

S.S. 67 "Tosco Romagnola"  
Lavori di adeguamento della S.S. 67 nel tratto tra la  
località S.Francesco in Comune di Pelago e l'abitato di  
Dicomano.

Variante di Rufina (FI) – LOTTI 2A e 2B

**PROGETTO DEFINITIVO**

COD. FI462

PROGETTAZIONE:  
RAGGRUPPAMENTO  
TEMPORANEO PROGETTISTI

MANDATARIA:



MANDANTI:



IL RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI  
SPECIALISTICHE:

Ing. Riccardo Formichi – Società Pro Iter Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Milano n. 18045

IL GEOLOGO:

Geol. Massimo Mezzanica – Società Pro Iter Srl  
Ordine Geologi della Lombardia n. 762

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Ing. Massimo Mangini – Società Erre.Vi.A Srl  
Ordine Ingegneri Provincia di Varese n. 1502

VISTO: IL RESP. DEL PROCEDIMENTO:

Ing. Francesco Pisani

PROTOCOLLO:

DATA:



**STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE**  
**SIA - SCENARIO DI BASE E ANALISI DELLA COMPATIBILITA'**  
**SIA -VIBRAZIONI**  
Studio vibrazionale - Relazione

| CODICE PROGETTO |             | NOME FILE              |                  | REVISIONE  | SCALA     |
|-----------------|-------------|------------------------|------------------|------------|-----------|
| PROGETTO        | LIV. PROG.  | T01-IA39-AMB-RE01A.pdf |                  |            |           |
| ACNO01113       | D 20        | CODICE ELAB.           | T01 IA39 AMBRE01 | A          | -         |
| D               |             |                        |                  |            |           |
| C               |             |                        |                  |            |           |
| B               |             |                        |                  |            |           |
| A               | EMISSIONE   | 10/2023                | Gambarana        | Luppi      | Formichi  |
| REV.            | DESCRIZIONE | DATA                   | REDATTO          | VERIFICATO | APPROVATO |

|   |  |  |                 |         |
|---|--|--|-----------------|---------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO  |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 2 di 38 |
|   |  |  | Data<br>10/2023 |         |

## INDICE

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | PREMESSE .....   | 4  |
| 2   | INQUADRAMENTO NORMATIVO .....  | 5  |
| 2.1 | Grandezze di riferimento .....   | 6  |
| 2.2 | Valori limite di riferimento .....   | 6  |
| 3   | CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI ESERCIZIO .....   | 8  |
| 4   | CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI CANTIERE .....  | 15 |
| 4.1 | Metodologia di valutazione dei livelli vibrazionali indotti dalla fase di cantiere ..... | 15 |
| 4.2 | Modello di calcolo .....   | 18 |
| 4.3 | Individuazione dei ricettori .....   | 19 |
| 4.4 | Individuazione degli scenari di cantiere .....   | 20 |
| 4.5 | Definizione del tipo di sorgente .....   | 21 |
| 4.6 | Stima dei futuri livelli vibrazionali .....  | 22 |
| 5   | MISURE DI MITIGAZIONE .....  | 31 |
| 5.1 | Mitigazioni in fase di esercizio .....   | 31 |
| 5.2 | Mitigazioni in fase di cantiere .....  | 32 |
|     | Allegato 1 - Aggiornamento al 2017 della norma UNI 9614 .....                            | 33 |

## INDICE FIGURE

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata, in piedi o seduta .....   | 6  |
| Figura 2 - Decorso temporale Asse Z – A7 .....   | 9  |
| Figura 3 - Transito energeticamente significativo – A7 .....   | 10 |
| Figura 4 - Decorso temporale Asse Z – A21 .....  | 11 |
| Figura 5 - Transito energeticamente significativo – A21 .....  | 12 |
| Figura 6 - Decorso temporale Asse Z – A4 .....   | 13 |
| Figura 7 - Transito energeticamente significativo – A4 .....   | 14 |
| Figura 8 - Relazione tra mezzi d’opera e spettro di emissione di vibrazioni .....  | 15 |
| Figura 9 - Matrice dei livelli ponderati di accelerazione complessiva per singola frequenza e distanza .....                         | 16 |
| Figura 10 - Curva di ponderazione asse generico .....  | 16 |
| Figura 11 - Propagazione dello spettro di vibrazione .....   | 17 |
| Figura 12 - Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni a diverse distanze .....  | 17 |
| Figura 13 - Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra) ..... | 18 |
| Figura 14 - Localizzazione ricettori .....   | 19 |
| Figura 15 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente .....                                 | 31 |

## 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) ..... | 7  |
| Tabella 2 - Tracciati stradali rilevati e localizzazione punto di misura .....  | 8  |
| Tabella 3 - Definizione dell’esponente n in base al tipo di sorgente e onda .....   | 18 |

|   |  |  |  |  |                   |
|---|--|--|--|--|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  |  | REV.<br>A  | FOGLIO<br>3 di 38 |
|   | MANDATARIA<br> <b>PRO ITER</b><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> <b>EITVIA</b> s.r.l.<br>ENERGIA VIBRATA AMBIENTE |  |  <b>sinèrgo</b><br>D VisionArchitecture |                   |

|   |    |
|---|----|
| Tabella 4 - Definizione degli scenari di cantiere esaminati: elenco dei macchinari utilizzati in funzione delle attività previste ..... | 20 |
| Tabella 5 - Sorgenti di vibrazioni individuate negli scenari di riferimento (spettri di accelerazione in mm/s <sup>2</sup> ).....       | 22 |
| Tabella 6 - Distanze entro cui è presente disturbo vibratorio, per le diverse ipotesi di lavorazioni considerate.....                   | 27 |

|   |  |  |   |  |                 |                   |
|---|--|--|---|--|-----------------|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE |  sinèrgo |  VA<br>DVisionArchitecture | REV.<br>A       | FOGLIO<br>4 di 38 |
|   |  |  |   |  | Data<br>10/2023 |                   |

## 1 PREMESSE

Nel presente studio è stata condotta la valutazione dei livelli vibrazionali riconducibili alla progettazione definitiva dell'intervento di realizzazione della variante tra le località San Francesco e l'abitato di Dicomano alla strada statale n. 67 - Tosco-Romagnola; 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*.

La relazione è articolata 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.

|   |  |  |  |                   |
|---|--|--|--|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.<br>A  | FOGLIO<br>5 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <br>sinèrgo | Date<br>10/2023   |

## 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.

Si precisa che nell'allegato 1 al presente studio si è ritenuto di sintetizzare quanto riportato nella norma UNI 9614 aggiornata al 2017 che è il principale riferimento metodologico per la misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici e per i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi.

Tuttavia, si evidenzia che le valutazioni condotte nel presente studio fanno riferimento a quanto contenuto nella versione della norma precedente in ragione dell'assenza di un quadro sullo stato attuale dal punto di vista vibrazionale del comparto indagato, definito sulla base delle metodologie indicate nella norma del 2017.

Le nuove modalità di valutazione dei disturbi da vibrazioni ed i nuovi metodi di misura e valutazione di cui alla norma del 2017 saranno pertanto implementati nelle attività di monitoraggio ambientale previste per il presente progetto.

<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.

|   |  |   |                |                                   |
|---|--|---|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |   | REV.           | FOGLIO                            |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETREVA</b> s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |
|   |  |   |                | Data<br>10/2023                   |

## 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.

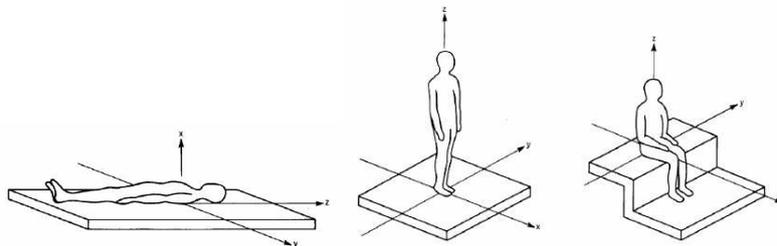


Figura 1 - Sistema cartesiano di riferimento per persona coricata, in piedi o seduta

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.

|                |   |     |     |   |     |     |   |   |     |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------------|---|-----|-----|---|-----|-----|---|---|-----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Frequenza [Hz] | 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 |
|----------------|---|-----|-----|---|-----|-----|---|---|-----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|

## 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.

|   |  |   |                 |                   |
|---|--|---|-----------------|-------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |   | REV.<br>A       | FOGLIO<br>7 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>Energia Mobilità Ambiente<br>D_VisionArchitecture | Data<br>10/2023 |                   |

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 alle 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 | Azze 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)

|   |   |  |   |        |
|---|---|--|---|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE   |  | REV.  | FOGLIO |
|   | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE |  sinèrgo | A      |
|   |   |  | Data<br>10/2023   |        |

### 3 CLIMA VIBRAZIONALE FASE DI ESERCIZIO

È noto che il traffico stradale 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. 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 stradali 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 stradali 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.

Sulla scorta di quanto sopra descritto, considerando in particolare che il volume di traffico transitante sui tratti autostradali di cui si è detto risulta significativamente 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, 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.



**SINTESI LIVELLI ASSE Z** LwUNI9614 = 58.7 dB    Lw\_max = 67.6 dB    Lim\_UNI9614 = 80.0/77.0 dB

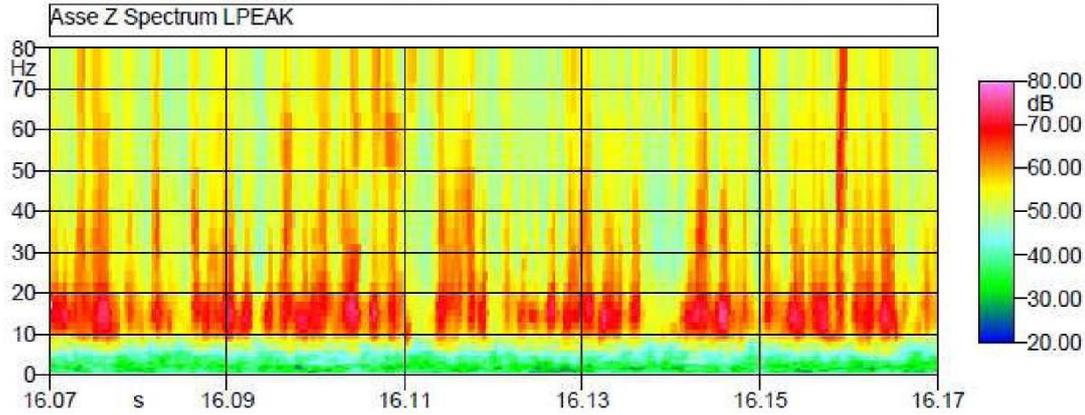
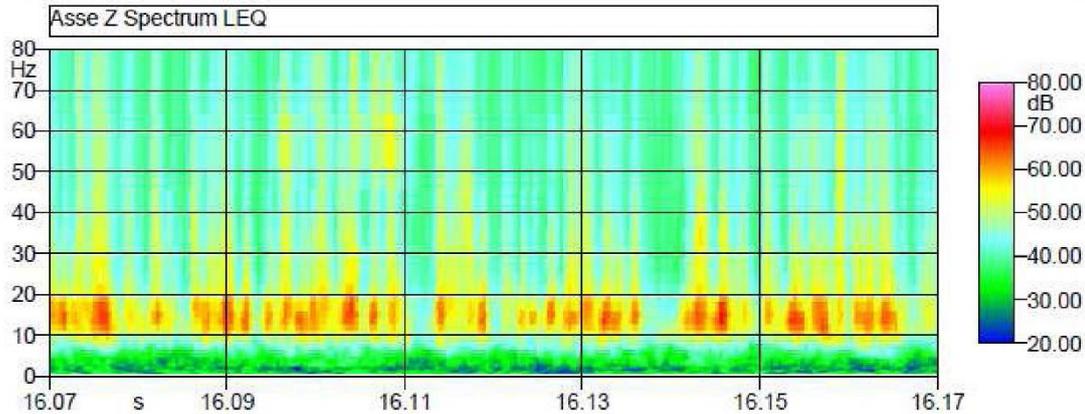


