

# S.G.C. E78 GROSSETO-FANO

Tratto Siena Bettolle (A1)

Adeguamento a 4 corsie del tratto Siena-Ruffolo (Lotto 0)

## PROGETTO DEFINITIVO

COD. FI-81

R.T.I. di PROGETTAZIONE: Mandataria Mandante



**PROGETTISTI:**

Ing. Riccardo Formichi – Pro Iter srl (Integratore prestazioni specialistiche)  
Ordine Ing. di Milano n. 18045

Ing. Alberto Rinaldi – Erre.via. srl  
Ordine Ing. di Milano n. 16951

**IL GEOLOGO**

Dott. Geol. Massimo Mezzanica – Pro Iter srl  
Albo Geol. Lombardia n. A762

**COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE**

Ing. Enrico Moretti – Erre.via. srl  
Ordine Ing. di Milano n. 16237

**VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO**

Ing. Raffaele Franco Carso

PROTOCOLLO

DATA



## 07 - Sezione Ambientale

### 07.04 - Studio di Impatto Ambientale

Scenario di base e analisi della compatibilità

Vibrazioni - Studio vibrazionale - Relazione

CODICE PROGETTO			NOME FILE	REVISIONE	SCALA
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.	T00IA47AMBRE01B.pdf		
DPFI0081	D	20	CODICE ELAB. T00IA47AMBRE01	B	-
D					
C					
B	Revisione per istruttoria ANAS		MAGGIO 2021	GAMBARANA	SECHI RINALDI
A	Emissione		OTTOBRE 2020	GAMBARANA	SECHI RINALDI
REV.	DESCRIZIONE		DATA	REDATTO	VERIFICATO APPROVATO

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSE</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO NORMATIVO</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Grandezze di riferimento</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Valori limite di riferimento</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI ESERCIZIO</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI CANTIERE</b> .....	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodologia di valutazione dei livelli vibrazionali indotti dalla fase di cantiere</b> .....	<b>14</b>
<b>4.2</b>	<b>Modello di calcolo</b> .....	<b>17</b>
<b>4.3</b>	<b>Individuazione dei ricettori</b> .....	<b>18</b>
<b>4.4</b>	<b>Individuazione degli scenari di cantiere</b> .....	<b>19</b>
<b>4.5</b>	<b>Definizione del tipo di sorgente</b> .....	<b>20</b>
<b>4.6</b>	<b>Stima dei futuri livelli vibrazionali</b> .....	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>MISURE DI MITIGAZIONE</b> .....	<b>32</b>
<b>5.1</b>	<b>Mitigazioni in fase di esercizio</b> .....	<b>32</b>
<b>5.2</b>	<b>Mitigazioni in fase di cantiere</b> .....	<b>33</b>

## INDICE FIGURE

Figura 1 - Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata, in piedi o seduta .....	5
Figura 2 - Decorso temporale Asse Z – A7 .....	8
Figura 3 - Transito energeticamente significativo – A7 .....	9
Figura 4 - Decorso temporale Asse Z – A21 .....	10
Figura 5 - Transito energeticamente significativo – A21 .....	11
Figura 6 - Decorso temporale Asse Z – A4 .....	12
Figura 7 - Transito energeticamente significativo – A4 .....	13
Figura 8 - Relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni .....	14
Figura 9 - Matrice dei livelli ponderati di accelerazione complessiva per singola frequenza e distanza .....	15
Figura 10 - Curva di ponderazione asse generico .....	15
Figura 11 - Propagazione dello spettro di vibrazione .....	16
Figura 12 - Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni a diverse distanze.....	16
Figura 13 - Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra) .....	17
Figura 14 - Localizzazione ricettori.....	18
Figura 15 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 1 .....	22
Figura 16 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 1 .....	22
Figura 17 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 2 .....	23
Figura 18 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 2 .....	23
Figura 19 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 3 .....	24
Figura 20 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 3 .....	24
Figura 21 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 4 .....	25
Figura 22 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 4 .....	25
Figura 23 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 5 .....	26
Figura 24 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 5 .....	26
Figura 25 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente .....	32

## INDICE TABELLE

Tabella 1 - Valori e livelli limite per la valutazione del disturbo delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse z e gli assi x e y e scala gerarchica di sensibilità decrescente assegnata agli edifici in base alla destinazione d'uso (UNI 9614).....	6
Tabella 2 - Tracciati autostradali rilevati e localizzazione punto di misura.....	7
Tabella 3 - Definizione dell'esponente n in base al tipo di sorgente e onda .....	17
Tabella 4 - Definizione degli scenari di cantiere esaminati: elenco dei macchinari utilizzati in funzione delle attività previste .....	19
Tabella 5 - Sorgenti di vibrazioni individuate negli scenari di riferimento (spettri di accelerazione in $\text{mm/s}^2$ )	20
Tabella 6 - Distanze entro cui è presente disturbo vibratorio, per le diverse ipotesi di lavorazioni considerate .....	27

## 1 PREMESSE

Nel presente studio è stata condotta la valutazione dei livelli vibrazionali riconducibili alla progettazione definitiva dell'intervento di adeguamento da due a quattro corsie del tronco della statale SS 223 "di Paganico" nel tratto compreso tra lo svincolo con la Siena-Firenze (km 63.561 del tratto Grosseto-Siena) e lo svincolo di Ruffolo (km 2.800 del tratto Siena-Bettolle) comprensivo degli svincoli di inizio e fine intervento; si darà conto sia delle valutazioni in fase di esercizio sia di quelle relative alla fase di realizzazione dell'opera.

Si precisa che la relazione è conforme al documento *Specifiche tecniche per la predisposizione e la trasmissione della documentazione in formato digitale per le procedure di VAS e VIA ai sensi del d.lgs. 152/2006 e s.m.i.* ed in coerenza con le *Linee guida per la Valutazione di Impatto Ambientale SNPA 28/2020*.

Lo studio è articolato come segue:

- inquadramento dal punto di vista normativo ed individuazione dei limiti di normativa per la verifica dei livelli di vibrazione, con particolare riguardo agli effetti sulle persone (in termini di disturbo alle attività condotte);
- valutazione del clima vibrazionale in fase di esercizio;
- valutazione del clima vibrazionale in fase di cantiere:
  - ✓ introduzione del tema vibratorio con descrizione della procedura seguita per il calcolo;
  - ✓ individuazione dei ricettori;
  - ✓ definizione degli scenari di cantiere potenzialmente più impattanti in termini di numero e tipologia di macchinari in azione, riferiti a lavorazioni standard;
  - ✓ valutazione della propagazione delle vibrazioni in campo libero dalla sorgente al piede dei ricettori mediante l'impiego di una relazione empirica di attenuazione del segnale vibratorio, nel percorso dalla sorgente al ricettore, con successiva composizione dei livelli vibratorii di scenario;
  - ✓ conclusioni dello studio con indicazione delle eventuali criticità rilevate e relative mitigazioni/gestione degli impatti.

## 2 INQUADRAMENTO NORMATIVO

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece diverse norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo e del danno in edifici interessati da fenomeni vibrazionali. A livello giurisprudenziale, si è infatti affermata la prassi di valutare la "normale tollerabilità" dei fenomeni vibratorii facendo ricorso alle raccomandazioni contenute nelle principali seguenti disposizioni tecniche in materia:

- UNI 9614 Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo (ultimo aggiornamento 2017);
- UNI 9916:2014 Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici (ultimo aggiornamento 2014);
- UNI ISO 2631-1 Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 1: Requisiti generali (ultimo aggiornamento 2014);
- UNI ISO 2631-2 Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 2: Vibrazioni negli edifici (ultimo aggiornamento 2018).

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, il principale riferimento è costituito dalla norma ISO 2631, che specifica un metodo per la misura e la valutazione, compresa l'individuazione della direzione e punti di misura, dell'esposizione umana alle vibrazioni al corpo intero all'interno degli edifici per quanto riguarda il comfort ed il disturbo degli occupanti; inoltre, essa definisce la ponderazione in frequenza applicabile nell'intervallo di frequenza fra 1 Hz e 80 Hz, nella quale la postura degli occupanti non necessita di essere definita. A tale norma fa riferimento la norma UNI 9614.

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni sono invece trattati dalla UNI 9916, norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866<sup>1</sup> ed in cui vengono richiamate le norme DIN 4150<sup>2</sup>. La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misurazione, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii per permettere la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica.

In via generale, si noti che i livelli massimi di vibrazione imposti per la limitazione del disturbo sulla persona sono generalmente più restrittivi di quelli relativi al danneggiamento degli edifici (più elevati di quasi 30 dB). Si può pertanto assumere che, nel caso la vibrazione fosse tale da non generare superamenti dei limiti fissati per il disturbo sugli individui, si possono ragionevolmente escludere effetti di danneggiamento sugli edifici.

## 2.1 Grandezze di riferimento

La caratterizzazione del disturbo vibrazionale è effettuata in termini di valore medio efficace (RMS - *Root Mean Square*) della velocità (in mm/s) per valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici e dell'accelerazione (in mm/s<sup>2</sup>) per valutare la percezione umana. È tuttavia agevole convertire i valori di velocità  $v$  nei corrispondenti valori di accelerazione  $a$ , nota la frequenza  $f$ , 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:

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

in cui compaiono i valori di riferimento  $a_0 = 0.001 \text{ mm/s}^2$  e  $v_0 = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$ .

La sensibilità umana è variabile con la frequenza e dipende dall'asse cartesiano considerato rispetto al riferimento relativo al corpo umano. Le curve di sensibilità umana sono codificate dalla norma tecnica UNI 9614, rispetto ai sistemi di riferimento per persone sdraiate, sedute o in piedi.

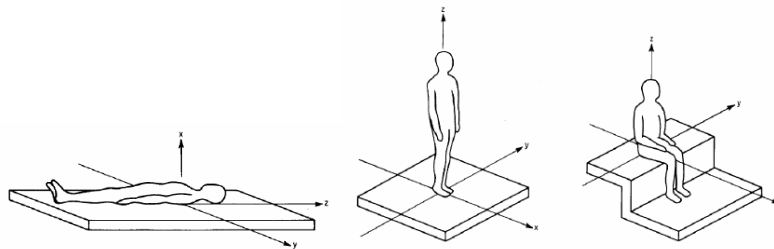


Figura 1 - Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata, in piedi o seduta

La norma UNI9614 prevede di valutare il livello complessivo di accelerazione ponderata nell'intervallo da 1 ad 80 Hz. Gli spettri di vibrazione, nel campo di frequenze da 1 a 80 Hz, sono rappresentati per terzi di ottava.

<b>Frequenza [Hz]</b>	1	1,3	1,6	2	2,5	3,2	4	5	6,3	8	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80
-----------------------	---	-----	-----	---	-----	-----	---	---	-----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

<sup>1</sup> ISO 4866 Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures.

<sup>2</sup> DIN 4150-3 Vibrations in buildings - Part 3: Effects on structures.

## 2.2 Valori limite di riferimento

La norma 9614 definisce, in funzione della destinazione d'uso degli edifici, dei valori limite per evitare il disturbo vibratorio in relazione all'esposizione umana.

I livelli di vibrazione dentro un edificio dipendono dall'energia vibratoria che raggiunge le fondamenta, dall'accoppiamento tra le fondamenta ed il terreno e dalla propagazione della vibrazione attraverso la struttura dell'edificio. Come regola generale si può affermare che più è massivo l'edificio, minore è la sua risposta all'energia vibratoria incidente sul terreno. Le sorgenti di vibrazioni provocano effetti che si propagano attraverso il terreno e diminuiscono di intensità con la distanza. Gli edifici subiscono effetti che si possono classificare in una scala da non percepibili (livelli di vibrazione bassi), a suoni a bassa frequenza e vibrazioni percepibili (livelli di vibrazione medi) fino a livelli tali da provocare danni alle strutture.

Relativamente ai limiti individuati, la soglia di percezione delle vibrazioni si pone convenzionalmente (UNI 9614) pari a:  $a_{soglia,z} = 5.0 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  corrispondente a 74 dB per l'asse z e  $a_{soglia,x/y} = 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  corrispondente a 71 dB per gli assi x e y.

Di seguito, il prospetto riassuntivo dei limiti in relazione alla destinazione d'uso degli edifici cui è assegnata la rispettiva classe di sensibilità alle vibrazioni, a prescindere da considerazioni inerenti le caratteristiche dei singoli fabbricati quali, ad esempio, lo stato di conservazione e la tipologia costruttiva dell'immobile.

Destinazione d'uso edifici	Classe di sensibilità alle vibrazioni	Asse z		Assi x e y	
		$a \text{ [m/s}^2\text{]}$	$L \text{ [dB]}$	$a \text{ [m/s}^2\text{]}$	$L \text{ [dB]}$
Aree critiche*	Alta	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74	$3.6 \cdot 10^{-3}$	71
Abitazioni (notte)	Media	$7.0 \cdot 10^{-3}$	77	$5.0 \cdot 10^{-3}$	74
Abitazioni (giorno)	Media	$10.0 \cdot 10^{-3}$	80	$7.2 \cdot 10^{-3}$	77
Uffici	Bassa	$20.0 \cdot 10^{-3}$	86	$14.4 \cdot 10^{-3}$	83
Fabbriche	Bassa	$40.0 \cdot 10^{-3}$	92	$28.8 \cdot 10^{-3}$	89

\* Le aree critiche corrispondono alle aree archeologiche di importanza storico-monumentale, alle infrastrutture sanitarie, ai fabbricati scolastici di qualsiasi genere, nonché alle attività industriali che impiegano macchinari di precisione.

Tabella 1 - Valori e livelli limite per la valutazione del disturbo delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza validi per l'asse z e gli assi x e y e scala gerarchica di sensibilità decrescente assegnata agli edifici in base alla destinazione d'uso (UNI 9614).

### 3 CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI ESERCIZIO

È noto che il traffico autostradale non rappresenta, a meno di situazioni locali "singolari", una sorgente vibrazionale significativa in termini di livello vibrazionale.

Il rotolamento degli pneumatici su un manto stradale rugoso o liscio non genera energia sufficiente a far emergere problemi di rispetto normativo in corrispondenza dei ricettori. Queste problematiche possono viceversa manifestarsi localmente, anche in modo intenso, su tracciati stradali esistenti in presenza di punti singolari caratterizzati da discontinuità nella pavimentazione stradale (giunti di dilatazione, spalle viadotti, ecc.) o di rigidità del sottofondo stradale (intersezioni con tombini, sottovia, ecc.).

Al fine di documentare quanto detto, vengono nel seguito riportati i risultati di alcune misure di vibrazioni triassiali *real time* svolte in prossimità di diversi tracciati autostradali in presenza di pavimentazione drenante. Le misure ed i contestuali rilievi di traffico, hanno permesso di identificare il passaggio dei mezzi pesanti e di estrarre gli eventi energeticamente più significativi. Nella seguente tabella sono riportate le sorgenti autostradali indagate.

Infrastruttura	Tipologia tracciato	Localizzazione postazione
A7	Rilevato	Base rilevato / 23 m dal ciglio
A21	Raso	Raso / 65 m dal ciglio
A4	Raso	Raso / 9 m dal ciglio

Tabella 2 - Tracciati autostradali rilevati e localizzazione punto di misura

Le figure riportate nelle seguenti pagine (dalla Figura 2 alla Figura 7) sono rappresentative dei decorsi temporali per l'asse Z ed i relativi spettrogrammi dei livelli equivalenti e massimi tra 0-80 Hz, per ogni tipologia indagata. Sono anche riportati i livelli di ogni asse relativi agli eventi energeticamente più significativi.

L'analisi delle misure evidenzia che il transito caratterizzato dai massimi livelli è stato rilevato sull'Autostrada A7, con tracciato in rilevato, ed è associato ad un livello equivalente di accelerazione relativo all'asse Z pari a 61.8 dB ed un livello massimo di 67.6 dB, ben al di sotto del limite di cui alla norma UNI9614 pari a 80 dB. Valori molto minori riguardano gli assi di propagazione orizzontale X e Y. La massima energia vibrazionale è concentrata nell'intervallo di frequenza 12.5-16 Hz.

A fronte di quanto sopra descritto, per analogia con il tipo di pavimentazione che sarà impiegata (asfalto drenante fonoassorbente) e considerando altresì che il volume di traffico transiente sui tratti autostradali di cui si è detto risulta maggiore rispetto a quello previsto nello scenario progettuale in esame, si può ritenere che in fase di esercizio non vi siano criticità in ordine all'impatto vibrazionale.

