
<b>6 ESITO DELL'ANALISI VIBRAZIONALE.....</b>	<b>58</b>
<b>7 BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>62</b>

### Sommario figure

<b>FIGURA 1 UNI9614 ASSI RIFERIMENTO .....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 2 UNI9614 POSTURA.....</b>	<b>10</b>
<b>FIGURA 3 UNI9614 CURVA PONDERAZIONE X,Y,Z.....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 4 UNI9614 CURVA PONDERAZIONE ASSE NON DEFINITO.....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 5 VISTA DI TRIESTE.....</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 6 VISTA DI TRIESTE.....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 7 AREA DI INTERVENTO.....</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 8 ESTRATTO DALLA CARTA DELLE LITOLOGIA SUPERFICIALE (TAV.4) DEL P.R.G. DI TRIESTE.....</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 9 ESTRATTO DALLA CARTA DELLE LITOLOGIA SUPERFICIALE (TAV.6) DEL P.R.G. DI TRIESTE.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 10 LEGENDA DALLA CARTA DELLE LITOLOGIA SUPERFICIALE DEL P.R.G. DI TRIESTE.....</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 11 PROPAGAZIONE DELLE ONDE DI VOLUME E DI SUPERFICIE E LORO ATTENUAZIONE CON LA DISTANZA.....</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 12 ANDAMENTO DELLO SMORZAMENTO NORMALIZZATO TRATTO DAI SISMOGRAMMI DELLA PROVA MASW1-2.....</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 13 RISPOSTA DELLE FONDAZIONI PER DIVERSE TIPOLOGIE DI EDIFICI (FONTE: FTA, USA).....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 14 ATTENUAZIONE DELLE VIBRAZIONI DA UN PIANO AL SUCCESSIVO. 34</b>	
<b>FIGURA 15 AMPLIFICAZIONE PRODOTTA DAI SOLAI.....</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 16 FATTORI CORRETTIVI ADOTTATI IN FUNZIONE ALLA TIPOLOGIA DI FONDAZIONE.....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 17 POSIZIONE RICETTORI R1-R3.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 18 POSIZIONE RICETTORI R5-R8.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 19 POSIZIONE RICETTORI R9-R16-R20.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 20 POSIZIONE RICETTORE R17.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 21 POSIZIONE RICETTORE R18-19.....</b>	<b>48</b>
<b>FIGURA 22 ANDAMENTO CON LA DISTANZA DEL LIVELLO VIBRATORIO IN ACCELERAZIONE PONDERATA IN FREQUENZA DI TRAFFICO FERROVIARIO PER LE DUE CLASSI LITOLOGICHE CL-1 E CL-2.....</b>	<b>54</b>



<b>FIGURA 23 ANDAMENTO CON LA DISTANZA DEL LIVELLO VIBRATORIO IN ACCELERAZIONE PONDERATA IN FREQUENZA DI TRAFFICO MISTO STRADALE PER LE DUE CLASSI LITOLOGICHE CL-1 E CL-2.....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 24 POSIZIONE RICETTORI VIBRAZIONI COSTRUZIONE SETTO.....</b>	<b>56</b>
<b>FIGURA 25 ANDAMENTO CON LA DISTANZA DEL LIVELLO VIBRATORIO IN ACCELERAZIONE PONDERATA IN FREQUENZA REALIZZAZIONE SETTO S PER LE DUE CLASSI LITOLOGICHE CL-1 E CL-2.....</b>	<b>56</b>

### Sommario tabelle

<b>TABELLA 1 LIMITI UNI9614-1990.....</b>	<b>13</b>
<b>TABELLA 2 LIMITI UNI9614-2017.....</b>	<b>15</b>
<b>TABELLA 3 LIMITI UNI9916-2014 LIMITI VIBRATORI DI BREVE DURATA.....</b>	<b>17</b>
<b>TABELLA 4 LIMITI UNI9916-2014 LIMITI VIBRATORI PERMANENTI.....</b>	<b>18</b>
<b>TABELLA 5 CARATTERISTICHE DEI TERRENI:.....</b>	<b>28</b>
<b>TABELLA 6 CLASSI GEOLITOLOGICHE DEL SITO.....</b>	<b>30</b>
<b>TABELLA 7 TIPOLOGIA DELLE SORGENTI DI VIBRAZIONI UTILIZZATE.....</b>	<b>31</b>
<b>TABELLA 8 FREQUENZE NATURALI DI VIBRAZIONE.....</b>	<b>36</b>
<b>TABELLA 9 TIPOLOGIA DELLE FONDAZIONI E FATTORE CORRETTIVO.....</b>	<b>38</b>
<b>TABELLA 10 VALORI DEL COEFF. DI ATTENUAZIONE PER DIVERSE SORGENTI. .</b>	<b>40</b>
<b>TABELLA 11 PRINCIPALI PARAMETRI DEI TIPI DI TERRENO .....</b>	<b>40</b>
<b>TABELLA 12 ELENCO RICETTORI CONSIDERATI.....</b>	<b>46</b>
<b>TABELLA 13 LIVELLI DI ACCELERAZIONE CALCOLATI AI RICETTORI PER VIBRAZIONI STRADALI E FERROVIARIE.....</b>	<b>49</b>
<b>TABELLA 14 LIVELLI DI ACCELERAZIONE CALCOLATI AI RICETTORI PER VIBRAZIONI DI TRIVELLAZIONE SETTO.....</b>	<b>57</b>
<b>TABELLA 15 LIVELLI DI ACCELERAZIONE CALCOLATI AI RICETTORI PER VIBRAZIONI DI ATTIVITÀ DI CANTIERE.....</b>	<b>59</b>



## **1** PREMESSA

La presente relazione è relativa al progetto di Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuova nel porto di Trieste.

In essa si sviluppa l'analisi vibrazionale dell'area di cantiere e delle aree limitrofe interessate dall'ampliamento.

L'analisi vibrazionale è stata sviluppata mediante una valutazione ragionata delle caratteristiche del sito, della morfologia e della geologia dell'area; si sono altresì valutate le caratteristiche delle sorgenti vibratorie che verranno utilizzate durante lo sviluppo del progetto in fase di cantiere e del possibile impatto dell'opera a regime.

In particolare si evidenzia che il presente studio è stato basato sull'utilizzo di spettri vibrazionali tratti da studi precedenti e da fonti bibliografiche dalla letteratura tecnica, non essendo stati effettuati rilievi vibrazionali in sito.

La firma spettrale di queste sorgenti è stata applicata alle tipologie dei terreni presenti nell'area e sulla base di questi caratteri si sono calcolate le curve di attenuazione specifiche per ogni tipologia di terreno e sorgente.

Su questi dati si è quindi potuto calcolare il livello di vibrazioni stimato per distanze comprese tra 10 e 200 m dalla sorgente, ad intervalli di 10 m.

Conoscendo come il fenomeno vibratorio si propaga nel sottosuolo si è potuto quindi valutare in corrispondenza degli edifici (ricettori) il livello di vibrazioni che raggiunge le fondazioni degli stessi e che quindi si propaga attraverso la struttura degli stessi fino ai piani superiori.

Sulla base di questi livelli calcolati si è potuto verificarne il valore massimo ipotizzabile e confrontarlo con i limiti previsti dalle norme.

L'analisi pertanto, pur se si è cercato di utilizzare dei dati quanto più possibile conformi alle caratteristiche del sito e delle macchine operatrici in opera, ha carattere indicativo, essendo la propagazione delle vibrazioni soggetta ad un ampio numero di variabili difficilmente valutabili in modo complessivo a priori.

Per la valutazione del disturbo indotto da vibrazioni si è fatto pertanto riferimento alla norma UNI 9614-1990, in cui il fenomeno vibratorio è stato considerato come continuo, questo per avere una valutazione del possibile disturbo quanto più conservativa.



Nel 2017 la UNI 9614 ha subito un aggiornamento con l'introduzione della valutazione del disturbo vibratorio introducendo un approccio innovativo e diverso nelle modalità di valutazione dei disturbi da vibrazione.

L'uso di quest'ultima tuttavia complica l'analisi in quanto non si sarebbe potuto utilizzare i dati tecnici disponibili tratti dalle fonti bibliografiche.

Per poter avere una valutazione del fenomeno vibratorio e della sua attenuazione con la distanza è necessario conoscere lo spettro di frequenze che lo compongono ad una certa distanza.

Questo viene valutato nella UNI 9614-1990 mediante lo spettro a 1/3 di ottava a cui viene applicato il filtro di ponderazione e la valutazione viene fatta sull'asse in cui il valore appare più significativo.

Con l'introduzione della UNI 9614-2017 si prevede istante per istante il calcolo della risultante delle accelerazioni sui tre assi, e l'applicazione dinamica del filtro di ponderazione, che rimane sostanzialmente uguale. Il valore di accelerazione fornito pertanto è un valore che non è più possibile scomporre nuovamente nelle sue tre componenti  $x,y,z$ , a meno che non sia fornito l'intero spettro acquisito da cui poterlo elaborare nuovamente.

L'attenuazione dei valori di vibrazione con la distanza è funzione non solo della distanza, che porterebbe peraltro ad un facile calcolo, ma anche delle componenti spettrali, dove le componenti a bassa frequenza sono meno attenuate con la distanza rispetto alle componenti ad alta frequenza, che a loro volta dipendono dalle caratteristiche litologiche e morfologiche del sito.

La propagazione delle vibrazioni nel sottosuolo pertanto è strettamente sito e sorgente dipendente, questo comporta che se non si ha a disposizione uno spettro di riferimento e della distanza a cui è stato acquisito non è possibile fare una valutazione della sua attenuazione con la distanza, se non in modo molto indicativo.

Pertanto per poter fare una valutazione il più verosimile possibile, si sono utilizzati come input di calcolo degli spettri di emissione di macchine di cantiere, tratti dalla documentazione tecnica di più autori.

L'analisi è stata sviluppata nelle seguenti fasi:

- ✓ Inquadramento generale dell'area: Inquadramento delle caratteristiche generali dell'area di studio e delle caratteristiche delle opere in progetto;



Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 7 di 72

- ✓ Censimento Ricettori: l'identificazione degli edifici limitrofi al tracciato; la destinazione d'uso; la tipologia; il numero di piani;
- ✓ Stima distanza sorgente-ricettore: la stima della distanza tra sorgente ed il punto più vicino dell'edificio a livello p.c.;
- ✓ Stima degli spettri sorgente: caratterizzazione vibrometrica degli spettri vibrazionali compatibili col tipo di macchine di cantiere e di sito;
- ✓ Caratterizzazione geotecnica/geodinamica del suolo: è stata consultata la documentazione geotecnica contenente le prove geognostiche fatte per lo studio dell'area;
- ✓ Stima delle curve di attenuazione con la distanza, per le varie tipologie di suolo, tra suolo e fondazione e tra i livelli dell'edificio, sulla base di relazioni empiriche tratte da fonti bibliografiche;
- ✓ Calcolo dei livelli vibrazionali secondo la norma UNI 9614 e confronto con i livelli delle vibrazioni ottenuti con i limiti forniti dalla normativa UNI 9614;
- ✓ Previsione dello scenario di progetto: Valutazione dell'Impatto Vibratorio sulla base di tutti gli spettri vibro compatibili col sito e con l'attività di cantiere. Verifica dei valori di attenuazione con la distanza per le varie sorgenti e confronto con i limiti dati dalle norme, confrontati con il tipo di ricettori presenti nell'area;
- ✓ Costruzione di mappe dei valori vibrazionali calcolati.





## **2 RIFERIMENTI NORMATIVI**

A livello nazionale non esiste al momento una norma che stabilisca valori limite per l'esposizione alle vibrazioni, in ambito non lavorativo, si fa riferimento alle seguenti norme tecniche, nazionali ed internazionali:

### **Esposizione umana**

- UNI 9614: Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo;
- ISO 2631-2: Valutazione dell'esposizione umana alla vibrazione del corpo intero - Vibrazione negli edifici;
- UNI 11048: Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo;

### **Danni agli edifici**

- UNI 9916-DIN 4150: Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.

Per la valutazione del fenomeno vibratorio e del disturbo indotto da vibrazioni si è fatto riferimento alla norma UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

Nel 2017 la UNI 9614 ha subito un aggiornamento con l'introduzione della valutazione del disturbo vibratorio introducendo un approccio innovativo e diverso nelle modalità di valutazione dei disturbi da vibrazione.

Nel presente studio si è dovuto necessariamente far riferimento anche alla norma UNI 9614-1990, in quanto gli spettri vibrazionali, in 1/3 d'ottava, utilizzati a riferimento sono tratti da fonti bibliografiche che hanno utilizzato per il loro calcolo questa versione.

Le due norme pur tuttavia rimangono confrontabili nei limiti di accelerazione ponderata in frequenza come evidenziato nelle seguenti tabelle che evidenziano i valori limite assunti per le due revisioni.



• **UNI 9614-1990**

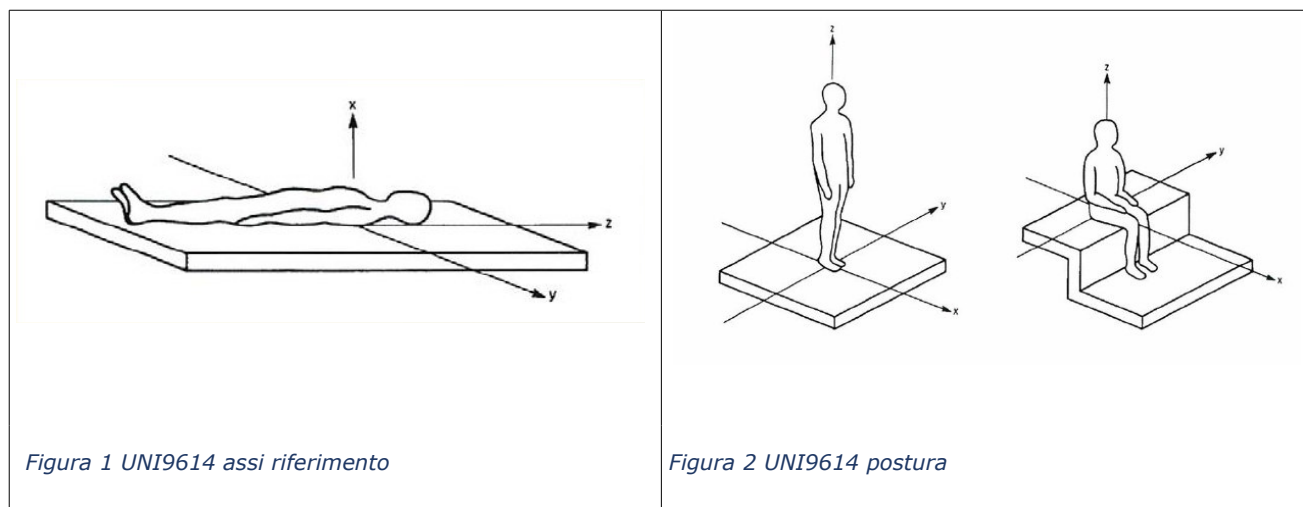
La norma concorda parzialmente con la norma ISO 2631-2.

In generale i contenuti della norma UNI 9614-1990 sono sostanzialmente analoghi alla norma ISO 2631-2.

Dal punto di vista tecnico ne differisce nella definizione dei tipi di vibrazioni e nel fatto che nella norma UNI vengono riportate indicazioni supplementari per quanto riguarda le vibrazioni residue, la valutazione di disturbo da vibrazioni di livello non costante e le vibrazioni da veicoli ferroviari.

La norma specifica che la sensibilità umana è variabile con la frequenza e dipende dalla posizione del corpo umano soggetto alle vibrazioni.

La ISO 2631-2 e la UNI 9614 si applicano a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y, e z di riferimento per persone in piedi, sedute o coricate.



Il campo di frequenze considerato è 1÷80 Hz, ed il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione, espresso dalla seguente relazione:

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

Ai valori misurati si applica un filtro di ponderazione che tiene conto della diversa sensibilità del corpo umano a seconda della sua posizione.

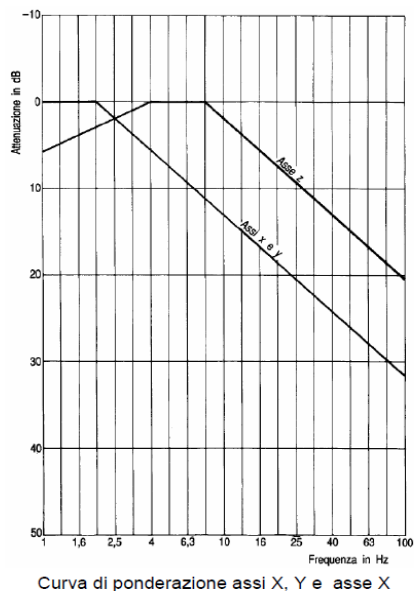


Figura 3 UNI9614 curva ponderazione x,y,z

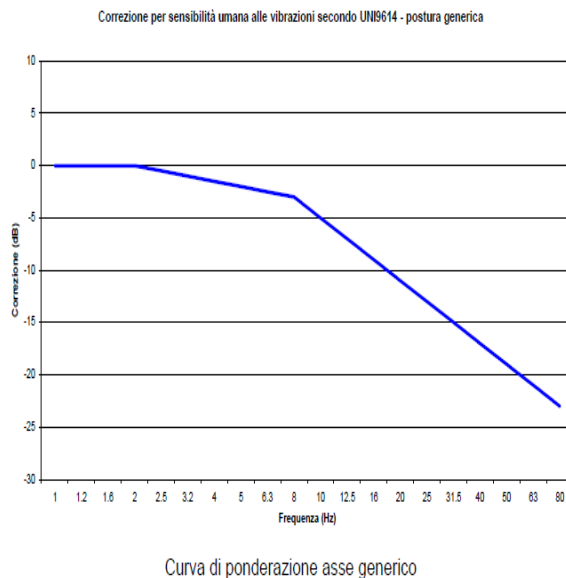


Figura 4 UNI9614 curva ponderazione asse non definito

Pertanto per valutare il livello complessivo di accelerazione ponderata in frequenza nell'intervallo da 1 ad 80 Hz si deve sottrarre al valore misurato di accelerazione alle varie frequenze un valore di ponderazione per ciascuna frequenza (Fig.3 e 4) espressa in 1/3 d'ottava, e quindi sommare energeticamente i livelli di accelerazione alle varie frequenze onde ricavarne il valore di accelerazione complessivo ponderato in frequenza ( $L_{aw}$ ), ai cui livelli la norma fa riferimento:

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

Questa metodica rende tuttavia le cose più complicate in presenza di fenomeni di propagazione che, come abbiamo visto, producono una attenuazione con la distanza che dipende fortemente dalla frequenza.

La norma UNI9614 definisce infine il valore numerico del limite di accettabilità per edifici residenziali, corrispondente ad un valore del livello di accelerazione complessiva, ponderata



secondo asse generico, pari a 74 dB per il periodo notturno (7-22) e a 77 dB per il periodo diurno.

Dato che nell'opera di progetto è prevista l'attività di cantiere sia diurna che notturna si sono adottati come limiti di accettabilità il valore diurno (7-22) di 77 dB ed il valore notturno (22-7) di 74 dB, ad eccezione degli edifici "particolarmente sensibili" per i quali si è adottato come limite (sia diurno che notturno) il valore stesso della soglia di percezione, che è pari a 71 dB, come previsto dalla UNI 9614.

Tale limite è da intendersi riferito al livello di accelerazione (ponderata per asse generico) rilevata sul pavimento all'interno degli edifici.

Per cui in presenza dei fenomeni di attenuazione/amplificazione propri dell'edificio stesso, i livelli di accelerazione al suolo tali da non indurre il superamento del valore limite all'interno degli edifici dovranno essere più bassi di alcuni dB.

Il livello vibrazionale all'interno degli edifici, interessati dalla amplificazione legata alle strutture dell'edificio, è stata stimata applicando un guadagno di +5 dB per le strutture fino a 2 piani, e di +1 dB per ogni piano superiore al secondo per gli edifici più elevati, non disponendo dei dati specifici di costruzione di ogni singola struttura.

La norma UNI 9614 prevede che la valutazione del disturbo venga valutato in modo differente a seconda della postura del soggetto, per compensare la differente sensibilità alle vibrazioni che ha il corpo umano ha nei tre assi (X,Y,Z).

Qualora non si faccia riferimento ad un asse specifico di valutazione delle vibrazioni, la norma prevede l'uso di un filtro di ponderazione per asse generico o meglio per "postura non definita" come riportato nelle seguenti tabelle tratte dalla Norma UNI 9614 (Fig.4)

I limiti di accelerazione ponderata in frequenza a cui fare riferimento sono pertanto i valori relativi agli assi X e Y (Tabella 1, asse X, Y).

### **Vibrazioni da Traffico Ferroviario**

La UNI 9614-1990 prevede una valutazione separata per le vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari, ed assume come valore di riferimento per il disturbo il valore di accelerazione di:

- $30 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  per asse Z pari ad un livello di 89,5 dB e di
- $21,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  per assi X e Y (postura non definita) pari ad un livello di 86,7 dB.



