

Variante alla S.S. 45 "Val di Trebbia"
Comuni di Torriglia e Montebruno
dal Km 31+500 (Costafontana) al Km 35+600 (Montebruno)
2° stralcio funzionale

PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

I PROGETTISTI:

Ing. Giuseppe Danilo Malgeri
Ordine Ing. di Roma n. A34610

Ing. Angelo Dandini
Ordine Ing. di Frosinone n. A918

Geol. Maurizio Martino
Ordine Geologi del Lazio n. 457

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Arch. Roberto Roggi

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO :

Ing. Fabrizio Cardone

PROTOCOLLO

DATA

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Analisi ambientale - Vibrazioni

Relazione integrativa vibrazioni

CODICE PROGETTO		NOME FILE	REVISIONE	SCALA:
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.		
D P G E 0 3	D	1 7 0 1	T 0 0 I A 3 4 A M B R E 0 5	A
D				
C				
B	Revisione a seguito di Richiesta Integrazioni prot. CTVA 7867	Gen. 2023		
A	EMISSIONE		
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO
				APPROVATO

SOMMARIO

1	PREMESSA	1
2	RICHIESTE DI INTEGRAZIONE MiTE PUNTO 8. VIBRAZIONI	2
3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
3.1	ISO 2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni"	3
3.2	UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"	4
3.3	UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"	12
3.4	Norma UNI 11048 – "Vibrazioni meccaniche ed urti - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo"	14
3.5	Riferimenti Bibliografici	14
4	ANALISI DEI RICETTORI	16
5	ANALISI DEI POTENZIALI IMPATTI IN FASE DI CANTIERE	17
5.1	Definizione del disturbo vibrazionale	18
5.2	Metodologia per la valutazione dei livelli vibrazionali indotti dal cantiere e dai mezzi di trasporto ..	19
5.3	Modello di calcolo	21
5.3.1	Sorgenti superficiali	21
5.3.2	Sorgenti in profondità.....	23
5.3.3	Sintesi delle ipotesi assunte	24
5.4	Ipotesi di base	25
5.5	Macchine di cantiere	25
5.6	Ubicazione delle sorgenti e ricevitori	25
5.7	Definizione degli scenari.....	25
5.8	Valutazione della propagazione delle vibrazioni.....	27
5.9	Valutazione del disturbo alle persone (UNI 9614:2017)	28
5.9.1	Scenario emissivo "1": rifacimento manto stradale / fase di rullatura.....	29
5.9.2	Scenario emissivo "2": realizzazione del ponte e opere civili.....	30
5.10	Valutazione del danno strutturale (UNI 9916:2014)	30
5.10.1	Scenario emissivo "1": rifacimento manto stradale / fase di rullatura.....	30
5.10.2	Scenario emissivo "2": realizzazione del ponte e opere civili.....	31
5.11	Valutazione delle vibrazioni ai ricettori.....	31
5.12	Impatto vibrazionale in fase di cantiere.....	37

6	ANALISI DEI POTENZIALI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO	39
6.1	Valutazione delle sorgenti per lo scenario di esercizio.....	39
6.2	Valutazione della propagazione delle vibrazioni sull'infrastruttura stradale	39
7	MISURE DI MITIGAZIONE	44
7.1	Mitigazioni delle vibrazioni in fase di cantiere	44
7.2	Mitigazioni delle vibrazioni in fase di esercizio	44

1 PREMESSA

Il presente documento si inserisce nell'ambito della procedura (ID_ 5003) di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) con riferimento all'intervento relativo al Progetto definitivo della Variante alla S.S. 45 "Val Trebbia" dal km 31+500 (Costafontana) al km 35+600 (Montebruno) - 2° stralcio funzionale, ed è redatto allo scopo di rispondere alle richieste di integrazione del Ministero della Transizione Ecologica (MiTE), Commissione tecnica di verifica dell'impatto ambientale – VIA e VAS di cui alla nota prot. CTVA-7867 del 20/10/2022 al punto 8 relativo alle vibrazioni.

La suddetta nota è stata rilasciata a seguito delle attività di analisi e valutazione della documentazione tecnica pervenuta al MiTE nell'ambito della VIA, alla luce di quanto stabilito dal d.lgs.152/2006.

In relazione alla posizione espressa nella nota, a chiarimento e ad integrazione di quanto già contenuto negli elaborati grafici e testuali del Progetto Definitivo e Studio di Impatto Ambientale presentato dalla Scrivente, con il presente documento e con gli elaborati di progetto (di nuova emissione o esistenti revisionati) si intende fornire riscontro e delucidazione in merito alle tematiche progettuali ed ambientali oggetto della richiamata nota.

In particolare, il riscontro completo alla nota del MiTE in parola, si compone della presente relazione specialistica sullo studio vibrazionale e della relativa tavola.

2 RICHIESTE DI INTEGRAZIONE MiTE PUNTO 8. VIBRAZIONI

Si riportano di seguito le richieste di integrazione del Ministero della Transizione Ecologica (MiTE), Commissione tecnica di verifica dell'impatto ambientale – VIA e VAS di cui alla nota prot. CTVA-7867 del 20/10/2022 al punto 8 relativo alle vibrazioni:

8.1. Si richiede una relazione dello stato ante operam in relazione alle vibrazioni già in essere nella zona prevista dall'opera in oggetto, in tale relazione si dovrà riportare: proprietà del terreno, elenco dei ricettori, topologia di edificio se appartenenti al patrimonio architettonico e/o archeologico, destinazioni d'uso residenziale e/o sensibile, distanza dall'opera in oggetto;

8.2. Si richiede una stima previsionale dell'impatto dovuto alle vibrazioni su eventuali ricettori potenzialmente impattati (individuati planimetricamente) e più prossimi alle aree di cantiere fornendo, oltre ai parametri di emissione dei singoli macchinari impiegati, la caratterizzazione della sorgente in termini di modalità, di fasi di cantiere ed attività, indicando inoltre il contributo dovuto ai mezzi di trasporto per la movimentazione dei materiali, indicando: i dati di input dell'eventuale modello previsionale utilizzato, descritti e tabellati, evidenza della taratura del modello, i livelli vibratori stimati dal modello di calcolo previsionale, per la verifica del rispetto dei limiti indicati dalle norme UNI 9614 e UNI 9916;

8.3. Si richiede che sia effettuato un confronto con i dati ante operam e quelli previsionali.

In base a quanto richiesto nel presente studio di farà riferimento al censimento dei ricettori dello studio acustico, il quale considera un ambito di studio più ampio di quello tipico impiegato per la matrice vibrazioni che è identificato in 50 m.

Si procederà all'analisi vibrazionale in fase di cantiere, con un approccio qualitativo, basato su dati bibliografici sull'operatività delle macchine e verificato il valore immesso delle vibrazioni sia in base alla UNI 9614:2017, relativa al disturbo alle persone, che alla 9916:2014, sul possibile danno strutturale. Per la fase di esercizio sarà prodotta una analisi delle vibrazioni su considerazioni generali e qualitative di situazioni analoghe contestualizzate all'opera in valutazione. Saranno evidenziati i potenziali miglioramenti, gli interventi di mitigazione e le possibili criticità che si potrebbero avere nel post operam in base alla norma UNI 9614:2017. Si rimanda ad opportuni approfondimenti di dettaglio da sviluppare nella fase di PE.

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

A differenza del rumore ambientale, regolamentato a livello nazionale dalla Legge Quadro n. 447/95, non esiste al momento alcuna legge che stabilisca limiti quantitativi per l'esposizione alle vibrazioni. Esistono invece numerose norme tecniche, emanate in sede nazionale ed internazionale, che costituiscono un utile riferimento per la valutazione del disturbo in edifici interessati da fenomeni di vibrazione.

Per quanto riguarda il disturbo alle persone, i principali riferimenti sono costituiti dalla norma ISO 2631 / Parte 2 "Evaluation of human exposure to whole body vibration / Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz)". La norma assume particolare rilevanza pratica poiché ad essa fanno riferimento le norme tecniche per la redazione degli Studi di Impatto Ambientale relativi alla componente ambientale "Vibrazioni", contenute prima nel D.P.C.M. 27/12/1988 e, a seguito della sua abrogazione nel 2017, dall'Allegato VII alla Parte Seconda del D.Lgs. n. 152/2006 che lo ha sostituito. Ad essa, seppur con alcune non trascurabili differenze, fa riferimento la norma UNI 9614:2017 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo".

Si riporta di seguito la principale normativa tecnica esistente in riferimento all'aspetto ambientale delle vibrazioni.