Ciò presuppone che il manto stradale, nel corso della vita dell'infrastruttura, sia sempre soggetto a piani di manutenzione programmata al fine di conservarne le caratteristiche di continuità e di fonoassorbente, evitando pertanto la formazione di discontinuità, ammaloramenti, ormaie o quant'altro possa determinare la generazione di azioni dinamiche in grado di sollecitare il corpo stradale ed il terreno sottostante, con conseguente propagazione laterale delle vibrazioni. È infatti evidente il ruolo svolto dalla rugosità del fondo stradale, e pertanto dalle sue condizioni di manutenzione, nella riduzione dell'entità delle vibrazioni trasmesse nel terreno circostante: a parità di altre condizioni, la cattiva manutenzione del fondo stradale può comportare un incremento, anche di un ordine di grandezza, dell'ampiezza delle vibrazioni trasmesse ad un edificio.

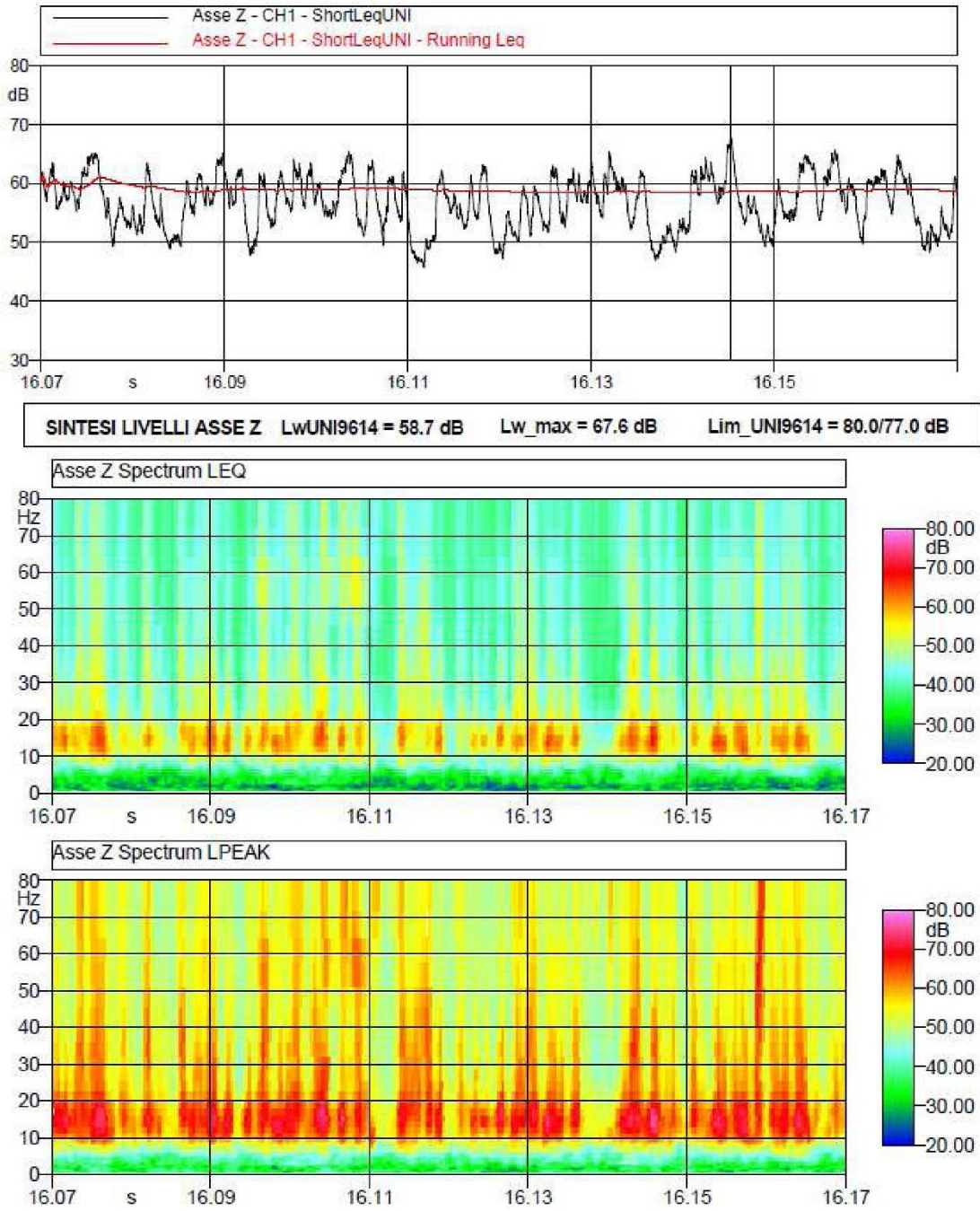


Figura 2 - Decorso temporale Asse Z – A7



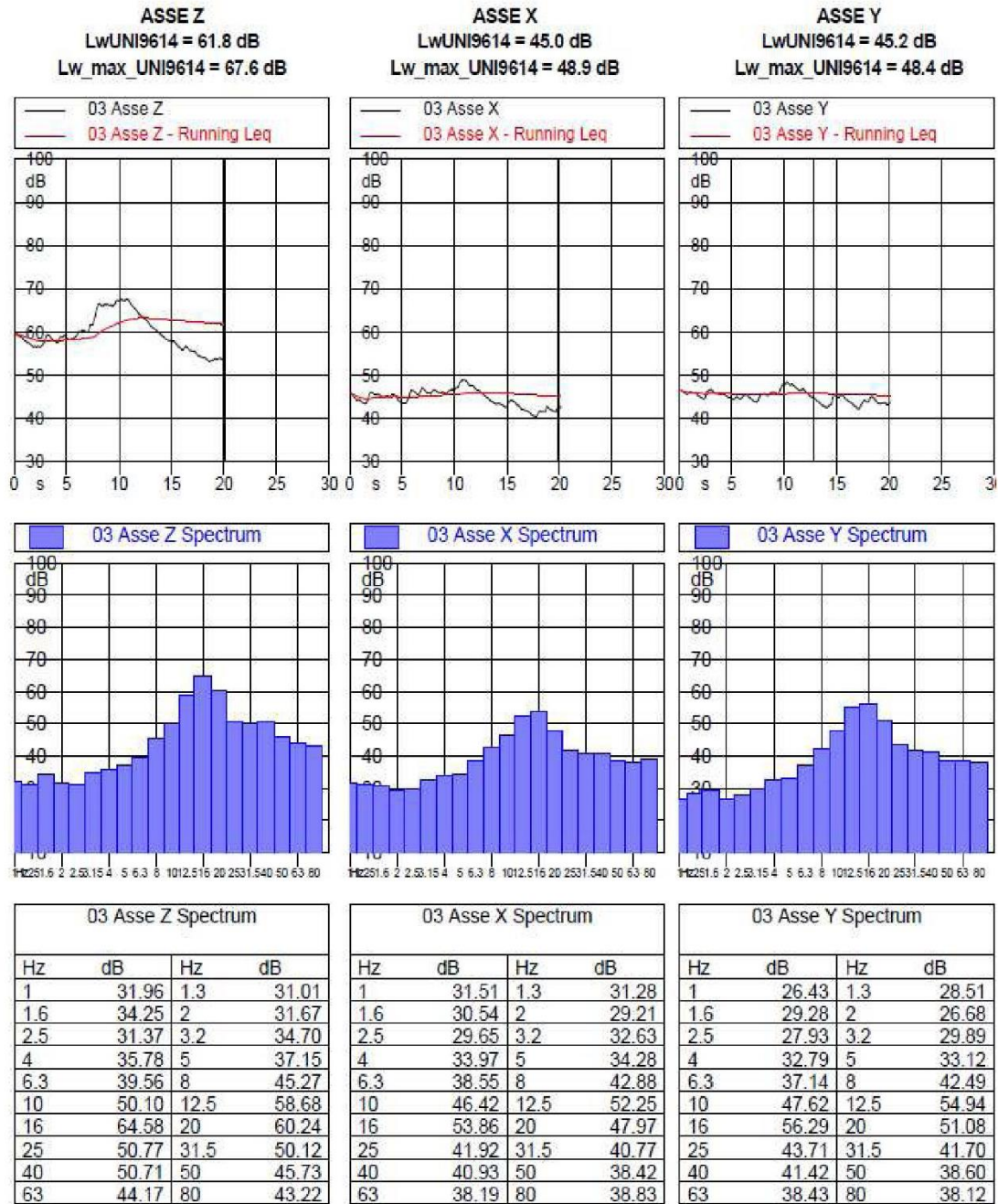


Figura 3 - Transito energeticamente significativo – A7

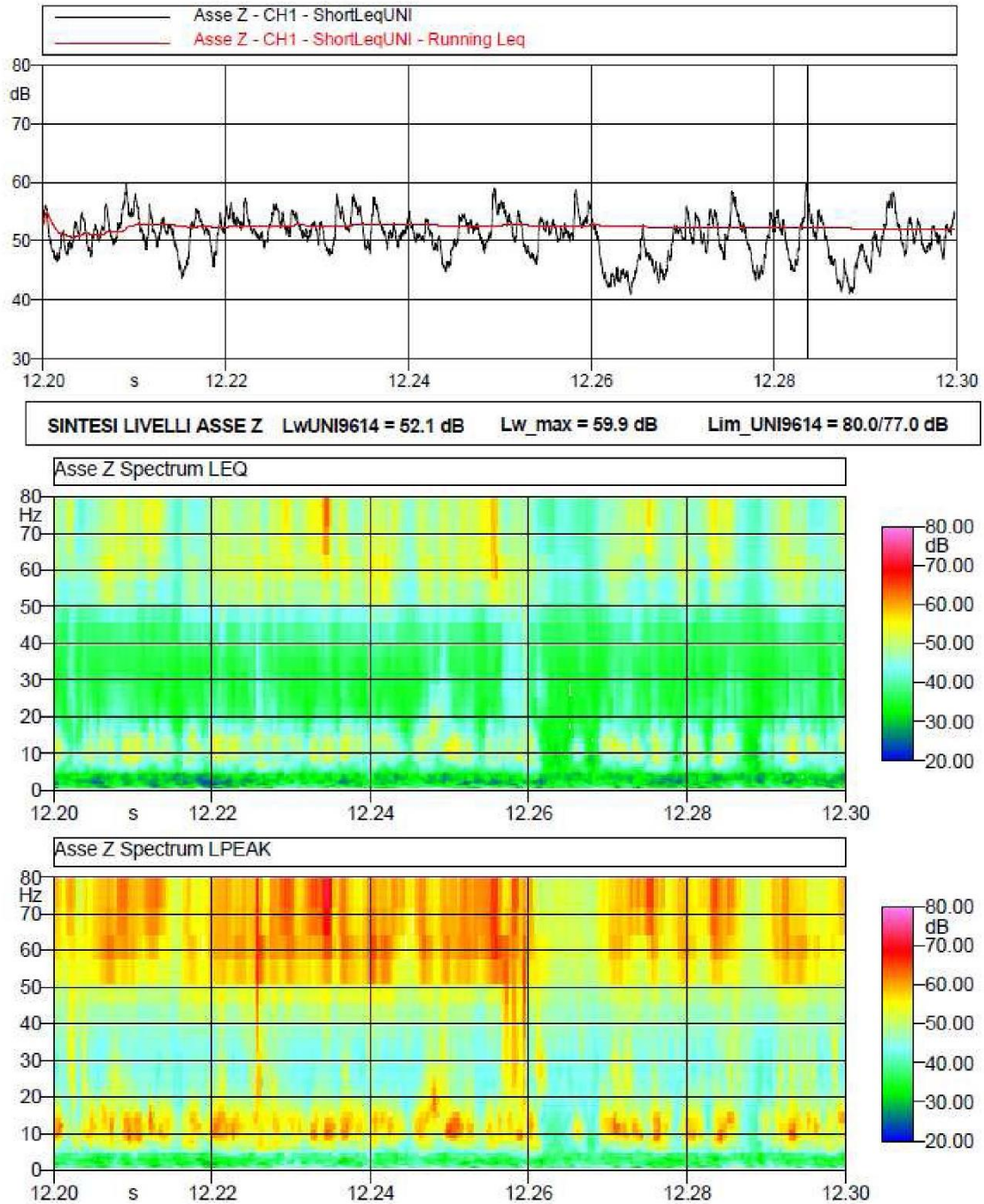


Figura 4 - Decorso temporale Asse Z – A21

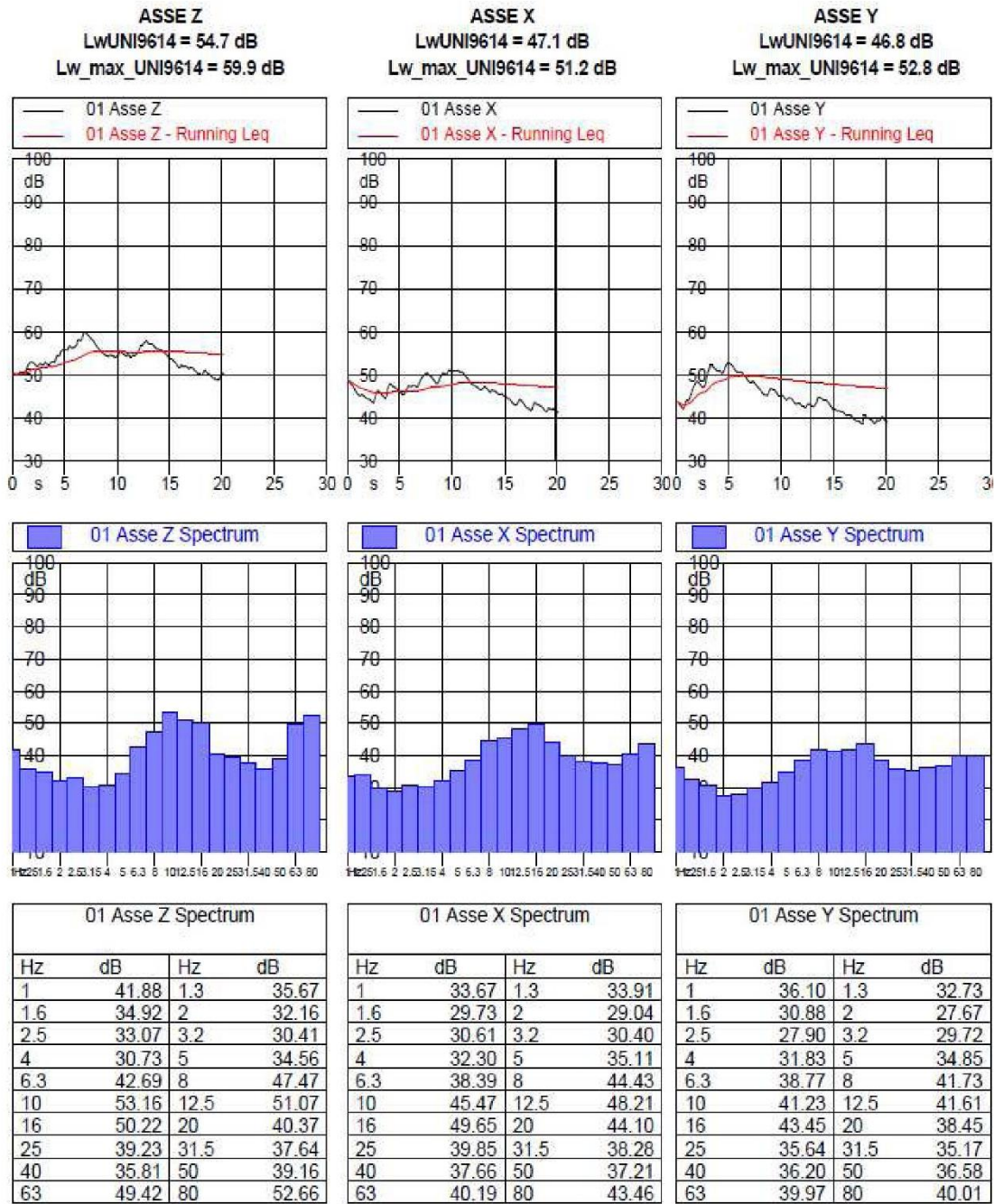


Figura 5 - Transito energeticamente significativo – A21

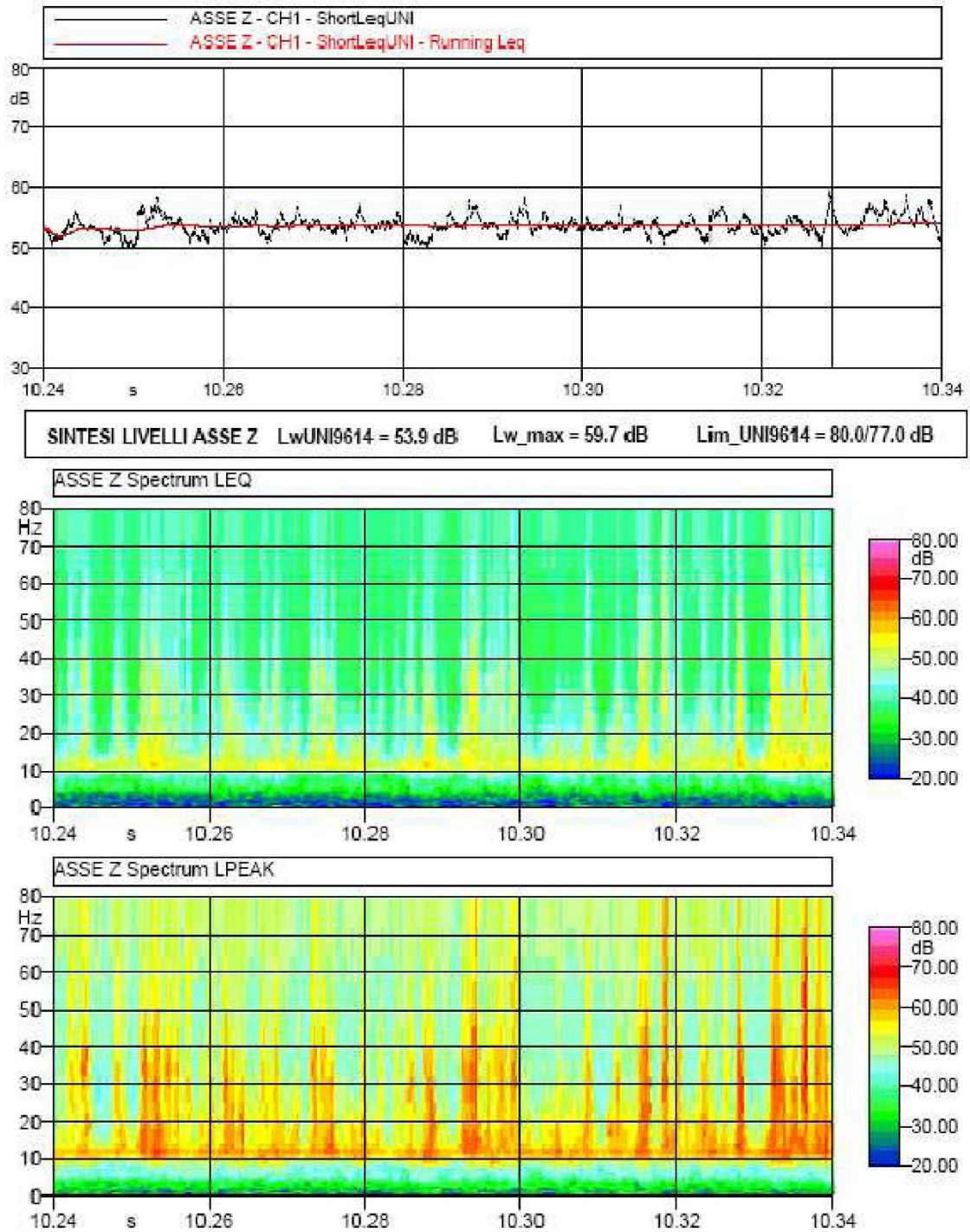


Figura 6 - Decorso temporale Asse Z – A4

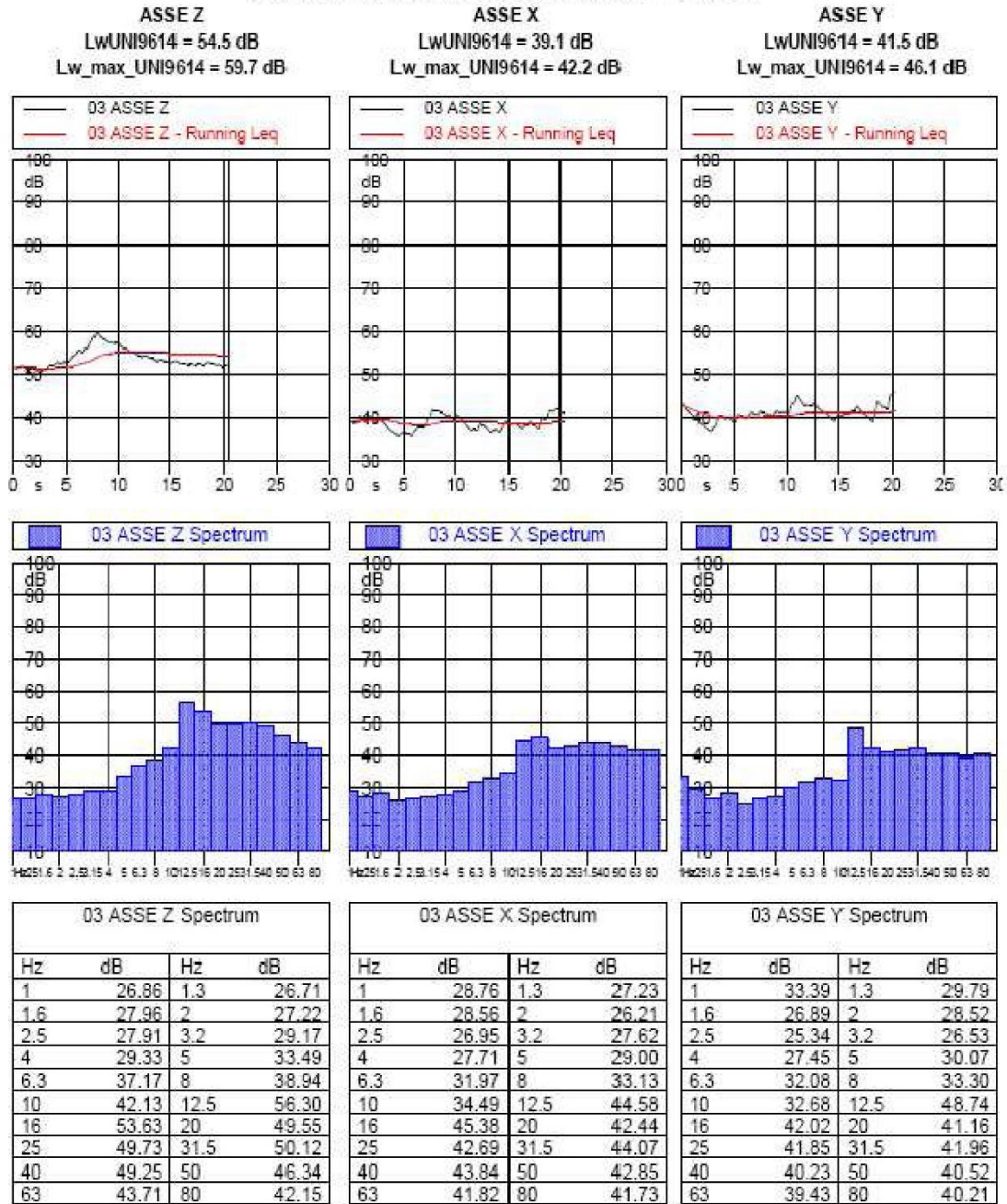


Figura 7 - Transito energeticamente significativo – A4

## 4 CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI CANTIERE

Nel presente capitolo si è provveduto ad analizzare l'eventuale impatto vibrometrico in corrispondenza delle aree di cantiere potenzialmente più critiche sia in relazione alla tipologia di lavorazione prevista sia in relazione alla presenza di ricettori in loro prossimità.

### 4.1 Metodologia di valutazione dei livelli vibrazionali indotti dalla fase di cantiere

Il fenomeno con cui un prefissato livello di vibrazioni imposto sul terreno si propaga nelle aree circostanti è correlato alla natura del terreno, alla frequenza del segnale ed alla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto. Il metodo previsionale dei livelli di vibrazione indotti ai ricettori dalle attività di cantiere, ha impiegato simulazioni numeriche; di seguito, si illustrano i principali step procedurali seguiti.

Sono state inizialmente individuate le lavorazioni ritenute più impattanti dal punto di vista vibrazionale (per caratteristiche e numero di macchine impiegate) al fine di definire gli scenari di cantiere da valutare in relazione altresì alla eventuale presenza di ricettori.

Ciascun mezzo appartenente agli scenari di cantiere individuati, è stato caratterizzato in termini di spettro di emissione tramite la rappresentazione della variazione in frequenza del livello di accelerazione generato ad una distanza di riferimento nota dalla sorgente vibratoria. Gli spettri impiegati (dati di letteratura) sono riferiti alla componente verticale (asse Z).

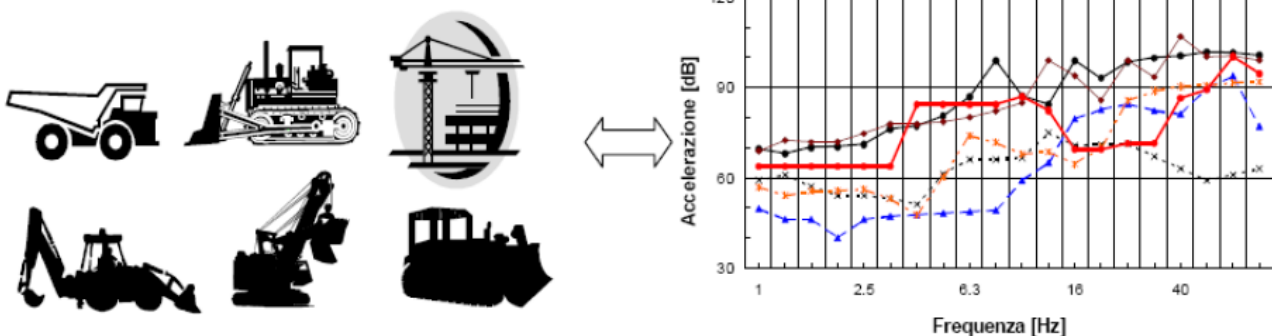


Figura 8 - Relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni

Dagli spettri delle sorgenti (mezzi di cantiere) si ottiene il livello di accelerazione non ponderato a distanze crescenti dalla sorgente mediante l'applicazione di una opportuna legge di propagazione. L'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza  $d$  è basata sulla seguente formulazione.

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

I livelli complessivi di accelerazione ponderati per singola frequenza (in dB), a distanze crescenti dalla sorgente, corrispondenti agli scenari analizzati sono dati dalla somma di tutti i contributi, frequenza per frequenza, degli spettri di vibrazione relativi alle singole macchine previste. Per ciascuna frequenza si è quindi ottenuto un valore complessivo di tutte le macchine attive sotto forma di matrice (vedi esempio seguente figura).