Figura 2 - Decorso temporale Asse Z - A7

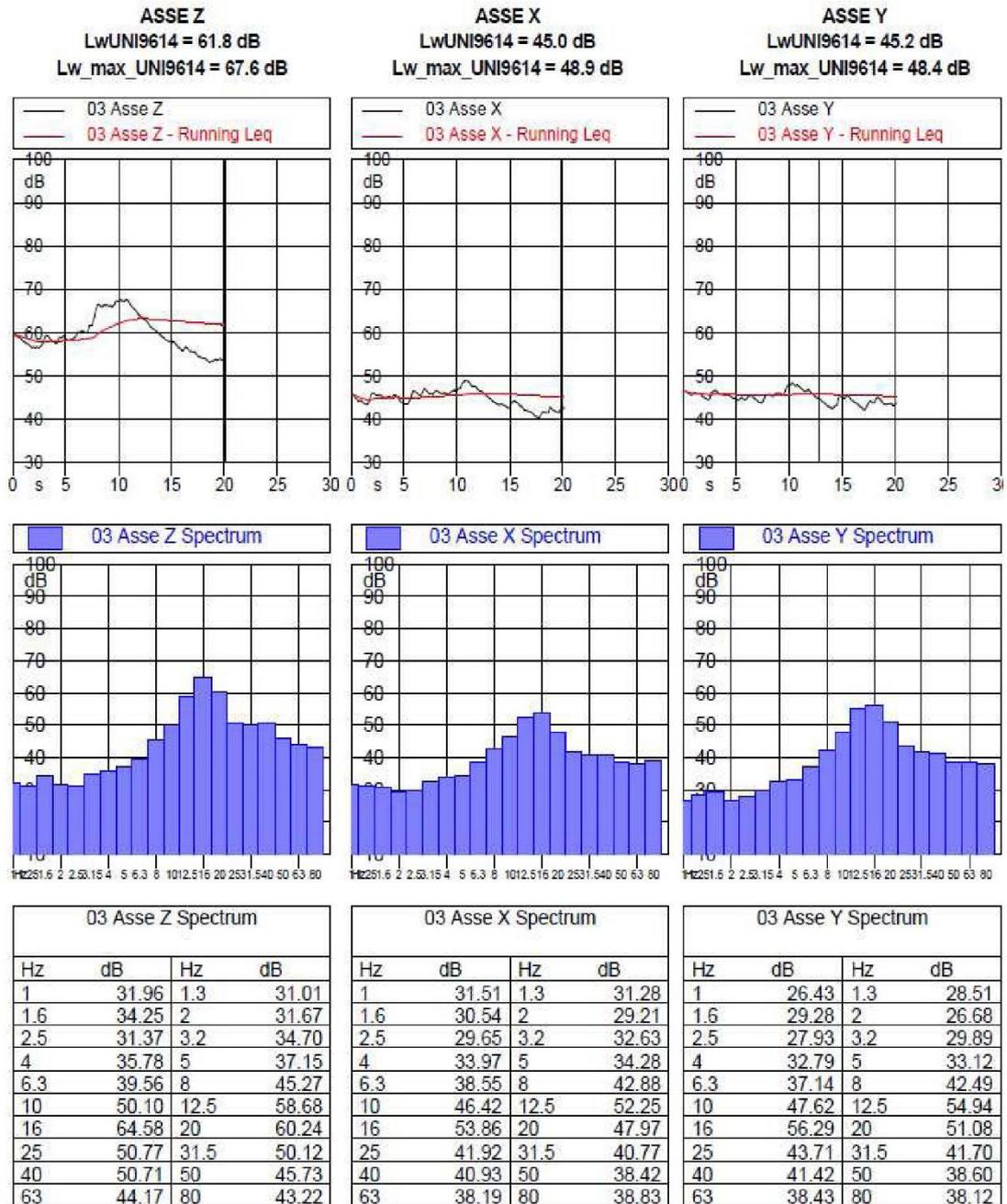


Figura 3 - Transito energeticamente significativo – A7



**SINTESI LIVELLI ASSE Z** LwUNI9614 = 52.1 dB    Lw\_max = 59.9 dB    Lim\_UNI9614 = 80.0/77.0 dB

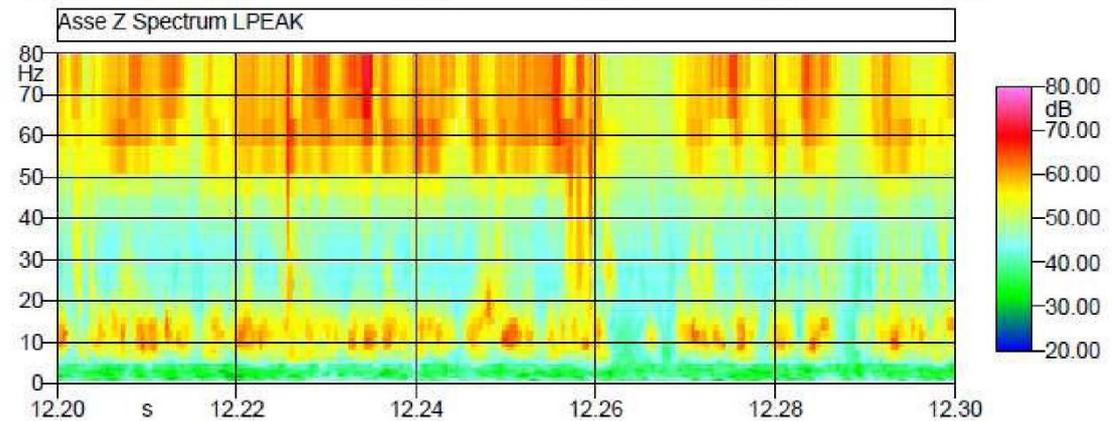
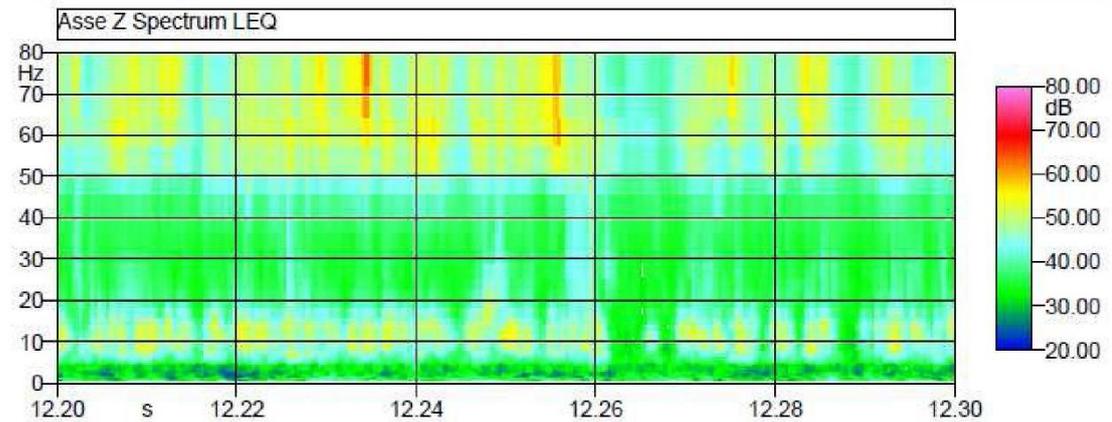


Figura 4 - Decorso temporale Asse Z – A21

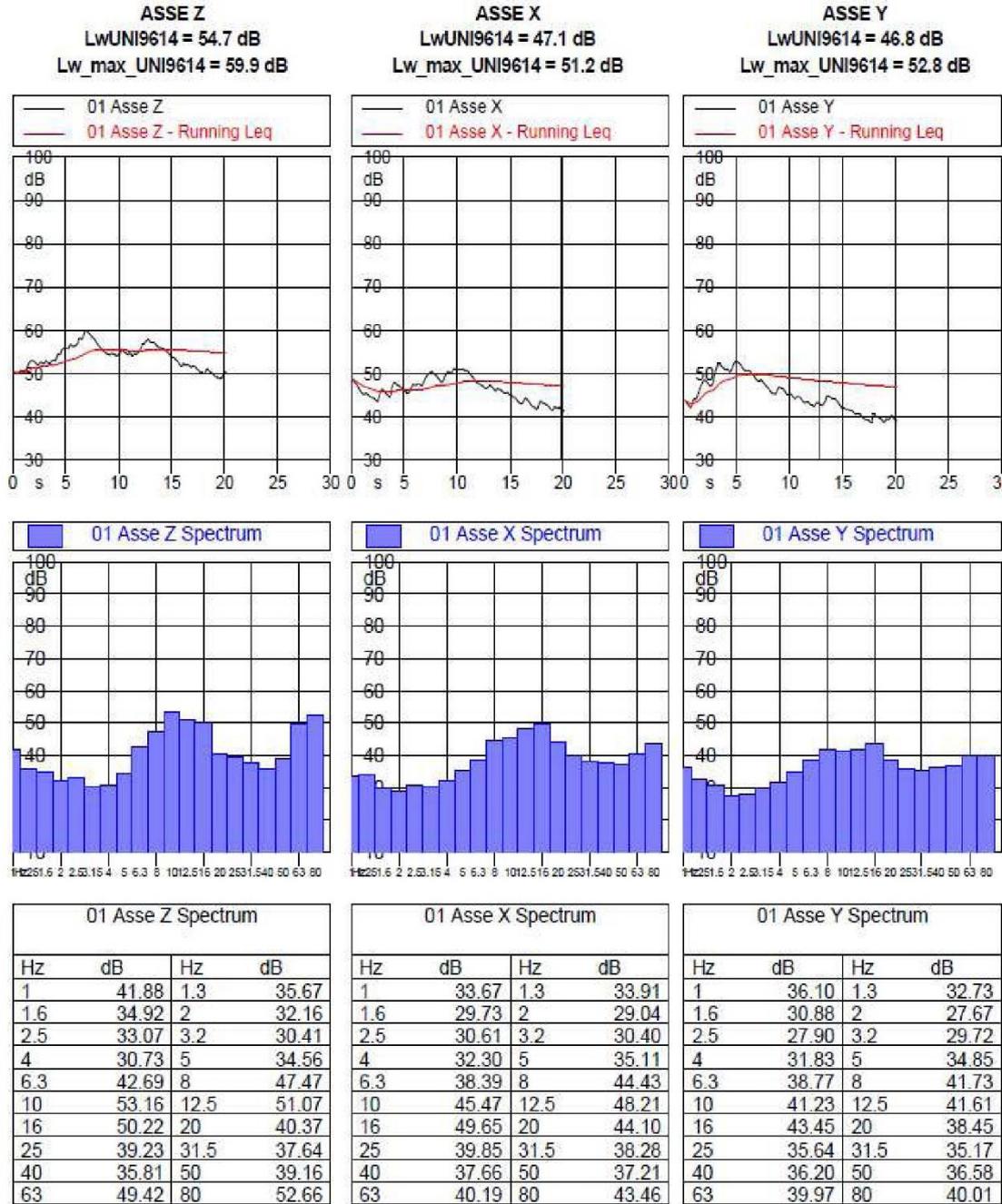


Figura 5 - Transito energeticamente significativo – A21



SINTESI LIVELLI ASSE Z LwUNI9614 = 53,9 dB Lw\_max = 59,7 dB Lim\_UNI9614 = 80,0/77,0 dB

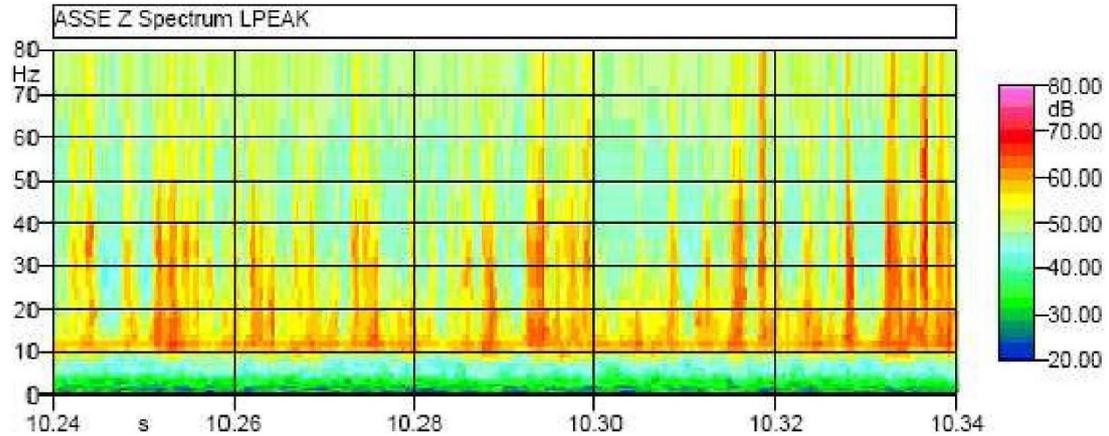
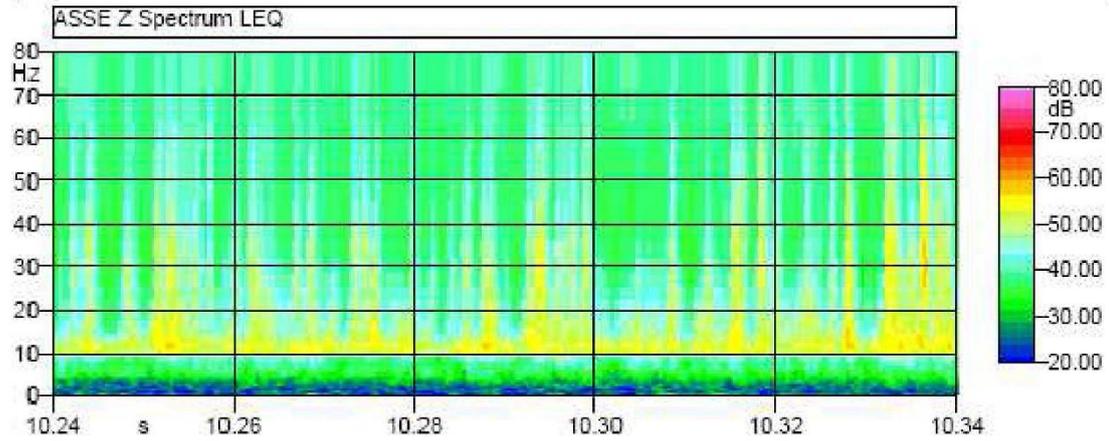