**Tabella 1 limiti UNI9614-1990**

Destinazione d'uso	Accelerazione (asse Z)	
	m/s <sup>2</sup>	dB
Aree critiche	5,0 x 10 <sup>-3</sup>	74
Abitazioni notte (22.00 – 7.00)	7,0 x 10 <sup>-3</sup>	77
Abitazioni giorno (7.00 – 22.00)	10,0 x 10 <sup>-3</sup>	80
Uffici	20,0 x 10 <sup>-3</sup>	86
Fabbriche	40,0 x 10 <sup>-3</sup>	92

Destinazione d'uso	Accelerazione (asse X, Y)	
	m/s <sup>2</sup>	dB
Aree critiche	3,6 x 10 <sup>-3</sup>	71
Abitazioni notte (22.00 – 7.00)	5,0 x 10 <sup>-3</sup>	74
Abitazioni giorno (7.00 – 22.00)	7,2 x 10 <sup>-3</sup>	77
Uffici	14,4 x 10 <sup>-3</sup>	83
Fabbriche	28,8 x 10 <sup>-3</sup>	89

• **UNI 9614-2017**

La nuova versione della norma prevede nella misura anche un'analisi statistica legata al numero di eventi del fenomeno e che il valore di accelerazione sia misurato e ponderato in ogni istante e che ne venga calcolato il valore risultante dalla somma del contributo di ogni asse.

Si fa riferimento alle specifiche di misurazione che devono essere conformi alle caratteristiche di analisi richieste dalla UNI EN ISO 8041-1, che definiscono i filtri "band limiting" e di ponderazione Wm e le caratteristiche minime della strumentazione utilizzata.

Il calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace  $a_w(t)$  deve essere quindi eseguito per la combinazione, istante per istante, a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate calcolate mediante l'equazione:



$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,rms,x}^2(t) + a_{w,rms,y}^2(t) + a_{w,rms,z}^2(t)}$$

La combinazione delle tre componenti assiali del valore efficace dell'accelerazione ponderata è effettuata secondo quanto richiesto dalla norma UNI ISO 2631-1:1997 punto 6.5 con  $k_x=k_y=k_z = 1$ .

La massima accelerazione ponderata è calcolata come il massimo di tali valori, all'interno del singolo j-esimo evento

$$a_{w,95} = \overline{a_{w,max}} + 1,8 \times \sigma$$

dove

$$\overline{a_{w,max}}$$

è il valore medio della massima accelerazione ponderata calcolato mediante la media aritmetica delle massime accelerazioni ponderate relative agli N eventi considerati e

$$\overline{a_{w,max}} = \frac{\sum_{j=1}^N a_{w,max,j}}{N}$$

$\sigma$  è lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate.

Le vibrazioni associate alla sorgente ritenuta fonte di disturbo devono essere quantificate mediante l'accelerazione ponderata massima statistica della sorgente  $V_{sor}$  che deve essere calcolata a partire dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse  $V_{imm}$  e dalla accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue  $V_{res}$  con la seguente equazione:

$$V_{sor} = \sqrt{(V_{imm}^2 - V_{res}^2)}$$

La valutazione del disturbo è effettuato confrontando il parametro descrittore della vibrazione della sorgente  $V_{sor}$  con i limiti di riferimento riportati ai punti 9.1 e 9.2 della norma.

Di seguito vengono riportati per i diversi tipi di ambiente e per i diversi periodi della giornata i valori limite di disturbo della norma UNI 9614-2017.



**Tabella 2 limiti UNI9614-2017**

<b>Tipologia</b>	<b>UNI 9614-2017</b> valore limite <b>V<sub>50r</sub></b> mm/s <sup>2</sup> - (dB)
<b>Ambiente ad uso abitativo</b>	
<i>periodo diurno</i>	7,2 - (74)
<i>periodo notturno</i>	3,6 - (68)
<i>periodo diurno giornate festive</i>	5,4 - (71,5)
<b>Ospedali, case di cura ed affini</b>	2,0 - (62,9)
<b>Asili e case di riposo</b>	3,6 - (68)
<b>Scuole</b>	5,4 - (71,5)

Come si può osservare i limiti sostanzialmente si equivalgono, nella nuova versione del 2017 sono state introdotte delle nuove tipologie di ambiente con livelli di accelerazione più conservativi, quali gli "ospedali" con un livello di 2,0 mm/s<sup>2</sup> pari a (62,9 dB), asili e case di riposo con un livello di 3,6 mm/s<sup>2</sup> pari a (68 dB), ed "periodo diurno giornate festive" con un livello di 5,4 mm/s<sup>2</sup> pari a (71,5 dB).

Come già esposto, tuttavia, questa metodica aggiornata della Norma UNI 9614 limita l'uso dell'analisi di confronto effettuata con dati di letteratura, di cui è disponibile solo il livello in dB calcolato e ponderato in frequenza della vibrazione di diverse sorgenti.

**• UNI 9916-2014 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"**

La norma UNI 9916 si occupa di valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici, al fine di prevenirne il degrado o, in casi estremi, il crollo.

Secondo la UNI 9916, la grandezza fisica che meglio rappresenta il potenziale lesivo del fenomeno vibratorio non è l'accelerazione, ma la velocità di vibrazione.

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916 "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 viene richiamata, sebbene non faccia parte integrante della norma, la DIN 4150, parte 3.

La norma UNI 9916 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.

Altro scopo della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime.

Gli edifici sono classificati secondo tre tipologie:

- costruzioni residenziali e costruzioni strutturalmente simili;
- costruzioni industriali e costruzioni strutturalmente simili;
- costruzioni che, per la loro sensibilità particolare alle vibrazioni, non rientrano nella classificazione delle prime due categorie o sono di grande valore intrinseco (per esempio edifici monumentali soggetti a tutela).

La Norma fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo due livelli:

- Danno di architettonico (o di soglia): effetto residuo delle vibrazioni che determina alterazione estetica o funzionale dell'edificio senza comprometterne la stabilità strutturale o la sicurezza degli occupanti. Il danno architettonico si presenta in molti casi con la formazione o l'accrescimento di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o sulle superfici intonacate o nei giunti di malta delle costruzioni in mattoni;
- Danno maggiore: Effetto che si presenta con la formazione di fessure più marcate, distacco e caduta di gesso o pezzi di intonaco fino al danneggiamento di elementi strutturali (per esempio fessure nei pilastri e nelle travature, apertura di giunti).

L'Appendice D della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli della velocità massima con riferimento alla DIN 4150.





Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco (peak component particle velocity).

Per le vibrazioni di breve durata (quelle per cui sono da escludere problemi di fatica e amplificazioni dovute a risonanza nella struttura interessata), i limiti sono riportati nel seguente prospetto:

**Tabella 3 limiti UNI9916-2014 limiti vibratori di breve durata**

Valori di riferimento per la velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni a breve durata sulle costruzioni						
Classe	Tipo di Edificio	Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s				
		Fondazioni			Piano Alto	Solai Componente Verticale
		Da 1Hz a 10Hz	Da 10Hz a 50Hz	Da 50Hz a 100Hz	Per tutte le frequenze	Per tutte le frequenze
<b>1</b>	<b>Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzione strutturalmente simili</b>	20	Varia linearmente da 20 ( $f = 1\text{Hz}$ ) a 40 ( $f=50\text{Hz}$ )	Varia linearmente da 40 ( $f = 1\text{Hz}$ ) a 50 ( $f=50\text{Hz}$ )	40	20
<b>2</b>	<b>Edifici residenziali e costruzioni simili</b>	5	Varia linearmente da 5 ( $f = 1\text{Hz}$ ) a 15 ( $f=50\text{Hz}$ )	Varia linearmente da 5 ( $f = 1\text{Hz}$ ) a 20 ( $f=50\text{Hz}$ )	15	20
<b>3</b>	<b>Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)</b>	3	Varia linearmente da 3 ( $f = 1\text{Hz}$ ) a 8 ( $f=50\text{Hz}$ )	Varia linearmente da 8 ( $f = 1\text{Hz}$ ) a 10 ( $f=50\text{Hz}$ )	8	3/4

Per frequenze oltre in 100Hz possono essere usati i valori di riferimento per 100Hz



Per le vibrazioni permanenti invece i valori di riferimento sono riportati nel seguente prospetto:

**Tabella 4 limiti UNI9916-2014 limiti vibratorii permanenti**

<b>Valori di riferimento per le componenti orizzontali della velocità di vibrazione (p.c.p.v.) al fine di valutare l'azione delle vibrazioni durature sulle costruzioni</b>		
<b>Classe</b>	<b>Tipo di Edificio</b>	<b>Valori di riferimento per la velocità di vibrazione p.c.p.v. in mm/s Per tutte le frequenze</b>
<b>1</b>	Costruzioni industriali, edifici industriali e costruzione strutturalmente simili	10
<b>2</b>	Edifici residenziali e costruzioni simili	5
<b>3</b>	Costruzioni che non ricadono nelle classi 1 e 2 e che sono degne di essere tutelate (per esempio monumenti storici)	25

Al paragrafo 9 della norma UNI 9916 viene precisato che i danni strutturali all'edificio nel suo assieme dovuti a vibrazioni continue sono estremamente rari e comunque è necessario che le vibrazioni raggiungano livelli tali da causare prima fastidio e dolore agli occupanti l'edificio medesimo.

Ciò non implica che si possano escludere a priori danni alle strutture una volta verificato che i livelli delle vibrazioni siano inferiori a quelli stabiliti dalle varie normative per il disturbo alle persone.

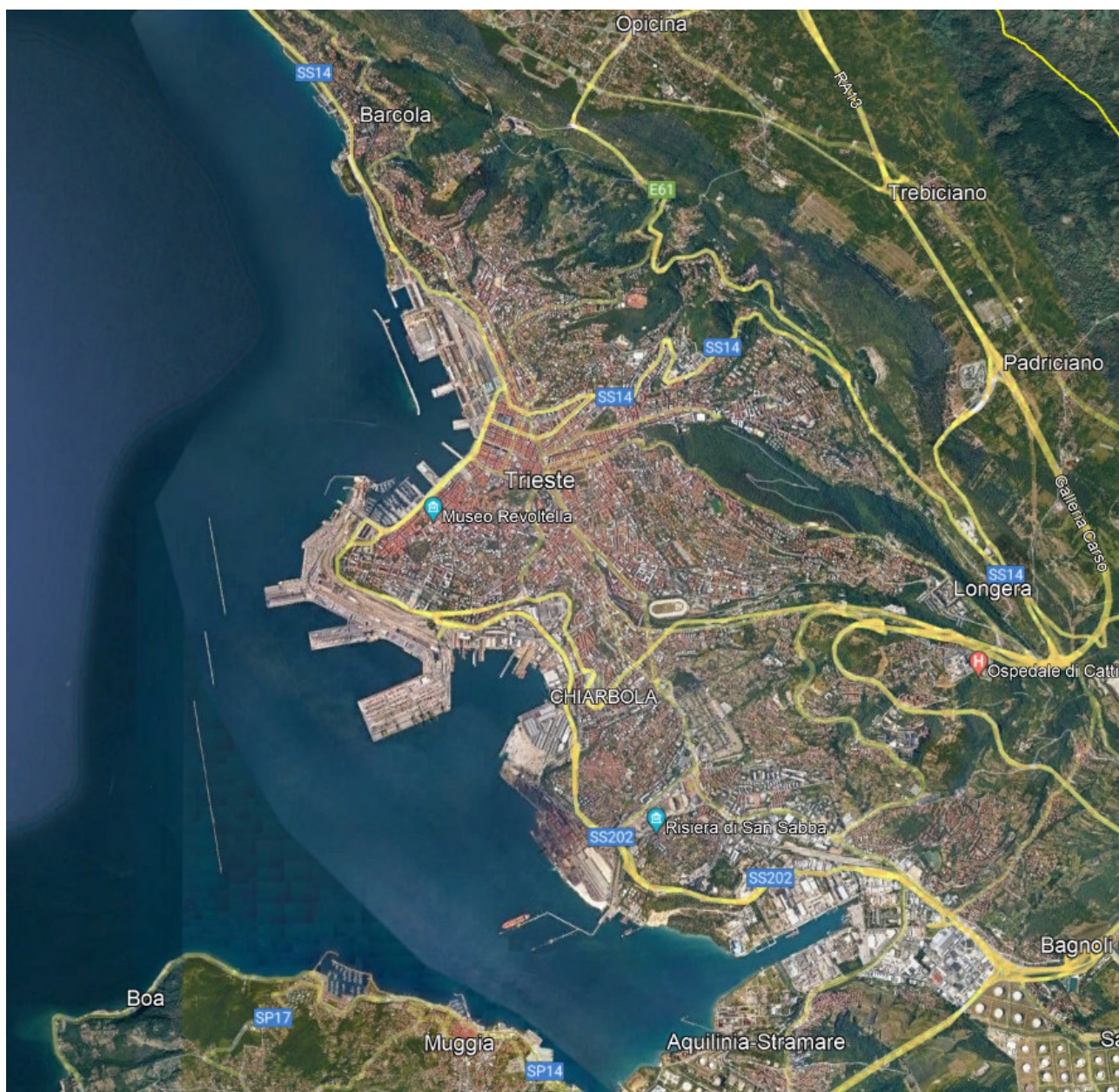
Infatti per la valutazione degli effetti sull'uomo si deve considerare un intervallo di frequenze tra 1 e 80 Hz mentre gli edifici possono essere interessati da una gamma di frequenza più ampia; pertanto, nel caso in cui un edificio rispondesse ad una particolare eccitazione con uno spettro il cui contenuto energetico fosse distribuito soprattutto a frequenze maggiori di 80 Hz, si potrebbe sottostimare il problema verificando il rispetto delle norme ISO 2631-2 e UNI 9916.



### **3 INFORMAZIONI IDENTIFICATIVE E DI CARATTERE GENERALE**

#### ***3.1 Descrizione dell'area in esame***

L'area di insediamento della struttura è localizzata a Trieste, in località Servola.



*Figura 5 vista di Trieste*





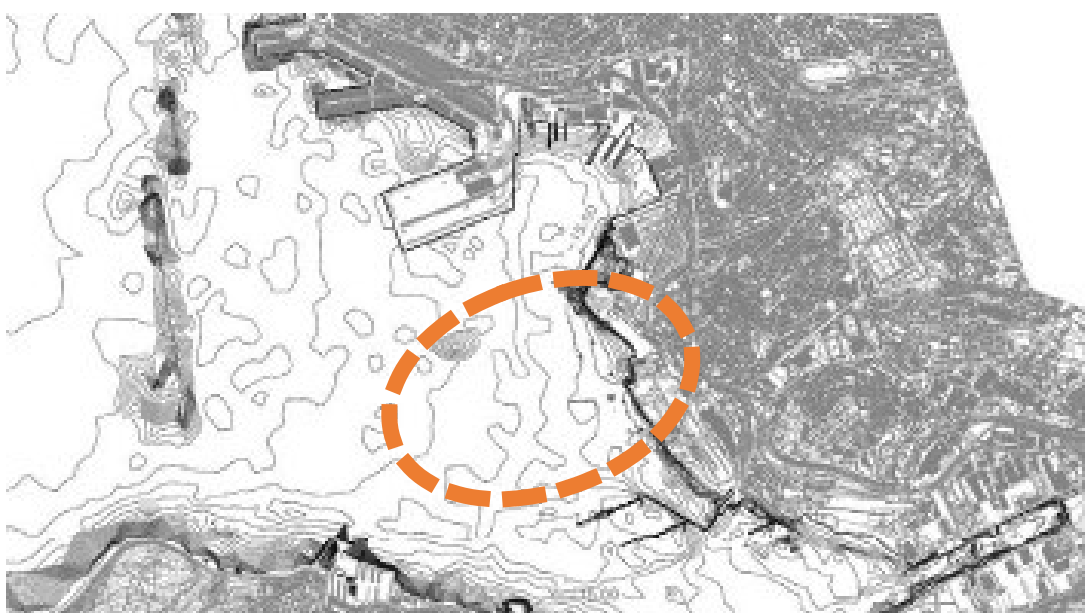
## Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 19 di 72



*Figura 6 vista di Trieste*

L'area di intervento è localizzata nell'area compresa tra lo Scalo Legnami e l'area ove insisteva la Ferriera di Servola. A confine dell'area vi è il quartiere Servola, separato dall'area dalla strada di grande comunicazione SS202.



*Figura 7 area di intervento*



### **3.2 Classificazione vibratoria**

La classificazione delle aree di territorio interessate dalla propagazione di vibrazioni legate all'opera di progetto sono state sviluppate sull'analisi delle caratteristiche geolitologiche dei terreni dell'area interessati dalla propagazione delle vibrazioni.

La propagazione delle vibrazioni costituisce una potenziale fonte di impatto vibrazionale sui ricettori circostanti (edifici e persone al loro interno).

Il livello previsionale adottato in questo studio per la stima di tale impatto si basa su misure sperimentali (condotte in altri progetti) impiegate in una modellazione specifica del fenomeno di propagazione delle vibrazioni fino ai ricettori.

### **3.3 Osservazioni sugli interventi da realizzare**

Il progetto prevede un insieme di interventi tutti coerenti sotto il profilo funzionale rispetto alla visione strategica della vocazione dell'area del Porto di Trieste: pur trattandosi un unico PFTE.

I quattro ambiti principali in cui si articola il PFTE sono i seguenti:

- 1) Stazione ferroviaria commerciale Nuova Servola
- 2) Connessione alla GVT e altre opere viarie
- 3) Cassa di colmata
- 4) Edifici pubblici
- 5) Nuovo terminal container sull'impronta del Molo VIII

Per una descrizione dettagliata delle attività e strutture si rimanda alla documentazione di progetto PFTE, da cui sono state estrapolate le informazioni utilizzate per redigere la presente valutazione.





#### **4 METODICA PREVISIONALE DEL LIVELLO VIBRAZIONALE**

##### **4.1 Caratteristiche geologiche dei terreni dell'area**



Figura 8 Estratto dalla carta delle Litologia superficiale (TAV.4) del P.R.G. di Trieste








Figura 9 Estratto dalla carta delle Litologia superficiale (TAV.6) del P.R.G. di Trieste

#### LEGENDA

##### COPERTURE QUATERNARIE

-  R : riporto, accumulo artificiale detritico e / o inerte
-  DF : detrito di falda
-  GM : sedimenti prevalentemente ghiaiosi con limi e argille
-  M : sedimenti prevalentemente limoso-argillosi
-  MG : sedimenti prevalentemente limoso-argillosi con ghiaie
-  MS : sedimenti prevalentemente limoso-argillosi con sabbie
-  MSG : sedimenti prevalentemente limoso-argillosi con ghiaie e sabbie
-  SMG : sedimenti prevalentemente sabbiosi con limi, argille e ghiaie
-  TR : terre rosse
-  DV : detrito di versante pleistocenico: ghiaie cementate, breccie

##### FLYSCH DI TRIESTE (Luteziano p.p.)

-  Facies marnoso-arenacea  
(alternanze di marne ed arenarie con una percentuale di arenaria variabile da 30% a 70%)
-  Facies arenacea  
(arenarie, intercalazioni marnose con netta prevalenza di arenarie)
-  Facies marnosa  
(marne, intercalazioni marnoso-arenacee con netta prevalenza di marne)

##### CALCARI DEL CARSO TRIESTINO (Cenomaniano sup - Cuisiano medio)

-  Calcari

Figura 10 Legenda dalla carta delle Litologia superficiale del P.R.G. di Trieste



L'area di cantiere, geologicamente, può essere ricondotta a tre principali gruppi di terreni:

- **Riporti di varia natura**, litologicamente eterogenei, principalmente costituiti da ghiaie limose sabbiose, limi ghiaiosi argillosi ed accumuli sparsi di detriti di risulta, con spessore variabile. Sono presenti specialmente nell'area portuale e nella fascia costiera, presentano uno spessore fino a 10 m;
- **Terreni di copertura** costituiti da terre limo argillose con ghiaia e sabbia, con spessore variabile da circa 6m ad oltre 20 m;
- **Substrato roccioso** costituito dalla Facies marnoso arenacea del Flysch di Trieste.

Per la valutazione vibrazionale si è deciso di riunire in un'unica voce i terreni costituiti dai riporti e dai terreni di copertura in quanto non si differenziano significativamente nella propagazione delle vibrazioni, avendo velocità sismiche similari, si differenziano nel fatto che i terreni di riporto, la variabilità locale è da ritenersi più accentuata.

Si sono quindi formate due classi di terreni a cui si sono attribuiti i seguenti parametri:

- **classe-geolitologica-1: CL-1**
  - (raggruppa i terreni di natura principalmente ghiaie limose e sabbiose / limi ghiaiosi sabbiosi)
- **classe-geolitologica-2: CL-2**
  - costituito dal substrato marnoso arenaceo del Flysch di Trieste

## **4.2 Studi geognostici utili alla caratterizzazione del modello**

### *1.1.1 Elementi base dello studio dei fenomeni vibratorii*

Il presente studio si occupa del fenomeno delle vibrazioni.

Si intendono con tale termine i moti delle strutture (in questo caso edili) a frequenze comprese fra 1 e 80 Hz.

La caratterizzazione viene effettuata in termini di valore medio efficace (RMS) della velocità (in mm/s) oppure della accelerazione (in mm/s<sup>2</sup>).

Il termine velocitario viene usato per valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici ed i possibili danni, mentre il valore dell'accelerazione viene usato per valutare la percezione umana del disturbo.





Per entrambe i tipi di misura, si utilizzano degli accelerometri, che forniscono il livello di accelerazione **a**.

Il valore di accelerazione può essere facilmente convertito nel corrispondente valore di velocità **v**, una volta nota la frequenza **f** di vibrazione, tramite la relazione:

$$v = \frac{a}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Convenzionalmente, in analogia con le analisi del rumore, sia i valori di velocità che quelli di accelerazione vengono valutati sulla scala dei **dB**, tramite le relazioni:

$$L_{\text{acc}} = 20 \cdot \lg \left[ \frac{a}{a_0} \right] \qquad L_{\text{vel}} = 20 \cdot \lg \left[ \frac{v}{v_0} \right]$$

Nelle quali compaiono i valori di riferimento **a<sub>0</sub>** = 0.001 mm/s<sup>2</sup> e **v<sub>0</sub>** = 1·10<sup>-6</sup> mm/s.