d (m)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
frequenza [Hz]	LIVELLO PONDERATO DI ACCELERAZIONE [dB]																				
1	68,13	61,67	57,70	54,76	52,37	50,35	48,56	46,96	45,49	44,13	42,86	41,66	40,52	39,43	38,39	37,38	36,41	35,47	34,56	33,67	32,80
1,25	72,00	65,42	61,34	58,29	55,80	53,66	51,76	50,05	48,47	47,00	45,61	44,30	43,05	41,85	40,70	39,58	38,50	37,45	36,42	35,42	34,44
1,6	70,02	63,29	59,06	55,85	53,20	50,90	48,85	46,98	45,25	43,62	42,08	40,62	39,21	37,85	36,54	35,27	34,03	32,83	31,65	30,49	29,36
2	69,00	62,10	57,68	54,30	51,47	49,00	46,77	44,72	42,81	41,01	39,29	37,64	36,06	34,53	33,04	31,59	30,17	28,79	27,43	26,10	24,78
2,5	71,53	64,40	59,76	56,15	53,10	50,41	47,96	45,69	43,55	41,53	39,59	37,72	35,92	34,16	32,45	30,78	29,14	27,53	25,95	24,40	22,86
3,15	78,00	70,58	65,65	61,76	58,42	55,43	52,69	50,14	47,71	45,40	43,17	41,01	38,92	36,87	34,88	32,92	30,99	29,09	27,22	25,38	23,55
4	83,00	75,20	69,91	65,63	61,91	58,55	55,43	52,50	49,70	47,00	44,40	41,86	39,39	36,97	34,59	32,26	29,95	27,68	25,43	23,21	21,00
5	85,00	76,76	71,01	66,29	62,13	58,33	54,76	51,38	48,14	45,00	41,95	38,97	36,05	33,19	30,37	27,58	24,84	22,12	19,43	16,76	14,11
6,3	88,00	79,18	72,86	67,56	62,82	58,44	54,30	50,34	46,52	42,80	39,17	35,62	32,12	28,68	25,28	21,92	18,59	15,30	12,03	8,78	5,56
8	95,00	85,42	78,35	72,29	66,80	61,66	56,77	52,05	47,47	43,00	38,62	34,31	30,06	25,86	21,70	17,59	13,50	9,45	5,43	1,43	-2,55
10	88,01	77,55	69,58	62,84	56,26	50,23	44,45	38,84	33,38	28,02	22,74	17,54	12,40	7,32	2,27	-2,73	-7,70	-12,64	-17,56	-22,45	-27,31
12,5	85,10	73,52	64,44	56,39	48,90	41,76	34,86	28,15	21,57	15,10	8,72	2,40	-3,85	-10,05	-16,20	-22,32	-28,40	-34,45	-40,47	-46,48	-52,45
16	90,00	76,87	66,24	56,83	47,58	38,88	30,43	22,16	14,03	6,00	-1,94	-9,80	-17,61	-25,36	-33,07	-40,74	-48,38	-55,99	-63,57	-71,13	-78,66
20	95,46	80,55	68,14	56,76	45,93	35,46	25,23	15,18	5,27	-4,53	-14,25	-23,89	-33,48	-43,01	-52,50	-61,95	-71,36	-80,75	-90,10	-99,44	-108,75
25	98,37	81,24	66,61	53,00	39,95	27,26	14,81	2,54	-9,60	-21,62	-33,56	-45,43	-57,23	-68,99	-80,70	-92,37	-104,01	-115,61	-127,19	-138,75	-150,28
31,5	100,00	79,98	62,46	45,96	30,02	14,44	-0,90	-16,06	-31,08	-45,99	-60,82	-75,58	-90,27	-104,91	-119,51	-134,07	-148,60	-163,09	-177,56	-192,01	-206,43
40	101,10	77,30	56,00	35,73	16,01	-3,35	-22,46	-41,40	-60,20	-78,89	-97,50	-116,03	-134,50	-152,92	-171,30	-189,64	-207,94	-226,21	-244,46	-262,68	-280,88
50	99,00	70,76	45,02	20,30	-3,86	-27,67	-51,23	-74,61	-97,85	-120,99	-144,04	-167,02	-189,93	-212,80	-235,62	-258,40	-281,15	-303,86	-326,55	-349,22	-371,87
63	98,00	63,98	32,46	1,96	-27,97	-57,56	-86,89	-116,05	-145,07	-173,99	-202,81	-231,57	-260,26	-288,90	-317,50	-346,06	-374,59	-403,08	-431,55	-459,99	-488,42
80	97,50	55,93	16,85	-21,20	-58,69	-95,83	-132,72	-169,44	-206,02	-242,48	-278,87	-315,18	-351,42	-387,62	-423,77	-459,89	-495,97	-532,02	-568,04	-604,04	-640,02
Livelli previsti - totale	107,75	90,32	81,68	75,75	70,90	66,72	63,05	59,83	57,00	54,50	52,28	50,30	48,51	46,88	45,37	43,98	42,67	41,44	40,27	39,15	38,08

Figura 9 - Matrice dei livelli ponderati di accelerazione complessiva per singola frequenza e distanza

Relativamente ad ogni scenario modellizzato, si è applicato alla matrice citata la curva di attenuazione definita per postura non nota (o asse generico) dalla UNI 9614. Si ricorda infatti che la popolazione si troverà esposta indifferentemente su uno dei tre assi, a seconda della giacitura dei soggetti, che è ovviamente non predeterminata e variabile nel corso delle 24 ore; in tali casi, la norma UNI 9614 prevede l'impiego di una curva di ponderazione per asse generico (o meglio, per asse non definibile), che viene riportata nella seguente figura.