Figura 6 - Decorso temporale Asse Z – A4

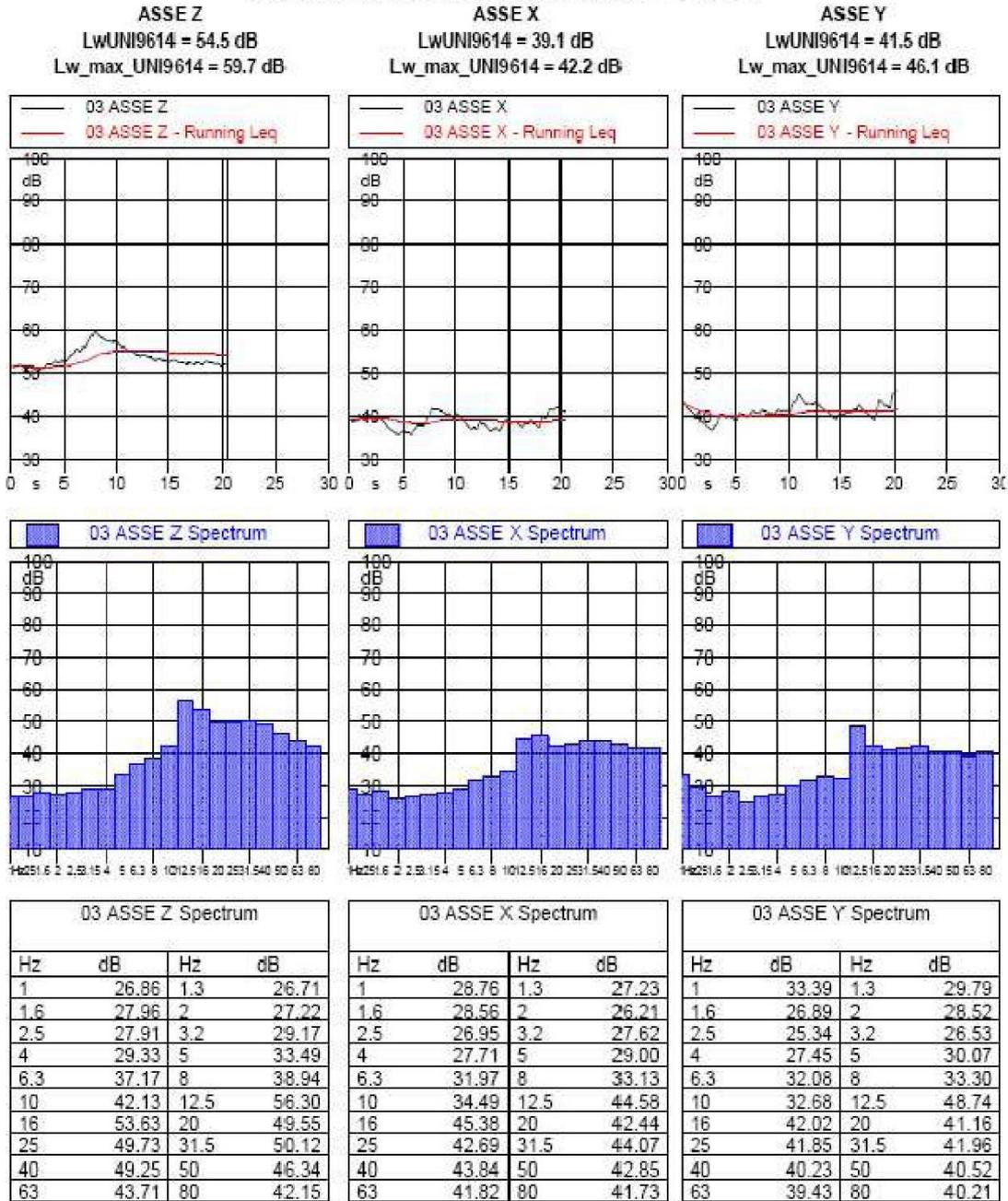


Figura 7 - Transito energeticamente significativo – A4

|   |  |   |                |                                   |
|---|--|---|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |   | REV.           | FOGLIO                            |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETA</b><br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D.VisionArchitecture |
|   |  |   |                | Data<br>10/2023                   |

## 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).

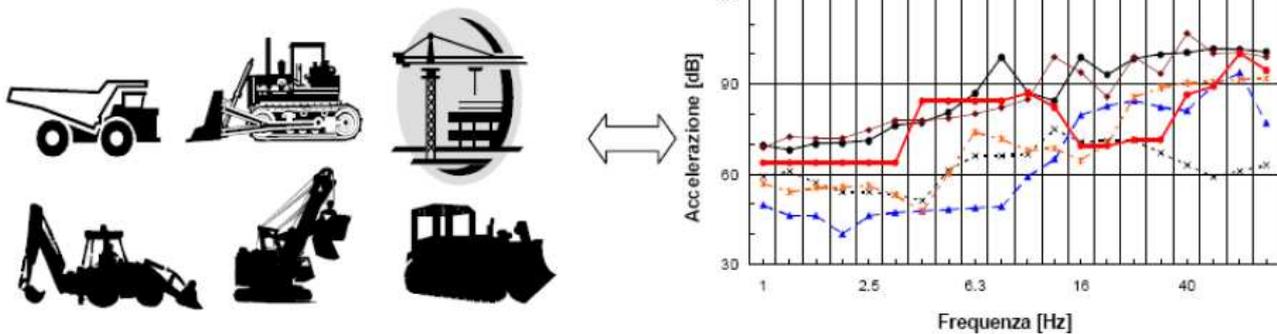


Figura 8 - Relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni

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 (cfr. paragrafo 4.2).

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

|  |   |  |                      |                        |
|--|---|--|----------------------|------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br><b>T01-IA39-AMB-RE01</b> | PROGETTAZIONE<br><br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><br><b>A</b> | FOGLIO<br><br>16 di 38 |
|  | Data<br><br><b>10/2023</b>  |  |                      |                        |

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                       | 98,00                                   | 79,18 | 72,98 | 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 | 62,64  | 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 | 56,63  | 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                        | 96,00                                   | 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 | 61,68 | 25,75  | 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 predeterminale 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.

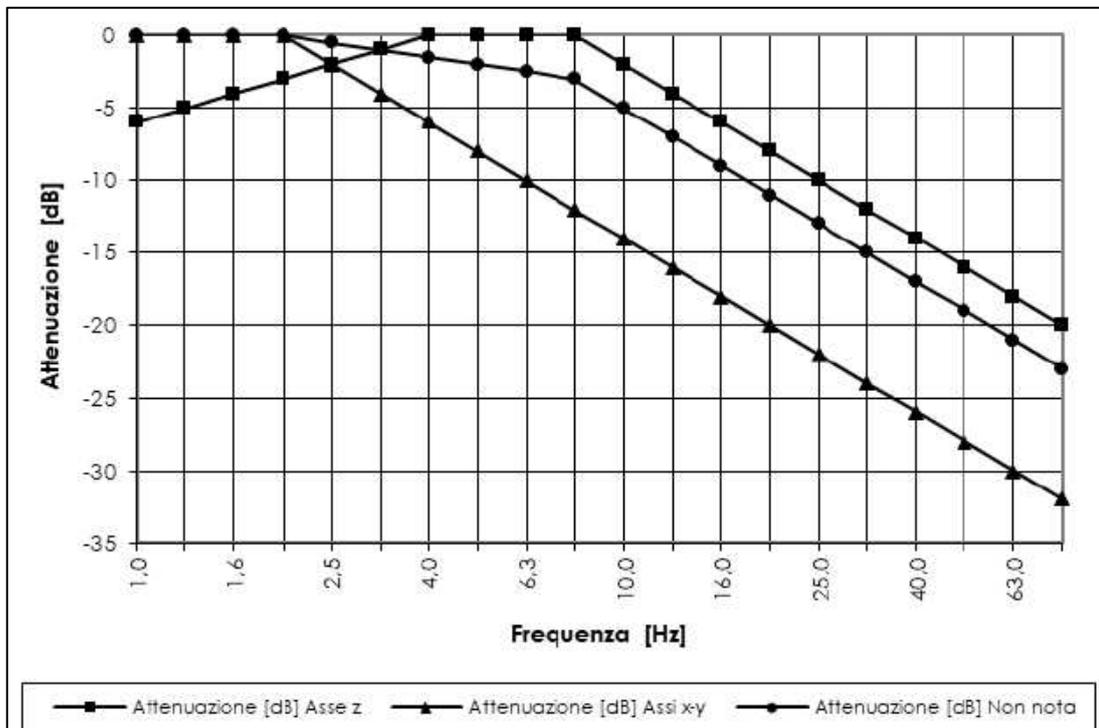


Figura 10 - Curva di ponderazione asse generico

|   |  |  |                |                                   |
|---|--|--|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.           | FOGLIO                            |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA VIBRATA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |
|   |  |  |                | Data<br>10/2023                   |

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.

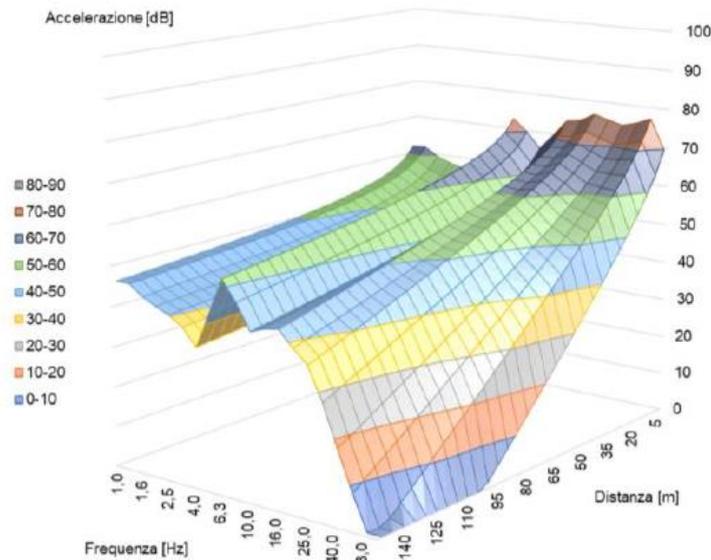


Figura 11 - Propagazione dello spettro di vibrazione

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 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

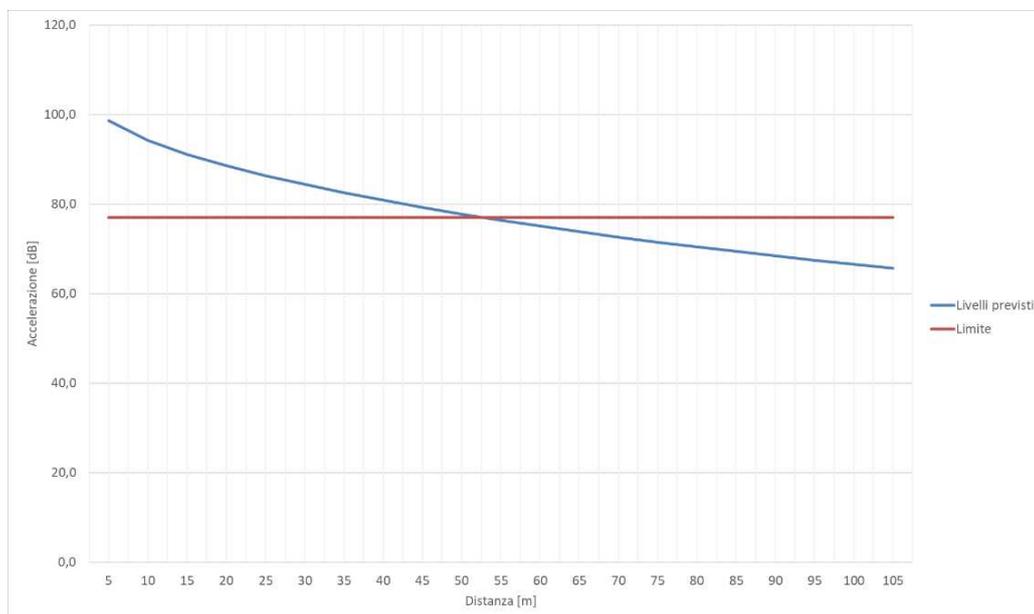


Figura 12 - Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni a diverse distanze

## 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.

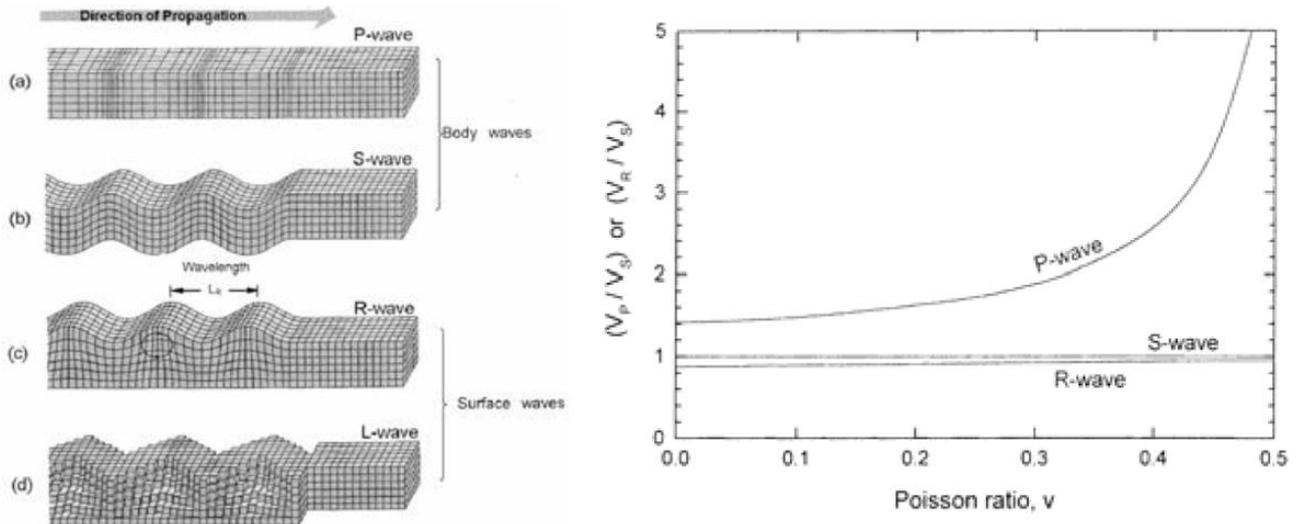


Figura 13 - Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra)

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:

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

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).

|   |  |  |                |                                   |
|---|--|--|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.           | FOGLIO                            |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b> s.p.a.<br>ENERGIA VERDE ITALIA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |
|   |  |  |                | Data<br>10/2023                   |

### 4.3 Individuazione dei ricettori

Per l'identificazione 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), sono stati individuati 62 ricettori, tutti residenziali eccezion fatta per quello identificato con il n. 299 che, localizzato nell'abitato di Rufina, risulta essere una scuola.

La figura seguente, riportata a titolo illustrativo, 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.