3.1 ISO 2631 "Valutazione sull'esposizione del corpo umano alle vibrazioni"

La ISO 2631-2 si applica a vibrazioni trasmesse da superfici solide lungo gli assi x, y e z per persone in piedi, sedute o coricate. Il campo di frequenze considerato è 1 ÷ 80 Hz e il parametro di valutazione è il valore efficace dell'accelerazione a_{rms} definito come:

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

dove $a(t)$ è l'accelerazione in funzione del tempo, T è la durata dell'integrazione nel tempo dell'accelerazione. La norma definisce tre curve base per le accelerazioni e tre curve base per le velocità (in funzione delle frequenze di centro banda definite per terzi di ottava) che rappresentano le curve approssimate di uguale risposta in termini di disturbo, rispettivamente per le accelerazioni riferite all'asse Z, agli assi X, Y e alla combinazione dei tre assi. L'Annex A della ISO 2631-2 (che non rappresenta peraltro parte integrante della norma) fornisce informazioni sui criteri di valutazione della risposta soggettiva alle vibrazioni; in pratica sono riportati i fattori di moltiplicazione da applicare alle curve base delle accelerazioni e delle velocità al variare del periodo di riferimento (giorno e notte), del tipo di vibrazione (vibrazioni continue o intermittenti, vibrazioni transitorie) e del tipo di insediamento (ospedali, laboratori di precisione, residenze, uffici, industrie). Le vibrazioni devono essere misurate nel punto di ingresso nel corpo umano e deve essere rilevato il valore di accelerazione r.m.s. perpendicolarmente alla superficie vibrante. Nel caso di edifici residenziali in cui non è facilmente definibile un asse specifico di vibrazione, in quanto lo stesso edificio può essere usato da persone in piedi o coricate in diverse ore del giorno, la norma presenta una curva limite che tiene conto delle condizioni più sfavorevoli combinate in tre assi.

3.2 UNI 9614 "Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo"

La UNI 9614:1990 "Vibrazioni - Misura delle vibrazioni negli edifici e criteri di valutazione del disturbo" considera i diversi tipi di sollecitazione vibratoria: livelli costanti, non costanti, impulsivi. La norma definisce metodologia di misura e analisi del segnale al fine di quantificare il disturbo da vibrazioni verso le persone. La vibrazione viene espressa attraverso il concetto di accelerazione:

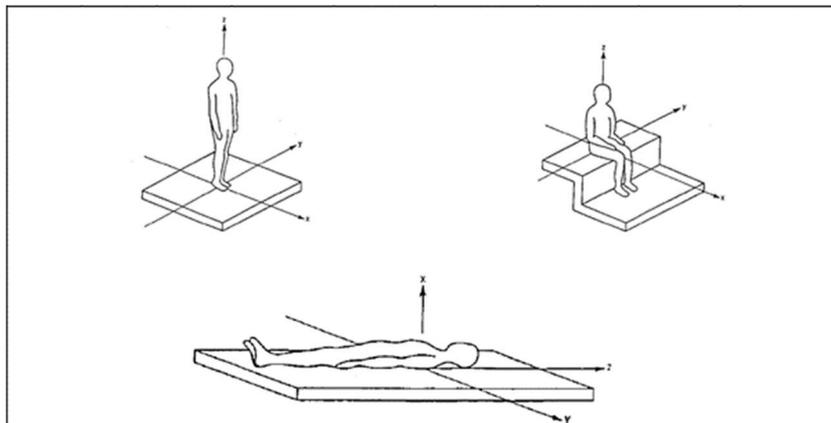
$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a(t)^2 dt}$$

o del suo equivalente livello di accelerazione (espressione in dB dell'accelerazione espressa in m/s²):

$$L_{acc} = 20 \cdot \lg \left[\frac{a}{a_0} \right] \quad a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$$

Nella definizione di accelerazione ponderata a_w prevista dalla norma (che prevede una pesatura in frequenza in funzione della direzione della vibrazione) si fa riferimento al seguente schema.

Frequenza [Hz]			Ponderazione per le Accelerazioni [dB]			Ponderazione per le Velocità [dB]		
centrale	Estremo inferiore	Estremo superiore	Postura Longitudinale (asse z)	Postura Trasversale (asse x-y)	Postura non nota o Variabile	Postura Longitudinale (asse z)	Postura Trasversale (asse x-y)	Postura non nota o Variabile
1.00	0.89	1.12	-6.0	0.0	0.0	-24.0	-6.0	-15.0
1.25	1.12	1.41	-5.0	0.0	0.0	-21.0	-4.0	-13.0
1.60	1.41	1.78	-4.0	0.0	0.0	-18.0	-2.0	-11.0
2.00	1.78	2.24	-3.0	0.0	0.0	-15.0	0.0	-9.0
2.50	2.24	2.82	-2.0	-2.0	-0.5	-12.0	0.0	-7.5
3.15	2.82	3.55	-1.0	-4.0	-1.0	-9.0	0.0	-6.0
4.00	3.55	4.47	0.0	-6.0	-1.5	-6.0	0.0	-4.5
5.00	4.47	5.62	0.0	-8.0	-2.0	-4.0	0.0	-3.0
6.30	5.62	7.08	0.0	-10.0	-2.5	-2.0	0.0	-1.5
8.00	7.08	8.91	0.0	-12.0	-3.0	0.0	0.0	0.0
10.00	8.91	11.22	-2.0	-14.0	-5.0	0.0	0.0	0.0
12.50	11.22	14.13	-4.0	-16.0	-7.0	0.0	0.0	0.0
16.00	14.13	17.78	-6.0	-18.0	-9.0	0.0	0.0	0.0
20.00	17.78	22.39	-8.0	-20.0	-11.0	0.0	0.0	0.0
25.00	22.39	28.18	-10.0	-22.0	-13.0	0.0	0.0	0.0
31.50	28.19	35.48	-12.0	-24.0	-15.0	0.0	0.0	0.0
40.00	35.48	44.67	-14.0	-26.0	-17.0	0.0	0.0	0.0
50.00	44.67	56.23	-16.0	-28.0	-19.0	0.0	0.0	0.0
63.00	56.24	70.79	-18.0	-30.0	-21.0	0.0	0.0	0.0
80.00	70.80	89.12	-20.0	-32.0	-23.0	0.0	0.0	0.0



I valori limite sono differenziati per tipologia insediativa, per tipo di segnale (durata, caratteristiche) e per asse di sollecitazione. Per valori di sollecitazione vibratoria costante e non costante (dove per quest'ultima viene richiesta un'integrazione dei valori misurati), i valori limite sono riportati nella seguente tabella.

Classe	Destinazione d'uso del territorio	Livello L_{eff} [dB] (*)			Accelerazione A_{eff} [mm/s ²]			Velocità V_{eff} [µm/s]		
		L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)	L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)	L (z)	T (x-y)	V (x-y-z)
I	Aree critiche ⁽¹⁾	74	71	71	5,0	3,6	3,6	100	280	100
II	Abitazioni (notte)	77	74	74	7,0	5,0	5,0	140	400	140
III	Abitazioni (giorno)	80	77	77	10,0	7,2	7,2	200	560	200
IV	Uffici	86	83	83	20,0	14,4	14,4	400	1.100	400
V	Fabbriche	92	89	89	40,0	28,8	28,8	800	2.200	800

L componente longitudinale (riferita alla spina dorsale dell'uomo)(Asse z)
T componente trasversale (riferita alla spina dorsale dell'uomo)(Assi x-y)
V nel caso di postura variabile o non nota(Assi x-y-z)
(*) 0 dB \cong 1 µm/s² (10⁻⁶ m/s²)

(1) Per aree critiche si intendono edifici particolarmente sensibili alle vibrazioni, quali ad es. laboratori metrologici, fabbricati industriali contenenti apparecchiature sensibili alle vibrazioni (microscopi elettronici...).

La UNI 9614:1990 definisce tre tipologie di segnali vibratorii:

- Vibrazioni di livello costante;
- Vibrazioni di livello non costante;
- Vibrazioni impulsive.

Il segnale vibratorio prodotto dalle vibrazioni stradali può essere considerato come una vibrazione di livello non costante, e dunque per tale tipologia di segnale la valutazione deve avvenire su un "intervallo di tempo rappresentativo" dell'evento (app. A.2 norma UNI 9614).

Su tale intervallo è possibile effettuare due tipi di valutazioni: nel caso in cui si scelga un approccio maggiormente cautelativo si può operare sul massimo valore raggiunto durante l'evento del transito, mentre in alternativa si può lavorare sul concetto di media energetica sulla durata dell'evento.

In generale, la valutazione delle vibrazioni negli studi, è scelto di eseguire le valutazioni sul valore medio del valore efficace (RMS) della vibrazione su un intervallo equivalente alla durata dell'evento di transito.