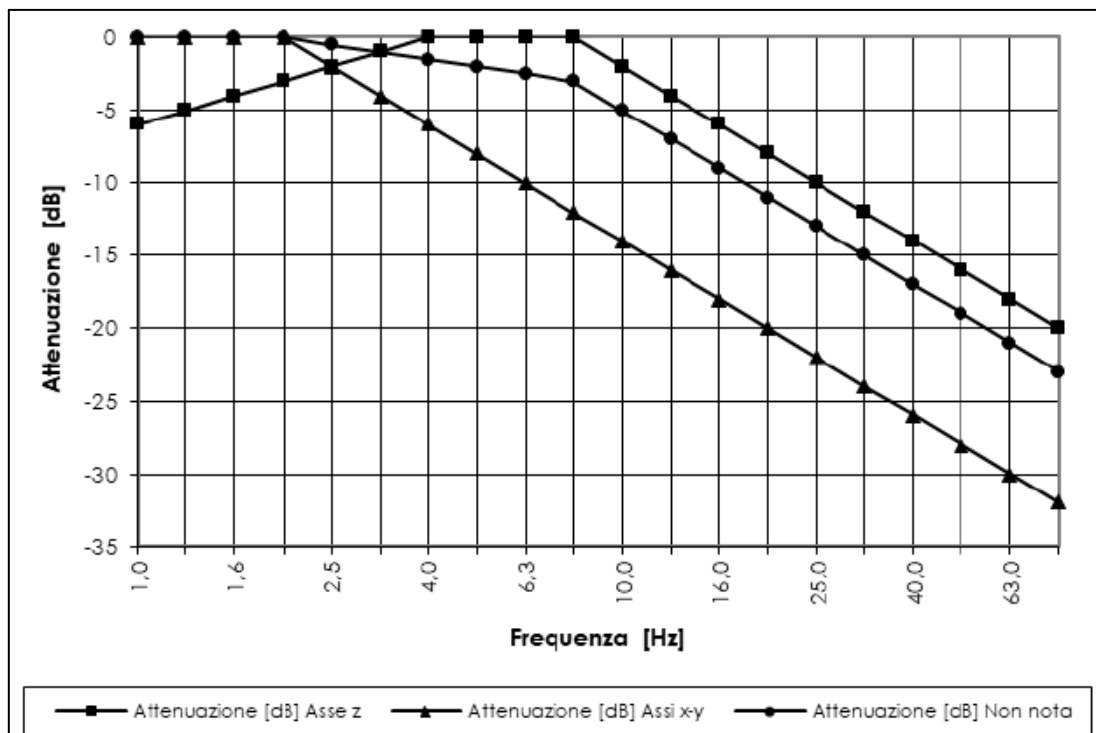


Figura 10 - Curva di ponderazione asse generico

Si è quindi ottenuta la matrice dei livelli ponderati di accelerazione complessiva per singola frequenza e distanza, con cui è stato possibile realizzare specifici grafici di propagazione dello spettro della somma delle sorgenti analizzate; di seguito se ne riporta uno a titolo esemplificativo.

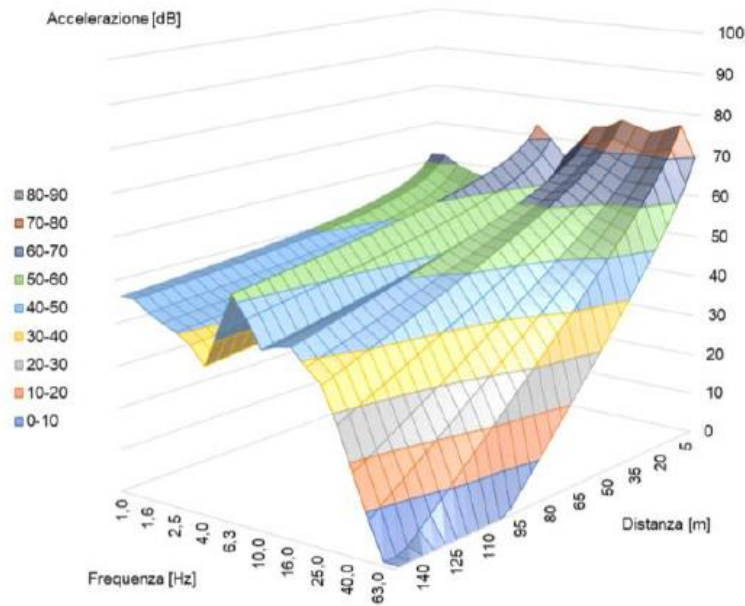


Figura 11 - Propagazione dello spettro di vibrazione

I livelli totali di accelerazione ponderata in funzione della distanza  $L_{a,w,d}$  espressi in dB sono rappresentativi dell'accelerazione complessiva ponderata su asse Z ad una determinata distanza; per ciascuno degli scenari di cantiere considerati, è stato quindi possibile predisporre il profilo di attenuazione dell'accelerazione ponderata e complessiva di tutti le sorgenti su asse Z (a titolo di esempio, si veda la figura riportata di seguito). Ai fini del confronto con i livelli di riferimento della norma UNI 9614, si stabilisce di prendere in esame il valore massimo fra i valori di accelerazione ponderata misurati lungo i tre assi; poiché nella pressoché totale generalità dei casi, questo porta a considerare l'accelerazione misurata in senso verticale, si valuteranno i livelli di accelerazione ponderata "per asse generico" lungo l'asse Z con la tabella dei valori di riferimento per gli assi X e Y (cfr. ultima colonna Tabella 1 del paragrafo 2.2).

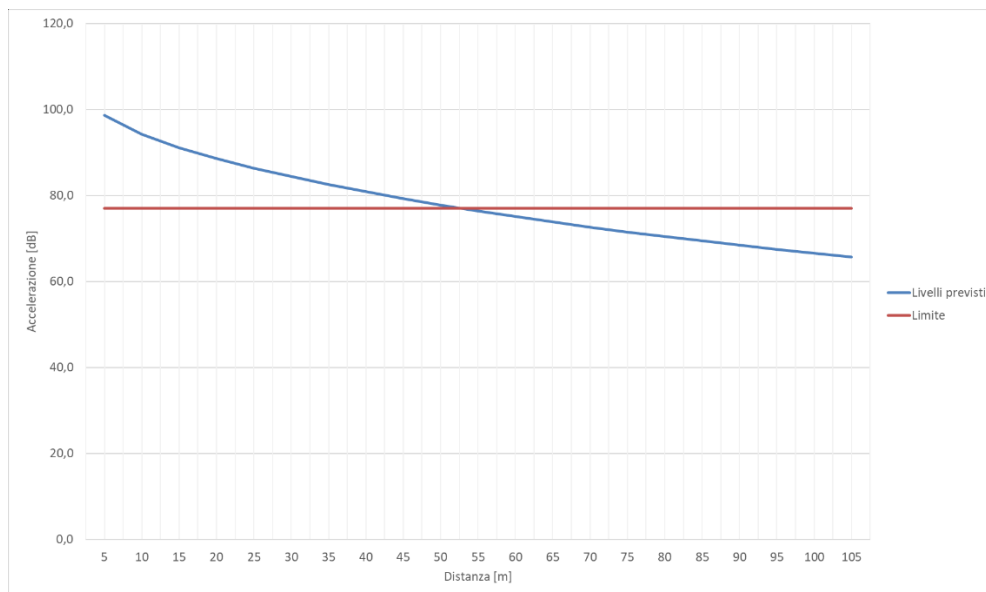


Figura 12 - Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni a diverse distanze



## 4.2 Modello di calcolo

In ordine alla trasmissione di vibrazioni nel terreno, è necessario distinguere tra tre tipi principali di onde che trasportano energia vibrazionale: onde di compressione (onda P), onde di taglio (onda S) e onde di superficie (orizzontali, onde R, e verticali, onde L), le quali hanno velocità di propagazione differente in funzione del modulo di Poisson del terreno.

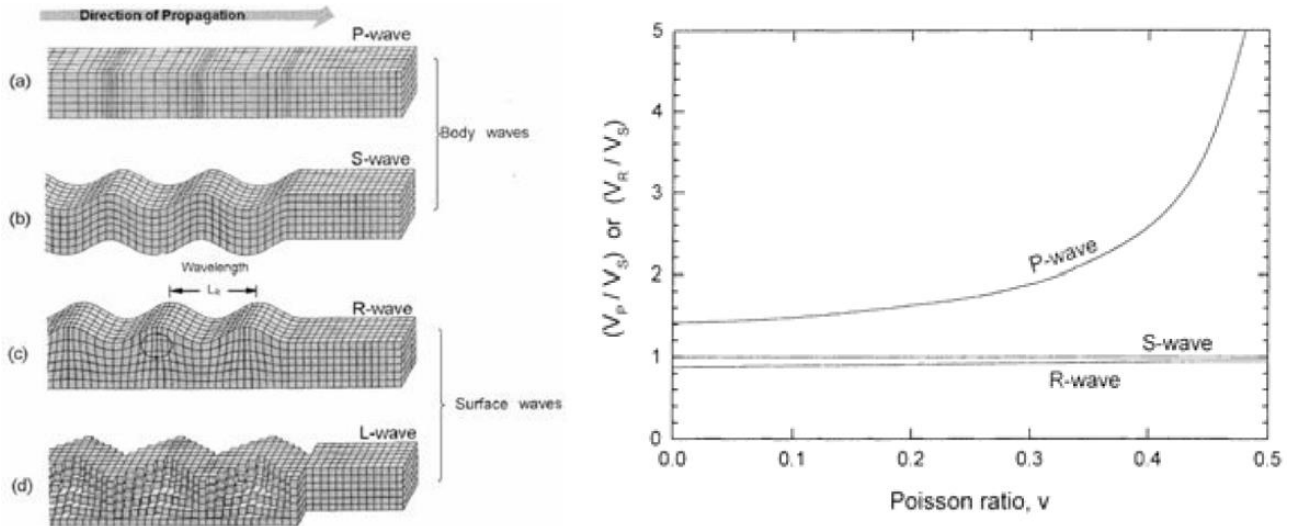


Figura 13 - Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relative delle onde P, R rispetto onde S (a destra)

L'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza  $d$ , per tutte le tre tipologie di onde considerate (P, S, R), è basata sulla seguente formulazione:

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

dove  $\eta$  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, assunta pari a 5 m. L'esponente  $n$  varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni; ai fini dell'analisi dei livelli massimi, si è proceduto prendendo a riferimento una sorgente concentrata, fissando l'esponente  $n$  a 0.5 per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie), e ad 1 per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda). Risulta pertanto evidente come la propagazione a partire da una sorgente posta in profondità sia dotata, anche nel caso di terreno omogeneo, di molta più rapida attenuazione al crescere della distanza dalla sorgente.

Tipo di sorgente	Onda	Strato	$n$
Punto	Rayleigh	Superficie	0.5
Punto sotterraneo	Volume	Profondo	1.0

Tabella 3 - Definizione dell'esponente  $n$  in base al tipo di sorgente e onda

Dalla formulazione di cui sopra si evince che nei terreni più soffici l'attenuazione intrinseca del mezzo di propagazione è maggiore di quella nelle rocce compatte; le frequenze più alte, inoltre, sono attenuate più di quelle basse. La migliore propagazione delle vibrazioni (equivalente ad attenuazione molto bassa), pertanto, si ha in presenza di terreno rigido e a basse frequenze (in tal caso infatti il termine  $f \eta / c$  assume valori bassi).

### 4.3 Individuazione dei ricettori

Per l'individuazione dei ricettori si è fatto riferimento al censimento eseguito per lo studio di impatto acustico in cui all'interno dell'ambito di analisi, fascia di pertinenza acustica B (250 m per lato dall'asse stradale, fascia sovrabbondante per gli scopi del presente studio), sono stati individuati 147 ricettori, tutti residenziali eccezion fatta per quello identificato con il n. 94 che, localizzato in Ruffolo, è sede del dipartimento di Siena dell'ARPA Toscana e del dipartimento di prevenzione dell'ASL. Non è stata rilevata la presenza di ricettori sensibili così come definiti dalla normativa in materia di rumore (scuole, ospedali, case di cura e case di riposo).

La figura seguente è rappresentativa della localizzazione dei diversi ricettori individuati nel comparto territoriale indagato; per maggiori approfondimenti circa la loro caratterizzazione ed ubicazione planimetrica si rimanda alla documentazione di cui allo studio acustico. I ricettori sono localizzati prevalentemente in corrispondenza delle aree dove il tracciato di progetto si sviluppa in galleria ed in corrispondenza dell'abitato di Ruffolo.

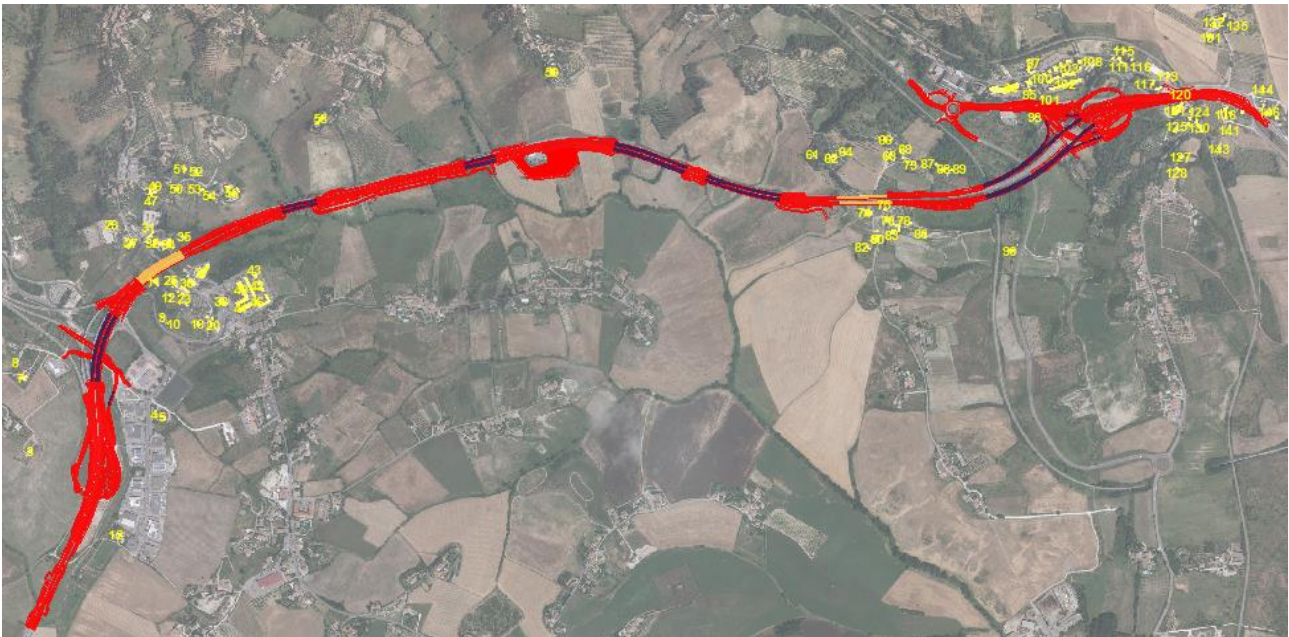


Figura 14 - Localizzazione ricettori

#### 4.4 Individuazione degli scenari di cantiere

Le sorgenti di vibrazioni per le fasi di cantiere sono costituite dai mezzi e dalle attrezzature utilizzati per l'esecuzione delle opere. La definizione degli scenari di cantiere è stata eseguita in base ad ipotesi cautelative sulle modalità di svolgimento delle lavorazioni, agendo in particolare sul numero di macchinari contemporaneamente in azione.