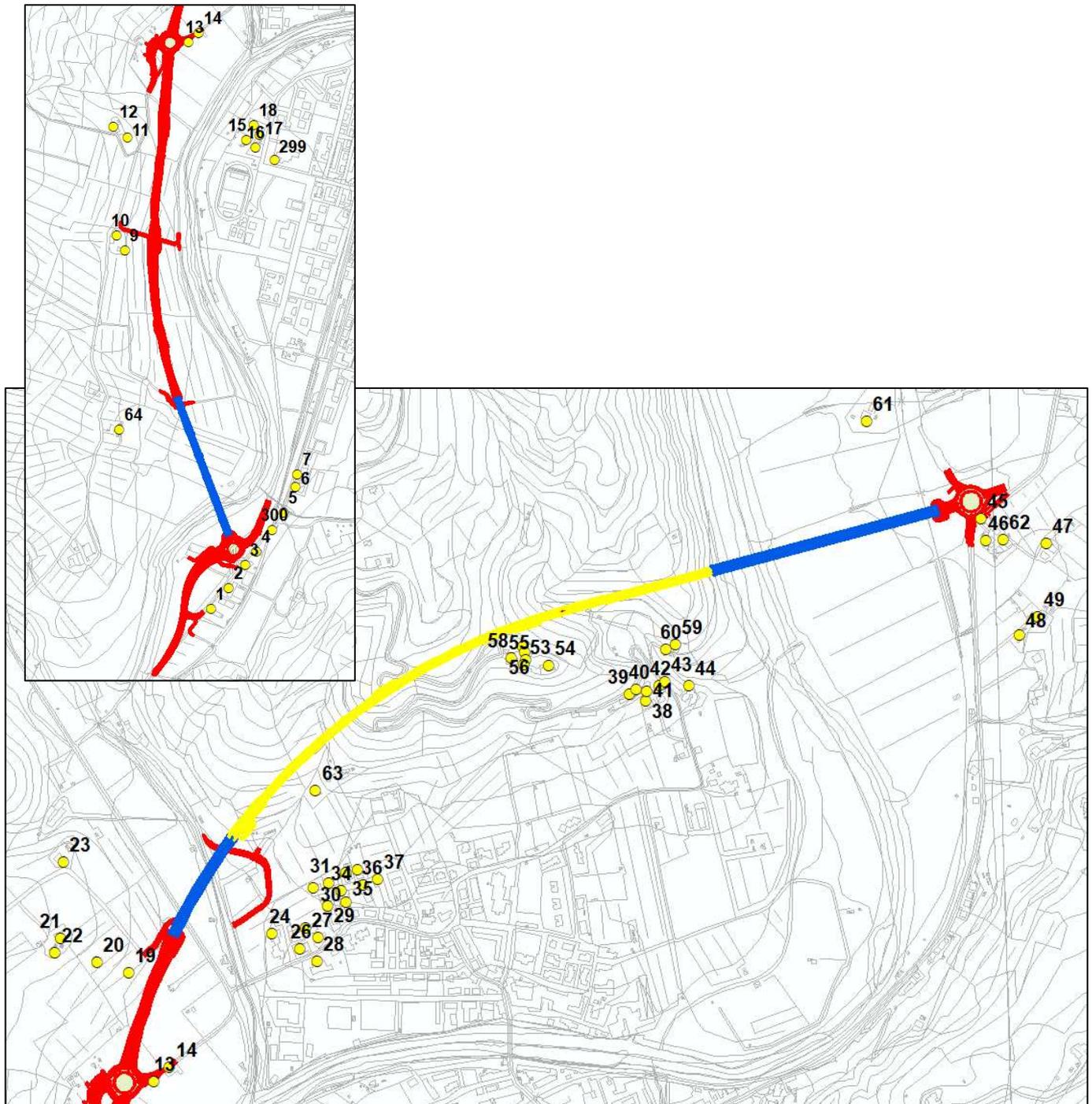


Figura 14 - Localizzazione ricettori

|   |  |  |  |   |                    |
|---|--|--|--|---|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  |  | REV.<br>A   | FOGLIO<br>20 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <br>sinèrgo | <br>D_VA<br>DVisionArchitecture | Data<br>10/2023    |

#### 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 gli scenari considerati e rappresentativi delle lavorazioni che potenzialmente sono in grado di generare maggiore impatto in termini di energia vibratoria prodotta; nel caso specifico sono state considerate sia le lavorazioni che attengono alla realizzazione delle fondazioni con pali di grande diametro (in corrispondenza dei viadotti) sia quelle riconducibili alla realizzazione dei rilevati, specialmente quelli di dimensioni più significative, nonché le attività di scavo della galleria; tali fasi realizzative sono quelle che, anche sulla base della loro localizzazione rispetto ai ricettori presenti lungo il tracciato stradale, determinano maggiori sollecitazioni meccaniche sul terreno e, di conseguenza, maggiore trasmissione di energia meccanica verso i ricettori stessi.

| Scenario | Descrizione attività                  | Mezzi attivi (n)  |
|----------|---------------------------------------|---|
| 1        | Realizzazione rilevati                | Pala cingolata (1) – Autocarro (1) – Rullo compattatore (1)                               |
| 2        | Pali di fondazione di grande diametro | Trivella pali (1) – Escavatore (1) – Pala gommata (1) – Autocarro (1) – Autobetoniera (1) |
| 3        | Scavi galleria                        | 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

|   |  |  |                 |          |
|---|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 21 di 38 |
|   |  |  | Data<br>10/2023 |          |

#### 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                |                    |
| Impianto di betonaggio / Betoniera                             |                  | Autocarro          |
| Trivella pali  |                  | Martello idraulico |
| Rullo (tipo Dynapac FD25 o similari)                           | X                |                    |
| Pala gommata   | X                |                    |

|   |  |  |   |   |                    |
|---|--|--|---|---|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  |   | REV.<br>A   | FOGLIO<br>22 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE |  sinèrgo |  VA<br>D_VisionArchitecture |                    |
|   |  |  |   |   | Data<br>10/2023    |

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 | Impianto di betonaggio / Betoniera | Trivella/ Martello | Rullo  | Pala gommata |
|----------------|----------------------|----------------|-----------|------------------------------------|--------------------|--------|--------------|
| 1              | 0,32                 | 0,71           | 0,89      | 0,89                               | 2,55               | 2,24   | 0,1          |
| 1,25           | 0,2                  | 0,5            | 1,12      | 1,12                               | 3,98               | 3,98   | 0,1          |
| 1,6            | 0,19                 | 0,63           | 0,71      | 0,71                               | 3,17               | 3,55   | 0,1          |
| 2              | 0,12                 | 0,67           | 0,5       | 0,5                                | 2,82               | 3,76   | 0,41         |
| 2,5            | 0,2                  | 0,6            | 0,47      | 0,47                               | 3,77               | 5,62   | 0,41         |
| 3,15           | 0,26                 | 0,45           | 0,45      | 0,45                               | 7,94               | 7,94   | 0,41         |
| 4              | 0,24                 | 0,24           | 0,33      | 0,33                               | 14,13              | 7,94   | 0,48         |
| 5              | 0,25                 | 1,12           | 1,26      | 1,26                               | 17,78              | 9,44   | 0,52         |
| 6,3            | 0,28                 | 5,62           | 2,11      | 2,11                               | 25,12              | 10,59  | 0,5          |
| 8              | 0,3                  | 3,98           | 2         | 2                                  | 56,23              | 12,59  | 0,76         |
| 10             | 0,98                 | 2,51           | 2,04      | 2,04                               | 25,16              | 16,79  | 1,1          |
| 12,5           | 1,88                 | 2,99           | 5,75      | 5,75                               | 17,98              | 100    | 1,25         |
| 16             | 9,89                 | 1,58           | 3,76      | 3,76                               | 31,62              | 53,09  | 2            |
| 20             | 13,34                | 3,98           | 3,55      | 3,55                               | 59,31              | 19,95  | 3            |
| 25             | 16,79                | 19,95          | 3,55      | 3,55                               | 82,91              | 89,13  | 17           |
| 31,5           | 12,59                | 29,85          | 2,24      | 2,24                               | 100                | 50,12  | 17           |
| 40             | 12,02                | 35,48          | 1,5       | 1,5                                | 113,48             | 251,19 | 7,8          |
| 50             | 28,84                | 37,58          | 0,89      | 0,89                               | 89,13              | 141,25 | 15           |
| 63             | 51,88                | 39,81          | 1,06      | 1,06                               | 79,43              | 125,89 | 14           |
| 80             | 8,41                 | 42,17          | 1,33      | 1,33                               | 74,99              | 112,2  | 7,8          |

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 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 dei solai, 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

|   |   |                 |           |                    |
|---|---|-----------------|-----------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE   |                 | REV.<br>A | FOGLIO<br>23 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><br>Mandanti<br>   | Data<br>10/2023 |           |                    |

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 dell'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).
- Per i parametri legati alle caratteristiche geodinamiche del terreno interessato dal progetto si è fatto riferimento alla documentazione geologica, geotecnica e sismica redatta per il progetto; dai risultati delle prospezioni sismiche eseguite nelle diverse campagne di indagine, anche in considerazione della distribuzione delle formazioni geologiche lungo il tracciato e, soprattutto, delle opere da realizzare, è stato possibile definire, in modo cautelativo, le seguenti categorie di sottosuolo:
  - una categoria di sottosuolo di tipo A, corrispondente a ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m, nei seguenti tratti/opere: all'imbocco nord della Galleria Montebonello; dalla Spalla 1 alla Pila 1 del Viadotto Sieve 2 (comprese);
  - una categoria di sottosuolo di tipo B, corrispondente a rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{S,eq}$  compresi tra 360 m/s e 800 m/s, nei seguenti tratti/opere: da inizio tracciato alla Pila 2 del Viadotto Argomena (comprese); in corrispondenza Spalla 2 del Viadotto Argomena;
  - una categoria di sottosuolo di tipo E, corrispondente a terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m, nel seguente tratto: in corrispondenza della Pila 3 del Viadotto Argomena; all'imbocco sud della Galleria Montebonello; tra la Pila 2 del Viadotto Sieve (compresa) e fine tracciato.
- 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 (la realizzazione delle opere non avverrà 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, rappresentativo delle attività attinenti alla realizzazione dei rilevati (stesa e compattazione), il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 70 m.

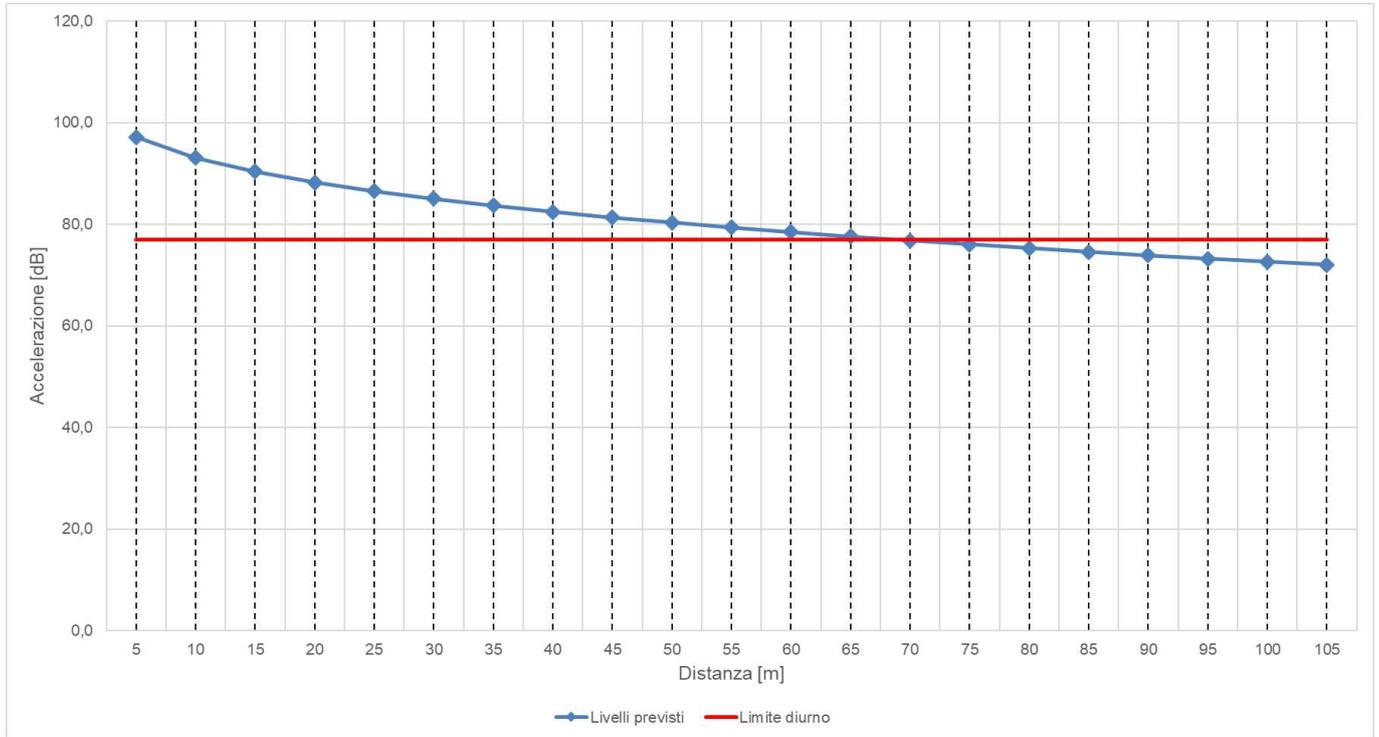


Figura 14 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 1

Per lo scenario 2, rappresentativo delle attività attinenti alla realizzazione delle fondazioni con pali di grande diametro, il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 50 m in corrispondenza del Viadotto Sieve 2 (VI.03) e ad una distanza di circa 30 m in corrispondenza del Viadotto Sieve 1 (VI.01) e del Viadotto Argomena (VI.02).