Per quanto riguarda la direzione del rilievo la norma UNI 9614 prescrive di eseguire i rilievi "lungo i tre assi ortogonali o secondo l'asse lungo il quale le vibrazioni sono più elevate". Negli studi è scelto di considerare la seconda ipotesi, e di applicare la ponderazione asse Z all'asse verticale e la ponderazione X-Y per gli assi orizzontali. I limiti applicabili saranno pertanto:

Direzione Asse	Soglia di percezione La_w (dB)	Limite di accettabilità per abitazioni La_w (dB)	Limite di accettabilità per uffici La_w (dB)
Asse Z	74	77	86
Assi X-Y	71	74	83

In riferimento alla UNI 9614:2017, essendo questa la norma presa a riferimento nel presente studio specialistico, se ne riporta di seguito la descrizione dettagliata.

Nel settembre 2017, dopo una lunga fase preparatoria, è stato emanato l'aggiornamento della norma UNI 9614:1990. L'aggiornamento si è reso necessario per mettere a punto un approccio più moderno alla valutazione del disturbo da vibrazioni e per tenere conto dei progressi delle tecniche di misura e della normativa internazionale vigente.

La norma, come già illustrato, riguarda il metodo di misurazione delle vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti interne o esterne agli edifici ed i criteri di valutazione del disturbo delle persone all'interno degli edifici stessi. 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 semi-continue (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 mostra alcune possibili individuazioni di punti di misura adeguati o non adeguati alle valutazioni oggetto della norma in esame.

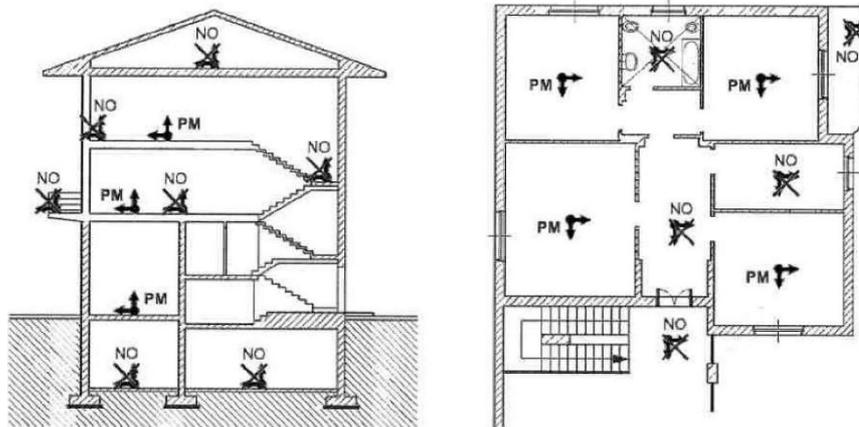


Figura 1 – Individuazione corretta e non corretta dei punti di misura

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 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 10m/s². 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 e 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 $a_{wj}(t)$
2. 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, e per un intervallo di integrazione $T = 1$ s, secondo la seguente formulazione:

$$a_{w,rms,j}(t) = \left(\frac{1}{T} \times \int_{t-T}^t a_{w,j}^2(t) \times dt \right)$$

3. 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.

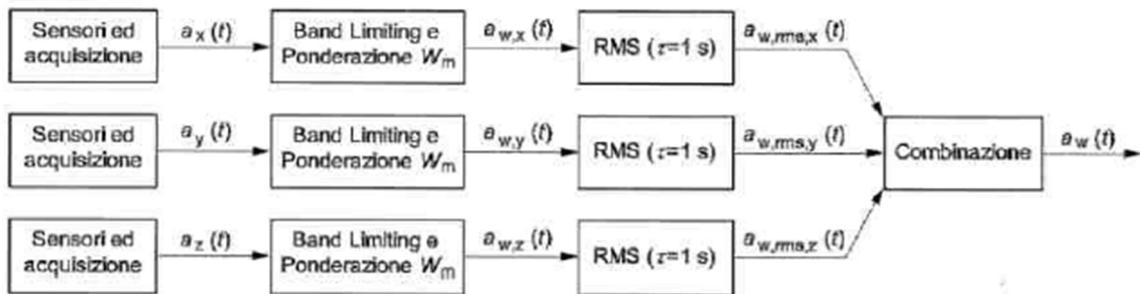


Figura 2 – schema di calcolo dell'accelerazione ponderata efficace secondo la UNI 9614:2017

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

- *massima accelerazione ponderata*, definita come il massimo livello di accelerazione ponderata efficace all'interno del singolo evento j-esimo, ovvero:

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

- *massima accelerazione statistica* $a_{w,95}$ data dalla seguente relazione:

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

dove:

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

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

σ 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.

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 mm/s²
- periodo notturno: 3,6 mm/s²
- periodo diurno di giornate festive: 5,4 mm/s²

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_{sorg} , può essere ritenuto trascurabile.

Di seguito la tabella di sintesi dei limiti previsti dalla UNI 9614:2017.

Destinazione d'uso	Accelerazione Vettore V_{sorg} (m/s^2)
Abitazioni (periodo notturno dalle 22:00 alle 6:00)	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (periodo diurno dalle 6:00 alle 22:00)	$7,2 \cdot 10^{-3}$
Abitazioni (periodo diurno festivo dalle 6:00 alle 22:00)	$5,4 \cdot 10^{-3}$
Luoghi di lavoro	$14 \cdot 10^{-3}$
Ospedali, case di cura e affini (indipendentemente dal periodo)	$2 \cdot 10^{-3}$
Asili e case di riposo (valido anche nel periodo diurno in caso sia previsto il riposo delle persone)	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Scuole (nel periodo di utilizzo degli allievi e limitatamente alle aule usate)	$5,4 \cdot 10^{-3}$

Tabella 1 - Valori limite delle accelerazioni complessive ponderate in frequenza per la UNI 9614:2017

3.3 UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici"

I danni agli edifici determinati dalle vibrazioni vengono trattati dalla UNI 9916 "Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici", norma in sostanziale accordo con i contenuti tecnici della ISO 4866 e in cui viene richiamata, sebbene non faccia parte integrante della norma, la DIN 4150, parte 3. La norma UNI 9916 fornisce una guida per la scelta di appropriati metodi di misura, di trattamento dei dati e di valutazione dei fenomeni vibratorii allo scopo di permettere anche la valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, con riferimento alla loro risposta strutturale ed integrità architettonica. Altro scopo della norma è di ottenere dati comparabili sulle caratteristiche delle vibrazioni rilevate in tempi diversi su uno stesso edificio, o su edifici diversi a parità di sorgente di eccitazione, nonché di fornire criteri di valutazione degli effetti delle vibrazioni medesime. La norma considera per semplicità gamme di frequenza variabili da 0.1 a 150 Hz. Tale intervallo interessa una grande casistica di edifici e di elementi strutturali di edifici sottoposti ad eccitazione naturale (vento, terremoti, ecc.) nonché ad eccitazioni causate dall'uomo (traffico, attività di costruzione, ecc.). In alcuni casi l'intervallo di frequenza delle vibrazioni può essere più ampio; tuttavia, le eccitazioni con contenuto in frequenza superiore a 150 Hz non sono tali da influenzare significativamente la risposta dell'edificio. L'Appendice A della UNI 9916 contiene una guida semplificata per la classificazione degli edifici secondo la loro probabile reazione alle vibrazioni meccaniche trasmesse attraverso il terreno.

Nell'ambito di questa classificazione, un sistema dinamico è costituito dal terreno e dallo strato di base (magrone) sul quale si trovano le fondazioni oltre che la struttura medesima dell'edificio.

Le strutture comprese nella classificazione riguardano:

- tutti gli edifici residenziali e gli edifici utilizzati per le attività professionali (case, uffici, ospedali, case di cura, ecc.);
- gli edifici pubblici (municipi, chiese, ecc.);
- edifici vecchi ed antichi con un valore architettonico, archeologico e storico;
- le strutture industriali più leggere spesso concepite secondo le modalità costruttive in uso per gli edifici abitativi.

La classificazione degli edifici (Prospetto III) è basata sulla loro resistenza strutturale alle vibrazioni oltre che sulla tolleranza degli effetti vibratorii sugli edifici in ragione del loro valore architettonico, archeologico e storico. I fattori dai quali dipende la reazione di una struttura agli effetti delle vibrazioni sono:

- la categoria della struttura;
- le fondazioni;
- la natura del terreno.

La categoria di struttura (Prospetto II) è classificata in una scala da 1 a 8 (a numero crescente di categoria corrisponde una minore resistenza alle vibrazioni) in base ad una ripartizione in due gruppi di edifici, edifici vecchi e antichi o strutture costruite con criteri tradizionali (Gruppo 1) e edifici e strutture moderne (Gruppo 2). L'associazione della categoria viene fatta risalire alle caratteristiche tipologiche e costruttive della costruzione e al numero di piani.