Di seguito, si riporta la definizione dei mezzi per ogni scenario considerato sia per i campi base ed aree tecniche sia per il cantiere in linea (fronte di cantiere). I cinque scenari individuati sono rappresentativi delle lavorazioni che potenzialmente sono in grado di generare maggiore impatto in termini di energia vibratoria prodotta, con particolare riferimento alle opere di scavo le quali, per loro natura, possono costituire la maggiore fonte di sollecitazioni meccaniche. Nelle aree di cantiere dove sono presenti gli impianti fissi, le emissioni di vibrazioni risultano usualmente più contenute rispetto a quelle presenti sul cantiere in linea poiché la natura stessa delle lavorazioni determina minori sollecitazioni meccaniche sul terreno e, di conseguenza, minore trasmissione di energia meccanica verso i potenziali ricettori. Si evidenzia che lo scenario 1, con specifico riferimento alle attività di frantumazione e vagliatura, è stato considerato a favore di sicurezza, ancorché prima di procedere con le attività di demolizione, in particolare quelle relative ai viadotti, saranno eseguiti dei tagli selettivi longitudinali e trasversali dell'impalcato al fine di ottenere elementi con pezzatura direttamente trasportabile a discarica per la successiva frantumazione, vagliatura e recupero dell'acciaio di armatura; il taglio con disco diamantato può essere applicato su qualsiasi tipo di materiale, anche sul cemento fortemente armato, e risulta essere un sistema tecnicamente valido per velocità d'esecuzione, precisione, limitazione del rumore, nonché assenza di vibrazioni.

Scenario	Descrizione attività	Mezzi attivi (n)
1	Campo base / area tecnica: deposito materiale, frantumazione, vagliatura, betonaggio	Escavatore (1) – Autocarro (2) – Impianto di betonaggio (1) – Impianto di frantumazione e vagliatura (1)
2	Realizzazione paratia di pali	Trivella pali (1) – Betoniera (1) – Escavatore (1)
3	Scavo trincea e/o realizzazione rilevato e movimentazione materiali	Escavatore (1) – Pala cingolata (1) – Rullo compattatore (1) – Autocarro (1)
4	Scavo in tradizionale galleria naturale	Martellone idraulico (1) – Pala cingolata (1) – Autocarro (1)
5	Scavi / demolizioni nei tratti all'aperto	Martellone idraulico (1) – Pala cingolata (1) – Autocarro (1)

Tabella 4 - Definizione degli scenari di cantiere esaminati: elenco dei macchinari utilizzati in funzione delle attività previste

## 4.5 Definizione del tipo di sorgente

Analizzando le principali sorgenti previste in funzione delle attività lavorative, si conviene come esse siano sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici, impianti fissi ed in mezzi adibiti al trasporto, ma se le prime hanno una distribuzione spaziale abbastanza prevedibile e delimitata, i secondi si distribuiscono lungo l'intero percorso che collega il fronte di avanzamento lavori ai luoghi di approvvigionamento o di deposito.

Le vibrazioni emesse dai mezzi di trasporto durante il tragitto sulla viabilità ordinaria (non durante le operazioni di cantiere, quali lo scarico o il ribaltamento del cassone) sono le stesse emesse dai normali veicoli stradali e non meritano quindi particolari attenzioni, in quanto il loro impatto è analogo a quello prodotto dal traffico già esistente sulla rete viaria.

Gli scenari in esame sono stati definiti avendo come prima finalità quella di fornire risultati sufficientemente cautelativi. Si sottolinea, tuttavia, come le situazioni esaminate non possano comunque rappresentare tutti i macchinari potenzialmente presenti in contemporanea all'interno dell'area di cantiere.

La valutazione dei livelli vibrazionali è stata quindi condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei macchinari di cantiere utilizzando dati bibliografici. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza di circa 5 m dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla sola componente verticale, considerata quella che fornisce il contributo maggiore.

Si precisa infine che stante l'indisponibilità di dati sperimentali per tutti i macchinari presenti nel cantiere in esame, si è proceduto utilizzando quelli di macchine in grado di trasmettere al terreno sollecitazioni di simile entità, ma di cui sia noto lo spettro; le assunzioni fatte in tal senso sono schematizzate nella tabella seguente.

Mezzi	Dati disponibili	Assimilazioni
Escavatore cingolato (tipo Fiat/Hitachi Mod. FH300 o similari)	X	
Pala cingolata	X	
Autocarro (tipo Mercedes Benz 2629 o similari)	X	
Martello idraulico (Hitachi H50 o similari)	X	
Rullo (tipo Dynapac FD25 o similari)	X	
Impianto di frantumazione e vagliatura		Escavatore cingolato
Impianto di betonaggio / Betoniera		Autocarro
Trivella pali		Martello idraulico

Di seguito, i dati di caratterizzazione delle sorgenti di vibrazioni individuate negli scenari di riferimento (spettri di accelerazione in  $\text{mm/s}^2$ ).

Frequenza [Hz]	Escavatore cingolato	Pala cingolata	Autocarro	Martello	Impianto di frantumazione e vagliatura	Impianto di betonaggio / Betoniera	Trivella	Rullo
1	0,32	0,71	0,89	2,55	0,32	0,89	2,55	2,24
1,25	0,2	0,5	1,12	3,98	0,2	1,12	3,98	3,98
1,6	0,19	0,63	0,71	3,17	0,19	0,71	3,17	3,55
2	0,12	0,67	0,5	2,82	0,12	0,5	2,82	3,76
2,5	0,2	0,6	0,47	3,77	0,2	0,47	3,77	5,62
3,15	0,26	0,45	0,45	7,94	0,26	0,45	7,94	7,94
4	0,24	0,24	0,33	14,13	0,24	0,33	14,13	7,94
5	0,25	1,12	1,26	17,78	0,25	1,26	17,78	9,44
6,3	0,28	5,62	2,11	25,12	0,28	2,11	25,12	10,59
8	0,3	3,98	2	56,23	0,3	2	56,23	12,59
10	0,98	2,51	2,04	25,16	0,98	2,04	25,16	16,79
12,5	1,88	2,99	5,75	17,98	1,88	5,75	17,98	100
16	9,89	1,58	3,76	31,62	9,89	3,76	31,62	53,09
20	13,34	3,98	3,55	59,31	13,34	3,55	59,31	19,95
25	16,79	19,95	3,55	82,91	16,79	3,55	82,91	89,13
31,5	12,59	29,85	2,24	100	12,59	2,24	100	50,12
40	12,02	35,48	1,5	113,48	12,02	1,5	113,48	251,19
50	28,84	37,58	0,89	89,13	28,84	0,89	89,13	141,25
63	51,88	39,81	1,06	79,43	51,88	1,06	79,43	125,89
80	8,41	42,17	1,33	74,99	8,41	1,33	74,99	112,2

Tabella 5 - Sorgenti di vibrazioni individuate negli scenari di riferimento (spettri di accelerazione in  $\text{mm/s}^2$ )

## 4.6 Stima dei futuri livelli vibrazionali

Ai fini dell'applicazione del modello di propagazione descritto nei paragrafi precedenti, sono state assunte le seguenti ipotesi.

- Il modello di propagazione illustrato fa riferimento ai soli fenomeni che avvengono nel terreno supposto omogeneo ed isotropo (perlomeno all'interno di ogni strato), senza tenere in considerazione la presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione che possono comportare variazioni dei livelli di accelerazione riscontrabili all'interno degli edifici stessi. I sistemi di fondazione in generale producono, in modo condizionato alla tipologia, un'attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante. Pertanto, nel presente studio è stato considerato quale spettro al ricettore (persona o edificio) quello calcolato in campo libero non tenendo conto dell'effetto indotto dalle strutture di fondazione, verticali e di piano sul livello di vibrazione all'interno degli edifici. Tale assunzione è stata presa sulla base delle due considerazioni seguenti:
  1. la mancanza di informazioni dettagliate sulle caratteristiche degli edifici, quali tipologia fondazionale, presenza di piani interrati, tipologia costruttiva (muratura, cemento armato ecc.) e dimensione della luce del solaio, che consentano di determinare le modalità di propagazione della sorgente vibratoria nell'edificio;
  2. la specificità di risposta di ogni edificio in termini di amplificazione o attenuazione del livello di vibrazione, nel campo di frequenze di interesse. Tale specificità rende difficile estendere il risultato ottenuto su di un edificio agli edifici circostanti, tranne nel caso di evidente somiglianza (tipologia di struttura verticale, numero di piani, tipologia di orizzontamento, anno di costruzione, stato di conservazione).

Nelle fasi successive di progettazione, a valle di un eventuale censimento dettagliato delle caratteristiche degli edifici circostanti l'area di cantiere, ed in presenza di particolari criticità, potrà essere eventualmente preventivata l'esecuzione di prove mirate alla caratterizzazione del comportamento strutturale su di un campione rappresentativo di edifici tenendo conto anche del comportamento fondazionale (in termini di attenuazione del segnale vibratorio). Quando gli edifici siano localizzati a notevole distanza da sorgenti vibrazionali, potranno essere usati metodi alternativi di eccitazione quali martelli battenti, vibrocompattatori, passaggi di veicoli gommati su ostacoli, ecc. azionati nelle vicinanze delle edificio sede delle misure.

- Nell'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza  $d$  (cfr. paragrafo 4.2), l'esponente  $n$  varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni; ai fini dell'analisi dei livelli massimi, si è proceduto prendendo a riferimento una sorgente concentrata, fissando l'esponente  $n$  a 0.5 per le onde di superficie (predominanti in caso di sorgente posta in superficie), e ad 1 per le onde di volume (predominanti in caso di sorgente profonda).
- Relativamente ai parametri legati alle caratteristiche geodinamiche del terreno interessato dal progetto (terreno di tipo consolidato), il fattore di perdita del terreno (fattore di smorzamento) è posto uguale a 0.04, mentre per la velocità di propagazione delle onde si è assunto il valore medio di quelli misurati nell'ambito delle prove sismiche effettuate per la progettazione, pari a 307 m/s (categoria di sottosuolo C) (cfr. documentazione geologica, geotecnica e sismica redatta per il progetto definitivo).
- Il modello semplificato di propagazione illustrato considera i soli fenomeni previsti in un terreno supposto omogeneo ed isotropo.
- Le macchine da cantiere sono assunte come sorgenti puntuali e come relativi livelli di riferimento sono stati utilizzati quelli misurati a distanza di 5 m dal centro della sorgente.
- Relativamente al limite da non superare per non indurre disturbo, si assume il valore di 77 dB per il giorno e di 74 dB per la notte (la realizzazione delle opere avverrà nel periodo diurno, ma alcune lavorazioni, come per esempio quelle riguardanti le gallerie o il varo dei viadotti, potrebbero svolgersi in caso di necessità anche di notte).

Si procede nel seguito ad analizzare la propagazione spaziale del valore complessivo ponderato dell'accelerazione per gli scenari individuati; per ciascuno di questi ultimi, si riporta sia il profilo di attenuazione dell'accelerazione ponderata sia il grafico di propagazione dello spettro della somma delle sorgenti considerate.

Per lo scenario 1, che identifica le attività di lavoro previste nei campi base e nelle aree tecniche (deposito materiale, frantumazione, vagliatura e betonaggio), il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di 15 m (il limite notturno a circa 25 m). Si ricorda che le aree tecniche saranno approntate anche in corrispondenza dei viadotti esistenti al fine di agevolare le attività di demolizione.

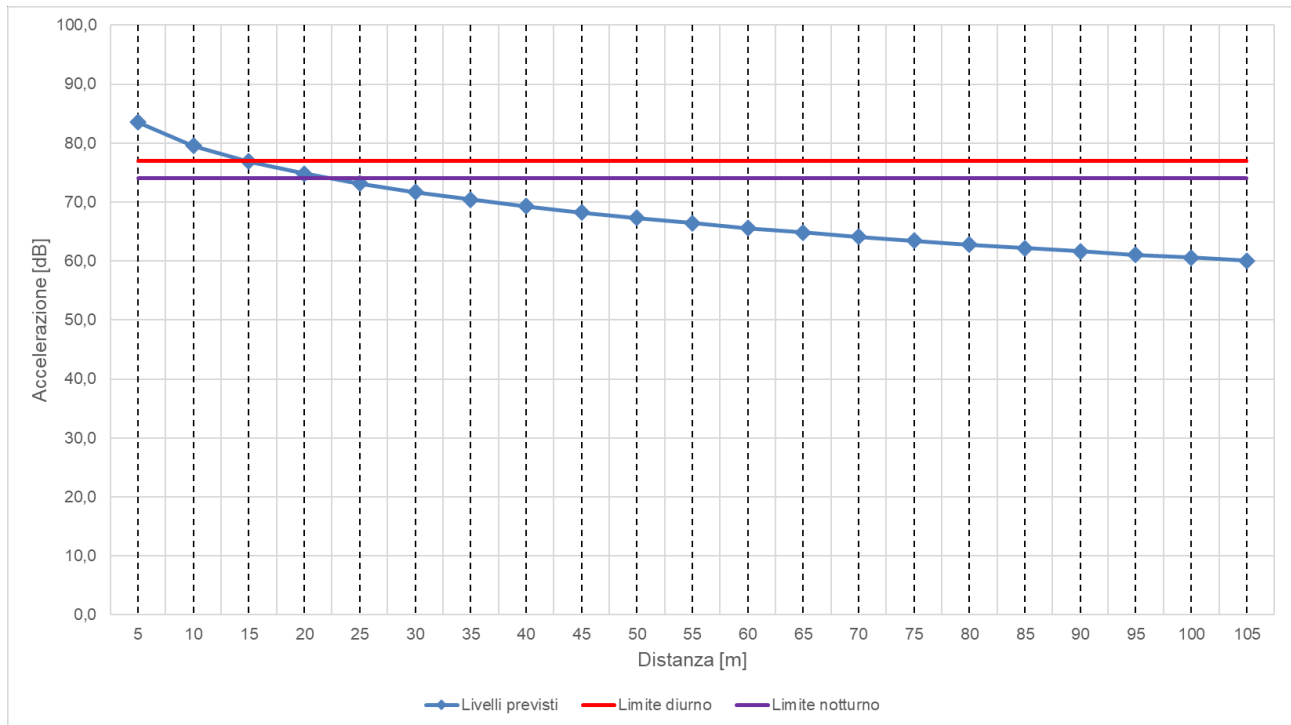


Figura 15 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 1

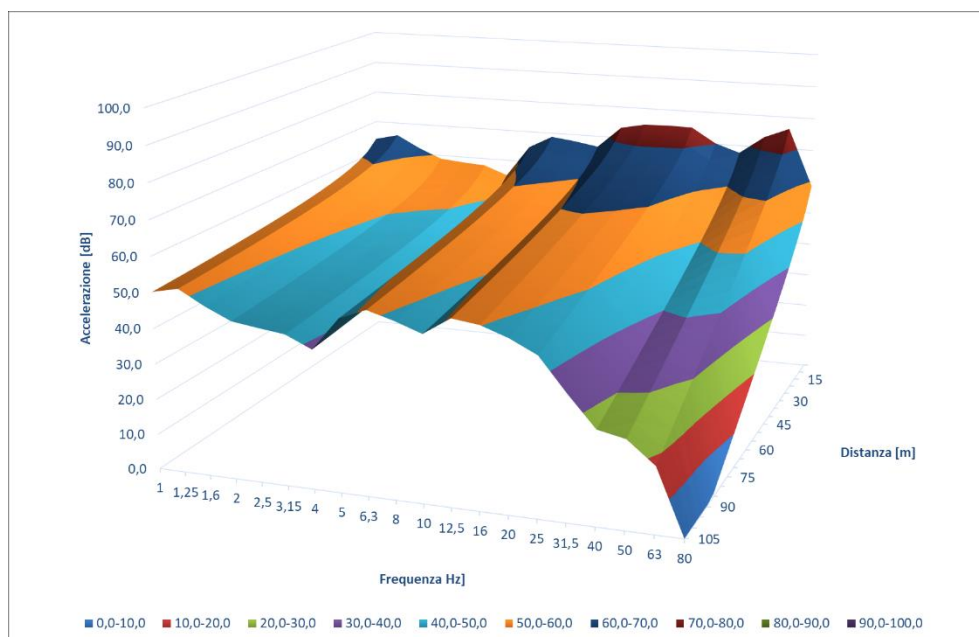


Figura 16 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 1

Per lo scenario 2, che identifica le attività riguardanti la realizzazione della paratia di pali prevista nel tratto di strada in progetto compreso fra la galleria Bucciano ed il viadotto Riluogo (progressive 3+994.27 e 4+147.04), il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di 35 m (il limite notturno a 45 m).