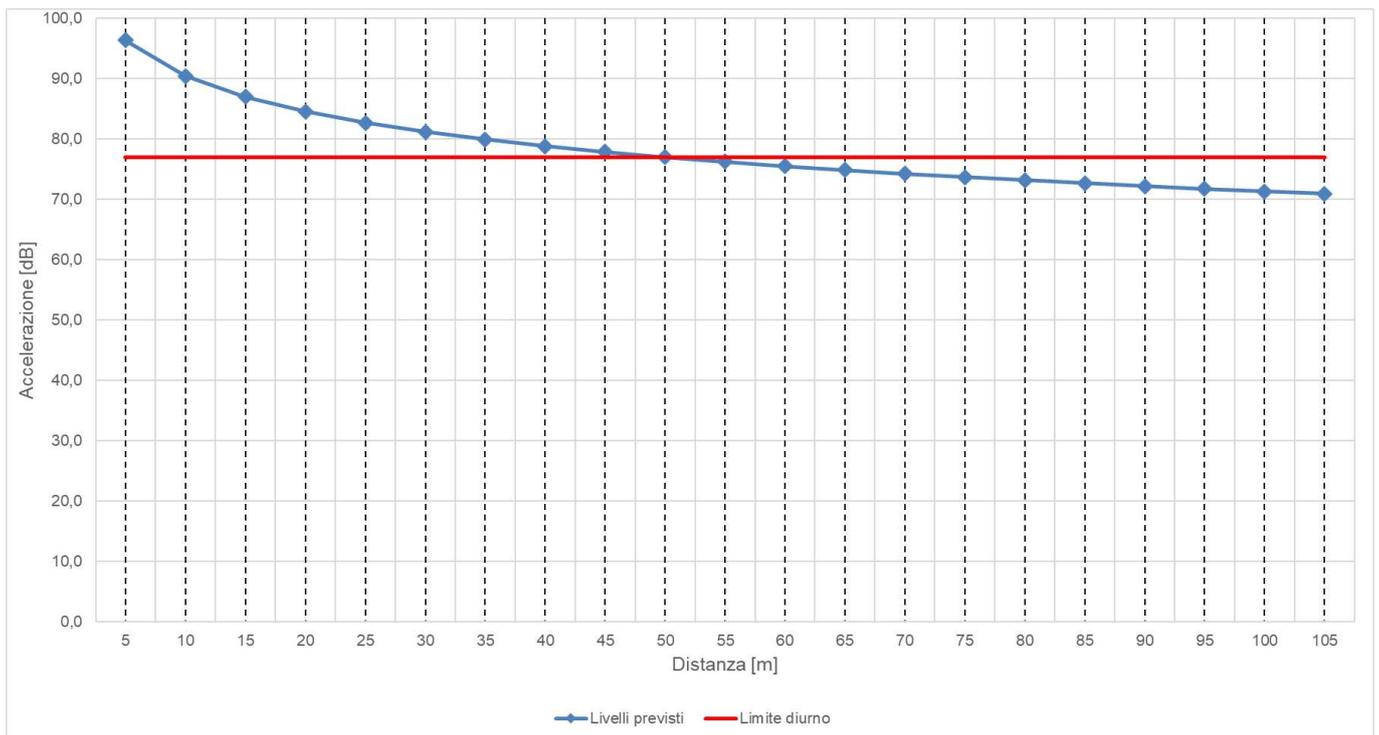


Figura 14 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 2 – Viadotto Sieve 2 (VI.03)

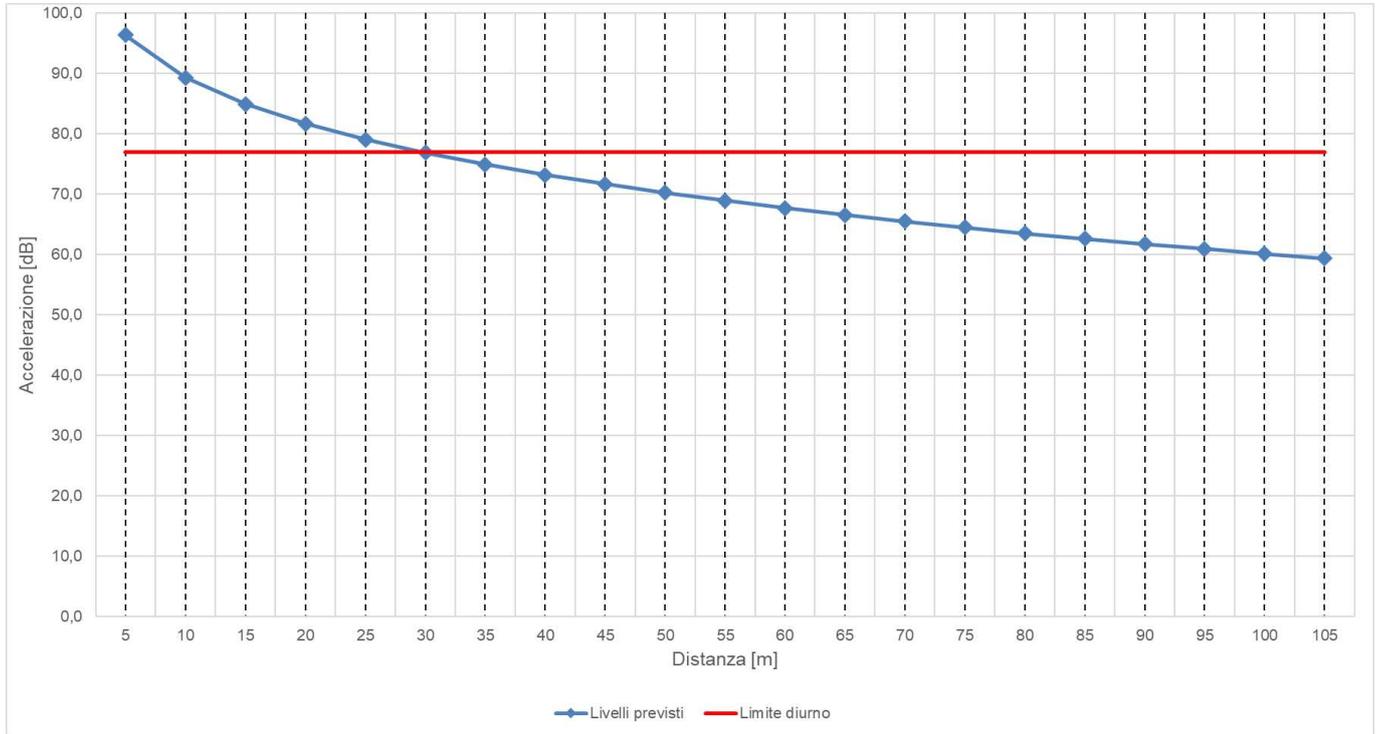


Figura 14 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 2 – Viadotto Sieve 1 (VI.01) e Viadotto Argomenna (VI.02)

Per lo scenario 3, rappresentativo delle attività attinenti agli scavi per la realizzazione della galleria, il limite di 77 dB è raggiunto ad una distanza di circa 80 m in corrispondenza dell'imbocco Sud e ad una distanza di circa 105 m in corrispondenza dell'imbocco Nord.

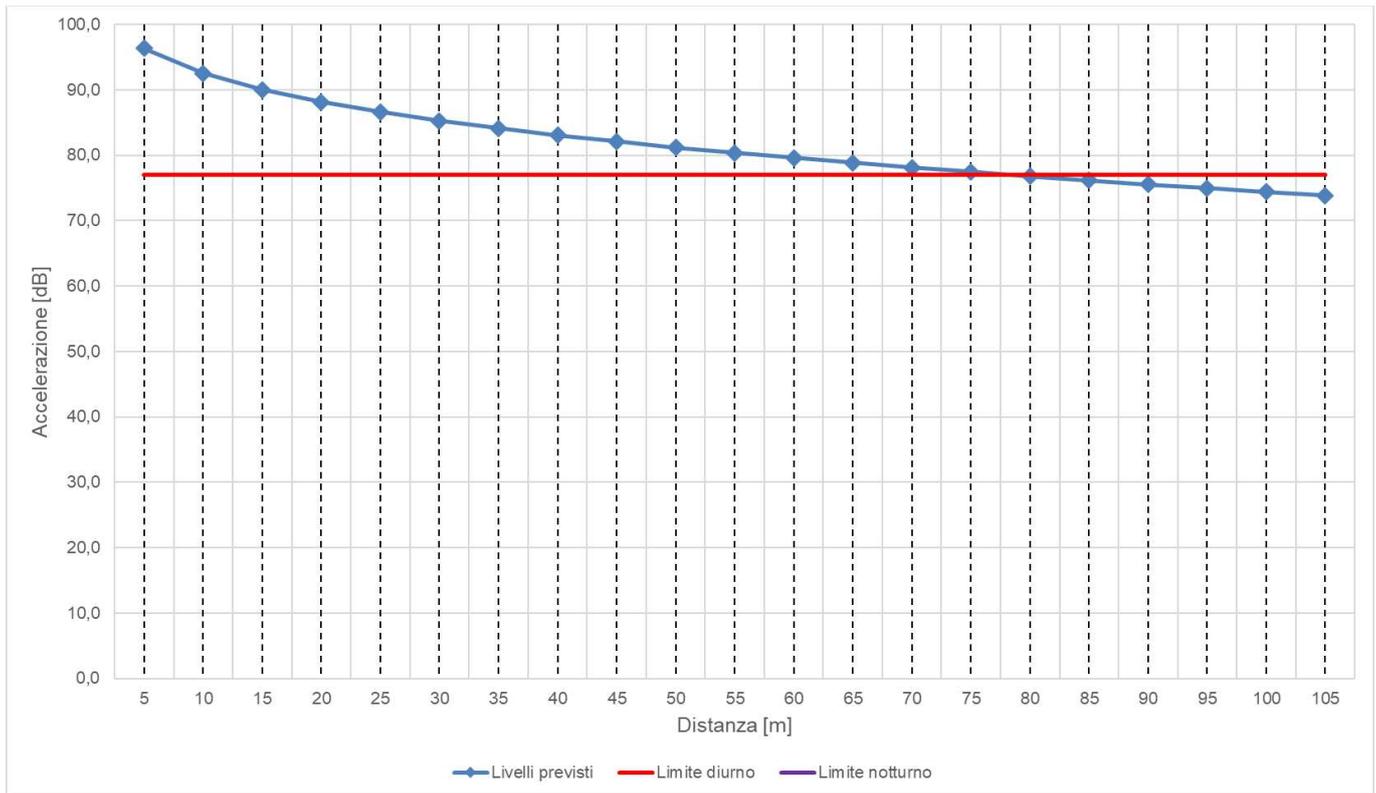


Figura 14 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 3 – Imbocco Sud galleria

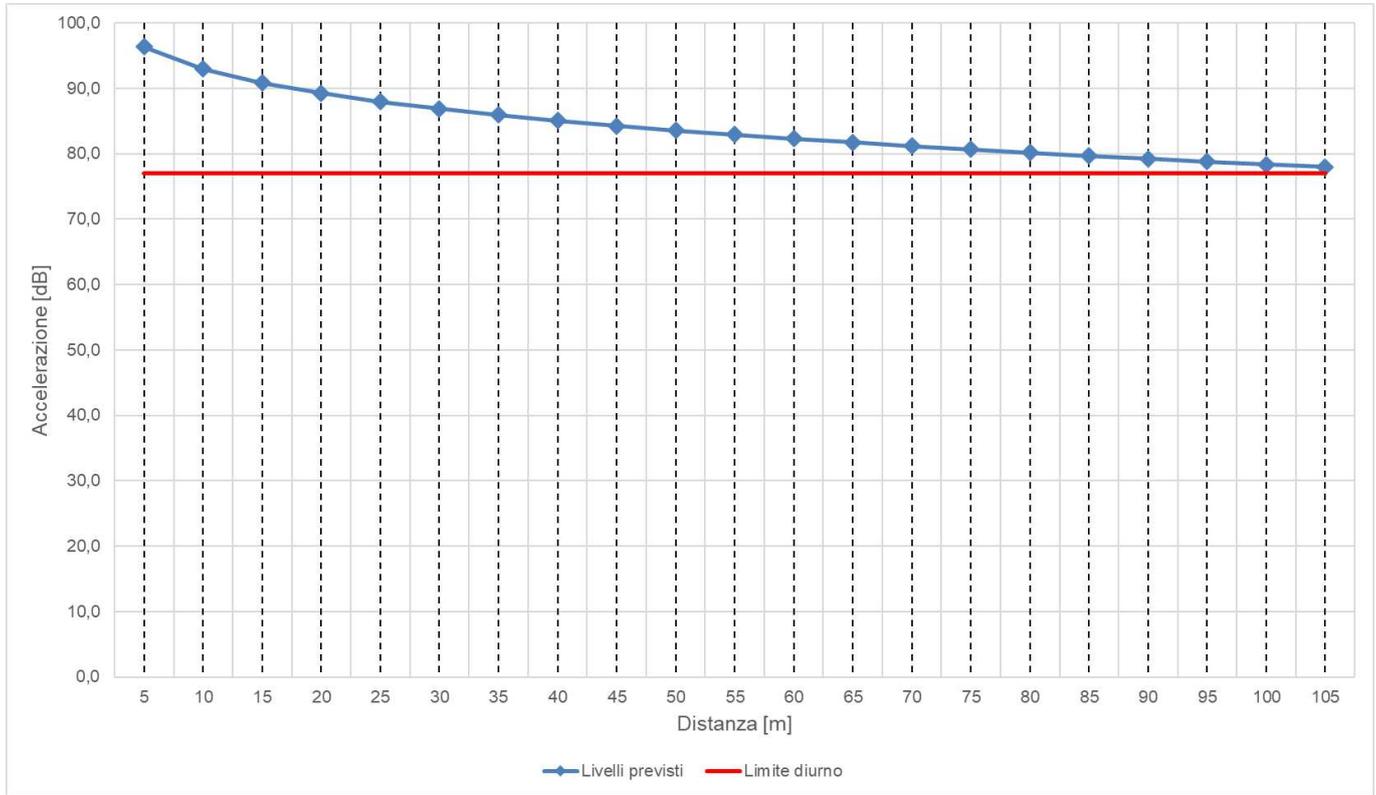


Figura 14 - Propagazione dei livelli di accelerazione stimati per lo scenario 3 – Imbocco Nord galleria

|   |  |   |                |                                   |
|---|--|---|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |   | REV.           | FOGLIO                            |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETREVA</b> s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |
|   |  |   |                | Data<br>10/2023                   |