Va osservato che un determinato evento vibratorio dà luogo, in generale, a valori in dB di accelerazione e velocità del tutto diversi, dipendentemente dalle frequenze interessate.

Normalmente un calibratore per accelerometri fornisce un valore di accelerazione RMS pari a 10 m/s<sup>2</sup>, ad una frequenza di 159.15 Hz (cosicché 2·π·f risulta pari a 1000 rad/s).

Tale segnale di calibrazione corrisponde dunque ad una velocità di vibrazione di 10 mm/s.

Il livello di accelerazione  $L_{\text{acc}}$  risulta pari a 140 dB, ed il livello di velocità risulta pari anch'esso a 140 dB.

Si deve osservare però che la corrispondenza dei due livelli si verifica solo a questa particolare frequenza (che infatti viene usata dal calibratore proprio a tale scopo), mentre in generale, a frequenze più basse, il livello di velocità è più elevato del livello di accelerazione, visto che la frequenza si trova al denominatore nella formula di conversione.

Le vibrazioni generate sul terreno si propagano nel terreno circostante, subendo una attenuazione che è dipendente dalla natura del terreno, dalla frequenza del segnale, e dalla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto.

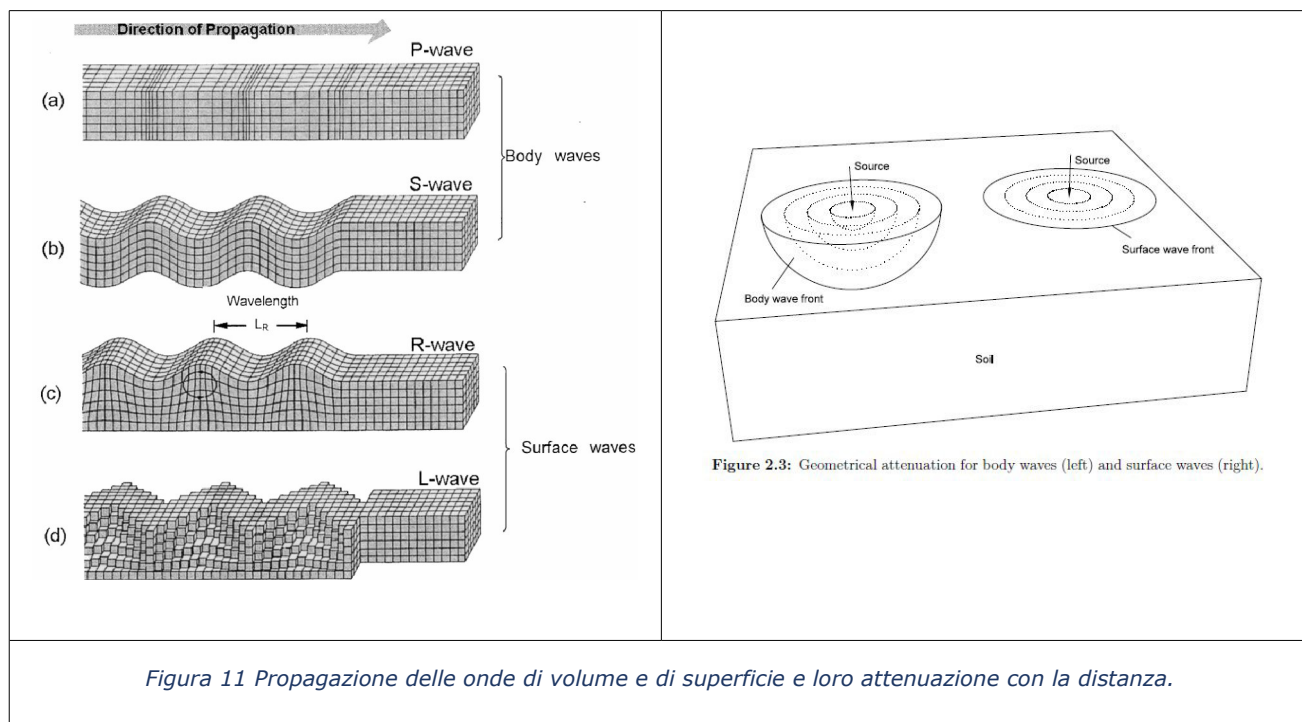
Si deve distinguere tra tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale:

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



I primi due tipi sono dette 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.



L'attenuazione dell'ampiezza del segnale vibratorio con la distanza è anch'esso funzione del tipo di onda, nelle onde di volume l'attenuazione avviene secondo un termine dipendente con il quadrato della distanza ( $1/r^2$ ), mentre per le onde di superficie secondo un termine dipendente dalla distanza ( $1/r$ ).

### 1.1.2 Propagazione delle vibrazioni nel terreno

La propagazione delle vibrazioni nel terreno è un fenomeno molto complesso da determinare in quanto strettamente dipendente dalle caratteristiche specifiche del sito di studio e dipendente dalle caratteristiche morfologiche, tipologiche del terreno e della sorgente.

Seppur esistono in letteratura numerosi modelli che permettono il calcolo della propagazione delle vibrazioni, e modelli che vanno da equazioni di tipo empirico a modelli BEM/FEM, nel caso in oggetto, per la mancanza di dati sperimentali specifici all'ambito di studio, si è ritenuto più cautelativo l'uso di modalità di calcolo meno sofisticate in modo da sviluppare un modello previsionale indicativo su cui fare le valutazioni di base.



In linea generale la propagazione delle onde vibrazionali nel terreno è funzione principalmente di due principali fenomeni di attenuazione:

- L'attenuazione geometrica legata alla distanza sorgente-ricettore
- L'attenuazione dovuta all'assorbimento del terreno

La varietà delle conformazioni morfologiche del terreno comporta le maggiori incertezze di valutazione della propagazione delle vibrazioni.

I fattori che possono influire nella determinazione dell'attenuazione nel terreno sono molteplici.

I più determinanti sono costituiti dalla natura del mezzo, dal suo grado di costipazione, dall'attrito statico fra i granuli e quindi dalla granulometria, dalla fratturazione del mezzo, dalla presenza di acqua e da altri fattori la cui differente combinazione può determinare gradi di attenuazione differenti in mezzi litologicamente simili.

Risulta quindi importante la suddivisione tra rocce lapidee (tipo A nella norma UNI 9916) e rocce sciolte (da tipo B a tipo F nella norma UNI 9916) in quanto di differente comportamento se sottoposti a sollecitazioni dinamiche.

In generale le rocce lapidee trasmettono tutta la gamma di frequenze, e principalmente le più alte, mentre le rocce sciolte lasciano passare solo le basse frequenze, che corrispondono anche a quelle in cui gli edifici mostrano la maggior risposta.

Inoltre, mentre le rocce lapidee difficilmente possono subire variazioni di struttura sotto sollecitazioni dinamiche, le rocce sciolte, risultano di gran lunga più sensibili.

Ne è un esempio il fenomeno della liquefazione delle sabbie in seguito ad un sisma.

Inoltre la loro risposta alla azione di disturbo è diversa a seconda che l'intensità del disturbo sia lieve o al contrario forte: in altre parole il comportamento dei materiali sciolti è fortemente non lineare.

Nel primo caso non si ha una vera variazione della struttura mentre nel secondo caso la vibrazione produce per tutte le rocce sciolte un assestamento e quindi una riduzione di porosità.

L'analisi delle caratteristiche geolitologiche degli strati superficiali del terreno è finalizzata al riconoscimento dei parametri correlabili alla propagazione delle vibrazioni nel terreno.

I valori tipici di densità, velocità di propagazione e fattore di perdita, noti esclusivamente per alcune classi geologiche e in presenza di un ammasso omogeneo, sono riassunti nella sottostante tabella tratta da fonti bibliografiche.



Tabella 5 caratteristiche dei terreni:

<b>Tipo di terreno</b>	<b>densità (t/mc)</b>	<b>velocità di propagazione Vp m/s</b>	<b>fattore di perdita <math>\eta</math></b>
roccia compatta	2,65	3500	0,01
roccia fratturata	2,2	1500 - 2000	0,05 - 0,1
Sabbia, limo, ghiaia, loess	1,6	600	0,1
Argilla, terreni argillosi	1,7	1000 - 1500	0,2 - 0,5

### 1.1.3 Fattore di smorzamento viscoso dei terreni da prove sismiche

Tra le prove effettuate per lo studio geotecnico dell'area sono state eseguite anche delle prove geofisiche di tipo sismico MASW per la caratterizzazione sismica dei terreni come richiesto dalla normativa NTC2018.

Da due di queste prove MASW, dai relativi sismogrammi, si è potuto fare una prima analisi del fattore di smorzamento viscoso equivalente dei terreni mediante la seguente relazione:

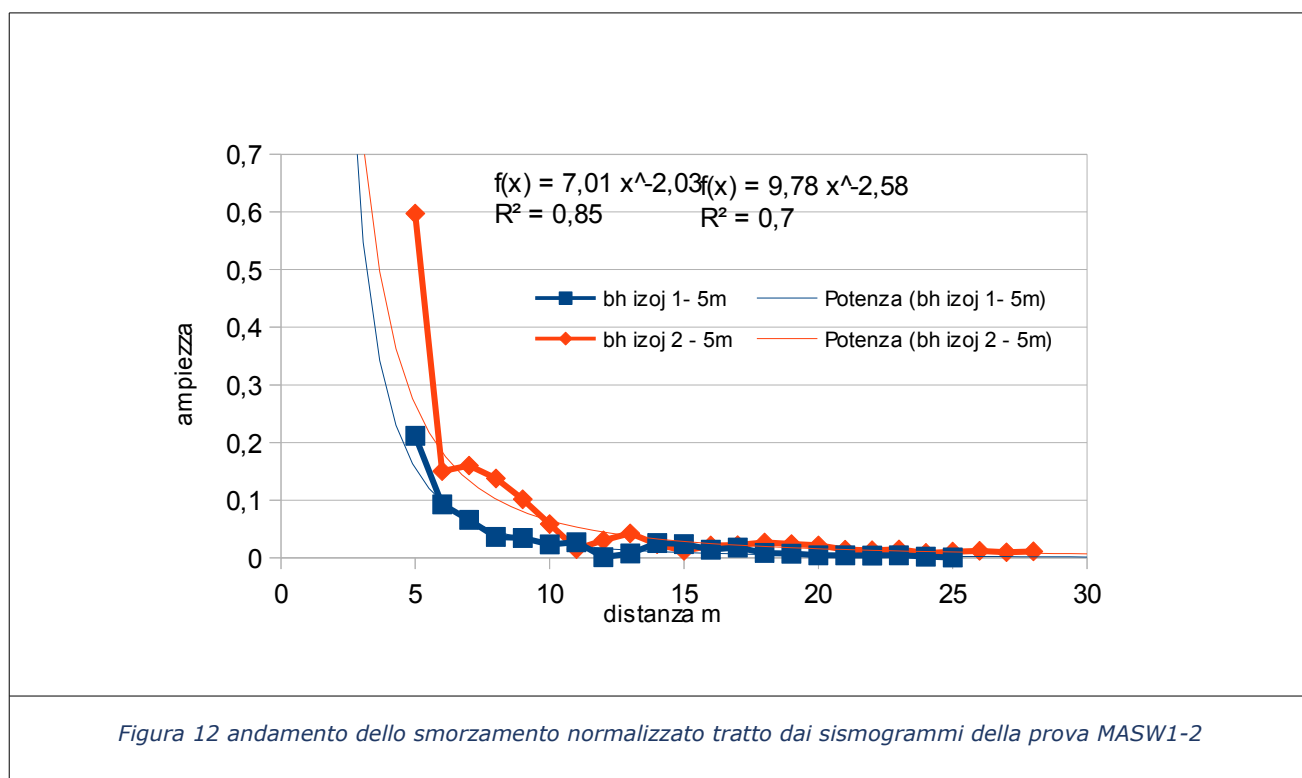
$$\alpha = \xi = \frac{\ln\left(\frac{A_1 R_1}{A_2 R_2}\right)}{R_2 - R_1}$$

nella quale compaiono le ampiezze dei segnali sismici ( $A_1$  e  $A_2$ ) posti a distanze  $R_1$  e  $R_2$  crescenti rispetto alla sorgente.

L'analisi evidenzia un fattore di smorzamento di 5,5% per la MASW1 e di ben 9,2% per il profilo MASW2.

Questi sono valori abbastanza elevati, sicuramente da attribuire ai terreni più superficiali di natura principalmente limo-argillosa detritica legati agli importanti riporti effettuati nella zona.

Questi valori sono superiori a quanto normalmente riportato per terreni non rielaborati colluviali fini (limi sabbiosi)  $\xi = 1,89\%$ , limi fluviali  $\xi = 2,16\%$ , terreni ghiaiosi sabbiosi  $\xi = 1,12\%$ .



### 4.3 Valutazione dell'impatto delle vibrazioni

La costruzione di un modello previsionale per la verifica degli impatti vibrazionali normalmente si basa sull'analisi dei dati sperimentali acquisiti durante la campagna di rilievo nei diversi tratti di studio, per tener conto dei molteplici fattori che la influenzano.

La propagazione del segnale nel sottosuolo è dipendente da numerose variabili legate al tipo di sorgente, alle caratteristiche dei terreni attraversati, alle interferenze distruttive e costruttive dovute alla presenza di sotto-servizi e strutture sepolte, nonché alla profondità della falda ed alla morfologia del territorio.

Questi fattori vincolanti nell'analisi dei dati in sito vengono incorporati delle misure sperimentali, nel nostro caso in cui la valutazione avviene senza aver fatto una acquisizione di dati in sito, deve svilupparsi sulla base di un modello, costruito sulla base delle conoscenze disponibili.

In questa relazione la valutazione dei molteplici fattori che condizionano il trasferimento delle vibrazioni nel suolo, per le diverse tratte oggetto di analisi, è stata sviluppata su considerazioni geometriche e sui dati indicativi tratti dalla letteratura tecnica.

Si è pertanto partiti dalla generalizzazione delle caratteristiche dell'area in due differenti classi litologiche, a cui sono stati attribuiti dei parametri medi, estratti dalla documentazione geologico geotecnica fornitaci, ed esposta nella seguente tabella 6:



Tabella 6 classi geolitologiche del sito

tipo terreno	velocità onde sismiche Vp (m/s)	velocità onde sismiche Vs (m/s)	fattore di perdita $\eta$	tipo di onda e sorgente n	
<b>CL-1</b> classe-geolitologica-1	1300-1600	200	0,1	body wave	2,0
				surface wave	0,5
<b>CL-2</b> classe-geolitologica-2	2800-3300	600	0,05	body wave	2,0
				surface wave	0,5

Sulla base di questa sintesi si è fatto il calcolo della attenuazione con la distanza per le diverse tipologie di sorgente e di terreni in cui ricadono i ricettori.

#### **4.4 Metodica di studio del modello previsionale di propagazione delle vibrazioni**

Come evidenziato precedentemente è possibile fare una simulazione più accurata tramite un programma di calcolo, ed avere una valutazione dell'impatto vibrazionale delle attività di cantiere, tuttavia l'elaborazione si basa sulla disponibilità degli spettri di emissione di vibrazioni delle macchine impiegate nel cantiere e lì registrate, infatti la propagazione delle vibrazioni è dipendente dalla sorgente e dalle caratteristiche del mezzo tramite cui si propaga.

Pertanto lo studio è stato sviluppato sulla base di dati di sorgenti vibratorie tratti dalla bibliografia tecnica.

Tali dati sono stati reperiti mediante una ricerca bibliografica, in particolare è stato utilizzato il volume **L.H. Watkins - "Environmental impact of roads and traffic" - Appl. Science Publ. #3**, che alle pagine 231-241 riporta 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 altre fonti bibliografiche si è considerato anche lo spettro vibrazionale di un treno a bassa velocità passante in galleria, e lo spettro vibratorio di traffico misto di autoveicoli e camion.



Da tale raccolta di dati sono stati estratti gli spettri di emissione delle macchine riportate nella seguente tabella:

**Tabella 7 tipologia delle sorgenti di vibrazioni utilizzate**

<b>Sorgente</b>	<b>Riferimento Bibliografico</b>
• Camion ribaltabile	Ref. #3
• Camion da cantiere (dumper)	Ref. #3
• Compattatore a rullo non vibrante	Ref. #3
• Compattatore a rullo vibrante	Ref. #3
• Pala gommata carica	Ref. #3
• Pala gommata scarica	Ref. #3
• Ruspa cingolata grande	Ref. #3
• Ruspa cingolata piccola	Ref. #3
• treno merci	Ref. #4
• traffico misto autoveicoli e camion	Ref. #4
• trivellazione pali	Ref. #5

Alcuni di questi spettri vibratorii tipici delle varie sorgenti sono stati forniti dagli autori come livelli di accelerazione ponderata in frequenza  $L_w$  oppure come spettro di accelerazione.

Per poterne calcolare e graficare l'andamento di attenuazione con la distanza, ogni spettro è stato oggetto dei seguenti passi di elaborazione:

- dallo spettro di accelerazione se ponderato in frequenza in 1/3 d'ottava  $L_w$  in dB ;
- sottrazione del coefficiente di ponderazione in frequenza per ottenere il livello di accelerazione in dB;
- trasformazione del valore di accelerazione in dB in valore di accelerazione lineare in  $m/s^2$ ; per ogni banda di frequenza;
- calcolo del fattore di attenuazione con la distanza a passo di 10 m, mediante il modello di propagazione elaborato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) e basato sulla formulazione generale richiamata di seguito (§1):
- trasformazione del valore di accelerazione da  $m/s^2$  in dB per ogni banda di frequenza in 1/3 d'ottava;
- applicazione del filtro di ponderazione per ogni banda di frequenza;



- calcolo del nuovo valore ponderato complessivo  $L_w$  a quella specifica distanza;
- il calcolo viene ripetuto nuovamente per ogni distanza necessaria alla valutazione e per tutto lo spettro in 1/3 d'ottava;
- graficazione del fattore di attenuazione del segnale vibratorio ponderato in frequenza calcolato, all'aumentare della distanza.
- il medesimo calcolo viene ripetuto modificando le caratteristiche litologiche dei terreni oggetto di valutazione, in modo da avere il valore di attenuazione lito-specifico.

#### ***4.5 Propagazione delle vibrazioni nelle strutture edilizie***

Le vibrazioni che si propagano nel suolo, raggiunto un edificio, si propagano attraverso le sue fondazioni e successivamente alle altre parti dell'edificio (pareti, pavimenti, soffitti), trasferendo ad esse l'energia vibratoria.

Queste possono essere percepite come vibrazioni trasmesse al corpo delle persone o come rumore re-irradiato di bassa frequenza.

Le vibrazioni possono a loro volta mettere in movimento alcune parti o oggetti delle abitazioni (mobili, vetri, suppellettili) e questi possono generare rumore o causare danni a strumenti sensibili.

In alcuni casi le vibrazioni particolarmente elevate e ripetute nel tempo possono procurare un danno strutturale agli edifici, ma ben raramente questi effetti si verificano con infrastrutture legate ai trasporti.

La propagazione del fenomeno vibratorio nelle strutture, parte dal sistema di fondazione, che può essere sviluppato in vario modo, ed interessando le varie strutture dell'edificio può portare sia ad una attenuazione, sia ad una amplificazione rispetto ai livelli presenti sul terreno.

I diversi sistemi di fondazione possono produrre una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante.

Questo è condizionato dalla tipologia delle fondazioni (a platea, su plinti isolati, su travi rovesce, su pali, etc.) e dal tipo di terreno in cui le fondazioni sono ancorate.

Nel caso di fondazioni a platea la grande area di contatto con il terreno determina una perdita di accoppiamento praticamente di 0 dB alle basse frequenze, sino alla frequenza di risonanza della fondazione.

Per le altre tipologie di fondazioni possono essere utilizzate curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione della fondazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.





Non è da trascurare il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, in particolare dei solai: allorché la frequenza di eccitazione coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, la stessa manifesta un rilevante aumento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli presenti alla base della stessa.

La propagazione delle vibrazioni dalle fondazioni di un edificio all'ambiente ricevente all'interno dell'edificio è un problema estremamente complesso, che richiede peraltro la conoscenza esatta della struttura dell'edificio.

(Le formulazioni più note si basano sugli studi di Kurzweil e Melke, e sono anche disponibili in testi quali *Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control*).

#### 4.6 Accoppiamento terreno – fondazioni edificio

Sulla base di correlazioni della letteratura tecnica si può arrivare a dare una stima della possibile attenuazione od amplificazione del livello vibratorio all'interno di un edificio.

Le vibrazioni che vengono trasmesse agli edifici dipendono dall'accoppiamento fra il terreno e le fondazioni.

Solitamente vi è un'attenuazione delle vibrazioni in questo passaggio.

Tuttavia per fondazioni a platea, a contatto con il terreno sottostante e sottoposte dunque alle stesse vibrazioni non vi è solitamente alcuna attenuazione (0 dB) per le frequenze fino alla frequenza di risonanza della struttura della platea. (Remington et al., 1987).

L'accoppiamento per edifici con strutture leggere è anch'esso stimato essere pari a 0 dB da Kurzweil, 1979.