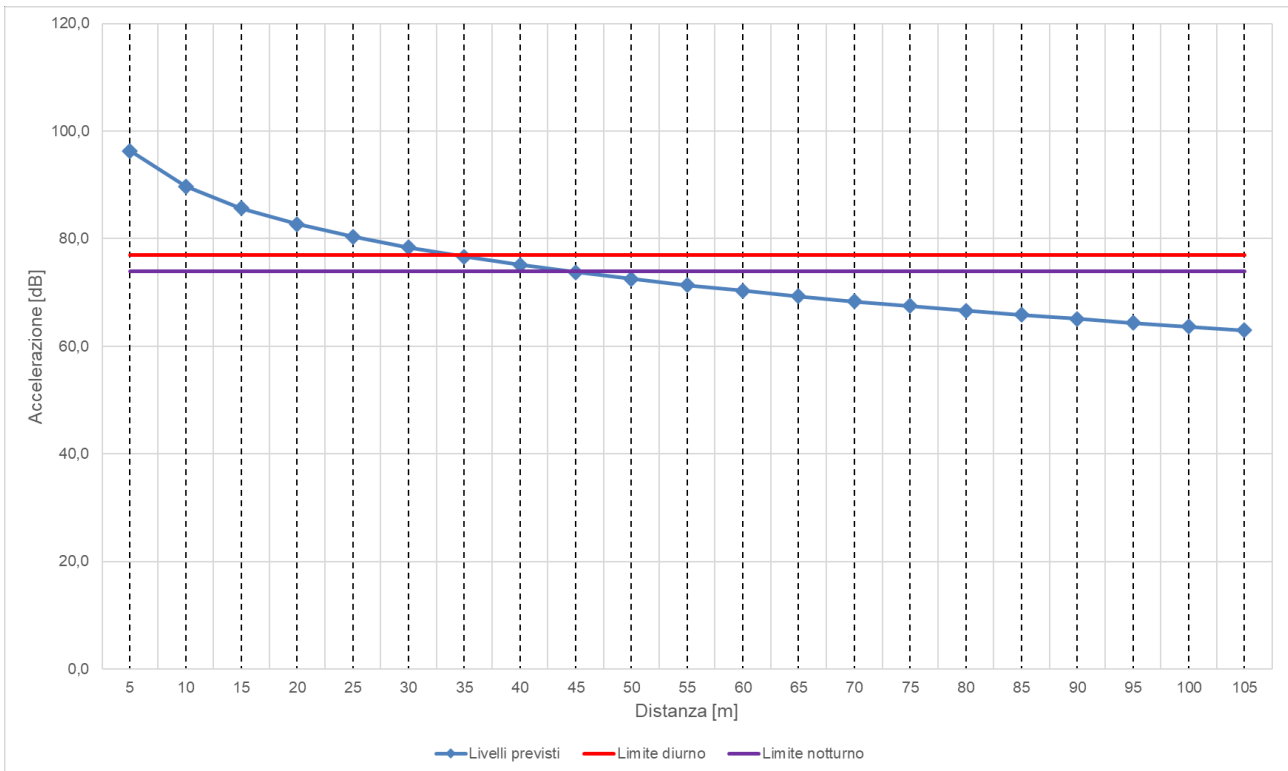


Figura 17 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 2

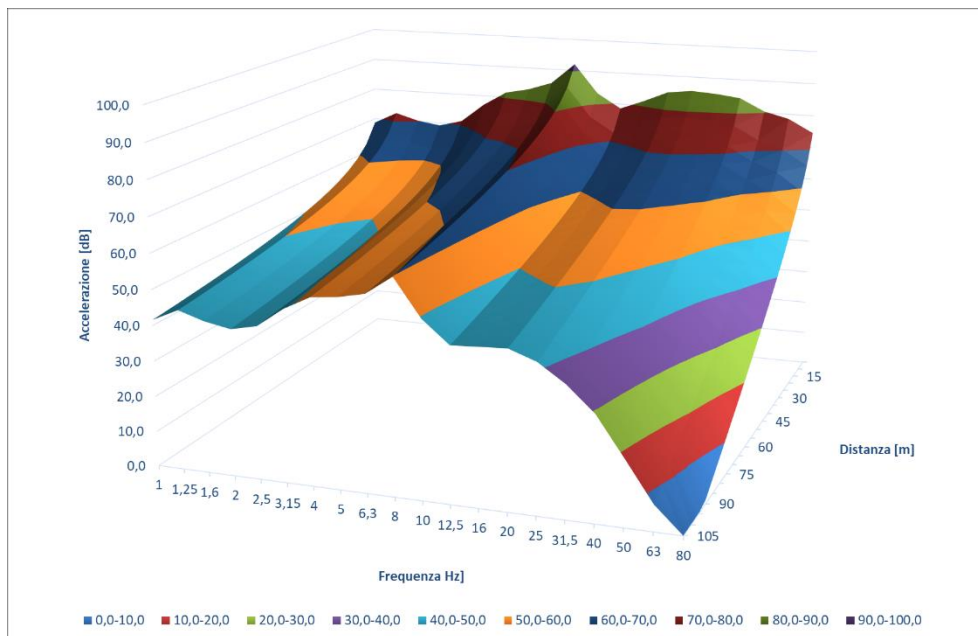


Figura 18 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 2

Per lo scenario 3, che identifica genericamente le fasi di scavo della trincea e/o realizzazione di rilevati (con rullatura), il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 65 m (il limite notturno a 80 m); sono stati in particolare esaminati i casi in cui l'edificato risulta essere molto vicino al tracciato: realizzazione rilevato tra la galleria San Lazzerò ed il viadotto Luglie (carreggiata est) e nel tratto compreso tra la galleria Bucciano ed il Viadotto Riluogo (carreggiata est).

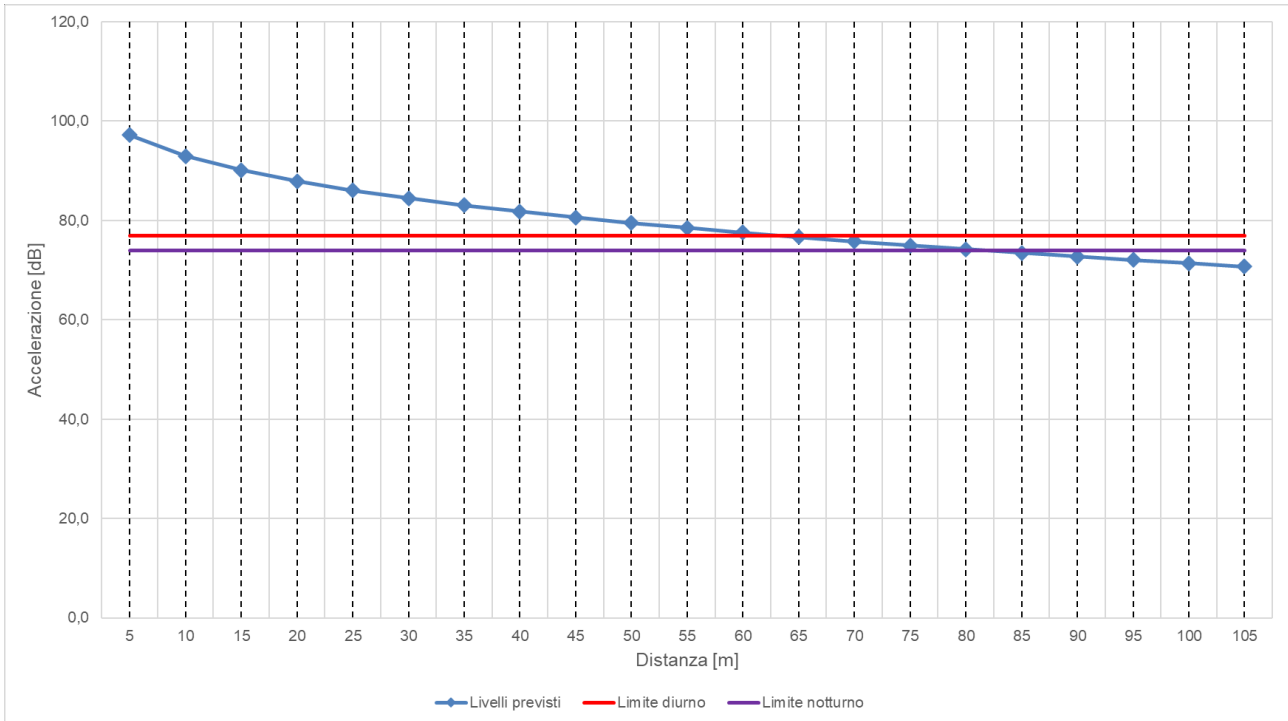


Figura 19 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 3

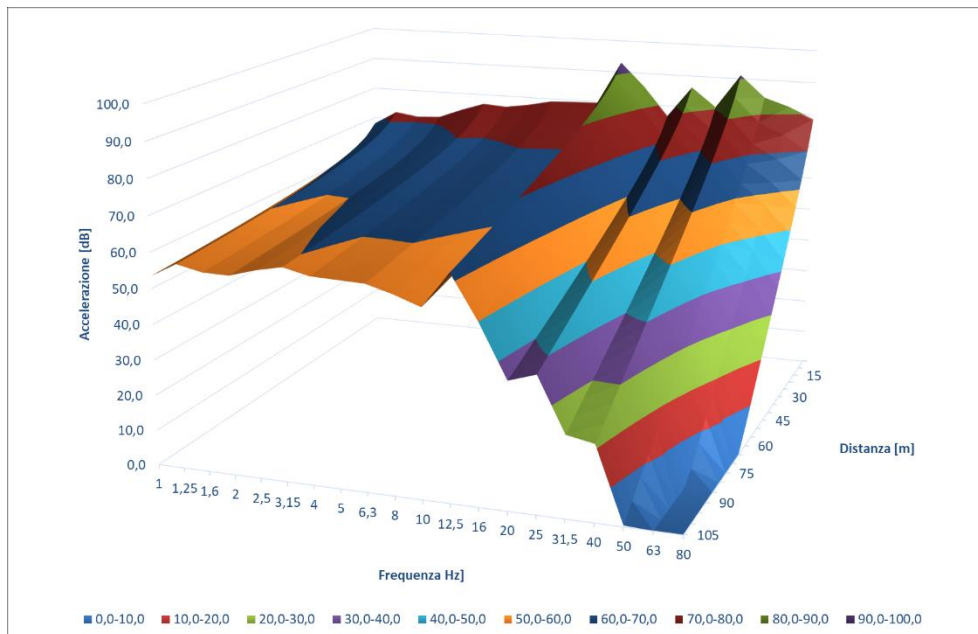


Figura 20 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 3



Per lo scenario 4, che identifica le fasi di scavo in tradizionale delle gallerie (tratto in naturale), il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 35 m (il limite notturno a 45 m).

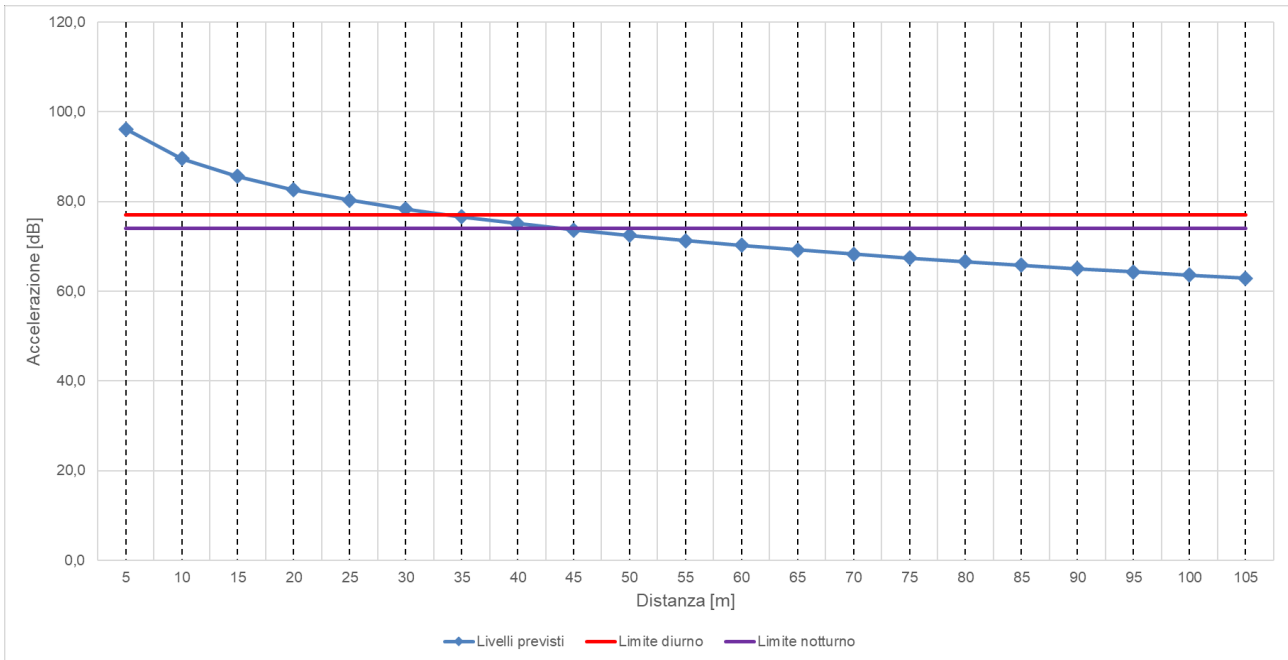


Figura 21 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 4

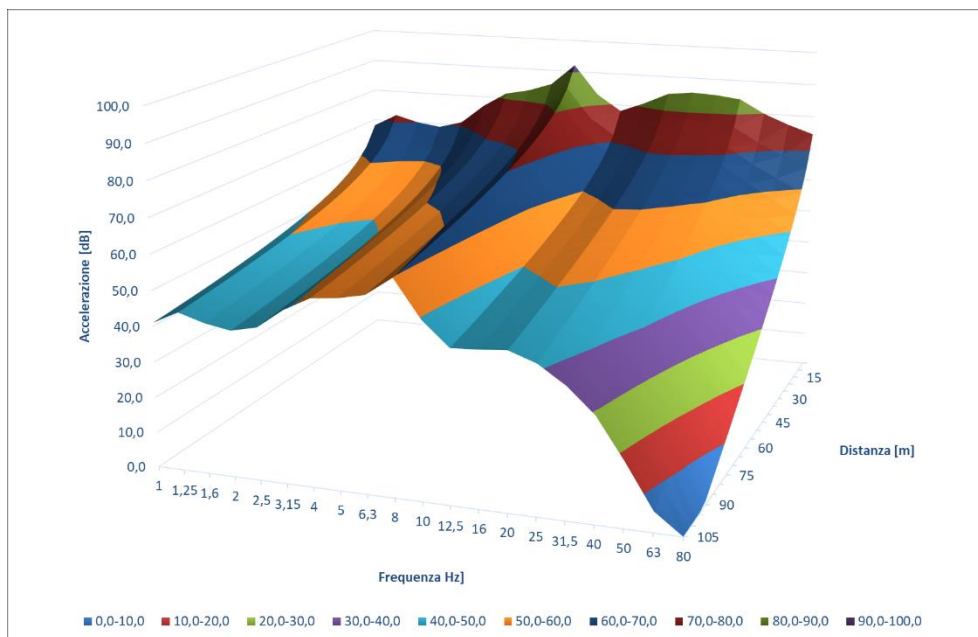


Figura 22 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 4

Per lo scenario 5, inteso come rappresentativo degli scavi nelle tratte di imbocco delle nuove gallerie, il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 80 m (il limite notturno a 105 m).