Le fondazioni sono classificate in tre classi. La Classe A comprende fondazioni su pali legati in calcestruzzo armato e acciaio, platee rigide in calcestruzzo armato, pali di legno legati tra loro e muri di sostegno a gravità; la Classe B comprende pali non legati in calcestruzzo armato, fondazioni continue, pali e platee in legno; la Classe C infine comprende i muri di sostegno leggeri, le fondazioni massicce in pietra e la condizione di assenza di fondazioni, con muri appoggiati direttamente sul terreno.

Il terreno viene classificato in sei classi: rocce non fessurate o rocce molto solide, leggermente fessurate o sabbie cementate (Tipo a); terreni compattati a stratificazione orizzontale (Tipo b); terreni poco compattati a stratificazione orizzontale (Tipo c); piani inclinati, con superficie di scorrimento potenziale (Tipo d); terreni granulari, sabbie, ghiaie (senza coesione) e argille coesive sature (Tipo e) e materiale di riporto (Tipo f).

L'Appendice B della UNI 9916 contiene i criteri di accettabilità dei livelli delle vibrazioni con riferimento alla DIN 4150 e al Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 24 gennaio 1986 "Norme tecniche relative alle costruzioni in zona sismica." La parte 3 della DIN 4150 indica le velocità massime ammissibili per vibrazioni transitorie:

- sui pavimenti: $v < 20$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione e le velocità massime ammissibili per vibrazioni stazionarie;
- sull'edificio (nel suo complesso): $v < 5$ mm/s in direzione orizzontale sull'ultimo piano;
- sui pavimenti: $v < 10$ mm/s in direzione verticale nel punto di massima vibrazione.

Per velocità massima è da intendersi la velocità massima di picco. Essa è ricavabile dalla velocità massima r.m.s. attraverso la moltiplicazione di quest'ultima con il fattore di cresta F. Tale parametro esprime il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace. Per onde sinusoidali si assume $F = 1,41$; in altri casi si possono assumere valori maggiori. Nei casi più critici (ed es. esplosioni di mina) F può raggiungere il valore 6. La ISO 4866 fornisce infine una classificazione degli effetti di danno a carico delle strutture secondo tre livelli:

- Danno di soglia: formazione di fessure filiformi sulle superfici dei muri a secco o accrescimento di fessure già esistenti sulle superfici in gesso o sulle superfici di muri a secco; inoltre, formazioni di fessure filiformi nei giunti di malta delle costruzioni in muratura di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata, con frequenze maggiori di 4 Hz e velocità di vibrazione di $4 \div 50$ mm/s, e per vibrazioni continue, con velocità $2 \div 5$ mm/s.
- Danno minore: formazione di fessure più aperte, distacco e caduta di gesso o di pezzi di intonaco dai muri; formazione di fessure in murature di mattoni. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz nel campo di velocità vibrazionale compreso tra $20 \div 100$ mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di $3 \div 10$ mm/s.
- Danno maggiore: danneggiamento di elementi strutturali; fessure nei pilastri; aperture di giunti; serie di fessure nei blocchi di muratura. Possono verificarsi per vibrazioni di piccola durata con frequenze superiori a 4 Hz e velocità vibrazionale compresa tra $20 \div 200$ mm/s oppure per vibrazioni continue associate a velocità di $5 \div 20$ mm/s.

3.4 Norma UNI 11048 – “Vibrazioni meccaniche ed urti - Metodo di misura delle vibrazioni negli edifici al fine della valutazione del disturbo”

La norma UNI 11048:2003, sperimentale, definisce i metodi di misurazione delle vibrazioni e degli urti trasmessi agli edifici ad opera di sorgenti esterne o interne agli edifici stessi, al fine di valutare il disturbo arrecato ai soggetti esposti. Essa affianca la UNI 9614. La norma non si applica alla valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici, in relazione a possibili danni strutturali o architettonici, per la quale si rimanda alla UNI 9916.

3.5 Riferimenti Bibliografici

Al fine della redazione del presente studio, per le assunzioni e comprovare le ipotesi tecniche assunte sono state prese in considerazioni, oltre la corrente normativa tecnica, la seguente bibliografia:

- Lamberto Tronchin, Angelo Farina, Valerio Tarabusi – “Studio di impatto acustico e vibrazionale nella realizzazione di infrastrutture viarie e ferroviarie” - 31° Convegno Nazionale AIA, Venezia, 5-7 Maggio 2004.
- Angelo Farina – “Valutazione dei livelli di vibrazioni in edifici residenziali - Normativa, tecniche di misura e di calcolo” - Rivista Neo-EUBIOS, n. 16. Maggio 2006 - ISSN 1825-5515.
- Aki, K., and Richards, P.G. (1980). “Quantitative Seismology: Theory and Methods.”, W.H. Freeman and Company, San Francisco, 932 pp.

- Ishihara, K. (1996). "Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics.", Oxford Science Publications, Oxford, UK, pp. 350.
- Ohta, Y. and N. Goto. (1978), Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes. Earthq. Eng. Struct. Dyn., 6:167-187.
- Hal Amick, Colin Gordon & Associates (1999), "A Frequency-Dependent Soil Propagation Model" - Presented at SPIE Conference on Current Developments in Vibration Control for Optomechanical Systems - Denver, Colorado, July 20, 1999, San Mateo, California USA.
- Dong-Soo Kim, Jin-Sun Lee¹ (1999), "Propagation and attenuation characteristics of various ground vibrations" - Department of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon – pp 305-701
- Hal Amick and Michael Gendreau (2000) – "Construction Vibrations and Their Impact on Vibration-Sensitive Facilities" - Colin Gordon & Associates, San Mateo, California 94402.

4 ANALISI DEI RICETTORI

Dall'analisi dell'inquadramento territoriale delle aree di intervento si rileva che i ricettori presenti sono prevalentemente a destinazione residenziale.

La scelta dei ricettori da considerare nella valutazione è stata fatta in base alla vicinanza degli stessi sia all'area di intervento sia alle viabilità limitrofe alla stessa, si sono ricercati, inoltre, i ricettori che per le loro caratteristiche necessitano di particolari misure di tutela.

In dettaglio, per l'ambito di studio della valutazione sulle vibrazioni è stato individuato lo stesso dello studio acustico. Sono definiti ricettori, ai sensi del D.P.R. 142/04, tutti gli edifici adibiti ad ambiente abitativo, comprese le relative aree esterne di pertinenza ove, per ambiente abitativo, si intende ogni ambiente interno ad un edificio destinato alla permanenza di persone o comunità ed utilizzato per le diverse attività umane. Sono inoltre definiti ricettori tutti gli edifici adibiti ad attività lavorativa o ricreativa, le aree naturalistiche vincolate i parchi pubblici, le aree esterne destinate ad attività ricreativa e allo svolgimento della vita sociale della collettività, le aree territoriali edificabili (aree di espansione) già individuate dai vigenti PRG.

I ricettori interessati dallo studio sono pari a 60 edifici, di cui 59 ad uso abitativo residenziale e uno ad uso diverso, ed individuati all'interno o nelle immediate vicinanze della fascia di pertinenza dell'opera.

Nelle successive tabelle di valutazione delle vibrazioni sarà riportato, oltre all'identificativo del ricettore, la destinazione d'uso, il numero di piani e la distanza dall'opera o dalle aree di lavoro.

Di seguito la localizzazione dei ricettori considerati.