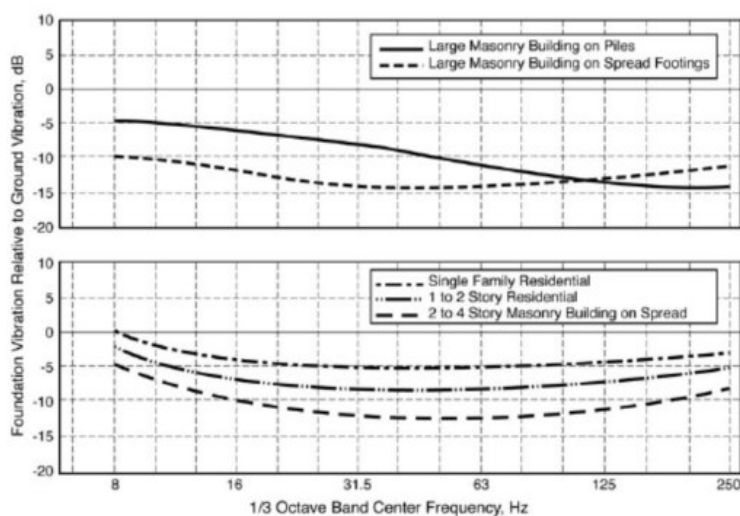


Figura 13 Risposta delle fondazioni per diverse tipologie di edifici (Fonte: FTA, USA)



Per altri tipi di fondazioni (pali, ecc.) l'accoppiamento varia fra 2 e 15 dB in funzione della frequenza e della fondazione (Remington, 1987; Kurzweil, 1979).

Per edifici fondati direttamente su strati rocciosi l'accoppiamento è 0 (Kurzweil, 1979).

Nel presente lavoro i comportamenti strutturali verranno stimati sulla base dei seguenti diagrammi.

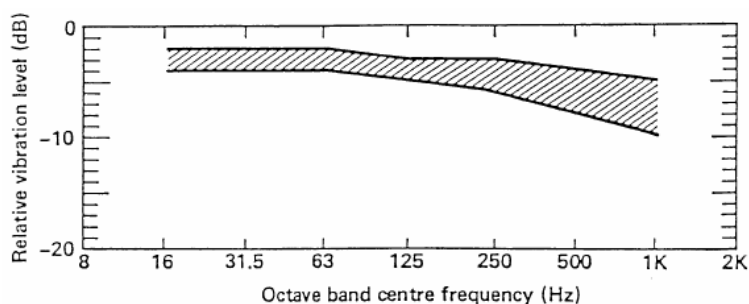


Figura 14 Attenuazione delle vibrazioni da un piano al successivo

#### 4.7 Risonanze strutturali dei solai

Pareti, solai e soffitti di un edificio possono comportarsi come amplificatori delle vibrazioni.

Edifici con strutture leggere in genere non amplificano particolarmente, anche se si possono verificare amplificazioni ai piani superiori (Kurzweil, 1979).

L'amplificazione può variare tra un fattore 0.5 (riduzione) e 2 (amplificazione) nella gamma di frequenza 25 - 30 Hz, anche se si sono osservate amplificazioni fino a un fattore 5 (Leventhall, 1987).

Questo fenomeno è causato dal fatto che parti diverse di un edificio possono avere caratteristiche diverse di rigidità, massa e smorzamento, con conseguenti diverse frequenze naturali di oscillazione.

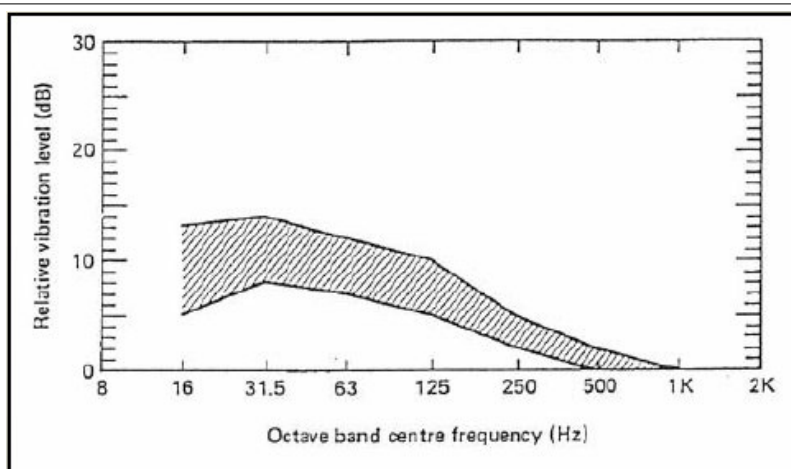


Figura 15 Amplificazione prodotta dai solai

Nella figura Fig.15 viene evidenziato il possibile campo di amplificazione delle vibrazioni dovuto alla risonanza dei solai, che come si nota oscilla fra 5 e 12 dB nel campo di frequenze rilevanti dal punto di vista ferroviario.

Dawn and Stanworth (1979) hanno dimostrato che vi possono essere notevoli differenze nei livelli di vibrazione e nelle frequenze fra due pavimenti di un edificio perlopiù legati alle diverse modalità costruttive e geometriche.

Generalmente l'amplificazione ricade nella gamma 5 - 15 dB per le frequenze comprese tra 16 - 80 Hz (Remington, 1987); mediamente un pavimento amplifica nella gamma 10 - 30 Hz che sono anche le frequenze più tipiche date dal transito di un treno.

Nella seguente tabella vengono riportate alcune frequenze naturali tipiche di vibrazione.

**Tabella 8 frequenze naturali di vibrazione**

<b>Elemento edilizio</b>	<b>Frequenza naturale (Hz)</b>
Pali	5-50
Pavimenti e solette	10-30
Finestre	10-100
Soffitti intonacati	10-20



Una sintesi dei dati bibliografici analizzati mostra che:

In base ai dati prodotti dalle Ferrovie Tedesche, e desumibili dalla norma DIN 4150, gli incrementi per risonanza possono essere dell'ordine di 3 – 8 volte, con rari casi fino a 15 volte.

Le misure di Ishii e Tachibana mostrano una attenuazione inter piano che varia progressivamente da 3 dB ai piani bassi sino a 1 dB negli ultimi piani di un edificio a 10 piani con struttura in CLS armato e acciaio.

Le misure effettuate dalla Ferrovie Svizzere hanno mostrato che mediamente i livelli di accelerazione misurati sui pavimenti sono superiori di circa 5 dB rispetto a quelli misurati sul terreno, in alcuni casi si può arrivare ad un incremento anche di 20 dB nel caso del pavimento del piano terra con frequenza di risonanza di circa 40 Hz.

Da questo si può quindi estrarre che la variazione dei livelli di vibrazione, misurati al centro dei solai, può estendersi tra 0 e +12dB rispetto ai livelli sul terreno.

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile parametrizzando gli effetti combinati secondo il seguente schema:

Innanzitutto si valuta l'attenuazione delle fondazioni.

Essa viene assunta pari a 0 dB per le fondazioni a platea, a -3 dB per fondazioni su travi rovescie in CLS, ed a -5 dB nel caso di fondazioni in muratura o comunque nel caso di fondazioni che non abbiano capacità di immersione.

Si valuta poi l'amplificazione dovuta alla risonanza dei solai.

Il valore di base assunto è una amplificazione di +5 dB per solai in latero-cemento con frequenza propria di 20 Hz.

A questo valore di base si aggiungono i seguenti effetti:

- Effetto della variazione della frequenza di risonanza: se la stessa è maggiore di 20 Hz e minore di 40 Hz, si incrementa linearmente il valore di base, che viene fatto variare da 5 dB a 20 Hz sino a 20 dB a 40 Hz;
- Effetto dell'incastro del solaio:
  - Appoggio semplice -2.0 dB
  - Incastro imperfetto 0.0 dB
  - Incastro perfetto +5.0 dB
- Rapporto rigidità/peso specifico del materiale
  - Solaio in latero-cemento 0.0 dB
  - Volte o archi in muratura -4.0 dB



- Spessore del solaio:
  - $h = 40 \text{ cm} + 8.0 \text{ dB}$
  - $h = 30 \text{ cm} + 3.0 \text{ dB}$
  - $h = 24 \text{ cm} 0.0 \text{ dB}$
  - $h = 12 \text{ cm} - 2.5 \text{ dB}$
- Luce del solaio
  - $L = 10 \text{ m} - 4.0 \text{ dB}$
  - $L = 7 \text{ m} - 3.0 \text{ dB}$
  - $L = 5 \text{ m} - 2.0 \text{ dB}$
  - $L = 4 \text{ m} 0.0 \text{ dB}$
  - $L = 3.5 \text{ m} + 3.0 \text{ dB}$
  - $L = 3.0 \text{ m} + 8.0 \text{ dB}$
- Attenuazione interpiano: si assume prudenzialmente una riduzione di 1 dB per ogni piano al di sopra del piano terra.

#### ***4.8 Individuazione delle vibrazioni trasmesse ai ricettori e stima della risposta vibrazionale***

Sulla base delle parametrizzazioni suddette, diviene possibile stimare in maniera approssimata per ogni edificio, una volta note le sue caratteristiche costruttive, l'eventuale effetto di amplificazione massima sul solaio più critico.

Nel nostro studio tuttavia non avendo a disposizione i dati costruttivi dettagliati degli edifici da analizzare, si è deciso di adottare i seguenti parametri di calcolo:

Le tipologie edilizie prevalenti in adiacenza al tracciato sono rappresentate mediamente da edifici in muratura, con fondazioni direttamente immorsate nel terreno e edifici di recente edificazione con ossatura in cemento armato e fondazioni continue.

In queste condizioni, sulla base di quanto sin ora detto, la differenza tra il livello di vibrazione del terreno e quello dell'edificio si stima cautelativamente essere di circa +5 dB per tutti gli edifici di altezza fino a 4 piani sopra terra.

A questo valore si è aggiunto il valore di amplificazione di +1 dB per ogni piano aggiuntivo oltre al secondo.

Ad esempio l'amplificazione valutata per una palazzina di 6 piani è stata stimata in questo modo:

$$+5\text{dB di amplificazione base} + 2 \text{ piani} \times +1\text{dB/piano} = + 7 \text{ dB}$$



**Tabella 9** tipologia delle fondazioni e fattore correttivo

Tipologia fondazioni	Tipologia edificio	Fattore correttivo [dB]
Fondazioni a platea	Villetta monofamiliare	curva 1
"	Palazzina 1-2 piani	curva 2
"	Palazzina 2-4 piani	curva 3
"	Edificio di grandi dimensioni (industriale, commerciale, palazzo multipiano)	curva 4
Fondazioni su pali	Edificio di grandi dimensioni (industriale, commerciale, palazzo multipiano)	curva 5

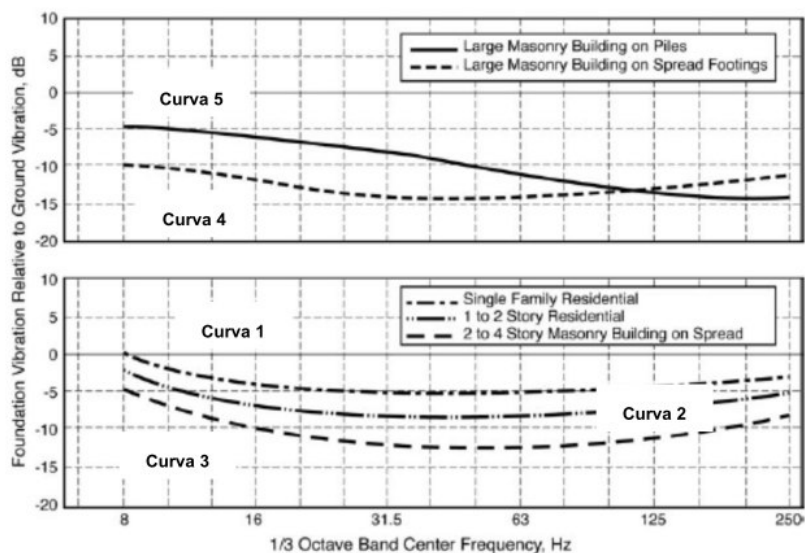


Figura 16 Fattori correttivi adottati in funzione alla tipologia di fondazione



## 4.9 Modello utilizzato

### 1.1.4 Specifiche generali di calcolo

Le sorgenti di vibrazioni sono state considerate come sorgenti puntiformi, in quanto la valutazione è più conservativa ed il percorso delle vibrazioni sviluppato lungo la congiungente ricettore-sorgente poste alla minima distanza dalla sorgente.

#### (§1) **Formulazione di calcolo**

Il modello di propagazione qui impiegato, valido per tutti tre i tipi di onde considerati (P, S, R) è basato sulla seguente formulazione (§1):

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

In cui  $\eta$  è il fattore di perdita del terreno,  $c$  la velocità di propagazione in m/s,  $f$  la frequenza in Hz,  $d$  la distanza in m, e  $d_0$  la distanza di riferimento a cui è noto lo spettro di emissione.

L'esponente  $n$  varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni.

In particolare, la seguente tabella mostra i valori di  $n$ :

**Tabella 10 valori del coeff. di attenuazione per diverse sorgenti**

Values of attenuation coefficient due to radiation damping for various combinations of source location and type (from Ref. [9])

Source location	Source type	Induced wave	$n$
Surface	Point	Body wave	2.0
		Surface wave	0.5
	Infinite line	Body wave	1
		Surface wave	0
In-depth	Point	Body wave	1.0
	Infinite line		0.5



**Tabella 11 principali parametri dei tipi di terreno**

Tipo di terreno	Velocità di propagazione per onda longitudinale m/s	Fattore di perdita $\eta$	Peso di volume $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
Roccia	3500	0,01	2,65
Sabbia	600	0,10	1,60
Argilla	1500	0,50	1,70

Il calcolo del livello vibrazionale è stato basato sull'utilizzo di spettri vibrazionali tratti da studi precedenti e da fonti bibliografiche dalla letteratura tecnica, non essendo stati effettuati rilievi vibrazionali in sito.

La firma spettrale di queste sorgenti è stata applicata alle tipologie dei terreni presenti nell'area e sulla base di questi caratteri si sono calcolate le curve di attenuazione specifiche per ogni tipologia di terreno e sorgente.

Su questi dati si è quindi potuto calcolare il livello di vibrazioni stimato per distanze comprese tra 10 e 200 m dalla sorgente, ad intervalli di 10 m.

Si è poi provveduto a redigere un diagramma di attenuazione con la distanza del livello vibratorio, e su questo livello si sono applicate le correzioni di amplificazione legate alla struttura degli edifici.

#### *1.1.5 Specifiche di calcolo vibrazioni realizzazione setti trivellati*

La valutazione specifica del livello vibratorio generato e quindi del possibile disturbo legato alla realizzazione dei setti impermeabili trivellati di 880 mm che delimitano l'area di cantiere, è stata fatta utilizzando due metodologie di calcolo proposte dalla documentazione tecnica.

Una più semplice, basata sull'attenuazione geometrica del fenomeno vibratorio con la distanza e sulla base della potenza della macchina perforatrice, in cui il contributo legato all'attrito dei terreni è considerato minoritario, tratta dal lavoro di Attewell et al. (1992) e Head and Jardine (1992), ed una sviluppata su di uno spettro compatibile, di macchina trivellatrice, ma che tuttavia è stato acquisito ad una distanza elevata (63 m) e quindi potrebbe essere affetto da un certo grado di approssimazione per i valori prossimi alla sorgente.





Attewell et al. (1992):

$$v = k \left( \frac{\sqrt{W_0}}{r} \right)^m$$

Where:

$v$	= predicted vertical velocity	[mm/s]
$k$	= constant of proportionality	[-]
$m$	= site specific constant	[-]
$W_0$	= input energy at source	[J]
$r$	= horizontal distance from source	[m]

$$W_0 = \frac{1000 \cdot W}{f}$$

Where:

$W_0$	= energy input	[J]
$W$	= power input	[kW]
$f$	= frequency	[Hz]

Con i valori di  $0.5 < k < 1.5$  ed  $0.5 < m < 1$  ;

Per una valutazione conservativa l'autore indica di assumere  $k = 1.5$  ed  $m = 1$  (valore suggerito anche nell'Eurocode3).

I valori di partenza sono stati dedotti dalle caratteristiche costruttive della macchina trivellatrice marca LIEBHERR modello BAT410:

questi sono:

- potenza nominale 400 KW
- velocità di rotazione max sotto carico 41 rpm pari a 1.46 Hz.
- distanza di misura 10 m e 50 m

da cui si ricava una velocità di vibrazione a 10 m:

$$W_0 = 1000 \times 400 / 1.46 \text{ Hz} = 273.97$$

$$v = ((273.97)^{0.5} / 10 \text{ m}) = 16.55 / 10 = 1.66 \text{ mm/s (10 m di distanza)}$$



e da cui una accelerazione:

$$a = 15.23 \text{ mm/s}^2 \text{ (10 m di distanza) pari ad un livello di accelerazione di 83.7 dB}$$

questo è un valore di accelerazione sicuramente percepibile, ma che è inferiore al limite di 89 dB previsto come limite per le fabbriche dalla UNI 9614.

da cui si ricava una velocità di vibrazione a 50 m:

$$W_0 = 1000 \times 400 / 1.46 \text{ Hz} = 273.97$$

$$v = ((273.97)^{0.5} / 50 \text{ m}) = 0.33 / 10 = 0.033 \text{ mm/s (50 m di distanza)}$$

e da cui una accelerazione:

$$a = 15.23 \text{ mm/s}^2 \text{ (10 m di distanza) pari ad un livello di accelerazione di 70.4 dB}$$

questo è un valore di accelerazione sicuramente al limite della percezione, il valore di 71 dB è il valore limite previsto nelle aree critiche dalla norma UNI 9614.

La misura a confronto calcolata sulla base dello spettro compatibile di una macchia trivellatrice tratta dalla documentazione tecnica con un livello ponderato in frequenza di accelerazione, il cui spettro ed attenuazione con la distanza è riportata in calce alla presente relazione, è di:

distanza 10 m : livello ponderato di accelerazione: 86.1 dB

distanza 50 m: livello ponderato di accelerazione: 64.6 dB

Considerando la semplicità di calcolo del primo approccio, una differenza di 2.4 dB alla distanza di 10 m appare plausibile, la differenza appare più evidente nella distanza in cui l'analisi spettrale prende in considerazione anche l'attenuazione legata alla tipologia di terreno.

Per lo studio pertanto si adotterà il calcolo mediante valutazione spettrale essendo più cautelativo alle brevi distanze.



## **5 CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA ATTORNO AL MOLO**

### **5.1 Identificazione delle principali sorgenti vibratorie**

La caratterizzazione della situazione vibrazionale sia di cantiere che di regime dell'area attorno al Molo è stata effettuata mediante le seguenti fasi:

1. Analisi geolitologica dell'area e attribuzione classe geolitologica di riferimento;
2. Identificazione dei ricettori;
3. Determinazione del numero di piani degli edifici ricettori;
4. Misura della distanza dalle sorgenti vibratorie quali strade e ferrovia;
5. Analisi delle fonti vibratorie rappresentative dell'area da usare nel calcolo;
6. Calcolo dei livelli vibratorie alla distanza dai ricettori e confronto con i valori limite applicabili.

Allo stato attuale le sorgenti esistenti con i relativi valori vibrazionali presi in considerazione dal presente studio sono riconducibili ai mezzi transitanti lungo le principali strade presenti nell'area, al transito di convogli ferroviari e alla movimentazione merci all'interno delle aree portuali.

Per il calcolo si sono presi a riferimento degli spettri vibrazionali tratti dalla documentazione tecnica i cui livelli spettrali sono stati ricalcolati in funzione delle caratteristiche del sottosuolo (fattore di perdita e tipologia della sorgente) e della distanza dai ricettori.

#### *1.1.6 Traffico stradale*

lo spettro di riferimento per il traffico stradale è uno spettro ottenuto dallo spettro medio di accelerazione di un campione di 290 automezzi e 13 camion misurato a 10 m di distanza, tratto dalla documentazione tecnica e riportato nella Fig.

#### *1.2 Traffico ferroviario*

lo spettro di riferimento per il traffico ferroviario pur se limitato è uno spettro ottenuto dallo spettro medio di accelerazione tratto dal passaggio di treno un cargo alla velocità di 56 km/h, misurato a 8 m di distanza, tratto dalla documentazione tecnica.



Il valore di velocità mediamente più alto di quello che ci si può attendere nell'area ferroviaria in atto, porta sicuramente ad avere un certo margine di sicurezza nella valutazione vibrometrica.

### *1.3 Realizzazione setti trivellati*

La valutazione specifica del livello vibratorio generato e quindi del possibile disturbo legato alla realizzazione dei setti impermeabili trivellati di 880 mm che delimitano l'area di cantiere, è stata fatta utilizzando due metodologie di calcolo proposte dalla documentazione tecnica e poco sopra esposte, sulla base dei dati indicati dalle specifiche della macchina trivellatrice e sulla base di uno spettro compatibile tratto dalla documentazione tecnica.

### *1.4 Attività di cantiere*

La valutazione specifica del livello vibratorio generato e quindi del possibile disturbo legato alle attività di cantiere è stata valutata sulla base di spettri vibrazionali tratti dalla documentazione tecnica in altri cantieri.

A riferimento si sono utilizzati i seguenti spettri riferiti alle diverse tipologie di macchinari di uso comune nei cantieri, questi sono:

<b>Sorgente</b>	<b>Riferimento Bibliografico</b>
• Camion ribaltabile	Ref. #3
• Camion da cantiere (dumper)	Ref. #3
• Compattatore a rullo non vibrante	Ref. #3
• Compattatore a rullo vibrante	Ref. #3
• Pala gommata carica	Ref. #3
• Pala gommata scarica	Ref. #3
• Ruspa cingolata grande	Ref. #3
• Ruspa cingolata piccola	Ref. #3



## 5.2 Identificazione dei ricettori

Per la valutazione delle vibrazioni si sono utilizzati i medesimi ricettori utilizzati per la valutazione acustica.

Di ogni ricettore si è valutata la tipologia di suolo predominante, la distanza dalla sorgente vibratoria a livello fondazioni, inoltre ove è disponibile: la tipologia di edificio ed il numero di piani.