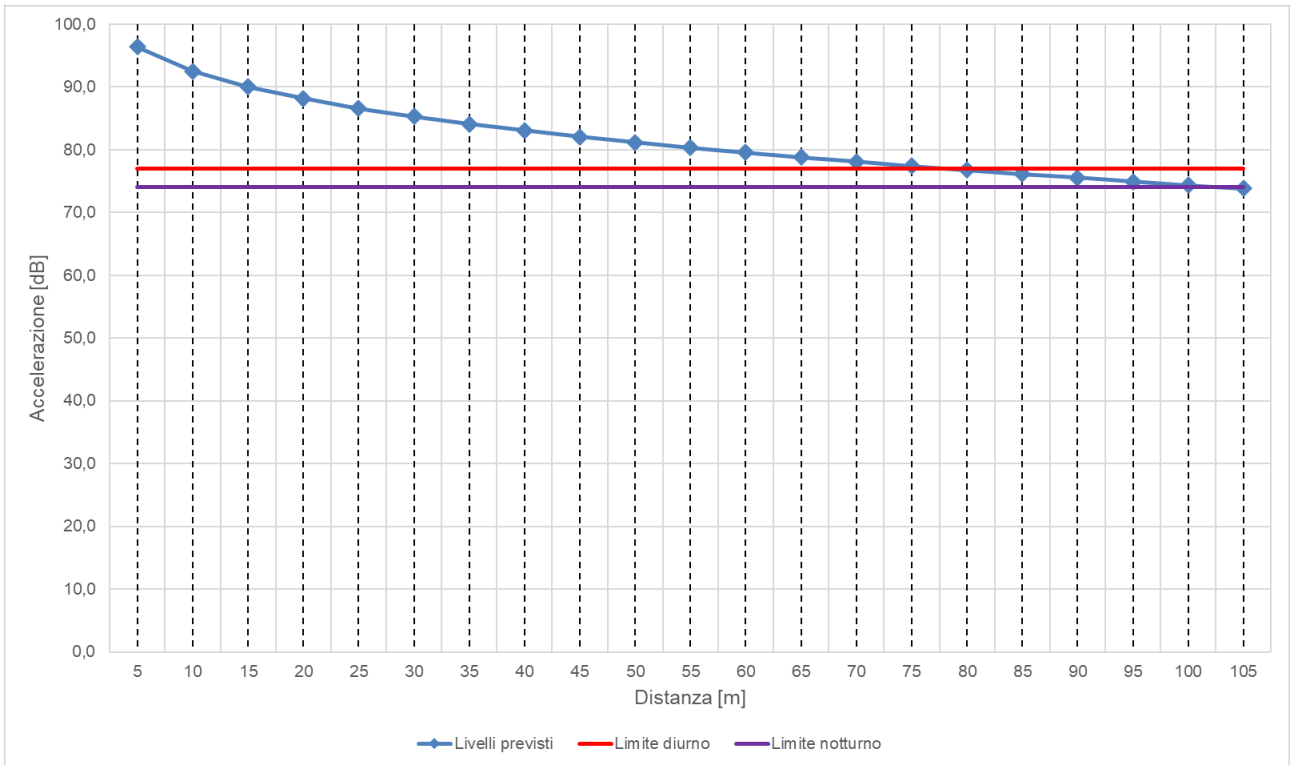


Figura 23 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 5

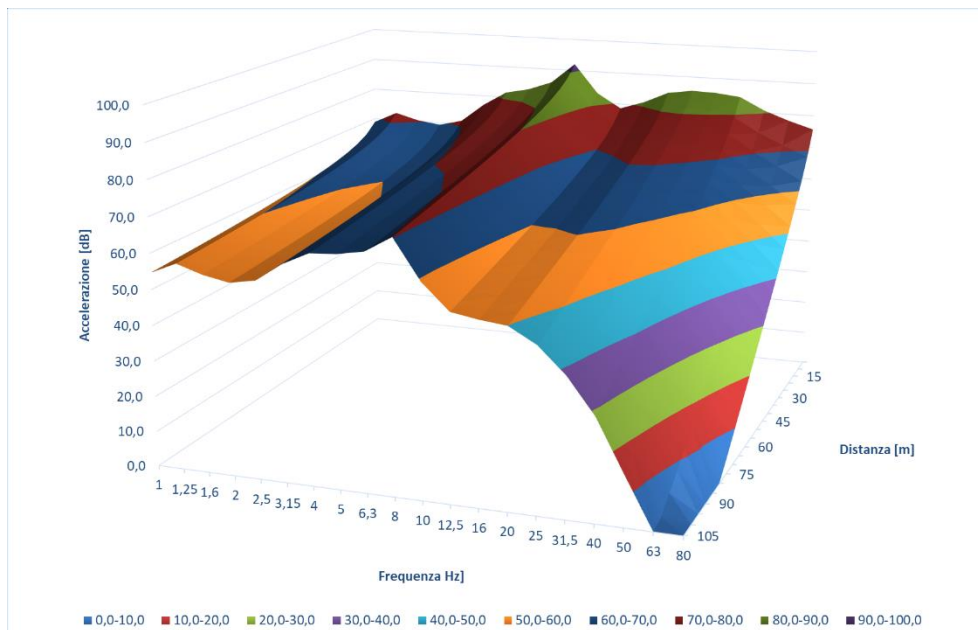


Figura 24 - Livelli di accelerazione in dB per singola frequenza stimati durante le attività di cui allo scenario 5

A distanze inferiori rispetto a quanto sopra indicato, potranno quindi verificarsi superamenti dei limiti relativi al disturbo alle persone secondo la norma UNI 9614; di seguito la tabella di sintesi dei risultati.

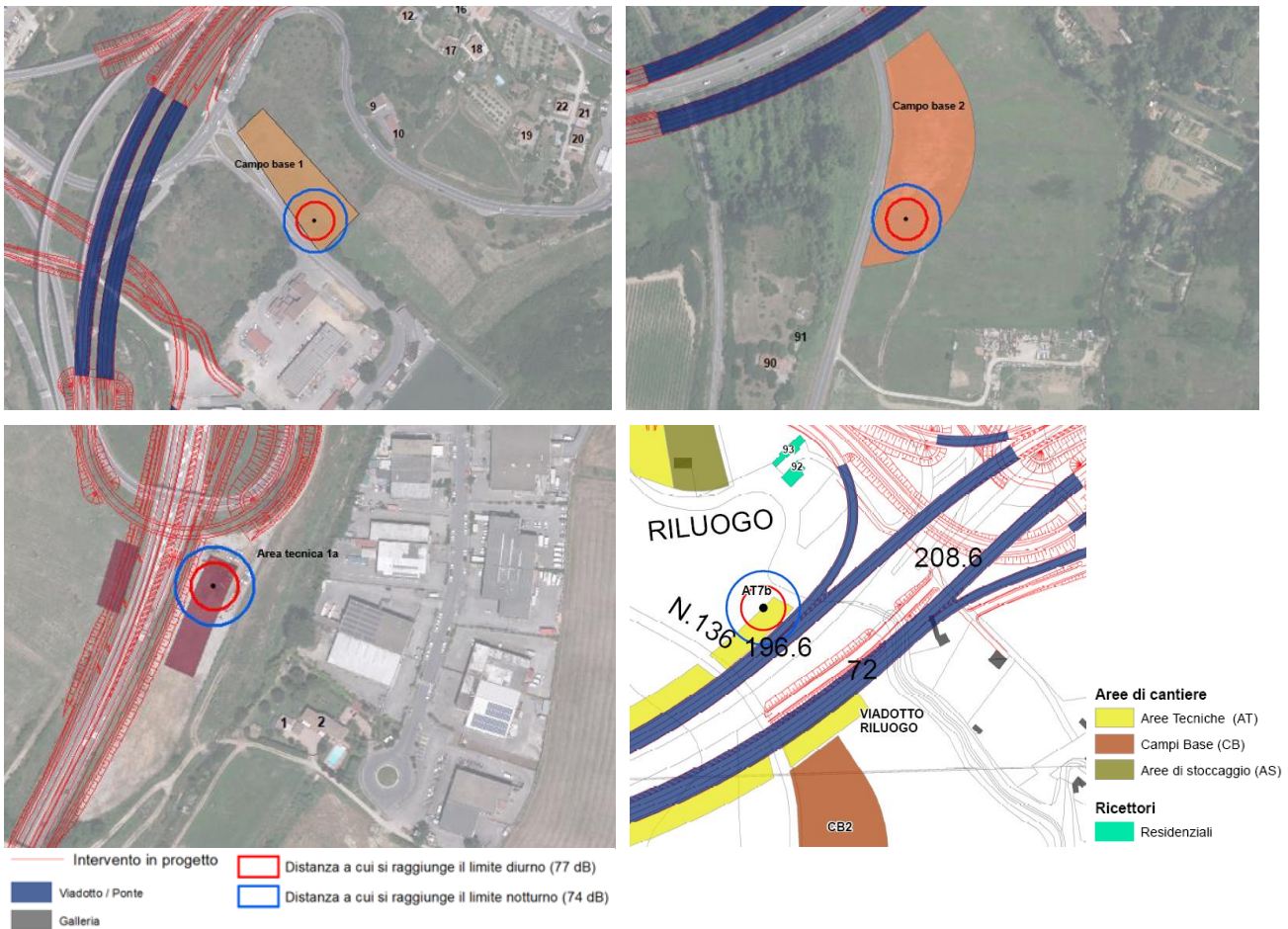
Scenario	Descrizione attività	Limite diurno per abitazioni (77 dB)	Limite notturno per abitazioni (74 dB)
1	Campo base / area tecnica: deposito materiale, frantumazione, vagliatura, betonaggio	15 m	25 m
2	Realizzazione paratia di pali	35 m	45 m
3	Scavo trincea e/o realizzazione rilevato e movimentazione materiali	65 m	80 m
4	Scavo in tradizionale galleria naturale	35 m	45 m
5	Scavi / demolizioni nei tratti all'aperto	80 m	105 m

Tabella 6 - Distanze entro cui è presente disturbo vibratorio, per le diverse ipotesi di lavorazioni considerate

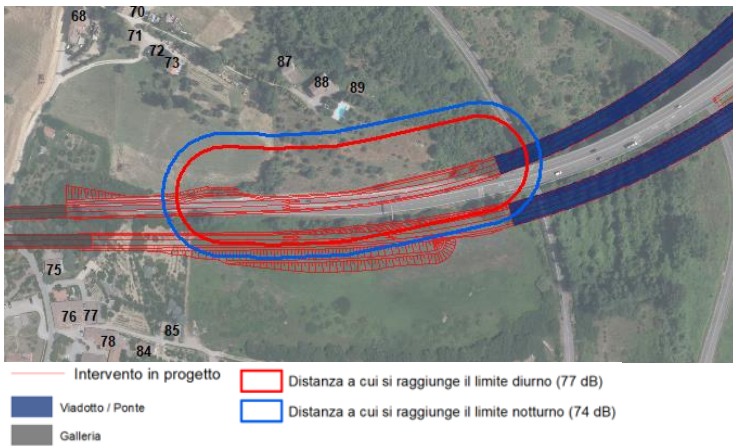
Nel seguito, si riportano alcune immagini rappresentative delle ipotesi localizzative fatte per i diversi scenari di cantiere simulati, al fine di verificare gli eventuali ricettori interessati dal disturbo vibratorio; per ciascuna lavorazione considerata, sono state inserite in planimetria le distanze entro cui viene raggiunto il limite oltre il quale non si avverte più il disturbo vibratorio (77 dB per il giorno, in rosso, e 74 dB per la notte, in blu).

Nel caso degli scenari 1 e 2 non si rilevano particolari criticità dato che gli edifici presenti nell'intorno delle aree di cantiere in esame, sono localizzati a distanze sensibilmente maggiori rispetto a quella massima entro cui è ancora possibile avvertire il disturbo (35 m di giorno e 45 m di notte); sono invece 2 i ricettori potenzialmente impattati nella fase di scavo nel tratto naturale della galleria Bucciano.

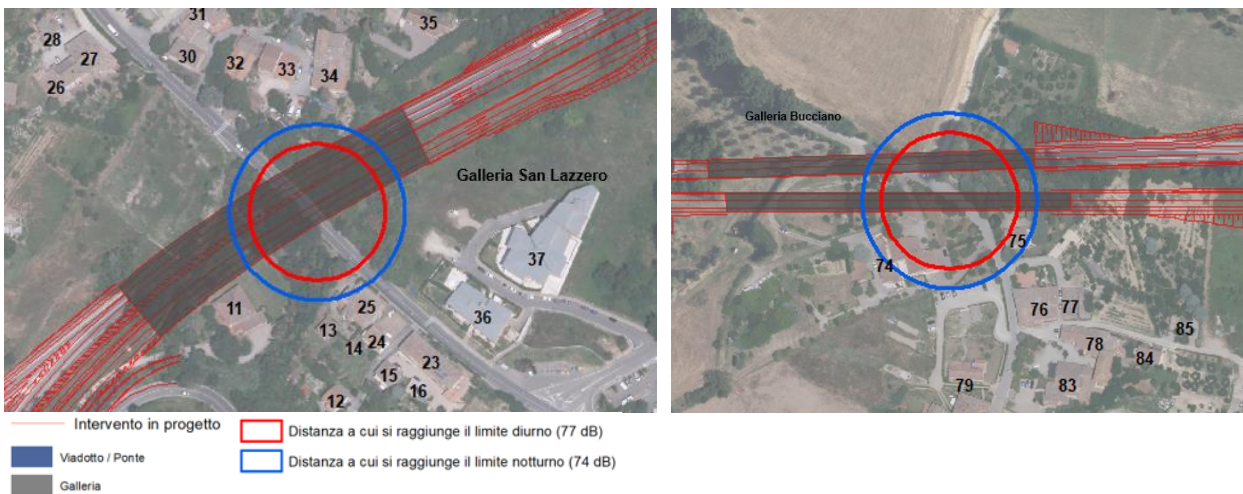
Scenario 1: identifica le attività di lavoro previste nei campi base e nelle aree tecniche (deposito materiale, frantumazione, vagliatura e betonaggio); il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di 15 m (il limite notturno a circa 25 m).



Scenario 2: identifica le attività riguardanti la realizzazione della paratia di pali prevista nel tratto di strada in progetto compreso fra la galleria Bucciano ed il viadotto Riluogo (progressive 3+994.27 e 4+147.04); il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di 35 m (il limite notturno a 45 m).

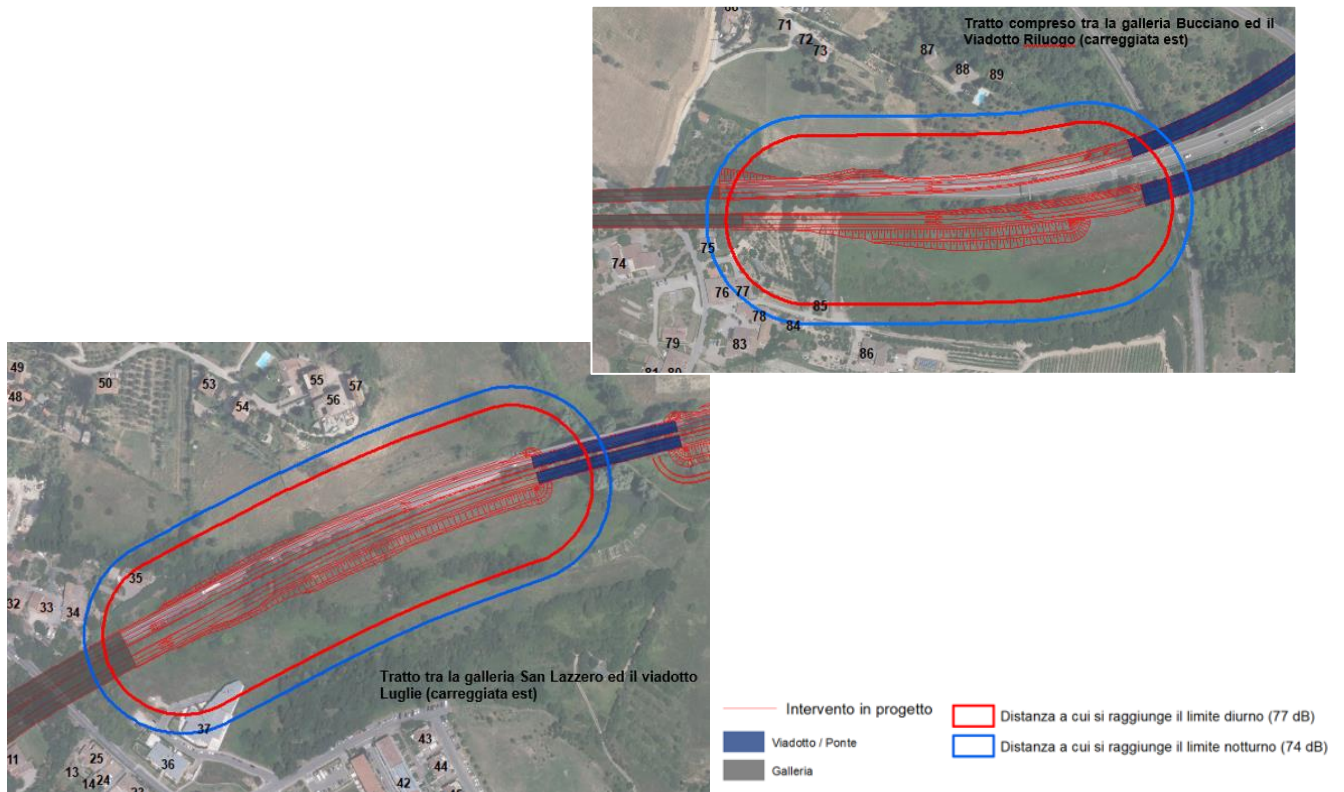


Scenario 4: identifica le fasi di scavo in tradizionale delle gallerie (tratto in naturale); il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 35 m (il limite notturno a 45 m).