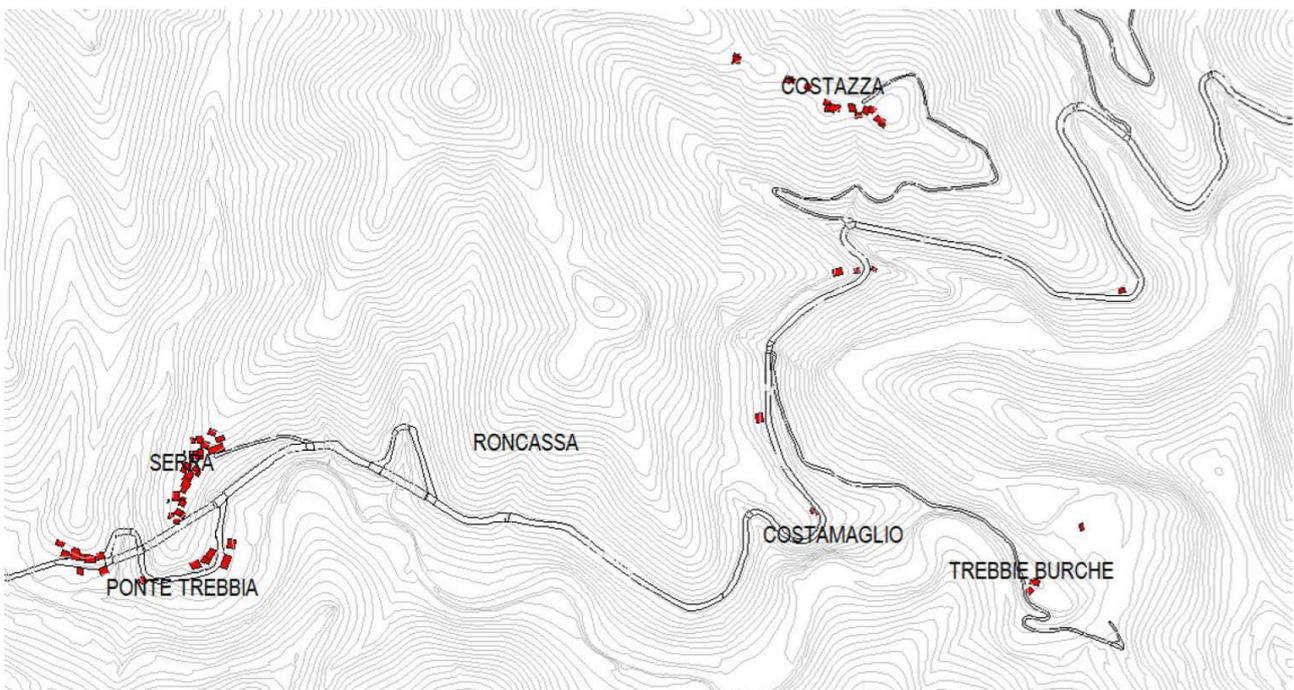


Figura 3 – Quadro d'insieme dei ricettori individuati

5 ANALISI DEI POTENZIALI IMPATTI IN FASE DI CANTIERE

In questo paragrafo si procede nella valutazione modellistica previsionale del clima vibrazionale determinato dalle emissioni associate alle attività di cantiere per la realizzazione del progetto in esame.

La valutazione delle vibrazioni ha lo scopo di stimare gli effetti sull'ambiente circostante delle vibrazioni emesse dai macchinari di cantiere impiegati per la realizzazione dell'opera.

In dettaglio, si procederà analizzando le principali sorgenti previste in funzione delle attività lavorative che saranno sostanzialmente raggruppabili in macchine operatrici (escavatore, sonda perforatrice, ecc.) ed in mezzi adibiti al trasporto (autocarri, autobetoniera, ecc.). Verrà descritto il metodo adottato per la previsione dei livelli vibrazionali indotti durante realizzazione delle opere e tali livelli saranno confrontati con i limiti della normativa in materia per ciò che riguarda l'effetto delle vibrazioni sulle persone e strutture.

Lo studio vibrazionale per la fase di cantiere è volto, in particolare, all'accertamento del disturbo alle persone, il quale ha limiti più restrittivi rispetto a quelli determinati sulle strutture. Pertanto, qualora si verifichi dall'esame della previsione di propagazione delle vibrazioni la presenza di edifici nelle più zone più critiche, tale elemento non costituisce un fattore per la stima di un possibile danno alle strutture, evidenziando unicamente il superamento di una soglia di disturbo per i residenti dell'edificio stesso. Tale soglia, pur ricavata dalle normative tecniche esistenti in sede nazionale ed internazionale, non risulta fissata da alcun atto legislativo.

Per quanto riguarda gli effetti sulle strutture, in presenza di livelli elevati e prolungati di vibrazioni, sono stati osservati danni strutturali a edifici e/o strutture. È da notare, però, che tali livelli sono più alti di quelli normalmente tollerati dagli esseri umani, i cui livelli sono riportati nelle norme ISO 2631 e UNI 9614. Tale considerazione è facilmente deducibile dal confronto dei valori riportati nelle norme che riportano i danni sull'uomo (ISO 2631 e UNI 9614) con i valori nelle norme che riguardano i danni strutturali (UNI 9916 ed ISO 4866), pertanto le prime sono state scelte quale riferimento, poiché riportano dei valori limite più restrittivi.

In definitiva, soddisfatto l'obiettivo di garantire livelli di vibrazione accettabili per le persone, risulta automaticamente realizzata l'esigenza di evitare danni strutturali agli edifici, almeno per quanto concerne le abitazioni civili. Come unica eccezione sono da annoverare le vibrazioni che incidono su monumenti e beni artistici di notevole importanza storico-monumentale, i quali devono essere trattati come punti singolari con studi e valutazioni mirate. Nell'ambito di studio considerato pari a quello dello studio acustico, non sono stati rilevati edifici e/o strutture di questo tipo.

Per lo studio dell'impatto vibrazionale si è proceduto con le operazioni seguenti:

- analisi del territorio in cui si colloca l'opera e delle caratteristiche dei ricettori;
- definizione degli scenari critici in termini di impatto vibrazionale;
- valutazione delle vibrazioni previste sui ricettori prossimi.

Al fine di valutare le vibrazioni prodotte durante la fase di cantiere risulta indispensabile ipotizzare una serie di fattori, tra cui: le tipologie di lavorazioni svolte, i macchinari impiegati, le loro modalità di utilizzo, l'entità dei livelli di vibrazione da essi prodotti e le caratteristiche del suolo in cui si propagano per la loro valutazione ai ricettori.

I livelli di vibrazione attesi sono stati determinati attraverso apposite simulazioni per poter poi essere confrontati con la localizzazione, le caratteristiche dei ricettori ed i limiti previsti dalla norma UNI 9614:2017. Nella valutazione dell'impatto delle vibrazioni generato dal cantiere, al fine di stimare le vibrazioni previste in prossimità dei ricettori, sono stati pertanto tenuti in considerazione i seguenti elementi:

- le sorgenti presenti nell'area che possono già generare livelli di vibrazione
- l'eventuale presenza di ricettori particolarmente sensibili (come scuole e istituti sanitari);
- lo stato attuale dei luoghi;
- la durata delle attività di cantiere.

Se generalmente per il calcolo delle vibrazioni indotte si prevede la concentrazione delle sorgenti più rilevanti nel baricentro dell'area di lavoro del cantiere, in questo caso le informazioni preliminari a disposizione riguardanti la cantierizzazione sono state utilizzate per operare nel seguente modo:

- sono state individuate le specifiche fasi di lavorazione e tra esse sono state scelte cautelativamente quelle ritenute più critiche;
- per ogni lavorazione, sono state acquisiti i dati di emissione delle vibrazioni delle macchine di cantiere;
- le macchine sono state considerate sempre accese e posizionate nella posizione più critica per i ricettori;
- è stata valutata l'attività di cantiere nelle fasi di maggiore vicinanza ai ricettori, quindi posizionando le sorgenti sul perimetro delle aree di cantiere.

5.1 Definizione del disturbo vibrazionale

La caratterizzazione del disturbo vibrazionale è effettuata in termini di definizione del Vettore Sorgente (V_{sorg} espresso in mm/s^2) ossia del vettore accelerazione relativo alla sorgente in valutazione per determinare la percezione umana e della velocità (in mm/s) per valutare gli effetti delle vibrazioni sugli edifici. È possibile convertire i valori di accelerazione "a" nel corrispondente valore di velocità "v", 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 è possibile valutarli 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 $v_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm/s}$.

5.2 Metodologia per la valutazione dei livelli vibrazionali indotti dal cantiere e dai mezzi di trasporto

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 e alla distanza fra il punto di eccitazione e quello di valutazione dell'effetto. Il metodo previsionale dei livelli di vibrazione ha impiegato simulazioni numeriche.

In dettaglio si illustrano i passi seguiti nell'elaborazione. La valutazione dei livelli vibrazionali è stata condotta a fronte dell'acquisizione degli spettri di emissione dei fenomeni considerati (attività dei mezzi di cantiere e per il trasporto dei materiali nonché impianti fissi), utilizzando sia dati bibliografici che rilievi strumentali. Gli spettri impiegati sono riferiti a misure eseguite ad una distanza nota dalla sorgente vibratoria e sono afferenti alla componente verticale. In particolare, si assume nello studio che la componente vettoriale che origina il Vettore Immissione e conseguentemente il Vettore Sorgente, sia la componente verticale.