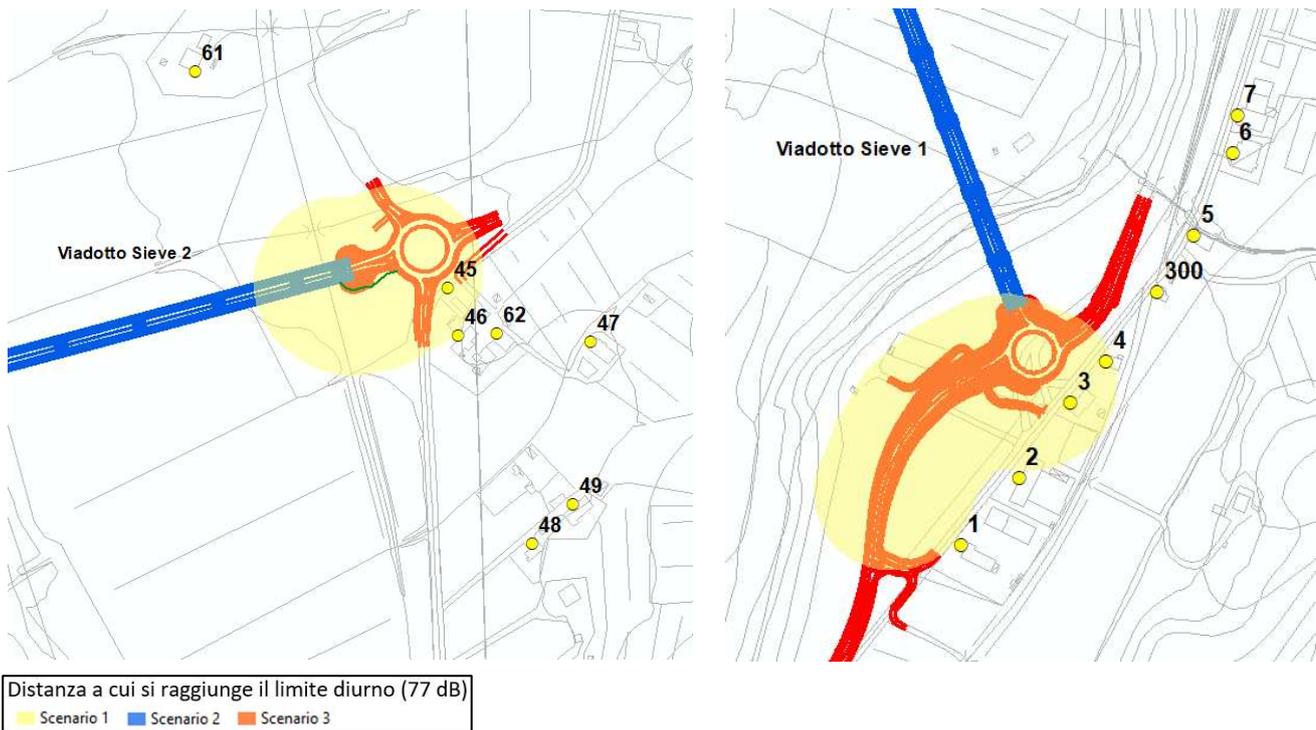
A distanze inferiori rispetto a quanto sopra indicato, potranno quindi verificarsi superamenti dei limiti relativi al disturbo alle persone secondo la norma UNI 9614; di seguito la tabella di sintesi dei risultati.

| Scenario | Descrizione attività           | Limite diurno per abitazioni (77 dB) |
|----------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1        | Realizzazione rilevati         | 70 m                                 |
| 2        | Pali di fondazione VI.03       | 50 m                                 |
| 2        | Pali di fondazione VI.01-VI.02 | 30 m                                 |
| 3        | Scavi galleria-Imbocco Sud     | 80 m                                 |
| 3        | Scavi galleria-Imbocco Nord    | 105 m                                |

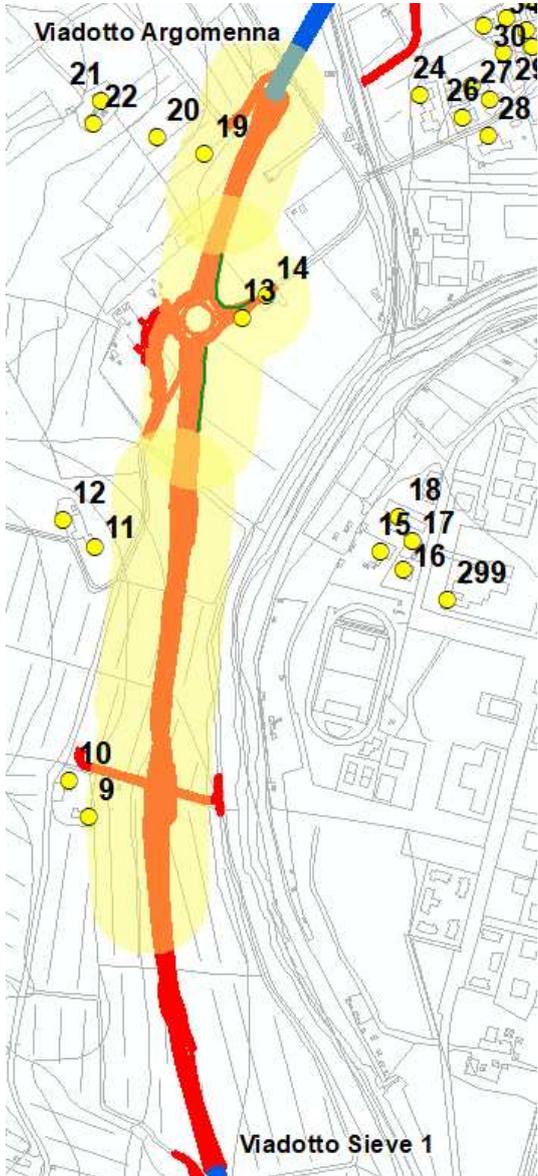
Tabella 6 - Distanze entro cui è presente disturbo vibratorio, per le diverse ipotesi di lavorazioni considerate

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).

#### Scenario 1 - Realizzazione rilevati



|  |   |  |                  |                    |
|--|---|--|------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T01-IA39-AMB-RE01</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>28 di 38 |
|  |   |  | Data<br>10/2023  |                    |

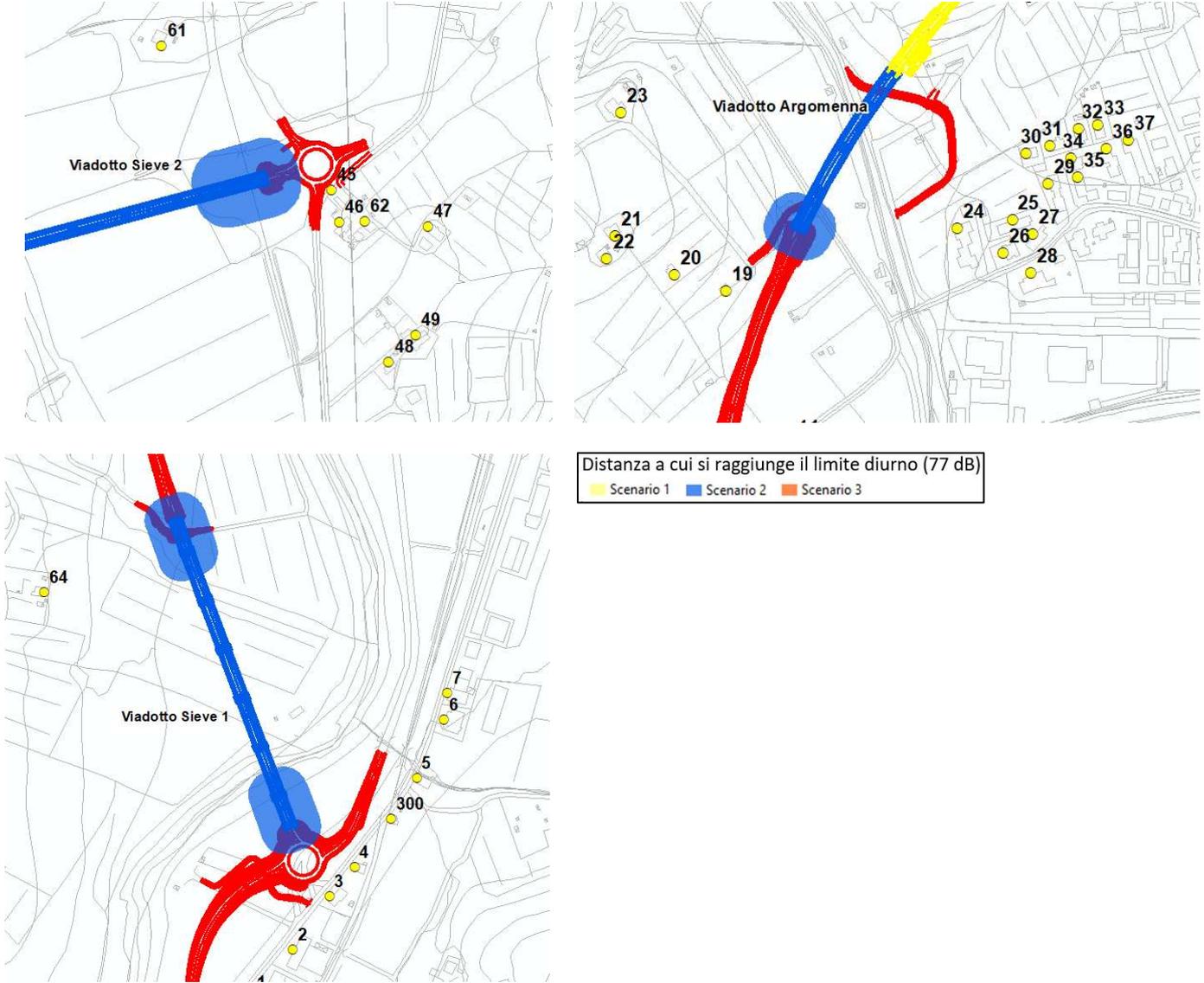


Distanza a cui si raggiunge il limite diurno (77 dB)

- Scenario 1
- Scenario 2
- Scenario 3

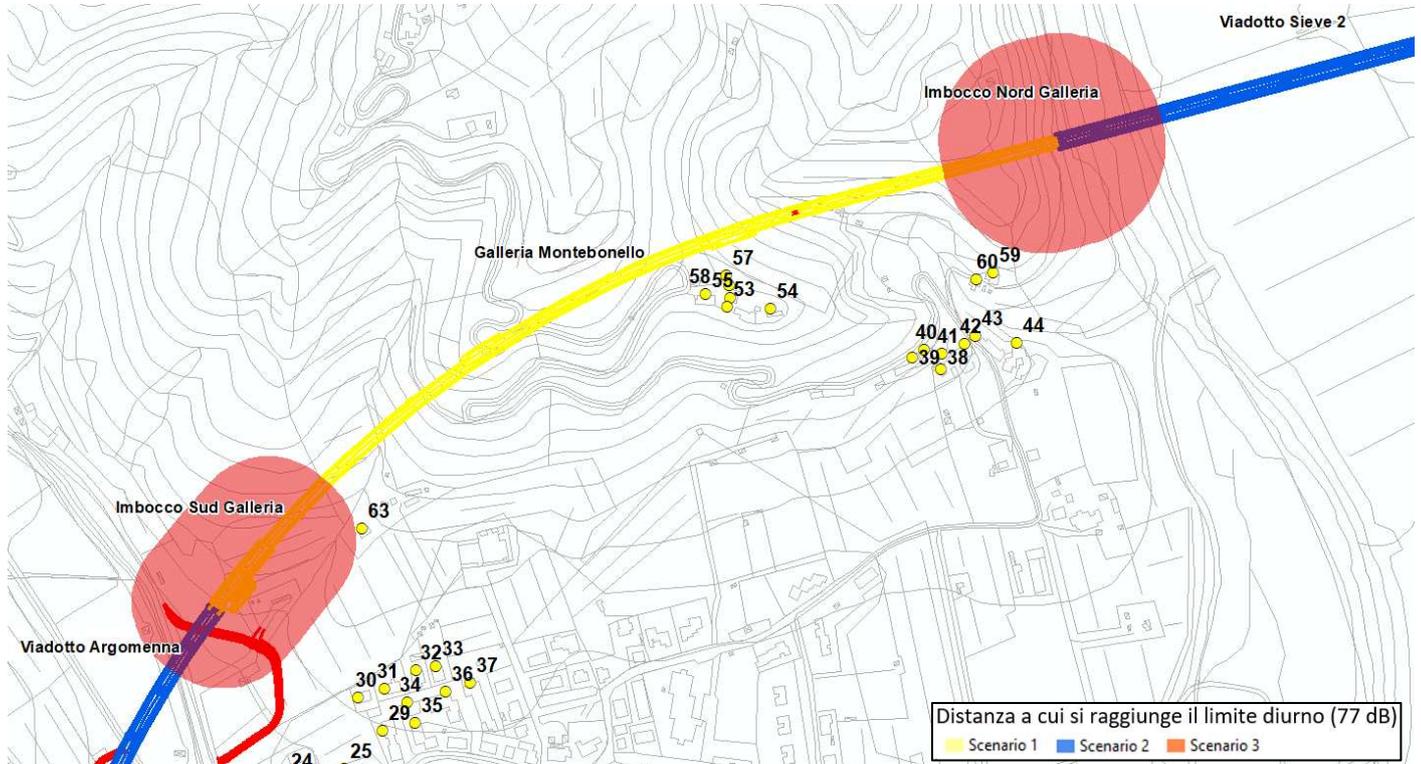
|  |   |  |                  |                    |
|--|---|--|------------------|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T01-IA39-AMB-RE01</b> | PROGETTAZIONE<br>MANDATARIA<br> MANDANTI<br>   |  | REV.<br><b>A</b> | FOGLIO<br>29 di 38 |
|  |   |  |                  | Data<br>10/2023    |

**Scenario 2 - Realizzazione pali di fondazione di grande diametro**



|  |  |  |                |                                   |
|--|--|--|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><b>T01-IA39-AMB-RE01</b> | PROGETTAZIONE  |  | REV.           | FOGLIO                            |
|  | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETA</b><br>ENERGIA VALUTAZIONE AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D.VisionArchitecture |
|  |  |  |                | Data<br>10/2023                   |

### Scenario 3 - Realizzazione scavi galleria



Dalle analisi svolte emerge dunque come alcune lavorazioni potrebbero generare livelli vibratori tali da interessare alcuni edifici residenziali localizzati lungo il tracciato. Complessivamente i ricettori potenzialmente interessati dal disturbo vibratorio sono risultati essere 10.

| Scenario | Descrizione        | Limite diurno per abitazioni (77 dB) | Numero ricettori impattati | Id Ricettori           |
|----------|--------------------|--------------------------------------|----------------------------|------------------------|
| 1        | Rilevati           | 70 m                                 | 9                          | 2-3-4-9-13-14-19-45-46 |
| 2        | Pali di fondazione | 50 e 30 m                            | 0                          | -                      |
| 3        | Scavi galleria     | 80 e 105 m                           | 1                          | 63                     |

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 precisa delle lavorazioni stesse).