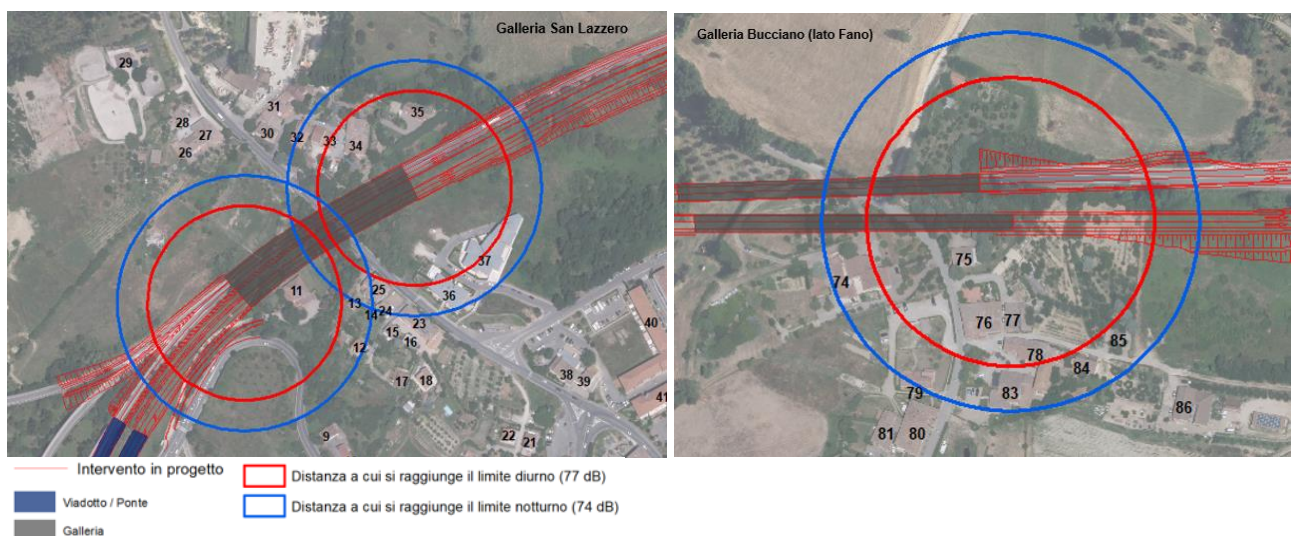


Per quanto riguarda invece gli scenari 3 e 5, i livelli vibrazionali indotti dalle lavorazioni sono tali da interessare diversi edifici.

Si ricorda che lo scenario 3 identifica genericamente le fasi di scavo della trincea e/o realizzazione di rilevati (con rullatura); il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 65 m (il limite notturno a 80 m). Sono stati specificatamente esaminati i casi in cui l'edificato risulta essere molto vicino al tracciato: realizzazione rilevato tra la galleria San Lazzerò ed il viadotto Luglie (carreggiata est) e nel tratto compreso tra la galleria Bucciano ed il Viadotto Riluoò (carreggiata est).



Lo scenario 5 invece è rappresentativo degli scavi nelle tratte di imbocco delle nuove gallerie; il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 80 m (il limite notturno a 105 m).

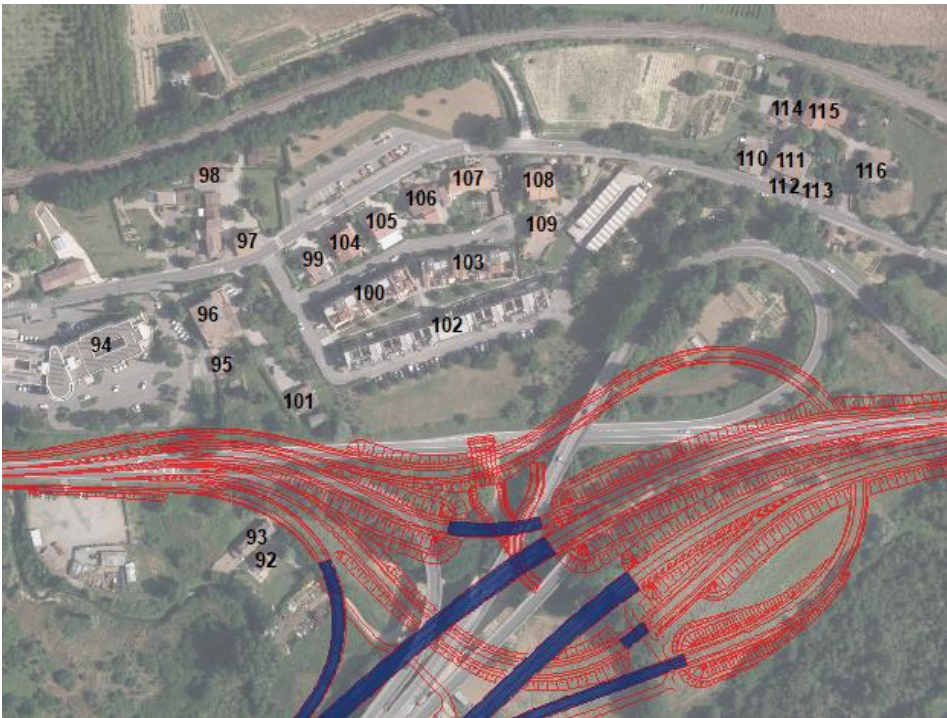


La tabella seguente fornisce il quadro sinottico del numero di ricettori potenzialmente interessati dal disturbo vibratorio, per ciascuno degli scenari di cantiere esaminati.

Scenario	Descrizione	Localizzazione	Limite diurno per abitazioni (77 dB)	Limite notturno per abitazioni (74 dB)	Numero ricettori impattati giorno	Numero ricettori impattati notte	Numero totale ricettori impattati
1	Deposito materiale, frantumazione, vagliatura e betonaggio	Campi base 1 e 2 Aree tecniche 1a e 7b	15 m	25 m	0	0	0
2	Realizzazione della paratia di pali	Tratto di strada in progetto compreso fra la galleria Bucciano ed il viadotto Riluogo (progressive 3+994.27 e 4+147.04)	35 m	45 m	0	0	0
3	Scavi trincea e/o realizzazione di rilevati (con rullatura)	Rilevato tra la galleria San Lazzerò ed il viadotto Luglie (carreggiata est) e rilevato nel tratto compreso tra la galleria Bucciano ed il Viadotto Riluogo (carreggiata est)	65 m	80 m	3	7	7
4	Scavo in tradizionale delle gallerie (tratto in naturale)	Galleria San Lazzerò Galleria Bucciano	35 m	45 m	1	2	2
5	Scavi nelle tratte di imbocco delle nuove gallerie	Galleria San Lazzerò (entrambi i lati – carreggiata est) Galleria Bucciano (lato Fano – carreggiata est)	80 m	105 m	11	22	22

Dalle analisi svolte emerge dunque come alcune lavorazioni potrebbero generare livelli vibratori tali essere percepiti anche a distanze significative dalla sorgente (80/100 m); in tal caso, la propagazione delle vibrazioni potrebbe interessare diversi edifici localizzati prevalentemente in corrispondenza delle aree dove il tracciato di progetto si sviluppa in galleria.

Particolare attenzione dovrà essere posta anche agli edifici ubicati nell'abitato di Ruffolo, dove le attuali rampe, non potendo essere preservate o parzialmente mantenute, verranno demolite e sostituite completamente da quelle nuove di progetto; a tal proposito, si veda la figura seguente, rappresentativa della configurazione progettuale dello svincolo di Ruffolo in cui le rampe si sviluppano a meno di 100 m dal fronte edificato.



In ultima analisi, appare opportuno evidenziare, come già più volte precedentemente sottolineato, che il modello di propagazione attraverso cui sono state condotte le valutazioni ha necessariamente assunto diverse ipotesi, che potranno essere confermate solo nelle successive fasi progettuali (si tratta in particolare delle assunzioni fatte relativamente al numero ed alla tipologia dei mezzi attivi in ciascuno degli scenari considerati, nonché in ordine alla localizzazione delle lavorazioni stesse).

A fronte di quanto sinora descritto, si ritiene tuttavia auspicabile prevedere, oltre al monitoraggio in corso d'opera, delle attività di monitoraggio prima dell'inizio dei lavori in grado sia di fornire il quadro sullo stato o condizione di bianco dal punto di vista vibrazionale (non sono disponibili per le aree in esame studi pregressi) sia di controllare delle situazioni critiche già in atto relativamente allo stato vibrazionale; sarà così possibile avere il quadro completo di ricettori potenzialmente impattati, verificando la presenza anche di altri edifici eventualmente non censiti nello studio acustico perché non residenziali o sensibili, ma comunque soggetti al disturbo vibratorio in ragione della vicinanza con l'opera in progetto.

## 5 MISURE DI MITIGAZIONE

### 5.1 Mitigazioni in fase di esercizio

Uno degli elementi essenziali su cui agire al fine di limitare l'eventuale impatto vibratorio associato alla fase di esercizio, riguarda la manutenzione del manto stradale; la predisposizione di adeguati piani di manutenzione programmata del manto stradale nel corso della vita dell'infrastruttura, ne assicura la conservazione delle caratteristiche di continuità e di fonoassorbimento, evitando pertanto la formazione di discontinuità, ammaloramenti, ormaie o quant'altro possa determinare la generazione di azioni dinamiche in grado di sollecitare il corpo stradale ed il terreno sottostante, con conseguente propagazione laterale delle vibrazioni. È infatti evidente il ruolo svolto dalla rugosità del fondo stradale, e pertanto dalle sue condizioni di manutenzione, nella riduzione dell'entità delle vibrazioni trasmesse nel terreno circostante; tale evidenza fisica è rappresentata nella figura seguente, da cui si ricava che, a parità di altre condizioni, la cattiva manutenzione del fondo stradale può comportare un incremento, anche di un ordine di grandezza, dell'ampiezza delle vibrazioni trasmesse ad un edificio.

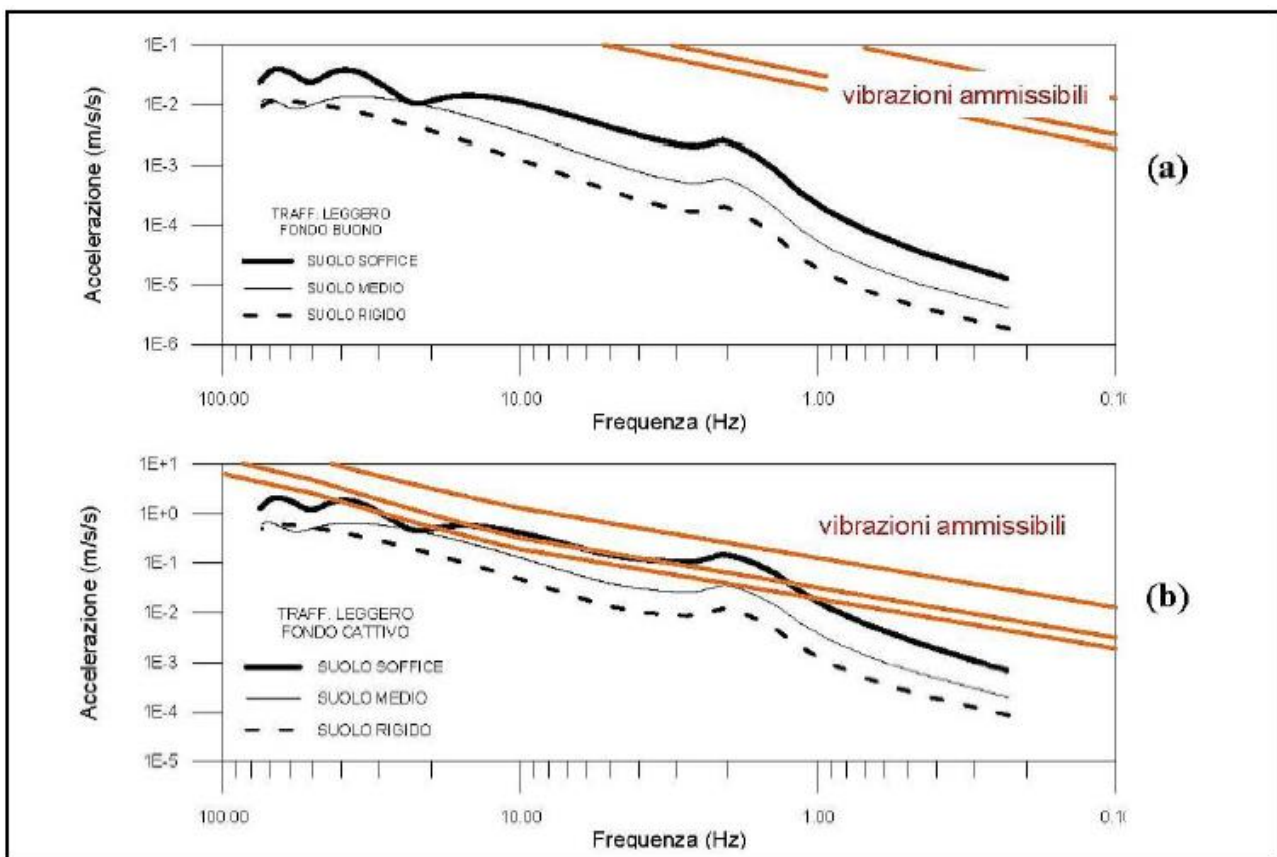


Figura 25 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente



## 5.2 Mitigazioni in fase di cantiere

Per la componente in esame non sono prevedibili interventi di mitigazione propriamente detti, dal momento che le attività previste non determineranno un impatto significativo diffuso nel territorio, ma solo significativo nel momento in cui le lavorazioni siano molto prossime agli edifici. Per questo sarà utile predisporre un'adeguata comunicazione con i residenti al fine di informare sul possibile disagio legato alle attività.

Al fine di contenere i livelli vibrazionali generati dai macchinari, è necessario agire sulle modalità di utilizzo dei medesimi e sulla loro tipologia ed adottare semplici accorgimenti, quali quelli di tenere i mezzi in stazionamento a motore acceso il più possibile lontano dai ricettori.

Nel caso in cui, per alcuni ricettori, le attività legate alle lavorazioni più impattanti siano incompatibili con la loro fruizione, dovrà essere attuata una procedura operativa che consenta di evitare lavorazioni impattanti negli orari e nei tempi di utilizzo dei ricettori.

La mitigazione delle vibrazioni può solo essere eseguita alla fonte, ovvero intervenendo, quando possibile, sulla scelta delle attrezzature utilizzate, ad esempio preferendo macchine a rotazione rispetto a macchine a percussione o vibropercussione, utilizzando macchinari di recente omologazione ed in buono stato di manutenzione, organizzando le lavorazioni in orari meno disturbanti.

Per tutte le fasi di costruzione che non possono prescindere dall'impiego di attrezzature ad elevato impatto o dallo svolgimento di attività caratterizzate da un elevato carico emissivo vibrazionale, quali ad esempio le attività di consolidamento con uso di sonde o le attività di demolizione di parti di strutture in cemento armato con martelli demolitori (scapitozzatura), le attività saranno sempre accompagnate da una preventiva comunicazione agli abitanti e alle strutture sensibili presenti sul territorio.

Pertanto, gli interventi di mitigazione applicabili nelle aree esposte a livelli di impatto oggettivamente disturbanti sono riferibili alle seguenti possibilità operative:

- ottimizzazione dei tempi di lavorazione in relazione alle condizioni di fruizione in particolare di laboratori e studi medici sensibili;
- utilizzo di attrezzature o tecniche caratterizzate da minime emissioni di vibrazioni (martelli pneumatici a potenza regolabile, sistemi a rotazione anziché a percussione, ...);
- previsione di misure di vibrazioni in fase di avanzamento dei lavori al fine di segnalare il superamento di soglie di attenzione;
- avviso periodico della popolazione residente e delle strutture sensibili sui tempi e sulle modalità con cui verranno condotte le lavorazioni più significative in termini vibrazionali;
- circoscrizione delle attività maggiormente impattanti nell'ambito degli orari di minor disturbo per la popolazione, evitando quindi le prime ore della mattina, la pausa pranzo e le ore serali.