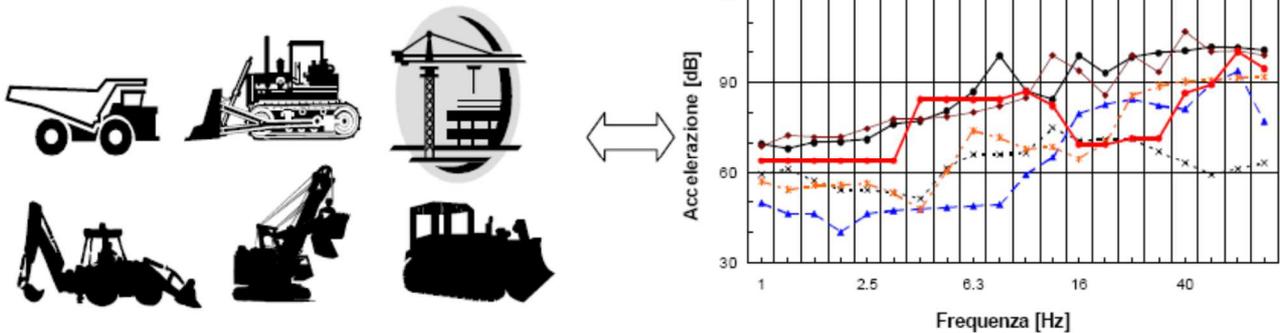


Figura 4 - Relazione tra mezzi d'opera e spettro di emissione di vibrazioni

Dagli spettri delle sorgenti si determina il livello di accelerazione non ponderato a distanze crescenti dalla sorgente mediante una legge di propagazione. Nel caso di sorgenti superficiali, ad esempio, si precisa che l'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza d è basata sulla seguente formulazione:

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

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

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

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.

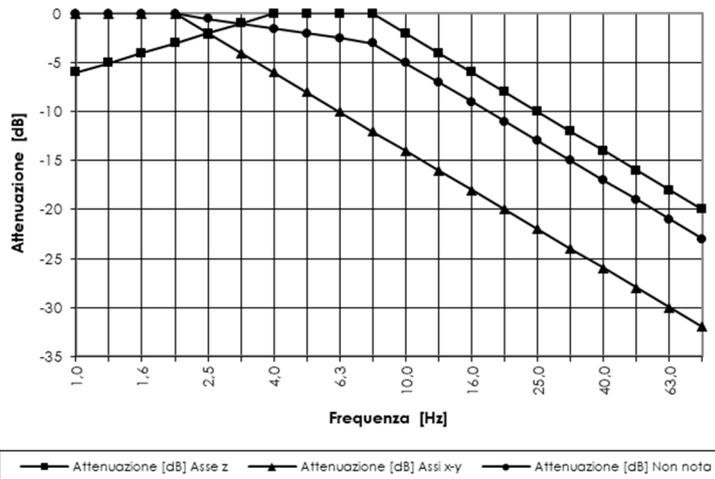


Figura 5 - Filtri di ponderazione per i diversi assi di riferimento

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.

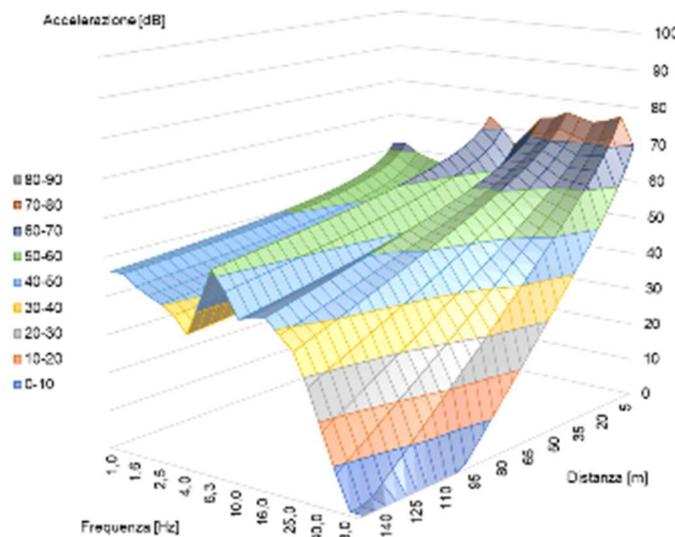


Figura 6 - Propagazione dello spettro di vibrazione

Il livello totale di accelerazione ponderata in funzione della distanza, $a_{w,d}$, è ottenuto sommando tutti i corrispondenti valori per frequenza $A_{TOT,f}$. Il numero ottenuto è rappresentativo dell'accelerazione complessiva ponderata sul vettore di riferimento, il quale individua il Vettore Immissione ad una determinata distanza. Ripetendo questa operazione per una griglia di distanze si è ottenuto il profilo di attenuazione dell'accelerazione ponderata e complessiva di tutti i Vettori di Immissione. Per la definizione del Vettore Sorgente sarà necessario stabilire il Vettore Residuo. In particolare, se il Vettore Residuo è molto basso il

Vettore Immissione sarà molto prossimo, se non coincidente al Vettore Sorgente. Nella valutazione si procederà ad una valutazione del Vettore Residuo in base a dati noti di letteratura basati sulla fruizione dei luoghi relativamente alla destinazione d'uso e allo stato dei luoghi.

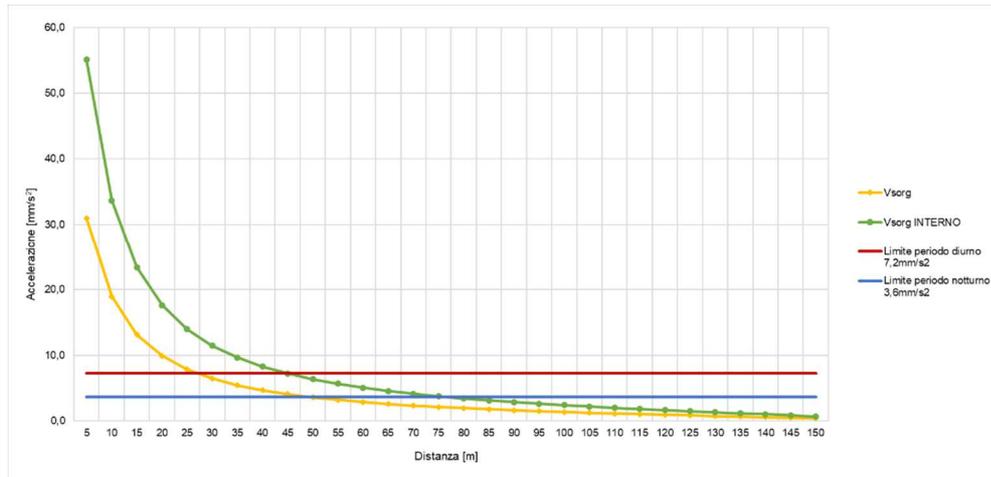


Figura 7 - Valutazione della propagazione del livello di vibrazioni (Vettore Sorgente) a diverse distanze

Ai fini del confronto con i livelli di riferimento della norma UNI 9614:2017 si procederà al confronto con il Vettore Sorgente determinato, in funzione dell'ubicazione del ricevitore e della destinazione d'uso.

5.3 Modello di calcolo

Al fine dell'esecuzione del calcolo della propagazione delle vibrazioni saranno valutate le posizioni che possono assumere le sorgenti: il caso in cui le sorgenti sono in superficie (sorgenti superficiali) e/o la situazione in cui operano in profondità (sorgenti profonde).

5.3.1 Sorgenti superficiali

Parlando della 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.

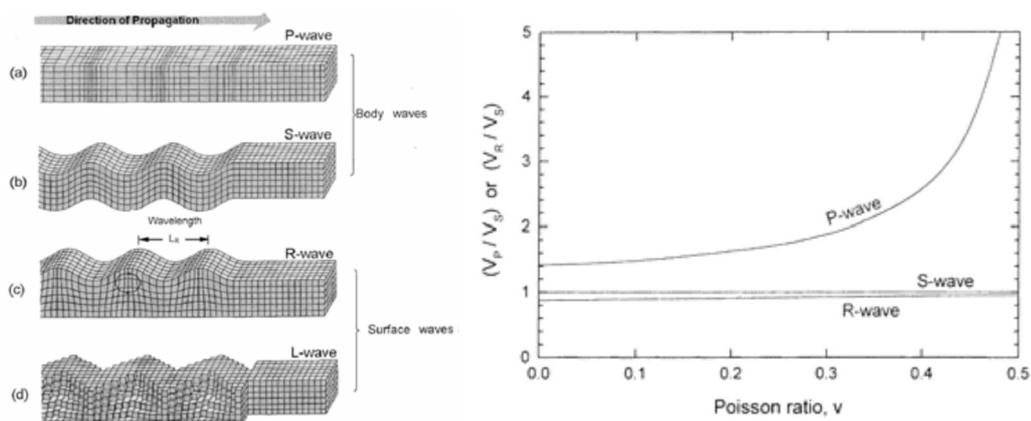


Figura 8 - Tipi di onda di volume e di superficie (a sinistra) e velocità relativa delle onde P, R rispetto onde S (a destra)

L'espressione con cui si esprime l'accelerazione ad una certa distanza d , per tutti tre i tipi di onde considerati (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 η 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 5m. L'esponente n varia a seconda del tipo di onda e di sorgente di vibrazioni. Ai fini dell'analisi dei livelli massimi, si è preceduto 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 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
Linea	Superficie	Superficie	0
	Volume	Superficie	1.0
Punto	Rayleigh	Superficie	0.5
	Volume	Superficie	2.0
Linea Sotterranea	Volume	Profondo	0.5
Punto Sotterraneo	Volume	Profondo	1.0

Tabella 2 - Definizione dell'esponente n in base al tipo di sorgente e onda

Il termine esponenziale rappresenta i fenomeni di dissipazione di energia meccanica in calore, che, come è possibile riscontrare, va crescendo proporzionalmente alla frequenza. Ciò fa sì che le alte frequenze si estinguano dopo un breve percorso, mentre le frequenze più basse si propagano a distanze maggiori.