Tra i ricettori sopra individuati, ne saranno selezionati alcuni presso cui condurre le attività di monitoraggio in corso d'opera; i punti selezionati sono quelli più idonei, sulla base della loro localizzazione rispetto alle sorgenti emittive esaminate, a monitorare eventuali variazioni dello stato della componente durante i lavori. A fronte di quanto sinora descritto, si ritiene altresì 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 (per maggiori dettagli ed approfondimenti si rimanda alla documentazione di cui al PMA allegata al progetto).

|   |  |  |                 |          |
|---|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO<br/>ITER</b><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br>EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | A               | 31 di 38 |
|   |  |  | Data<br>10/2023 |          |

## 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, 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.

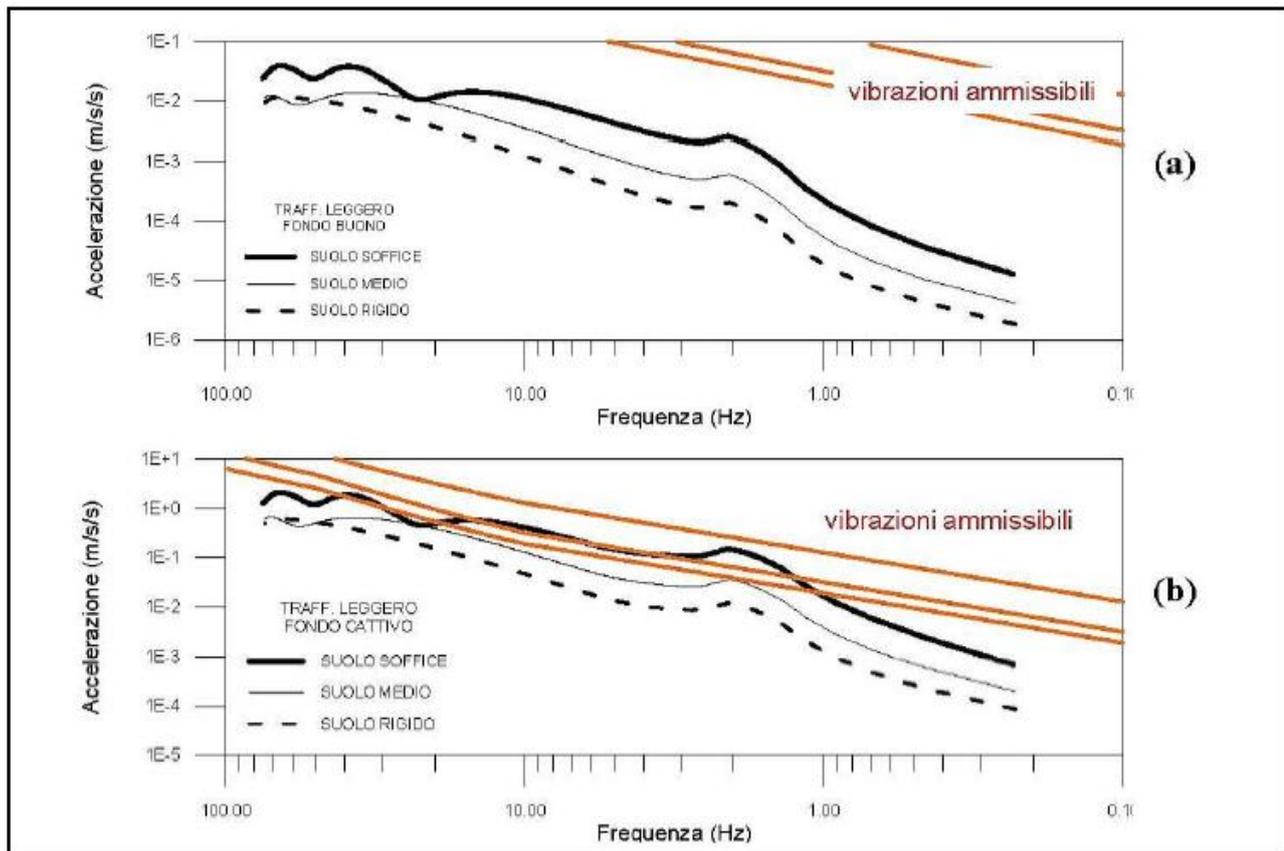


Figura 15 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente

|   |  |  |  |   |
|---|--|--|--|---|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.<br>A  | FOGLIO<br>32 di 38  |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br>EITRIVA s.r.l.<br>ENERGIA VIBRAZIONE AMBIENTE | <br>sinèrgo | <br>VA<br>DVisionArchitecture |
|   |  |  | Data<br>10/2023  |   |

## 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, 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, agenti demolitori espansivi non esplosivi, ...);
- 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 se possibile le prime ore della mattina, la pausa pranzo e le ore serali.

|   |   |  |   |        |
|---|---|--|---|--------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE   |  | REV.  | FOGLIO |
|   | MANDATARIA<br> PRO ITER<br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br> EITVIA s.r.l.<br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE |  sinèrgo | A      |
|   |   |  | Data<br>10/2023   |        |

## Allegato 1 - Aggiornamento al 2017 della norma UNI 9614

La nuova versione della norma modifica in modo sostanziale la vecchia, introducendo un approccio innovativo per le modalità di valutazione dei disturbi da vibrazioni, facendo riferimento alla norma ISO 2631.2:2003, per i metodi di misura e valutazione, ed alla norma norvegese NS 8176.E.

La norma è applicabile a tutti i fenomeni che possono originare vibrazioni negli edifici, come, ad esempio, traffico su gomma o su rotaia, attività industriali o di specifici macchinari, attività di cantiere, esplosioni, ecc.; non è invece applicabile a vibrazioni derivanti da fenomeni sismici, alla valutazione di danni strutturali, architettonici o “cosmetici” agli edifici, per la quale esistono altre norme di riferimento, all’esame di problematiche connesse all’igiene sul lavoro, o alle attività di manutenzione preventiva/predittiva di macchinari o di influenza su strumenti particolarmente sensibili. Non si applica inoltre a casi di frequenze vibrazionali inferiori al terzo di banda d’ottava centrato a 1 Hz.

Anzitutto la nuova norma 9614:2017 distingue i tipi di sorgenti in base a:

- Posizione: interna o esterna agli edifici.
- Funzione: per sorgenti legate ad “attività essenziali” di pubblico servizio, per le quali un’eventuale disattivazione potrebbe generare un’interruzione di pubblico servizio con danni a persone, cose o attività, possibili pericoli o problemi di ordine pubblico, ecc (ospedali, gasdotti, elettrodotti, acquedotti, ecc); per sorgenti legate ad “attività non interrompibili”, per le quali non è possibile, a meno di interventi di manutenzione programmata o straordinaria, interrompere in tempi rapidi l’attività senza produrre danni o pericoli o alterazioni di prodotto (sorgenti industriali e/o a ciclo continuo, impianti di produzione/distribuzione di energia, sistemi di trasporto pubblico); per sorgenti “di altra natura”.
- Caratteristiche di durata delle vibrazioni prodotte: per sorgenti continue o semicontinue (impianti industriali); per sorgenti intermittenti presenti per gran parte della giornata (strade, metropolitane, ferrovie); per sorgenti intermittenti presenti per una parte limitata della giornata (ascensori interni a un edificio); per sorgenti temporanee presenti per gran parte della giornata (cantieri); per sorgenti temporanee presenti per una parte limitata del giorno.

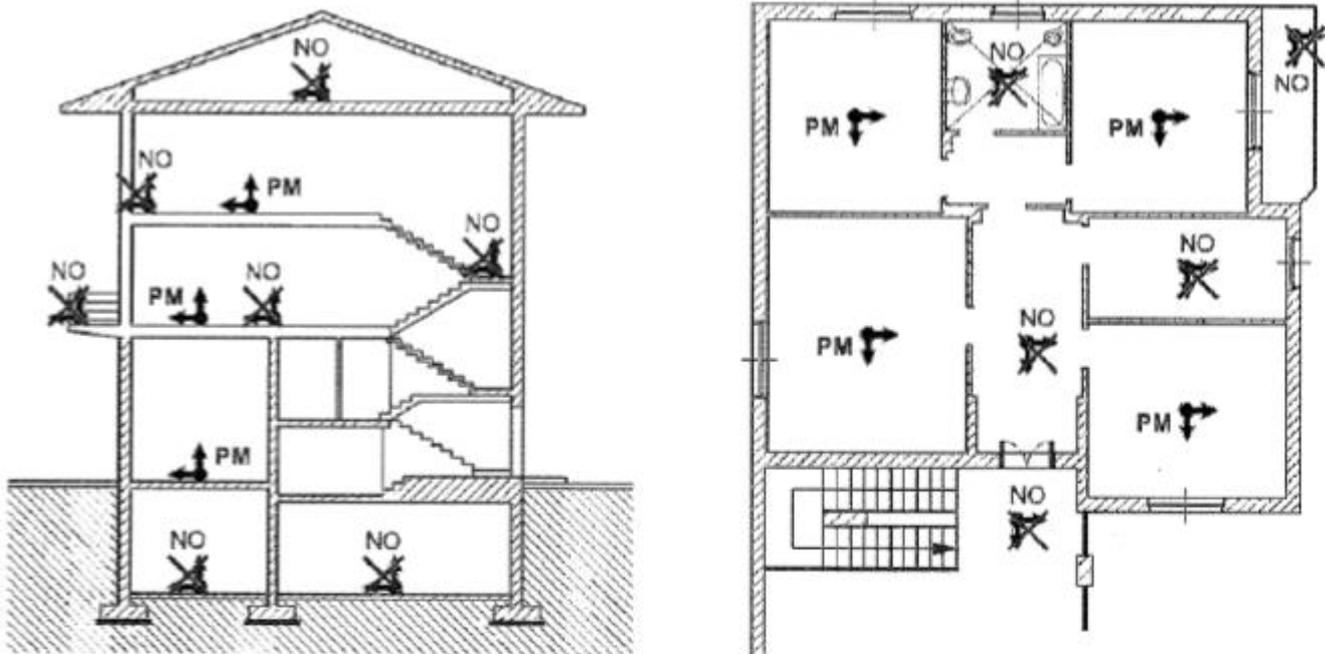
La classificazione di cui sopra viene proposta come descrittore univoco per l’identificazione dei fenomeni.

Le misure devono essere eseguite dopo un’analisi accurata dei fenomeni osservati, condotta sulla base degli aspetti legati alla tipologia di sorgente e di edificio, ed alle posizioni dei recettori e relativi tempi di permanenza.

La grandezza cinematica di riferimento rappresentativa del disturbo è individuata nell’accelerazione assoluta, che necessita di una misura diretta per mezzo di sensori accelerometrici, con misura simultanea sui tre assi ortogonali di riferimento per la struttura dell’edificio o del corpo umano (per convenzione: asse Z verticale).

Le postazioni di misura vanno individuate sulla base delle reali condizioni di utilizzo degli ambienti da parte degli abitanti, escludendo quindi eventuali ambienti di servizio (ripostigli, servizi igienici, cantine, solai, corridoi, giardini, vie di accesso, balconi/terrazzi, scale, pianerottoli e ambienti non abitabili secondo le vigenti normative indipendentemente dal loro reale uso). Le misure per la valutazione del disturbo alla persona vanno eseguite, in generale, sui pavimenti o, in subordine, su elementi strutturali che possono essere a diretto contatto con il corpo umano durante la normale attività all’interno dell’ambiente o su superfici di appoggio per mobili utilizzati per il riposo, ma non su soffitti, controsoffitti, mensole, vetrate, suppellettili, mobili, letti e arredi in generale. Vanno anche evitate posizioni di misura su superfici a scarsa aderenza con le strutture (piastrelle non aderenti al massetto), morbide e/o cedevoli (tappeti, moquette, ecc.) o per le quali l’ampiezza delle vibrazioni può derivare anche da cattivo stato di manutenzione. Ovviamente i punti di misura devono essere individuati nei punti ove si rileva il più elevato dei valori efficaci di accelerazione ponderata  $a_w(t)$ , ma lontano da eventuali punti singolari. La seguente figura mostra alcune possibili individuazioni di punti di misura adeguati o non adeguati alle valutazioni oggetto della norma in esame.

|   |  |   |                |                                   |
|---|--|---|----------------|-----------------------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |   | REV.           | FOGLIO                            |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA VIBRAZIONI AMBIENTE | <b>sinèrgo</b> | <b>VA</b><br>D_VisionArchitecture |
|   |  |   |                | Data<br>10/2023                   |



*Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura*

La durata complessiva delle misure dipende dal numero di eventi necessario ad assicurare una ragionevole accuratezza statistica delle misure, tenendo conto sia della variabilità della sorgente che della natura dell'ambiente di misura. Se l'esposizione è prodotta da fenomeni di diverso tipo presenti in diversi periodi, è necessario procedere ad un'analisi separata per ciascun periodo. L'appendice A della norma fornisce criteri generali per l'individuazione degli eventi da prendere in considerazione nel caso di fenomeni connessi a traffico tramviario o stradale, attività di cantiere, sorgenti industriali, attività umane dirette e vibrazioni stazionarie ed ergodiche. Per le misure, resta comunque fondamentale la verifica dell'effettiva ed esaustiva rappresentatività della situazione in esame.

La norma fornisce comunque indicazioni generali sul numero minimo consigliato di eventi da prendere in considerazione per i singoli casi:

- Per fenomeni caratterizzati da un elevato numero di eventi distinti: almeno 15 eventi;
- Per fenomeni generati da attività umane dirette con eventi distinguibili: almeno 25 eventi;
- Per fenomeni stazionari, ergodici o assimilabili che non danno luogo ad eventi distinti (attività industriali o attività umane dirette con eventi non facilmente distinguibili): almeno 25 eventi;
- Per fenomeni caratterizzati da un ridotto numero di eventi si possono eseguire misurazioni anche in giorni diversi per acquisire complessivamente i segnali relativi ad almeno 5 eventi;
- Gli eventi molto rari (indicativamente con occorrenza inferiore a un evento ogni due settimane) sono considerati "non disturbanti" ai fini della UNI 9614:2017, in virtù della loro scarsa incidenza temporale.