Tabella 12 elenco ricettori considerati

N	Indirizzo	Descrizione e n. piani	fascia di pertinenza infrastruttura di trasporto D.P.R. 142/2004
1	via italo svevo 19	Casa di riposo Emmaus, pt+4p	D e RFI
1b	via italo svevo	Istituto scolastico (facciata lato molo)	D e RFI
2	via italo svevo 38	Residenza civile, pt+4p	D e RFI
3	via baiamonti 1	Residenza civile, pt+5p	D e RFI
4	Via di Servola 40	Casa parrocchiale, pt+2p	E
5	Via di Servola	Chiesa	E
6	Via Pitacco 11	Residenza civile, pt+4p	E
7	Via S. Lorenzo in Selva	Residenza civile, pt+4p	E
8	Via S. Lorenzo in Selva	Residenza civile, pt+3p	D e RFI
8bis	Via S. Lorenzo in Selva	Residenza civile, pt+3p, facciata rivolta verso ingresso molo	D e RFI
9	Via S. Lorenzo in Selva	Residenza civile, pt+3p	D e RFI
10	Via S. Lorenzo in Selva	Residenza civile, pt+4p	D e RFI
11	via dei giardini 50	Residenza civile, pt+3p	D e RFI
12	via del ponticello 27	Residenza civile, pt+2p	D e RFI
13	via valmaura 75	Residenza civile, pt+9p	D e RFI
14	via valmaura 67	Residenza civile, pt+9p	D e RFI
15	via valmaura 51	Residenza civile, pt+9p	D e RFI
16	via Antonio Tribel 2	Residenza civile	D e RFI
17	via Matteo Giulio Bartoli	Residenza civile, pt+5p	D e RFI
18	Strada del Friuli	Residenza civile, pt+1p	D e RFI
19	Strada del Friuli	Residenza civile, pt+1p	D e RFI
20	Via Rio Primario	Residenza civile, pt+1p	D e RFI





### 5.3 Mappa ricettori

L'immagini seguenti riportano in dettaglio la posizione dei ricettori considerati e la distanza presa a riferimento dal tracciato ferroviario più prossimo.

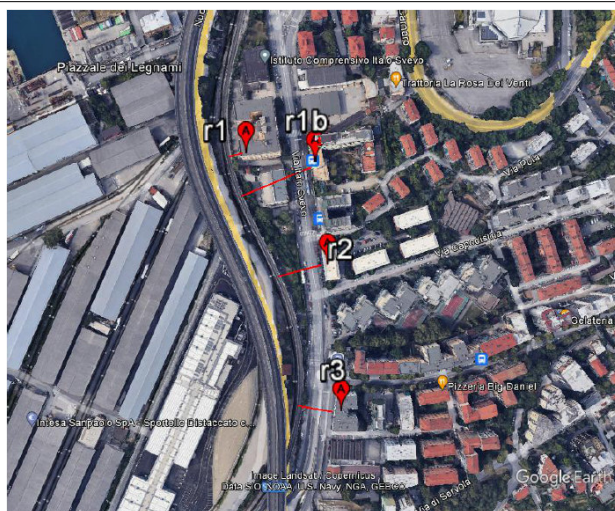


Figura 17 posizione ricettori r1-r3

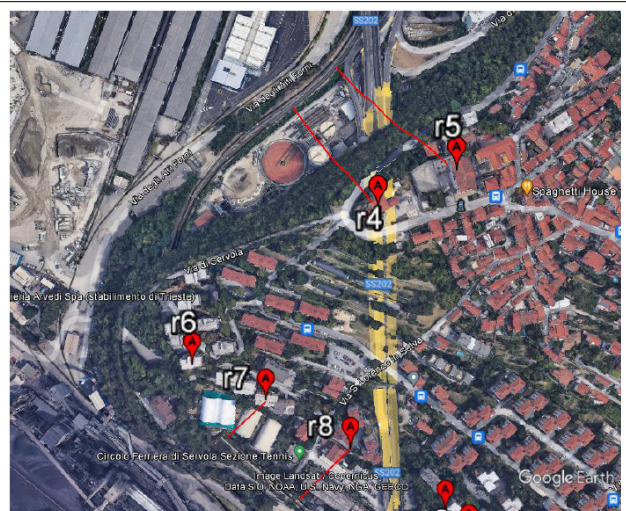


Figura 18 posizione ricettori r5-r8

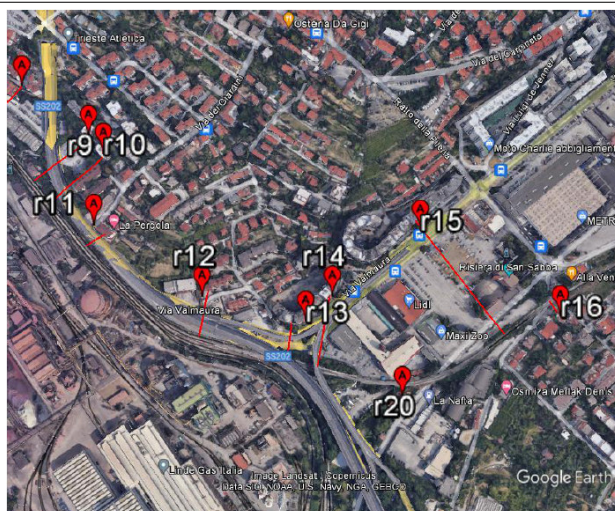


Figura 19 posizione ricettori r9-r16-r20

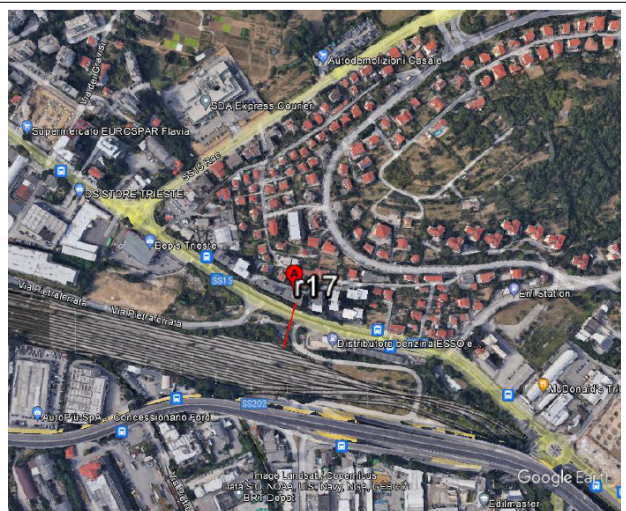


Figura 20 posizione ricettore r17

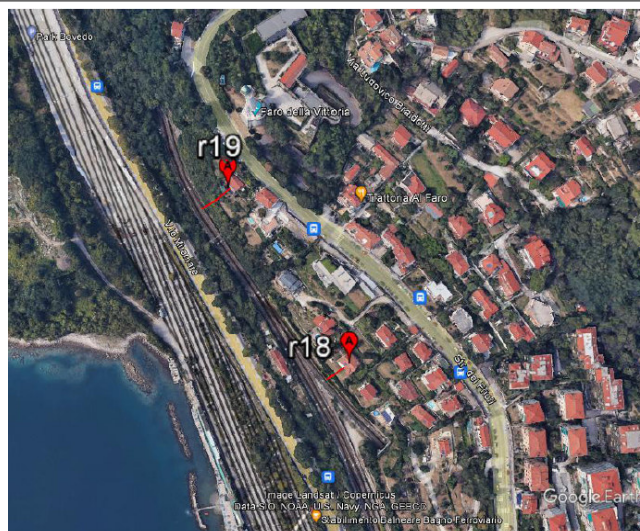


Figura 21 posizione ricettore r18-19

#### **5.4 Stima dei livelli vibratori ai ricettori nelle condizioni attuali con sorgente: traffico ferroviario e stradale**

Di seguito si riporta la tabella che riassume il calcolo del valore di accelerazione ponderato in frequenza Law corretto per il fattore di attenuazione legato alla distanza dalla sorgente, per la tipologia di suolo e per l'amplificazione legata alla tipologia strutturale degli edifici.

Per quanto riguarda quest'ultimo punto si è assunto un fattore medio di amplificazione strutturale di +5 dB per tener conto della propagazione delle vibrazioni all'interno dell'edificio, che cautelativamente è stato considerato come fenomeno di amplificazione seppur non sempre verificato in quanto dipende strettamente dalle caratteristiche strutturali del singolo edificio.

Questo valore di amplificazione è stato attribuito agli edifici sviluppati fino a 4 piani, mentre per gli edifici più alti si è valutato un ulteriore aumento di +1dB per ogni piano aggiuntivo, la stima è da ritenersi solo indicativa.

Per la tipologia della sorgente si è considerata la distanza dalla struttura viaria (strada/ferrovia) più prossima al ricettore e di una certa importanza.

Nel calcolo non si sono valutate le vibrazioni indotte al suolo dai viadotti, ma solo dalla strada più prossima.





I limiti considerati sono riferiti alla norma UNI9614-1990, valori che sono indicativamente mantenuti anche dall'aggiornamento della UNI9614-2017, che definisce il valore numerico del limite di accettabilità per edifici residenziali, corrispondente ad un valore del livello di accelerazione complessiva, ponderata secondo asse generico, pari a 74 dB per il periodo notturno e a 77 dB per il periodo diurno.

Poiché nell'area di cantiere è prevista attività anche nel periodo notturno si sono valutati due limiti di accettabilità:

il valore diurno di 77 dB esteso dalle ore 07-22 ed uno notturno di 74 dB esteso dalle ore 22-07.

Questi valori sono i valori previsti dalla norma UNI 9614 per gli edifici residenziali, per gli edifici "particolarmente sensibili", costituiti dagli ospedali, case di riposo e scuole, si adotta come limite (sia diurno che notturno) il valore stesso della soglia di percezione, che è pari a 71 dB.

La UNI 9614-1990 prevede una valutazione separata per le vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari, ed assume come valore di riferimento per il disturbo il valore di accelerazione di:

- $30 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  per asse Z pari ad un livello di 89,5 dB e di
- $21,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  per assi X e Y (postura non definita) pari ad un livello di 86,7 dB.

**Tabella 13 Livelli di accelerazione calcolati ai ricettori per vibrazioni stradali e ferroviarie**

Ricettore	tipologia	sorgente	distanza m	cat. suolo	piano	amplific. strutturale dB	livello acc. ponderata calcolata Law dB	limite nott. dB	limite diurno dB
<b>r1</b>	Casa di riposo	sede stradale	20	CL-2	pt	0	60	71	71
					5p	+6	66		
	ferrovia	15	CL-2	pt	0	82	86,7	86,7	
				5p	+6	88			
<b>r1b</b>	Istituto scolastico	sede stradale	7	CL-2	pt	0	69	71	71
					4P	+5	74		
	ferrovia	73	CL-2	pt	0	71	86,7	86,7	
				4P	+5	76			
<b>r2</b>	res.civile	sede	7	CL-2	pt	0	69	74	77





Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 48 di 72

		stradale			p4	+5	73		
		ferrovia	44	CL-2	pt	0	65	86,7	86,7
					p4	+5	70		
<b>r3</b>	res.civile	sede stradale	8,5	CL-2	pt	0	70	74	77
					p5	+6	75		
	ferrovia	33	CL-2	pt	0	80	86,7	86,7	
				p5	+6	86			
<b>r4</b>	res.civile	sede stradale	160	CL-2	pt	0	37	74	77
					p2	+5	42		
	ferrovia	143	CL-2	pt	0	62	86,7	86,7	
				p2	+5	67			
<b>r5</b>	chiesa	sede stradale	41	CL-2	pt	0	54	74	77
					p5	+6	60		
	ferrovia	166	CL-2	pt	0	60	86,7	86,7	
				p5	+6	66			
<b>r6</b>	res.civile	sede stradale	68	CL-2	pt	0	50	74	77
					p3	+5	55		
	ferrovia (galleria)	10?	CL-2	pt	0	?	86,7	86,7	
				p3	+5	?			
<b>r7</b>	res.civile	sede stradale	81	CL-2	pt	0	49	74	77
					p5	+6	55		
	ferrovia	61	CL-2	pt	0	72	86,7	86,7	
				p5	+6	78			



Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 49 di 72

<b>r8</b>	res.civile	sede stradale	39	CL-2	pt	0	42	74	77
					p5	+6	48		
		ferrovia	79	CL-2	pt	0	70	86,7	86,7
					p5	+6	76		
<b>r9</b>	res.civile	sede stradale	47	CL-2	pt	0	54	74	77
					p3	+5	59		
		ferrovia	94	CL-2	pt	0	68	86,7	86,7
					p3	+5	73		
<b>r10</b>	res.civile	sede stradale	66	CL-2	pt	0	50	74	77
					p3	+5	55		
		ferrovia	100		pt	0	67	86,7	86,7
					p3	+5	72		
<b>r11</b>	res.civile	sede stradale	96	CL-1 / CL-2	pt	0	25	74	77
					p2	+5	30		
		ferrovia	37	CL-1 / CL-2	pt	0	66	86,7	86,7
					p2	+5	71		
<b>r12</b>	res.civile	sede stradale	37	CL-1	pt	0	45	74	77
					p2	+5	50		
		ferrovia	68	CL-1	pt	0	59	86,7	86,7
					p2	+5	64		
<b>r13</b>	res.civile	sede stradale	35	CL-1	pt	0	46	74	77
					p7	+7	53		
		ferrovia	54	CL-1	pt	0	62	86,7	86,7
					p7	+7	69		



Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 50 di 72

<b>r14</b>	res.civile	sede stradale	15	CL-1	pt	0	61	74	77
					p8	+8	69		
		ferrovia	105	CL-1	pt	0	53	86,7	86,7
					p8	+8	61		
<b>r15</b>	res.civile	sede stradale	25	CL-1	pt	0	53	74	77
					p9	+9	62		
		ferrovia	210	CL-1	pt	0	35	86,7	86,7
					p9	+9	44		
<b>r16</b>	res.civile	sede stradale	52	CL-2	pt	0	53	74	77
					p2	+5	58		
		ferrovia	19	CL-2	pt	0	84	86,7	86,7
					p2	+5	89		
<b>r17</b>	res.civile	sede stradale	20	CL-2	pt	0	60	74	77
					p5	+6	66		
		ferrovia	72	CL-2	pt	0	71	86,7	86,7
					p5	+6	77		
<b>r18</b>	res.civile	sede stradale	64	CL-2	pt	0	51	74	77
					p1	+5	56		
		ferrovia	24	CL-2	pt	0	84	86,7	86,7
					p1	+5	89		
<b>r19</b>	res.civile	sede stradale	14	CL-2	pt	0	62	74	77
					p1	+5	67		
		ferrovia	38	CL-2	pt	0	78	86,7	86,7



Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 51 di 72

					p1	+5	83		
<b>r20</b>	res.civile	sede stradale	13	CL-1	pt	0	64	74	77
					p1	+5	69		
		ferrovia	6	CL-1	pt	0	92	86,7	86,7
					p1	+5	97		
		valori che rispettano i limiti della UNI 9614							
		valori che superano i limiti della UNI 9614							



# Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 52 di 72

Diagrammi di attenuazione del livello vibratorio con la distanza per le due classi litologiche utilizzate nell'analisi.

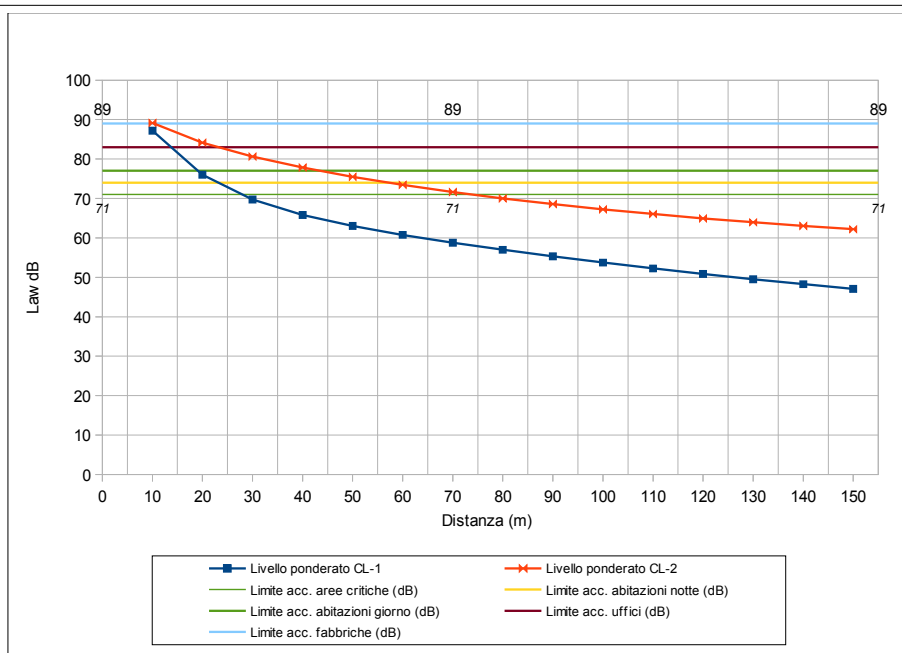


Figura 22 Andamento con la distanza del livello vibratorio in accelerazione ponderata in frequenza di traffico ferroviario per le due classi litologiche CL-1 e CL-2

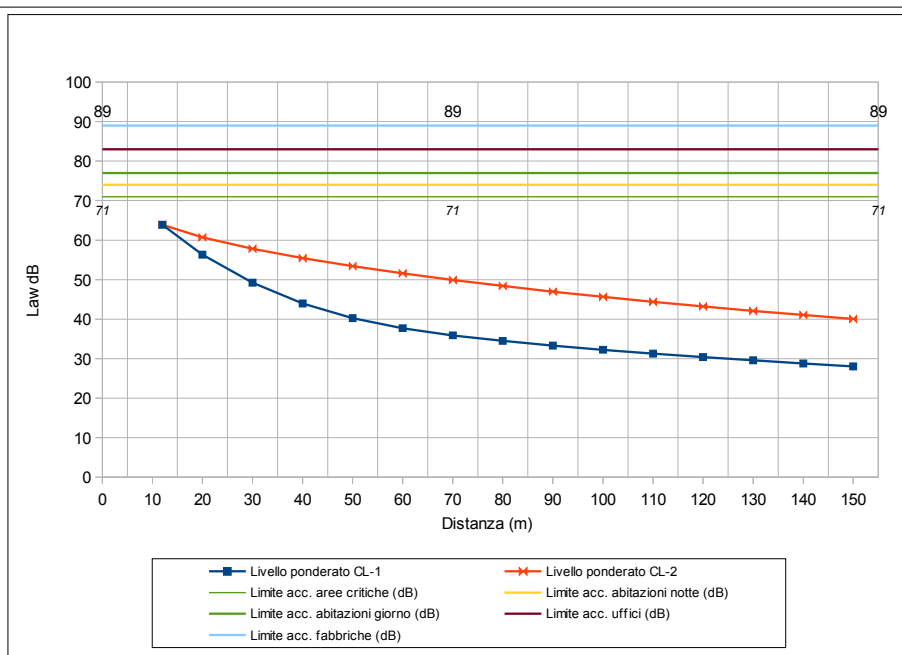


Figura 23 Andamento con la distanza del livello vibratorio in accelerazione ponderata in frequenza di traffico misto stradale per le due classi litologiche CL-1 e CL-2



### **5.5 Stima dei livelli vibratori ai ricettori nelle condizioni attuali con sorgente: attività di trivellazione sotto impermeabile**

A seguito si riporta la tabella che riassume il calcolo del valore di accelerazione ponderato in frequenza  $L_w$  corretto per il fattore di attenuazione legato alla distanza dalla sorgente per la tipologia di suolo e per l'amplificazione legata alla tipologia strutturale degli edifici per le vibrazioni generate durante la trivellazione dei pali del setto impermeabile a contorno dell'area di cantiere.

Nella valutazione si sono analizzati i ricettori più vicini all'asse di esecuzione della trivellazione per la realizzazione del setto impermeabile.

Questi sono: r6, r7, r8, r9, r10, r11, r12

Le loro distanze dalla sorgente di vibrazione sono comprese tra 55 m a 128 m.

Come si può osservare dalla figura 25, il livello di vibrazioni nei metri di distanza per i terreni più superficiali (classe litologica CL-1) appare decisamente elevato, valore che per poi decadere velocemente allorché la trivellazione raggiunge il substrato roccioso, che si presenta a modesta profondità, passando quindi alla curca di attenuazione CL-2.