Il rapporto η/c (indicato anche come ρ) dipende, infine, dal particolare tipo di terreno considerato, ed assume valori elevati nel caso di terreno coltivato soffice, mentre assume valori molto modesti nel caso di pavimentazioni rigide.

Classe	Descrizione del materiale	Coefficiente di attenuazione	ρ
I	Cedevole o tenero (terreno che può essere scavato facilmente)	0.003-0.01	$2 \times 10^{-4} - 6 \times 10^{-4}$

Classe	Descrizione del materiale	Coefficiente di attenuazione	ρ
II	Consolidato (terreno che può essere scavato utilizzando una pala)	0.001-0.003	$6 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-4}$
III	Duro (terreno che non può essere scavato con una pala ma necessità di un piccone)	0.0001-0.001	$6 \times 10^{-6} - 6 \times 10^{-5}$
IV	Duro consolidato (terreno che scavato difficilmente utilizzando un martello)	<0.0001	< 6×10^{-6}

Tabella 3 - Coefficiente di attenuazione

Il modello semplificato di propagazione illustrato considera i soli fenomeni previsti in un terreno supposto omogeneo ed isotropo, nel caso si abbia propagazione in presenza di edifici dalla struttura complessa, collegati al terreno mediante sistemi di fondazione, è evidente che i livelli di accelerazione riscontrabili all'interno risultino "filtrati" dalla funzione di trasferimento del sistema struttura edilizia.

In particolare, diversi sistemi di fondazione producono una attenuazione più o meno pronunciata dei livelli di accelerazione misurabili sulla fondazione stessa rispetto a quelli nel terreno circostante; tale aspetto è legato al fatto che l'interfaccia terreno-struttura non è perfettamente solidale, e pertanto genera fenomeni dissipativi o di amplificazione.

5.3.2 Sorgenti in profondità

Nel caso dell'attività di cantiere ove intervenga necessità di realizzazioni di opere in profondità (trivellazioni, ecc.), la valutazione della legge di propagazione delle vibrazioni con la distanza è più complessa, in quanto non si ha più la semplice legge di propagazione delle onde superficiali, ma si ha a che fare con una sorgente posta in profondità, che dà luogo alla propagazione di onde di volume. Si consideri ora lo schema di emissione illustrato nella seguente figura:

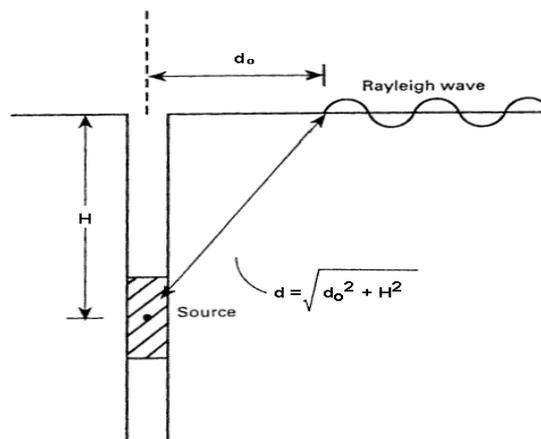


Figura 9 -- Schema della propagazione a partire da una sorgente profonda

Si può notare che, rispetto all'emissione di onde di superficie da parte di una sorgente concentrata posta sulla sommità del suolo, al recettore arrivano onde che hanno compiuto un percorso più lungo, e che si sono maggiormente attenuate lungo tale percorso a causa della legge di divergenza volumetrica anziché superficiale.

Considerando che l'epicentro di emissione si collochi circa ad 1/2 della lunghezza dell'elemento infisso, ovvero, per un palo di 9 m, a circa 5 m di profondità, si ha la seguente espressione relativa alla propagazione delle vibrazioni con cui è possibile calcolare il livello di accelerazione sulla superficie del suolo in funzione della distanza d_0 (misurata in orizzontale, sulla superficie) fra l'asse del palo ed il recettore.

$$a(d_0, f) = a(d_0, f) \cdot \left[\frac{d_0}{\sqrt{D^2 + H^2}} \cdot e^{-2\pi \cdot f \cdot \frac{\eta}{c} (\sqrt{D^2 + H^2} - d_0)} \right]$$

Il calcolo verrà eseguito assumendo che:

- il recettore si trovi ad una profondità di 3 m sotto il piano di campagna, poiché questa è la quota a cui si trovano in media le basi delle fondazioni degli edifici;
- rispetto a tale posizione, poiché l'epicentro di emissione è posto a 5 m di profondità, H assume un valore pari a 2 m;
- la distanza D a cui si è rilevato strumentalmente lo spettro di vibrazioni dovuto alla lavorazione in profondità è 5 m.

5.3.3 Sintesi delle ipotesi assunte

Il calcolo dei livelli vibrazionali ai ricettori, in condizioni di campo libero, risultanti dalle configurazioni dei macchinari da cantiere previsti negli scenari analizzati è stato condotto considerando una legge di attenuazione stabilita sulla base delle seguenti assunzioni:

- le macchine da cantiere sono assunte come sorgenti puntuali;
- l'attenuazione dissipativa del mezzo è stata calcolata secondo un approccio teorico semplificato basato sull'ipotesi di mezzo debolmente dissipativo e campo vibratorio costituito in prevalenza da onde di superficie del tipo di Rayleigh;
- l'attenuazione geometrica afferente alla sorgente puntuale che lavora in superficie (escavatore, autocarro, pala, autocarro, ecc.) è stata assunta proporzionale a r^{-1} , mentre quella che opera in profondità è stata considerata con una legge di attenuazione proporzionale a $r^{-0.5}$;
- l'epicentro di emissione, nel caso di sorgenti profonde, si collochi a circa 5 m di profondità;
- i livelli vibrazionali a distanze crescenti dalla sorgente corrispondenti agli scenari analizzati sono dati dalla combinazione, frequenza per frequenza, degli spettri di vibrazione relativi alle singole macchine di cantiere, mediante radice quadrata della somma dei quadrati delle ordinate spettrali relative alle singole macchine;
- il terreno si considera di tipologia mediamente consistente e si ipotizza di tipo consolidato, appartenete alla Classe II ($\rho < 1.5 \times 10^{-4}$) e di categoria C ($c = 300 \text{ m/s}$; $\eta = 0.04$).

5.4 Ipotesi di base

Le informazioni di input necessarie ed utilizzate per le valutazioni della stima delle emissioni delle vibrazioni ed il conseguente impatto, sono costituite dal cronoprogramma, dai dati sulla movimentazione materiali, dalla tipologia di attività in cantiere e dagli approvvigionamenti.

In particolare, sono considerate tutte le attività che avvengono all'interno del cantiere ed il traffico interno all'area di cantiere per la movimentazione materiali e scavi.

5.5 Macchine di cantiere

Al fine di valutare le vibrazioni prodotte dalle attività di cantiere è necessario, per ognuna delle tipologie di macchinario presenti, conoscere i livelli di emissione delle vibrazioni.

Le macchine di cantiere sono state quindi considerate come *sorgenti puntiformi*, a cui è stata assegnata una determinata emissione. Lo spettro che caratterizza l'emissione delle macchine è stato desunto da dati bibliografici e/o da dati tecnici delle macchine utilizzate in cantieri analoghi.

5.6 Ubicazione delle sorgenti e ricevitori

Nella presente fase progettuale, il posizionamento delle sorgenti puntuali è passibile di variazioni nelle successive fasi di progettazione, la posizione dei mezzi di lavoro e quindi delle sorgenti è un elemento molto significativo per la propagazione e l'impatto delle vibrazioni.

A ragione di ciò si è proceduto, in un'ottica improntata alla massima cautela ambientale, ipotizzando un'organizzazione delle aree di cantiere tale da permettere distanze opportune tra i vari gruppi di lavoro, evitando di produrre sovrapposizioni di contributi sul singolo ricettore, derivanti dalle diverse fasi di lavoro.