Per la determinazione del presunto disturbo vibrazionale generato da una specifica sorgente devono essere misurate sia le vibrazioni immesse che quelle residue. Le vibrazioni residue vanno misurate nello stesso punto e con le stesse modalità e criteri utilizzati per le vibrazioni immesse, considerando ricomprese nella componente residua le vibrazioni eventualmente rilevate in ambiente lavorativo e connesse all'attività produttiva o agli impianti al suo servizio.

Nel caso di sorgenti continue classificabili come attività essenziali di pubblico servizio, non è ovviamente possibile la misura delle vibrazioni residue, rendendo accettabile la misura delle sole vibrazioni immesse, ma mantenendo la possibilità di eseguire rilievi di vibrazioni residue in occasione di fermi per manutenzioni programmate o nel corso di fasi di ridotta attività, al fine di ottenere almeno una stima della componente vibrazionale residua. Per le attività non

|   |  |  |                 |          |
|---|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 35 di 38 |
|   |  |  | Data<br>10/2023 |          |

interrompibili, ma non essenziali, la misura delle vibrazioni residue è invece richiesta mediante una disattivazione programmata delle sorgenti, previa una valutazione preliminare cautelativa della significatività delle vibrazioni residue stesse e del loro peso rispetto alle vibrazioni immesse. Per sorgenti semi-continue, intermittenti o temporanee la misura delle vibrazioni residue è invece obbligatoria.

La strumentazione da utilizzare per la valutazione del disturbo da vibrazioni deve permettere, oltre che l'acquisizione e la registrazione del segnale accelerometrico, anche l'elaborazione in linea dei dati. È accettato anche l'uso di sistemi di acquisizione dati con memorizzazione digitale della storia temporale accelerometrica con successiva post elaborazione off-line mediante specifico software, dandone esplicita indicazione, rispondente comunque alle caratteristiche di analisi richieste dalla UNI EN ISO 8041-1.

Le caratteristiche metrologiche della catena di misura (curva di risposta in frequenza, dinamica del sistema di acquisizione, rumore di fondo, filtri "band limiting", ponderazione  $W_m$ , ecc.) devono essere conformi alla UNI EN ISO 8041-1. In particolare, si devono rispettare i seguenti requisiti:

- Sensibilità nominale non inferiore a  $10\text{mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ ;
- Risposta in frequenza della catena di misura, comprensiva dell'acquisizione, lineare con tolleranza  $\pm 5\%$  da 0.5 Hz a 250 Hz;
- Acquisizione digitale con frequenza di campionamento non minore di 1500 Hz, presenza di filtro anti-aliasing con frequenza non minore di 600 Hz, risoluzione preferenziale di 24 bit e minima di 16 bit;
- Valore efficace del rumore strumentale, dovuto a fenomeni casuali e non dipendenti né dalle vibrazioni immesse né da quelle residue, almeno cinque volte inferiore al minimo valore efficace dei segnali da misurare.

Il montaggio degli accelerometri deve essere tale da garantire la trasmissione rigida del moto dal sistema vibrante all'accelerometro almeno della banda 0-500 Hz e deve essere eseguito facendo riferimento alla norma UNI ISO 5348 o secondo le indicazioni fornite dal produttore del sensore. Le modalità di installazione devono essere riportate nel rapporto di misura e devono essere scelte in relazione alle condizioni dei piani di posa, prevedendo eventualmente l'utilizzo, anche contemporaneo, di inserti/tasselli (meccanici o chimici) inseriti nel piano di posa, collaggi rigidi (mastici, resine, cera d'api), magneti, collegamenti bullonati o masse appoggiate isostaticamente sulle superfici alle quali è vincolato l'accelerometro (configurazione non concessa per superfici morbide o irregolari).

Il corretto funzionamento della catena di misura deve essere verificato prima e dopo ogni misura mediante apposito calibratore a norma UNI EN ISO 8041-1; sono ammessi calibratori a frequenza fissa pari a 1000 rad/s ed ampiezza di  $10\text{m}/\text{s}^2$ . Ogni tre anni l'intera catena di misura deve essere sottoposta a verifica di taratura.

La strumentazione di misura deve infine garantire l'acquisizione del segnale con riferimento alle specifiche di cui al punto 6 della norma UNI 11568:2015.

Per l'elaborazione delle misure ed il calcolo dei parametri del disturbo, la norma UNI 9614:2017 suggerisce un metodo sequenziale valido per tutti i tipi di sorgente ed adeguato a coprire sia fenomeni di media e breve durata, sia fenomeni impulsivi caratterizzati da un fattore di cresta molto elevato. L'elaborazione del segnale corrispondente ad ogni singolo evento monitorato comporta i seguenti passaggi:

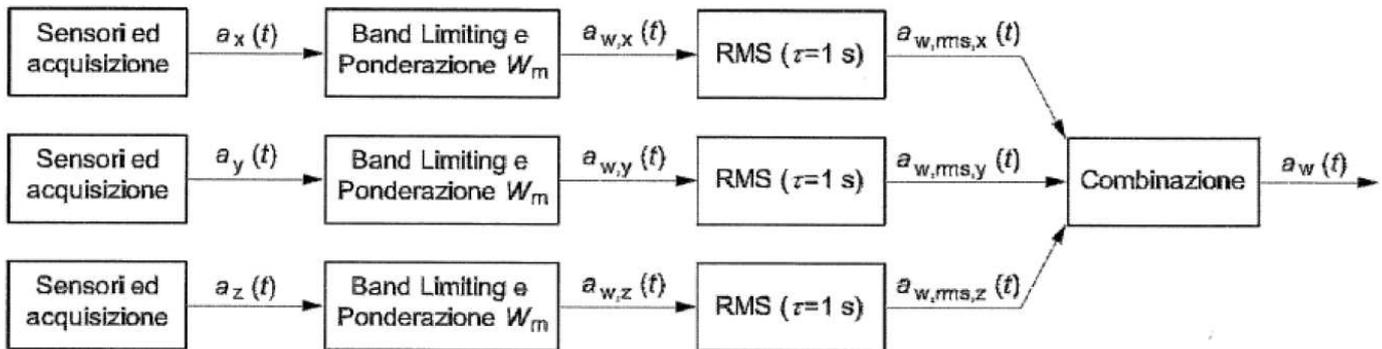
1. Filtraggio con filtro passa banda e con filtro di ponderazione: l'accelerazione rilevata sui tre assi  $a_x(t)$ ,  $a_y(t)$  e  $a_z(t)$  viene preliminarmente filtrata con un filtro passa banda ("band limiting"), con specifiche funzioni di trasferimento (§ punto 8.1.1 della norma), al fine di selezionare le frequenze significative per la risposta del corpo umano al disturbo. Successivamente si applica un filtro di ponderazione in frequenza che utilizza la curva  $W_m$  definita dalla ISO 2631-2, anch'esso con una specifica funzione di trasferimento (§ punto 8.1.2 della norma). Al termine del procedimento di filtraggio si ottiene. Per il j-esimo asse, l'accelerazione ponderata  $a_{w,j}(t)$ .

|   |  |   |  |                    |
|---|--|---|--|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |   | REV.<br>A  | FOGLIO<br>36 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><b>PRO ITER</b><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><b>ETIEM</b><br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <b>sinèrgo</b><br><b>VA</b><br>DVisionArchitecture |                    |
|   |  |   | Data<br>10/2023                                    |                    |

- Calcolo del valore efficace dell'accelerazione assiale ponderata: per l'intera storia temporale del segnale ponderato, viene calcolato, secondo quanto indicato dalla norma UNI EN ISO 8041-1:2017 al punto D.1, l'andamento nel tempo del valore efficace dell'accelerazione ponderata, in riferimento a ciascun asse cartesiano.
- Calcolo dell'accelerazione ponderata totale efficace: viene eseguito per combinazione (secondo UNI ISO 2631-1:1997, punto 6.5, con  $K_x=k_y=k_z=1$ ), istante per istante, a partire dalle tre accelerazioni assiali ponderate calcolate in precedenza secondo la seguente relazione:

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

Le precedenti tre fasi di calcolo sono riassunte nella seguente figura.



Schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017

|   |  |  |                 |          |
|---|--|--|-----------------|----------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  | REV.            | FOGLIO   |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto Infrastrutture Territorio s.r.l. | MANDANTI<br>  <br>D_VisionArchitecture | A               | 37 di 38 |
|   |  |  | Data<br>10/2023 |          |

Dall'accelerazione ponderata efficace,  $a_w(t)$ , si possono poi ottenere le seguenti grandezze:

- a) Massima accelerazione ponderata, definita come il massimo livello di accelerazione ponderata efficace all'interno del singolo evento  $j$ -esimo, ovvero:

$$a_{w,max,j} = \max(a_w(t))$$

- b) Massima accelerazione statistica,  $a_{w,95}$  data dalla seguente relazione:

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

dove:  $a_{w,max}$  è il valore medio della massima accelerazione ponderata calcolato come media aritmetica delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  con  $j$  che rappresenta gli eventi considerati, ovvero:

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

$\sigma$  è lo scarto tipo della distribuzione delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  calcolate mediante la seguente relazione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (a_{w,max,j} - \overline{a_{w,max}})^2}{N - 1}}$$

Nel caso in cui non sia possibile misurare più di 5 eventi, non si ritiene attendibile  $a_{w,95}$  così ottenuto, ed esso deve quindi essere stimato mediante la più elevata delle massime accelerazioni ponderate  $a_{w,max,j}$  relative agli  $N$  eventi misurati.

Inoltre, è possibile determinare anche le vibrazioni associate ad una specifica sorgente ritenuta fonte di disturbo mediante l'accelerazione ponderata massima statistica della sorgente,  $V_{sor}$ , da calcolare a partire dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni immesse,  $V_{imm}$ , e dall'accelerazione ponderata massima statistica delle vibrazioni residue,  $V_{res}$ , secondo la seguente relazione:

$$V_{sor} = \sqrt{V_{imm}^2 + V_{res}^2}$$

Per la determinazione del vero valore del parametro  $a_{w,95}$  si utilizza un procedimento di misure ripetute di vibrazioni su edifici, misure, per loro stessa natura, soggette, in generale, ad indeterminazione statistica derivante da incertezza strumentale, da quella relativa alla scelta delle postazioni di misura e da quella legata alla natura ed alle caratteristiche di variabilità del fenomeno in esame; dunque, anche  $a_{w,95}$  sarà un parametro soggetto ad indeterminazione. L'incertezza strumentale e quella legata alla scelta delle posizioni di misura sono ben caratterizzate nella UNI 9614:2017 e, per questo, sono, in generale, meno importanti dell'indeterminazione connessa alle specifiche caratteristiche del fenomeno vibratorio in esame. Di conseguenza le incertezze globali delle determinazioni sono influenzate principalmente dall'incertezza sulle caratteristiche del fenomeno e quindi dalla natura della sorgente, dalle modalità di generazione e di rilascio di energia vibrazionale e dalla proprietà fisico-meccaniche del mezzo entro il quale si propaga il fenomeno vibratorio, proprietà eventualmente anche variabili nel tempo.

In generale è quindi pressoché impossibile fornire indicazioni quantitative sull'incertezza del fenomeno vibratorio ed è quindi necessario valutare la dispersione dei dati mediante induzione motivata o l'esecuzione di misure in periodo diversi.

|   |  |  |  |  |                    |
|---|--|--|--|--|--------------------|
| CODIFICA DOCUMENTO<br><br>T01-IA39-AMB-RE01 | PROGETTAZIONE  |  |  | REV.<br>A  | FOGLIO<br>38 di 38 |
|   | MANDATARIA<br><br>Progetto<br>Infrastrutture<br>Territorio s.r.l. | MANDANTI<br><br>ENERGIA VALUTA AMBIENTE | <br>sinèrgo | <br>D_VisionArchitecture | Data<br>10/2023    |

Ovviamente una significativa riduzione dell'indeterminazione può essere ottenuta con l'incremento del numero di eventi analizzati anche oltre le indicazioni fornite, in generale, dalla UNI 9614:2017 (punto 6.3).

Una volta determinato il parametro descrittore della vibrazione di una sorgente,  $V_{sor}$ , è possibile confrontare i suoi valori con specifici limiti di disturbo caratteristici di diversi tipi di ambienti e di diversi periodi della giornata. Ad esempio, per ambienti ad uso abitativo, i limiti di riferimento massimi per la massima accelerazione ponderata della sorgente,  $V_{sor}$ , sono:

- Periodo diurno:  $7.2 \text{ mm/s}^2$
- Periodo notturno:  $3.6 \text{ mm/s}^2$
- Periodo diurno di giornate festive:  $5.4 \text{ mm/s}^2$

Il seguente schema riepiloga i limiti di riferimento individuati dalla norma UNI 9614:2017 per particolari ambienti diversi da quello residenziale/abitativo.

- Ambienti di lavoro (1)  $V_{sor} = 14 \text{ mm/s}^2$
- Ospedali, case di cura ed affini (2)  $V_{sor} = 2 \text{ mm/s}^2$
- Asili e case di riposo (3)  $V_{sor} = 3.6 \text{ mm/s}^2$
- Scuole (4)  $V_{sor} = 5.4 \text{ mm/s}^2$

Note:

- (1) limiti indicati fermi restando gli obblighi derivanti dalla protezione dei lavoratori ex D.Lgs. 81/08 e s.m.i, e riferendosi a vibrazioni immesse da sorgenti esterne e non connesse alle attività (le vibrazioni connesse alle attività produttive fanno parte della componente residua  $V_{res}$ )
- (2) limiti validi indipendentemente dall'orario, per degenze ordinarie, e con misure effettuate al pavimento in corrispondenza del letto dei pazienti
- (3) limiti validi anche in orario diurno, limitatamente ai periodi effettivamente utilizzati per il riposo diurno (prime ore del pomeriggio)
- (4) limiti validi per il periodo di effettivo utilizzo da parte degli allievi e limitatamente alle aule didattiche

Nel caso in cui le vibrazioni residue,  $V_{res}$ , avessero un valore maggiore del 50% di quelle immesse,  $V_{imm}$ , il disturbo prodotto dalle vibrazioni della sorgente,  $V_{sor}$ , può essere ritenuto trascurabile.