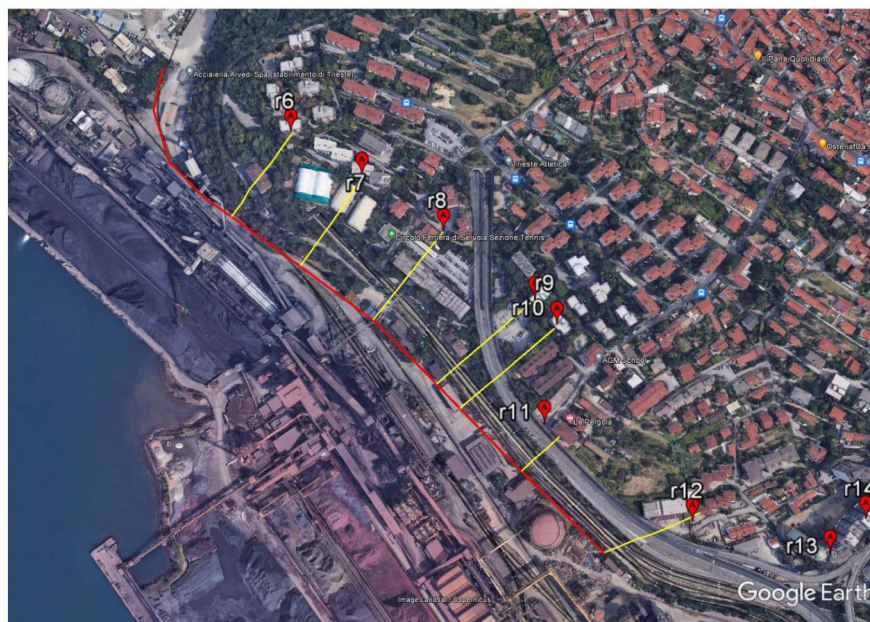


Figura 24 posizione ricettori vibrazioni costruzione setto

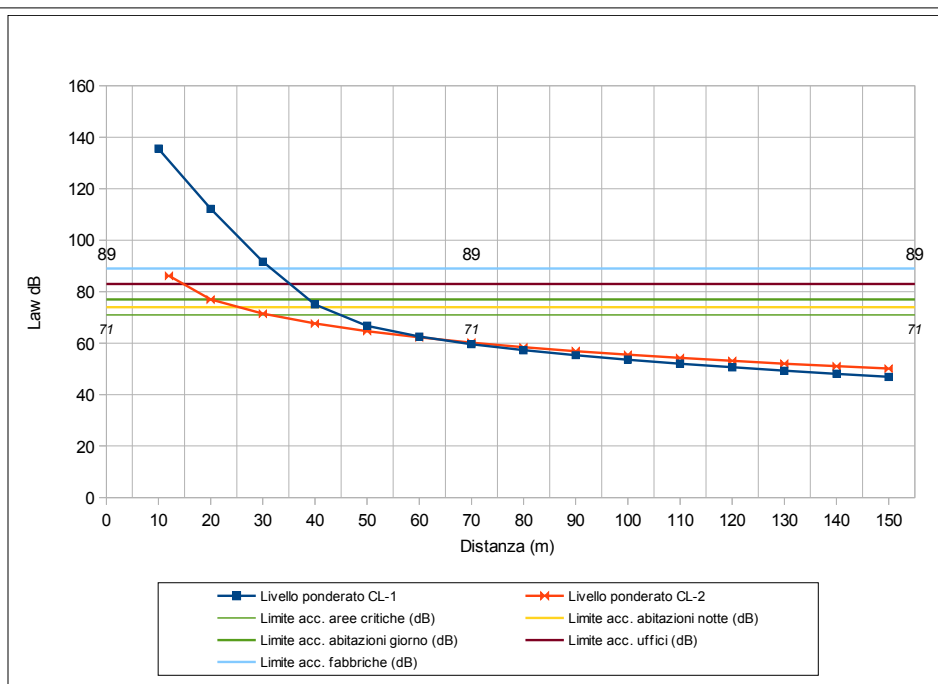


Figura 25 Andamento con la distanza del livello vibratorio in accelerazione ponderata in frequenza realizzazione setto per le due classi litologiche CL-1 e CL-2

Tabella 14 Livelli di accelerazione calcolati ai ricettori per vibrazioni di trivellazione setto

Ricettore	ipologia	sorgente	distanza m	cat. suolo	piano	amplific. strutturale dB	livello acc. ponderata calcolata Law dB	limite nott. dB	limite diurno dB
<b>r6</b>	res.civile	trivellazione setto	110	CL-2	pt	0	54	74	77
					p3	+5	59		
<b>r7</b>	res.civile	trivellazione setto	112	CL-2	pt	0	54	74	77
					p5	+6	60		
<b>r8</b>	res.civile	trivellazione setto	119	CL-2	pt	0	53	74	77
					p5	+6	59		
<b>r9</b>	res.civile	trivellazione setto	128	CL-2	pt	0	53	74	77
					p3	+5	58		
<b>r10</b>	res.civile	trivellazione	128	CL-2	pt	0	53	74	77



		setto			p3	+5	58		
<b>r11</b>	res.civile	trivellazione setto	55	CL-1 / CL-2	pt	0	63	74	77
					p2	+5	68		
<b>r12</b>	res.civile	trivellazione setto	109	CL-1	pt	0	54	74	77
					p2	+5	59		

### ***5.6 Stima dei livelli vibratori ai ricettori nelle condizioni attuali con sorgente: attività di cantiere***

La valutazione dell'attività di cantiere è stata fatta ipotizzando un cantiere tipo ed utilizzando per l'analisi degli spettri tipici dei vari mezzi tratti da fonti bibliografiche.

L'analisi, riportata nella tabella 15, mette in evidenza la distanza minima alla quale, le varie macchine operatrici e mezzi, generano al suolo livelli di accelerazione ponderata in frequenza (Law) tali che ai ricettori giungano livelli superiori ai valori indicati dalla norma UNI 9614 per tipologia di ricettore.

Per la valutazione si è considerata una amplificazione media di +6 dB, legata alla struttura degli edifici, ovvero il livello di accelerazione ponderata in frequenza Law a livello fondazione/p.c. deve risultare di 6 dB più basso del limite previsto di disturbo per compensare le amplificazioni legate ai solai/strutture.





**Tabella 15 Livelli di accelerazione calcolati ai ricettori per vibrazioni di attività di cantiere**

Ricettori	Ricettori sensibili distanza (m) minima per limite Law 71 dB = Law fondazione 65 dB	Abitazioni notte distanza (m) minima per limite Law 74 dB = Law fondazione 68 dB	Abitazioni giorno distanza (m) minima per limite Law 77 dB = Law fondazione 71 dB	Uffici distanza (m) minima per limite Law 83 dB = Law fondazione 77 dB
Tipologia macchina				
Camion ribaltabile	13	12	10	8
Camion da cantiere (dumper)	10	9	8	7
Compattatore a rullo non vibrante	130	115	94	65
Compattatore a rullo vibrante	17	15	12	8
Pala gommata carica	20	15	11	7
Pala gommata scarica	15	11	10	7
Ruspa cingolata grande	40	30	24	14
Ruspa cingolata piccola	75	60	45	27
trivellazione setti	55	47	45	39



## **6 ESITO DELL'ANALISI VIBRAZIONALE**

La valutazione delle vibrazioni presenti e in fase di cantiere è stata sviluppata sulla base di spettri di accelerazione tratti dalla documentazione tecnica e quindi registrati su altri cantieri, mancando una verifica strumentale in sito.

Una accurata ricerca ha permesso di utilizzare degli spettri tipici di treni merci a bassa velocità e di macchine in uso comune in cantiere.

Tuttavia si deve evidenziare che la propagazione delle vibrazioni nel sottosuolo, a differenza della perturbazione sonora, è condizionata in modo molto importante dalle caratteristiche del mezzo di propagazione (sottosuolo), e dalle caratteristiche costruttive e geometriche degli edifici, nonché da come questi due elementi sono interconnessi ed interagiscono a livello di fondazione.

Dato che non sono note le caratteristiche costruttive, tranne il numero di piani, degli edifici considerati come ricettori, si è assunto un fattore medio di amplificazione strutturale di +5 dB, per edifici fino a 4 piani, ed un incremento di +1dB/piano oltre il 4° piano; questo nell'ottica di una valutazione più conservativa dato che l'amplificazione non sempre è verificata in quanto dipende strettamente dalle caratteristiche strutturali del singolo edificio.

La valutazione è stata fatta assumendo che le vibrazioni analizzate siano continue e che la sorgente sia puntuale, valutazione conservativa.

La UNI 9614 prevede una valutazione separata per le vibrazioni prodotte da veicoli ferroviari, ed assume come valore di riferimento per il disturbo il valore di accelerazione di

$30 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  per asse Z pari ad un livello di 89,5 dB e di

$21,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$  per assi X e Y (postura non definita) pari ad un livello di 86,7 dB.

Fatte queste premesse si possono trarre le seguenti considerazioni dal presente studio:

### **Traffico automezzi e camion**

- L'analisi delle vibrazioni indotte dal traffico ai ricettori, fatta sulla base di uno spettro medio di traffico composto da 213 automezzi e 13 camion, evidenzia che nessuno dei ricettori mostra a livello di calcolo il superamento dei livelli vibrazionali previsti dalla UNI9614 sia per il valore notturno che diurno.
  - **r3** (residenza civile) nella valutazione del livello vibratorio al 5° piano, supera di +1 dB il livello notturno (74 dB), valore sicuramente trascurabile che rientra entro i limiti di calcolo;



### Traffico Ferroviario

- L'analisi delle vibrazioni indotte dalla movimentazione ferroviaria, è stata eseguita considerando il singolo transito nella condizione di massima emissione vibrazionale. Per quanto concerne il livello di emissione massima, questo è rappresentato dai valori vibrazionali massimi indotti da un singolo transito di un convoglio ferroviario merci determinato sulla base dei dati di spettro tipo di un treno merci. L'analisi evidenzia il superamento dei limiti in più ricettori (4 di 21):
  - **r1** (casa di riposo, ricettore sensibile) al 5° piano superamento di + 1,3 dB, valore sicuramente trascurabile che rientra entro i limiti di calcolo; si nota la distanza di solo 15 m dalla ferrovia;
  - **r16** (residenza civile) al 2° piano superamento di +2,3 dB; il valore può essere dovuto ad una sovrastima dell'amplificazione della struttura dato che si ha solo 2 piani, rientra entro i limiti di calcolo ; si nota la distanza di solo 19 m dalla ferrovia;
  - **r18** (residenza civile) al 1° piano superamento di +2,3 dB; il valore può essere dovuto ad una leggera sovrastima dell'amplificazione della struttura, rientra entro i limiti di calcolo; si nota la distanza di solo 24 m dalla ferrovia;
  - **r20** (residenza civile) al pt e 1° piano superamento di +5,3 dB e di 10,3 dB; il valore di accelerazione elevato è dovuto alla distanza di solo 6 m dalla ferrovia;

### Fasi di Cantiere

- L'analisi delle vibrazioni indotte dalla movimentazione di mezzi di cantiere, è avvenuta sulla base di spettri specifici tratti dalla documentazione tecnica e calcolata alle varie distanze:

Diversamente dalle valutazioni precedenti in cui si è in presenza di un percorso ben definito e delimitante la distanza sorgente-ricettore, si è preferito valutare la distanza minima alla quale le vibrazioni emesse dai vari mezzi risultano superare i limiti della norma.

Il limite delle vibrazioni a cui riferirsi è differente a seconda che l'attività di cantiere sia nella fase diurna, ovvero tra le ore 07 e 22 o notturna ore 22-07, ed inoltre deve riferirsi ai limiti previsti dalla normativa per la sensibilità specifica del ricettore.



Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001

Pag. 59 di 72

Ricettori	Ricettori sensibili distanza (m) minima per limite Law 71 dB = Law fondazione 65 dB	Abitazioni notte distanza (m) minima per limite Law 74 dB = Law fondazione 68 dB	Abitazioni giorno distanza (m) minima per limite Law 77 dB = Law fondazione 71 dB	Uffici distanza (m) minima per limite Law 83 dB = Law fondazione 77 dB
Tipologia macchina				
Camion ribaltabile	13	12	10	8
Camion da cantiere (dumper)	10	9	8	7
Compattatore a rullo non vibrante	130	115	94	65
Compattatore a rullo vibrante	17	15	12	8
Pala gommata carica	20	15	11	7
Pala gommata scarica	15	11	10	7
Ruspa cingolata grande	40	30	24	14
Ruspa cingolata piccola	75	60	45	27
trivellazione setti	55	47	45	39

Come si può notare i mezzi più rumorosi da un punto di vista vibratorio sono il compattatore a rullo non vibrante e le due ruspe, in cui si evidenzia a ruspa cingolata piccola.

La distanza minima per un compattatore a rullo deve essere pertanto di 130 m da un ricettore sensibile (notturno e diurno) e di 115 m da una abitazione civile nell'orario notturno, che si riduce a 94 nell'orario diurno.

Questi valori tuttavia sono stati valutati ipotizzandoli come continui, un uso di queste macchine intervallato negli orari diurni e nelle ore centrali della giornata, in cui le vibrazioni possono venire parzialmente mascherate da una vibrazione di fondo più alta, ne renderebbe sicuramente meno impattante il disturbo.



### Lavori di Trivellazione del setto impermeabile

La valutazione delle vibrazioni indotte dalla fase di scavo/trivellazione dei setti evidenzia che, pur se i livelli di vibrazioni indotte dalla trivellatrice sono molto elevati in prossimità della macchina, questi vengono attenuati molto velocemente con la distanza.

Le vibrazioni generate durante la fase di trivellazione subiranno una decisa attenuazione allorché la trivella passerà dai terreni più superficiali e sciolti ai terreni via via più addensati nel sottosuolo.

L'analisi evidenzia livelli di accelerazione ponderata in frequenza Law, in corrispondenza dei ricettori, ben sotto la soglia di percezione (71 dB).

Ricettore	ipologia	sorgente	distanza m	cat. suolo	piano	amplific. strutturale dB	livello acc. ponderata calcolata Law dB	limite nott. dB	limite diurno dB
<b>r6</b>	res.civile	trivellazione setto	110	CL-2	pt	0	54	74	77
					p3	+5	59		
<b>r7</b>	res.civile	trivellazione setto	112	CL-2	pt	0	54	74	77
					p5	+6	60		
<b>r8</b>	res.civile	trivellazione setto	119	CL-2	pt	0	53	74	77
					p5	+6	59		
<b>r9</b>	res.civile	trivellazione setto	128	CL-2	pt	0	53	74	77
					p3	+5	58		
<b>r10</b>	res.civile	trivellazione setto	128	CL-2	pt	0	53	74	77
					p3	+5	58		
<b>r11</b>	res.civile	trivellazione setto	55	CL-1 / CL-2	pt	0	63	74	77
					p2	+5	68		
<b>r12</b>	res.civile	trivellazione setto	109	CL-1	pt	0	54	74	77



## **7** **BIBLIOGRAFIA**

- #1)** G.A. Athanasopoulos, P.C. Pelekis, G.A. Anagnostopoulos - "Effect of soil stiffness in the attenuation of Rayleigh-wave motions from field measurements" - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000) 277-288;
- #2)** Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee - "Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations" - Soil Dynamics and Earthquake Engineering 19 (2000) 115-126;
- #3)** L.H. Watkins - "Environmental impact of roads and traffic" - Appl. Science Publ.;
- #4)** Raffaele Pisani "Origine, Propagazione e Modelli Previsionali delle Vibrazioni dei Mezzi di Trasporto", Studio di Ingegneria Acustica Rivoli (Torino);
- #5)** Kym Burgemeister, Kai Fisher and Kathy Franklin "Measurement and Prediction of Construction Vibration Affecting Sensitive Laboratories", Paper Number 33, Proceedings of ACOUSTICS 2011;

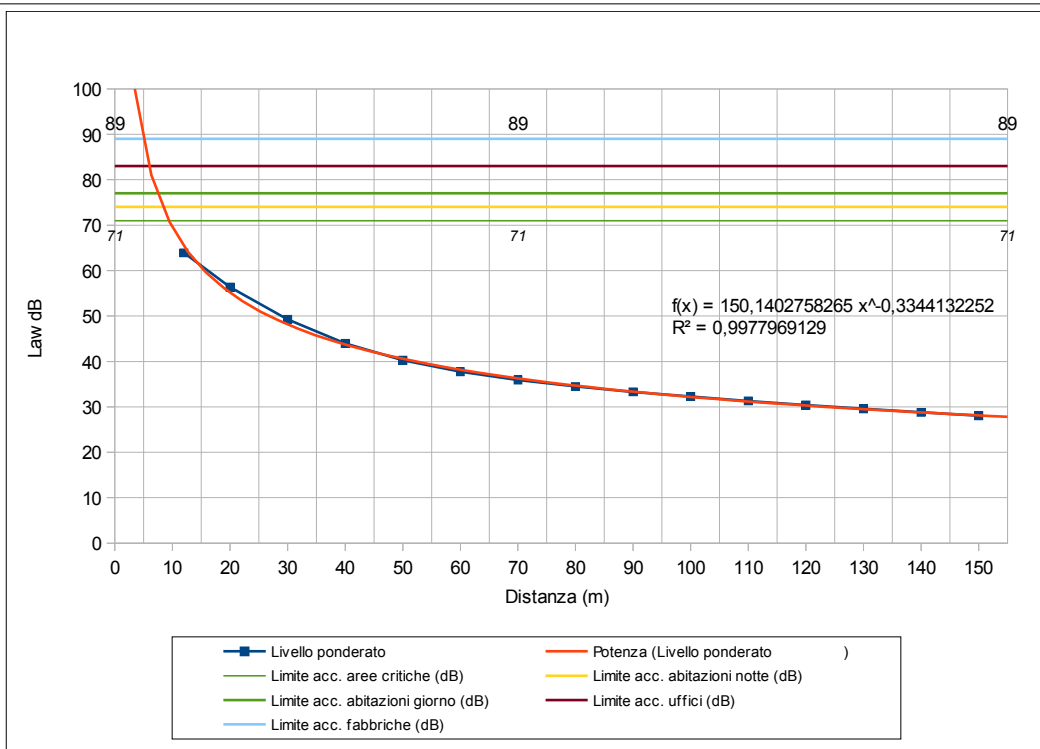
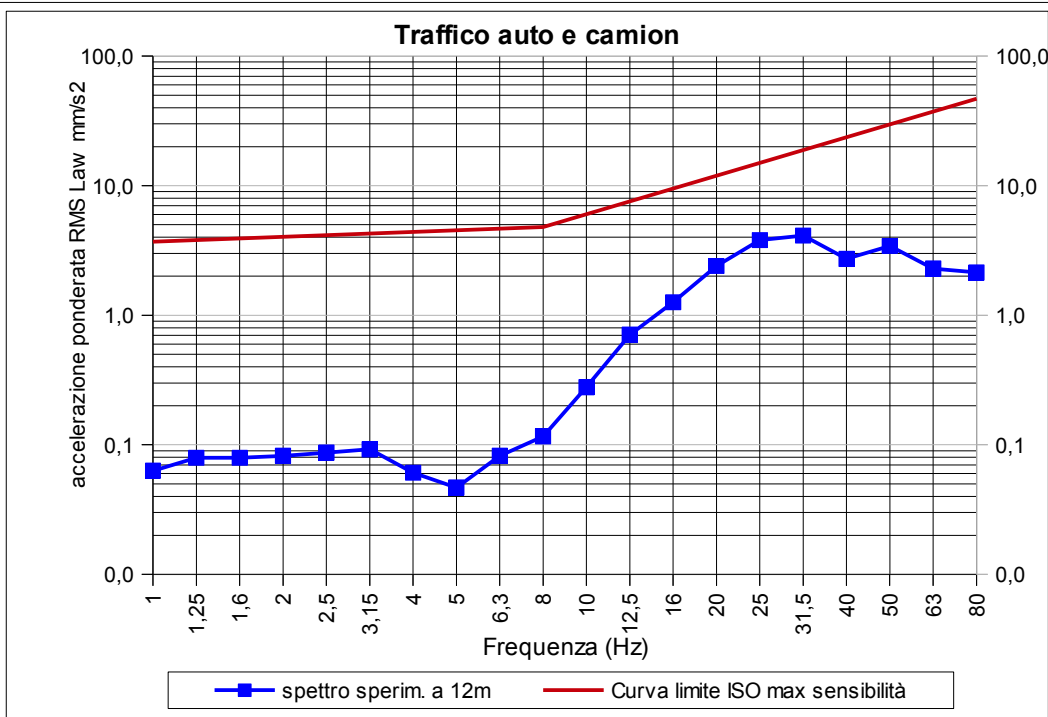
	PROGETTO AdSP 1951 Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuova nel porto di Trieste	Pag. 62 di 72
--	---	---------------

## **ALLEGATI**

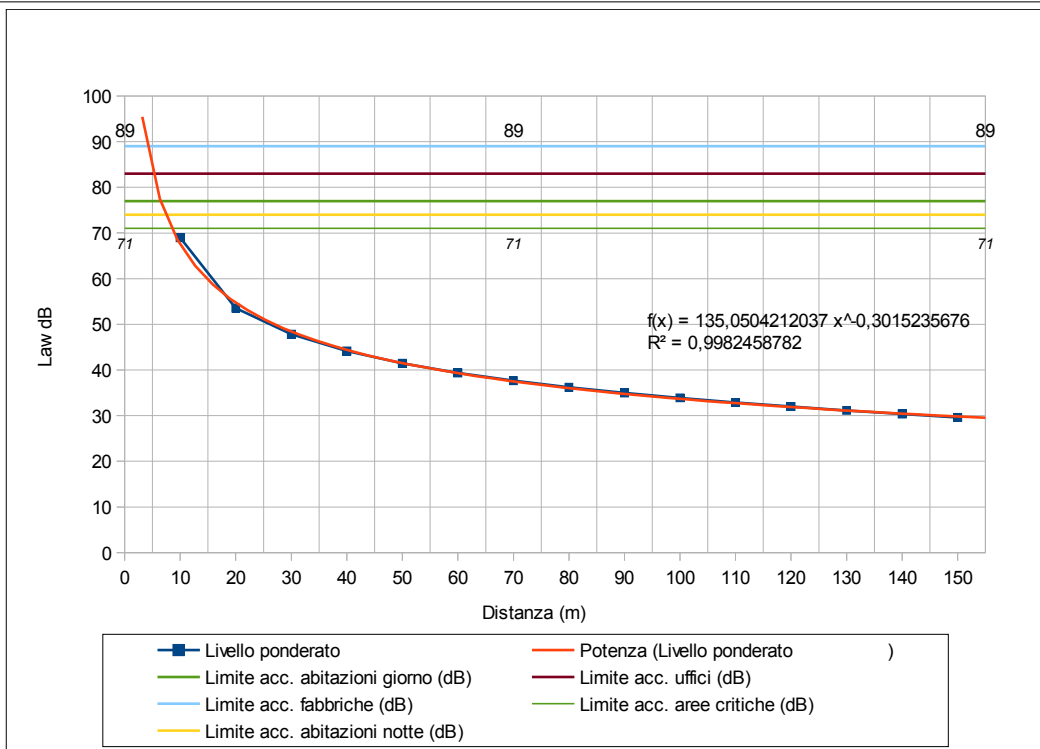
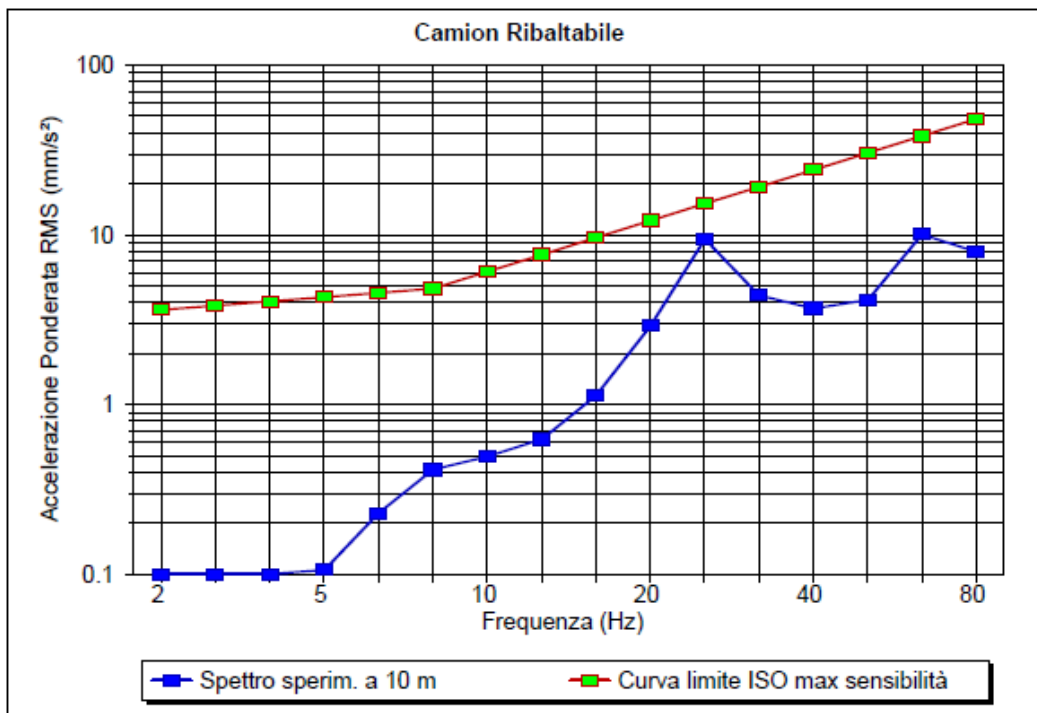
### **Spettri di accelerazione di riferimento e diagrammi di attenuazione con la distanza delle vibrazioni per differenti sorgenti vibratorie**

- ALLEGATO 1 - Traffico automezzi e camion
- ALLEGATO 2 - Camion ribaltabile
- ALLEGATO 3 - Camion da cantiere (dumper)
- ALLEGATO 4 - Compattatore a rullo non vibrante
- ALLEGATO 5 - Compattatore a rullo vibrante
- ALLEGATO 6 - Pala gommata carica
- ALLEGATO 7 - Pala gommata scarica
- ALLEGATO 8 - Ruspa cingolata grande
- ALLEGATO 9 - Ruspa cingolata piccola
- ALLEGATO 10 - Trivellazione setti

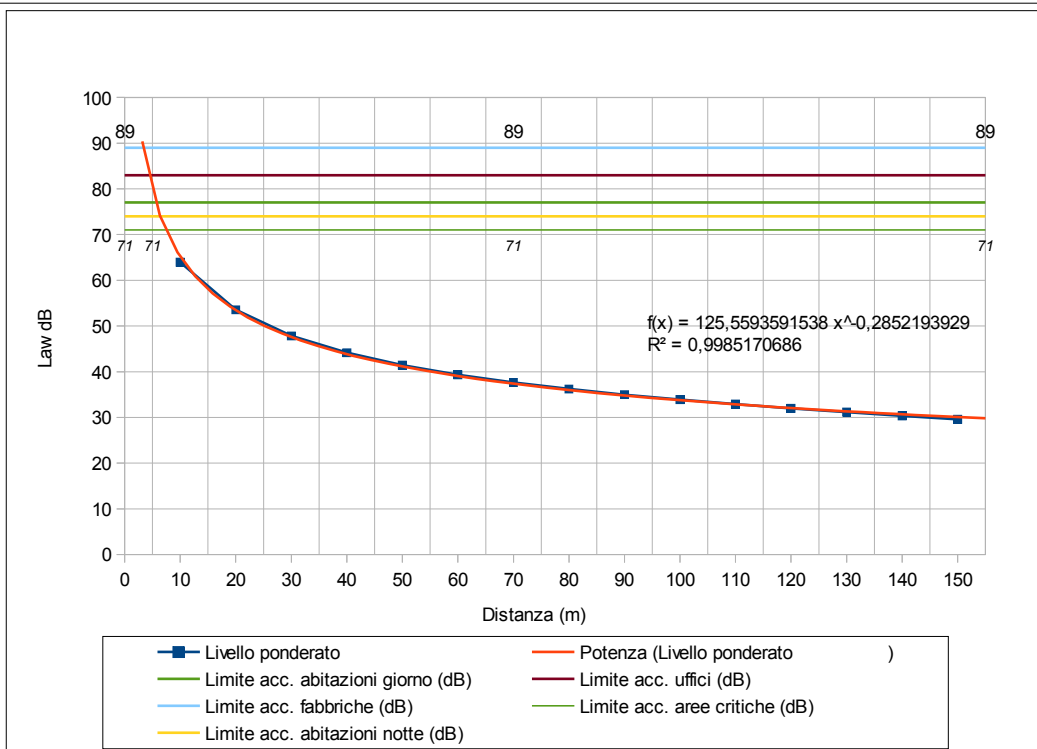
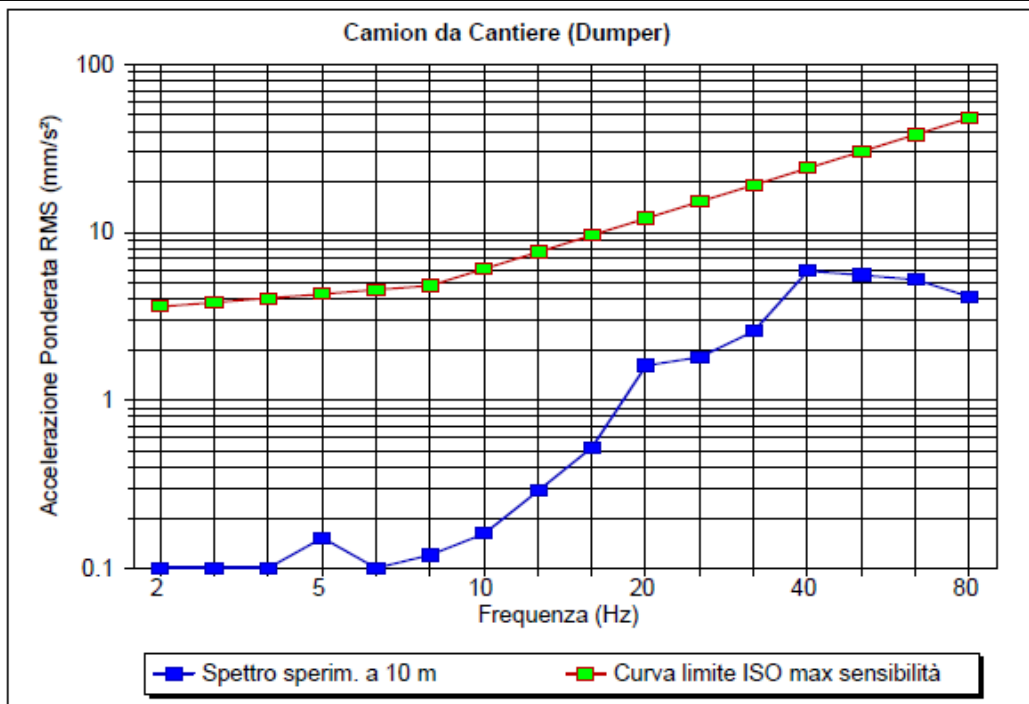




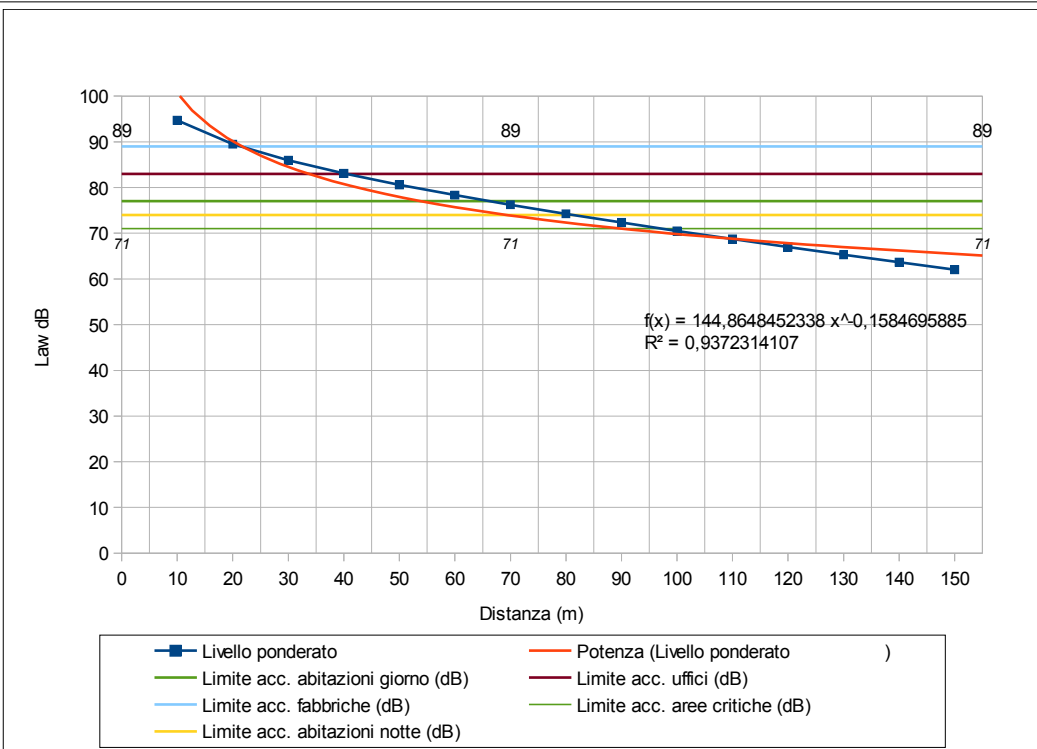
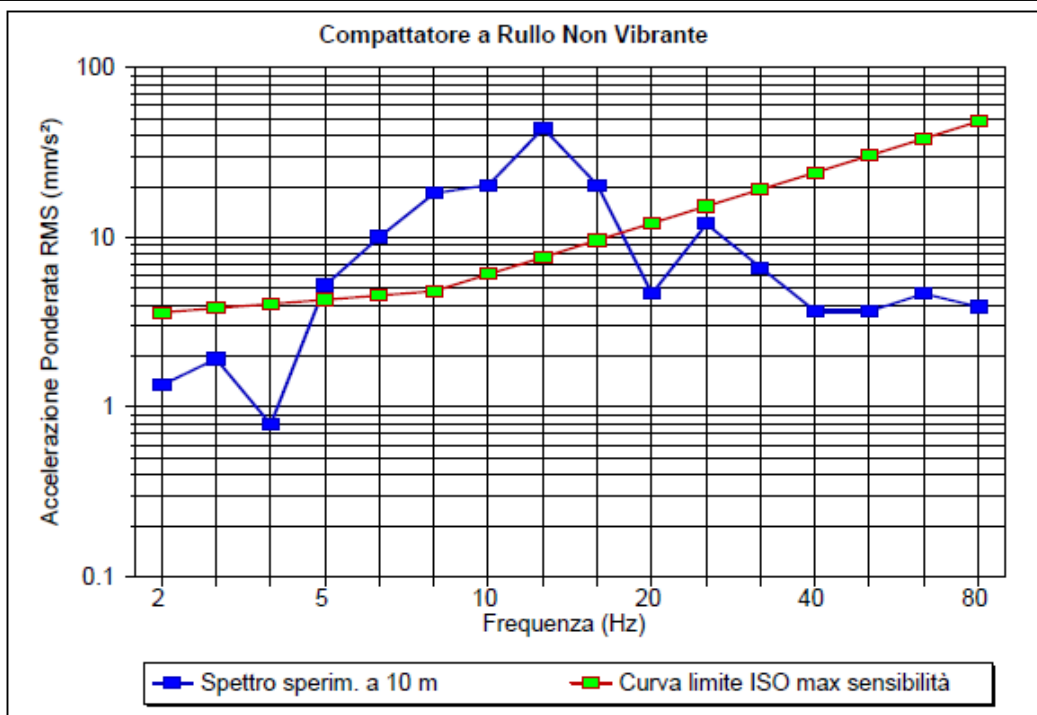
Traffico automobili e camion: attenuazione vibrazioni con la distanza



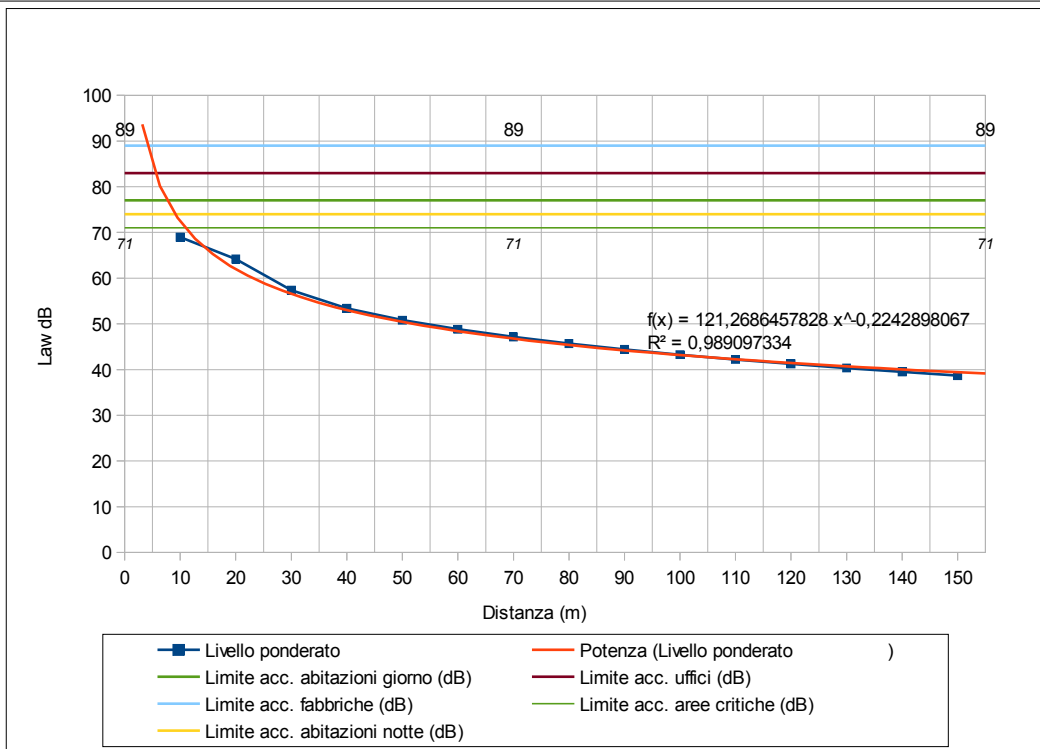
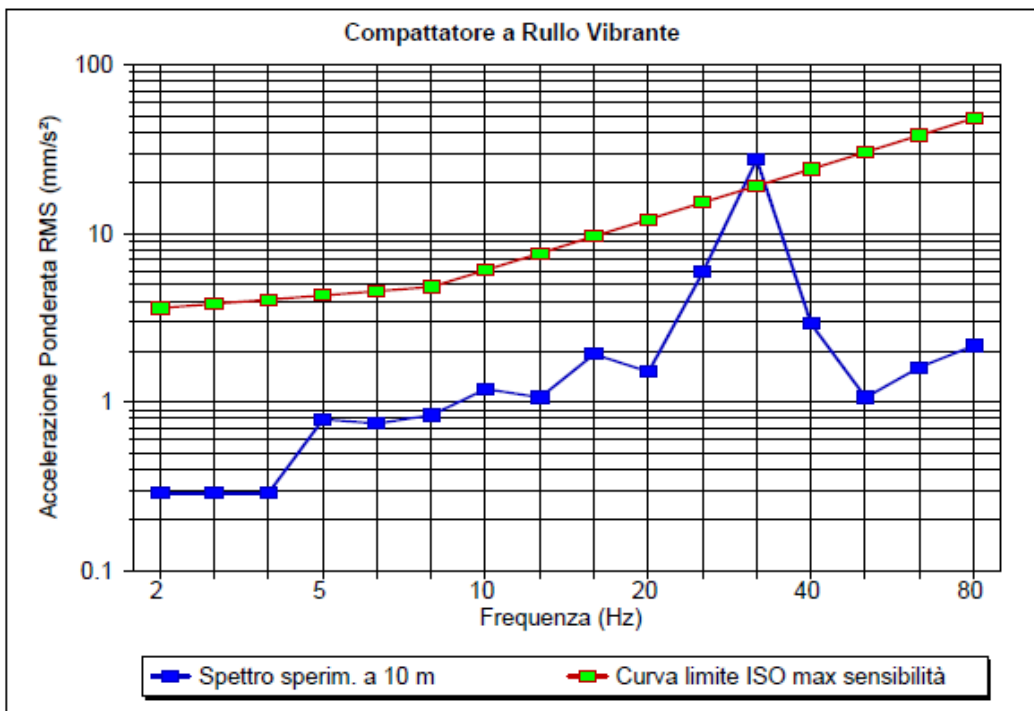
Camion ribaltabile: attenuazione vibrazioni con la distanza



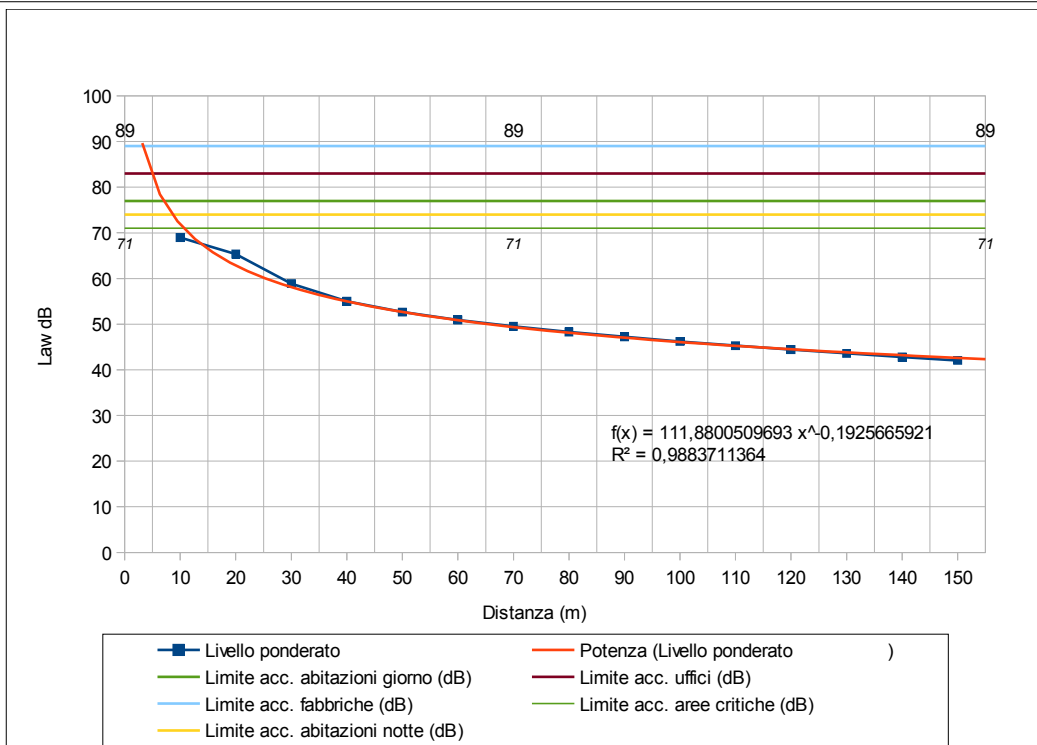
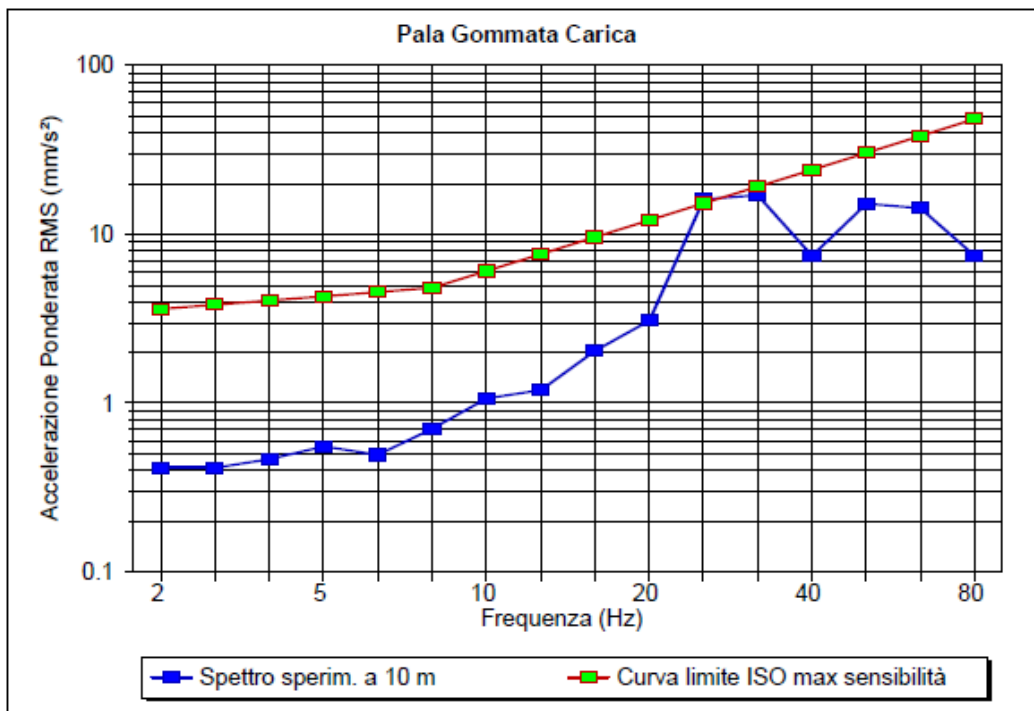
Camion da cantiere (dumper): attenuazione vibrazioni con la distanza



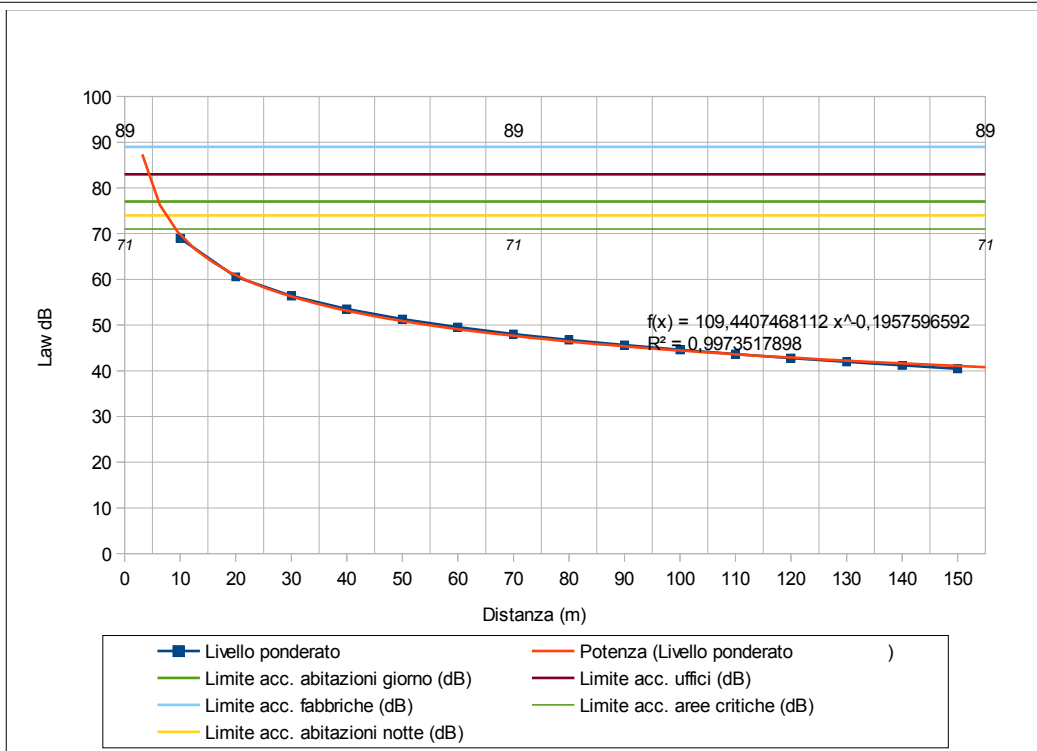
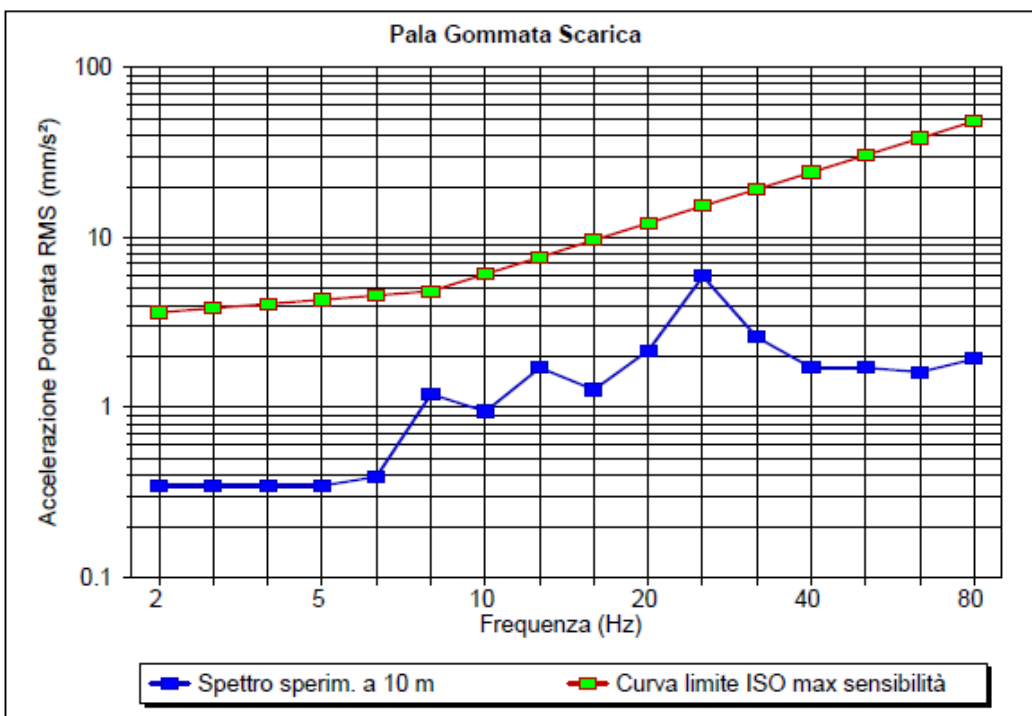
Compattatore a rullo non vibrante: attenuazione vibrazioni con la distanza



Compattatore a rullo vibrante: attenuazione vibrazioni con la distanza

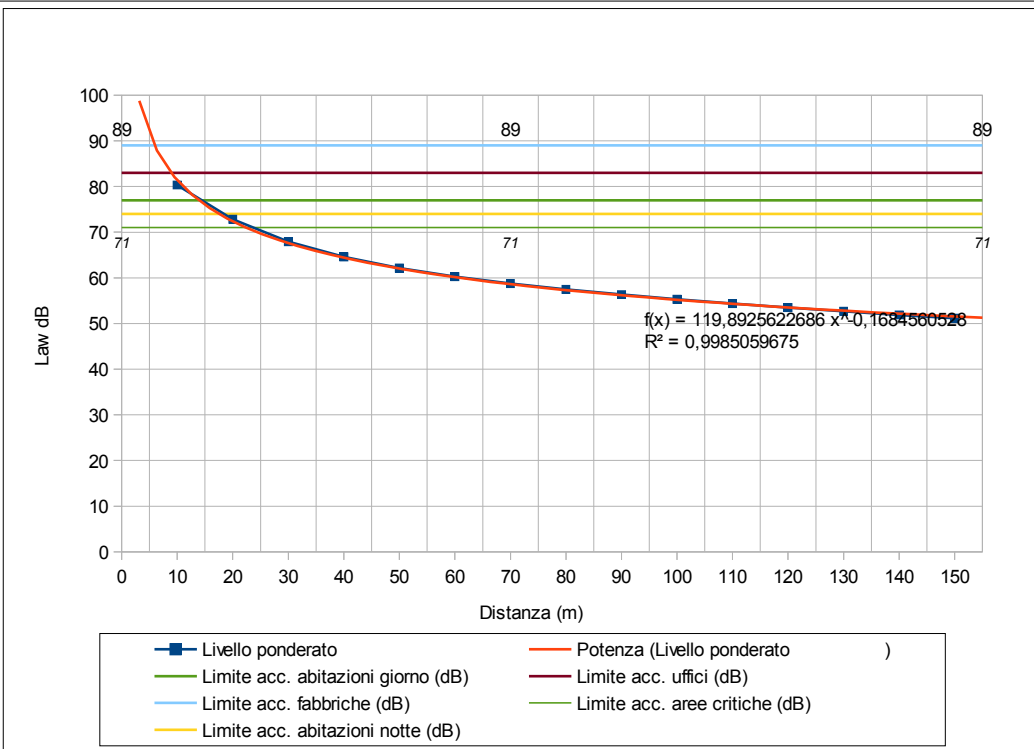
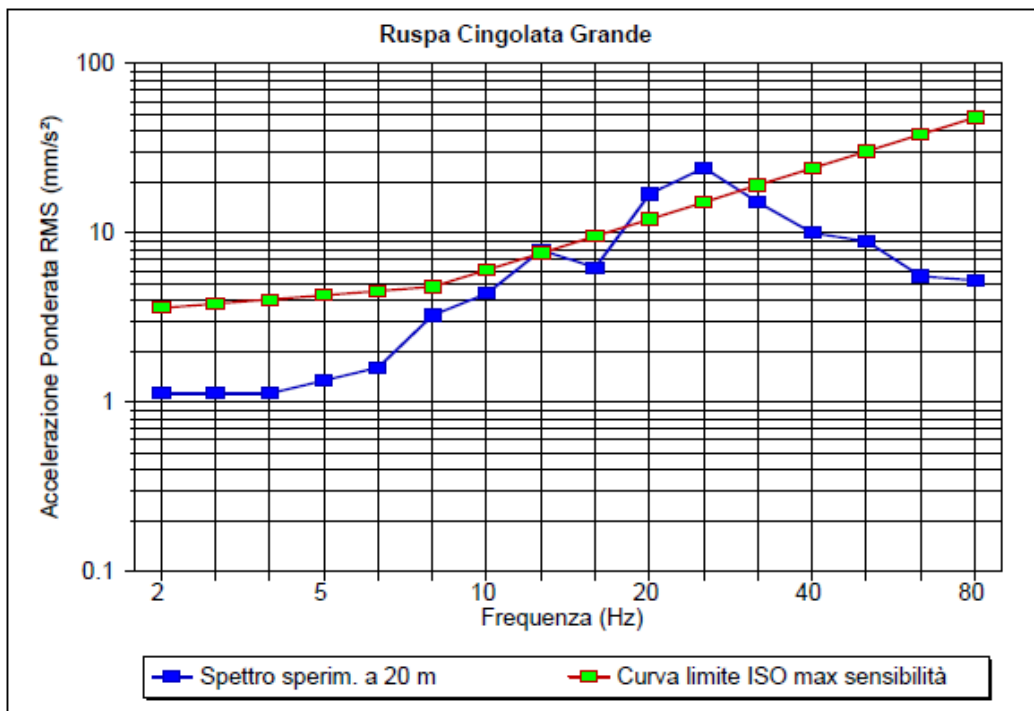


Pala gommata carica: attenuazione vibrazioni con la distanza

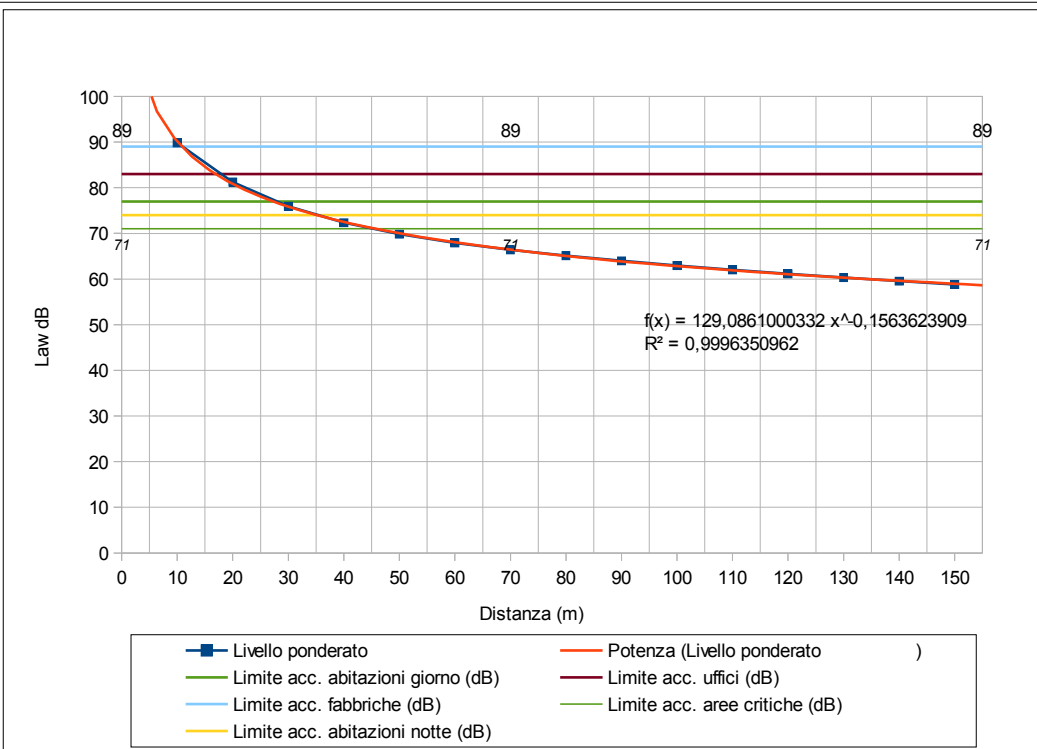
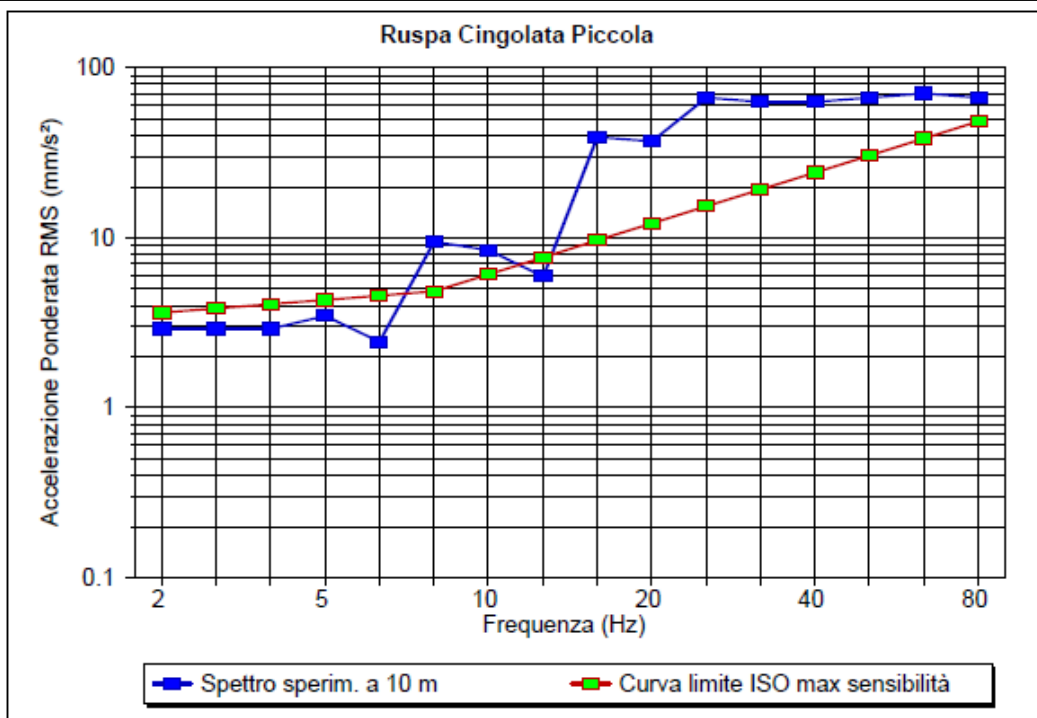


Pala gommata scarica: attenuazione vibrazioni con la distanza

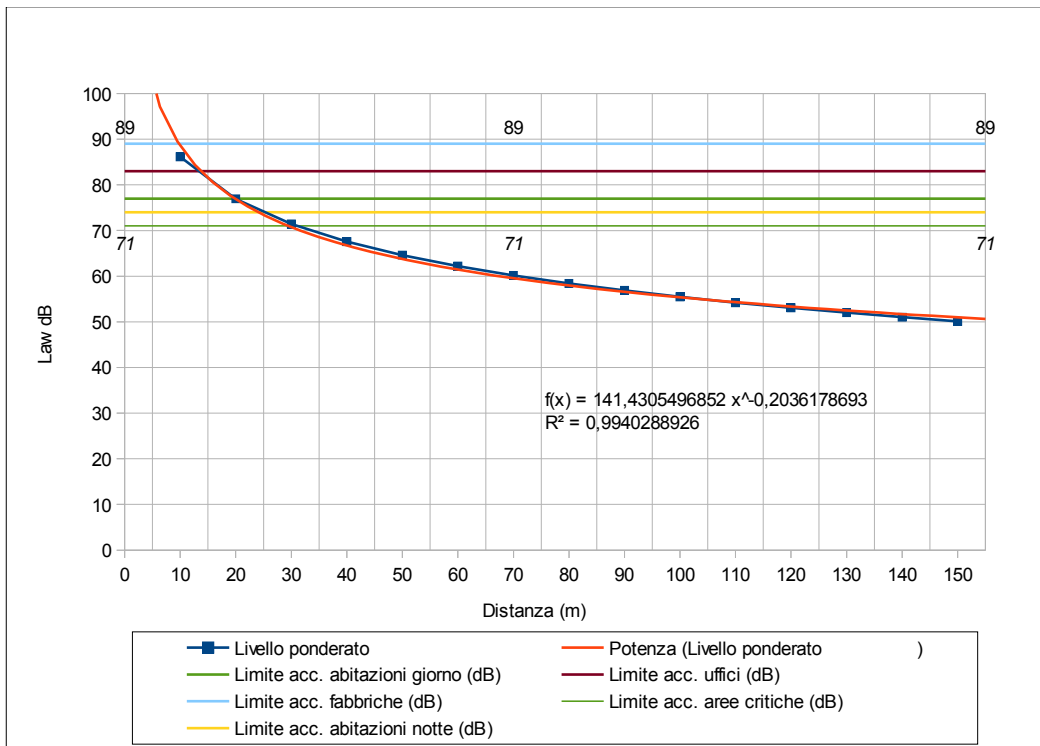
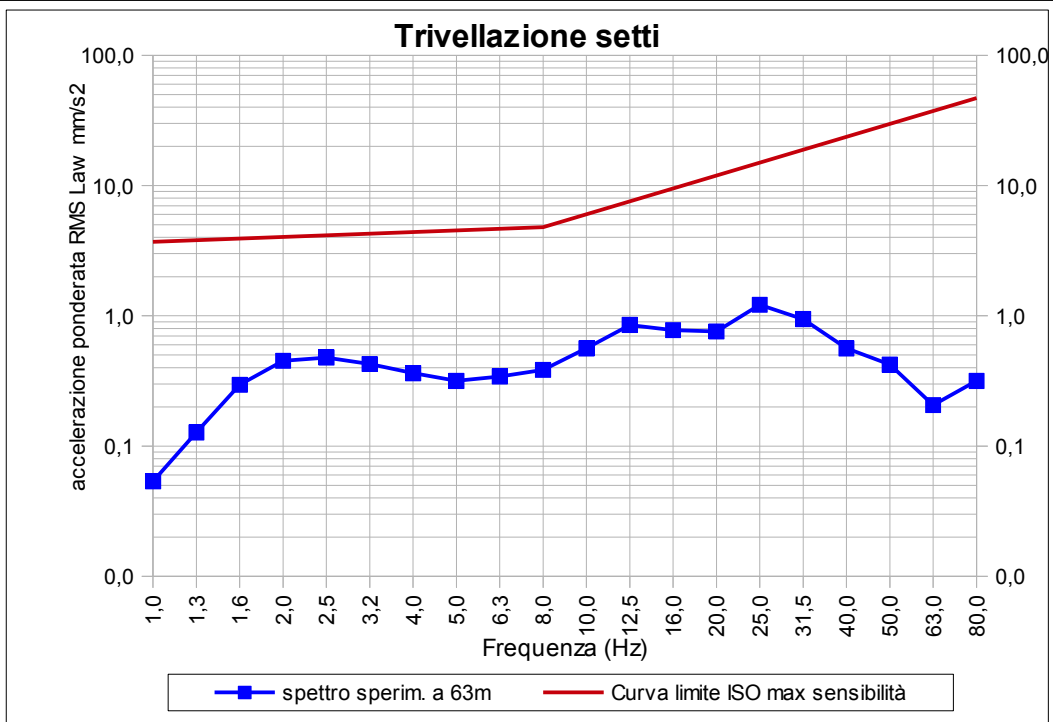




Ruspa cingolata grande: attenuazione vibrazioni con la distanza



Ruspa cingolata piccola: attenuazione vibrazioni con la distanza



Trivellazione setti: attenuazione vibrazioni con la distanza