Sebbene quindi, in virtù delle attività previste, si sia valutata la posizione delle macchine che meglio potesse limitare la propagazione delle vibrazioni verso i ricettori, sono state simulate le lavorazioni con strette ipotesi quali, ad esempio:

- valutare le attività di cantiere nelle fasi di maggiore vicinanza ai ricettori;
- evitare la concentrazione delle sorgenti più rilevanti nel baricentro dell'area di lavoro del cantiere, bensì al loro confine minimizzando le distanze dai ricettori.

5.7 Definizione degli scenari

Al fine di effettuare una valutazione degli impatti che risulti essere più cautelativa possibile si è proceduto con la definizione, per ciascuna delle fasi di lavorazioni, degli scenari con il maggior impatto, frequenza e probabilità. In base alle informazioni derivanti dall'ipotesi di cantierizzazione, nell'intera area di intervento è possibile identificare gli scenari con il maggior potenziale impatto, ossia:

- scenario 1: rifacimento manto stradale / fase di compattazione;

- scenario 2: realizzazione del ponte presso l'abitato di Ponte Trebbia e opere civili lungo la viabilità.

Le sorgenti saranno ubicate nella posizione di maggior impatto compatibili con le attività di lavoro al fine di eseguire una simulazione cautelativa dell'immissione ai ricettori. Le attività di cantiere si svolgeranno in un orario ipotizzato compreso tra le 08:00 e le 13:00 e tra le 14:00 e le 18:00, quindi in periodo diurno.

In base alle fasi ritenute più critiche, per lo scenario 1 è stata individuata come attività più impattante quella relativa alla fase di compattazione del nuovo manto stradale che avverrà per tutto il tracciato. Nello scenario di massimo impatto, pertanto, sono stati considerati attivi, i seguenti macchinari.

Sc. 1 - RIFACIMENTO MANTO STRADALE / FASE DI RULLATURA

Mezzi attivi	D. (m)	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Rullo (tipo Dynapac FD25 o similari)	5	2,24	3,98	3,55	3,76	5,62	7,94	7,94	9,44	10,59	12,59	16,79	100,00	53,09	19,95	89,13	50,12	251,19	141,25	125,89	112,20
Autocarro (tipo Mercedes Benz 2629 o similari)	5	0,89	1,12	0,71	0,50	0,47	0,45	0,33	1,26	2,11	2,00	2,04	5,75	3,76	3,55	3,55	2,24	1,50	0,89	1,06	1,33

Tabella 4– Mezzi di cantiere considerati nel modello e caratteristiche emissive per lo scenario 1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)

Per lo scenario 2, relativo alla valutazione della realizzazione del ponte presso l'abitato di Ponte Trebbia e per altre opere civili (p.es. realizzazione nuovi marciapiedi, preparazione sottofondo, ecc.), la fase ritenuta più significativa è stata presunta quella che prevede la contemporaneità dei seguenti mezzi: escavatore idraulico e generatore diesel per l'alimentazione dei servizi.

Sc. 2 - REALIZZAZIONE DEL PONTE e OPERE CIVILI / PREPARAZIONE CON ESCAVATORE

Mezzi attivi	D. (m)	1	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Escavatore cingolato (tipo Fiat-Hitachi FH300 o similari)	5	0,32	0,20	0,19	0,12	0,20	0,26	0,24	0,25	0,28	0,30	0,98	1,88	9,89	13,34	16,79	12,59	12,02	28,84	51,88	8,41
Generatore assimilato ad Autocarro (tipo Mercedes Benz 2629 o similari)	5	0,89	1,12	0,71	0,50	0,47	0,45	0,33	1,26	2,11	2,00	2,04	5,75	3,76	3,55	3,55	2,24	1,50	0,89	1,06	1,33

Tabella 5– Mezzi di cantiere considerati nel modello e caratteristiche emissive per lo scenario 2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)

Di seguito i grafici degli spettri delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse verticale.

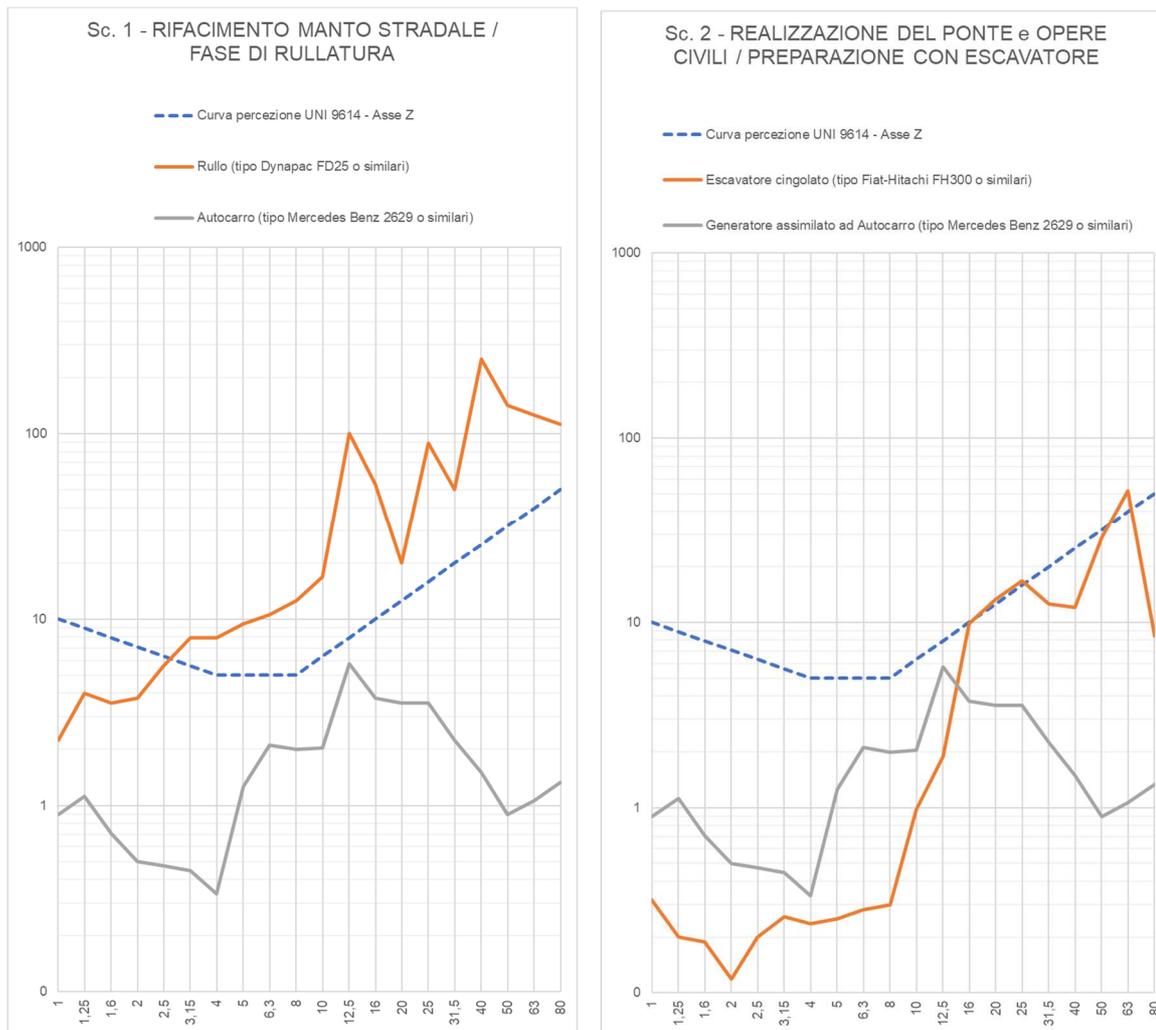


Figura 10 — Spettri delle sorgenti dei macchinari con confronto con curva di percezione della UNI 9614 per l'asse Z

Come è possibile identificare dall'analisi degli spettri delle sorgenti presenti nelle aree di cantiere, quelle che potrebbero fornire un maggiore disturbo sono quelle lavorazioni che prevedono l'emissione di vibrazione richieste dalla fase di lavoro come la di compattazione del manto stradale con il rullo vibrante. Si evidenzia che la fase di rullatura per la compattazione del manto stradale avrà durata temporale molto ridotta quindi il suo effetto sarà di breve durata e limitato nel tempo.

In modo più ridotto, si potranno avere situazioni di disturbo nella fase in cui è previsto l'impiego dell'escavatore per le lavorazioni propedeutiche alla realizzazione del ponte e delle altre opere civili.

5.8 Valutazione della propagazione delle vibrazioni

Dall'analisi della propagazione dello spettro, per ogni distanza della sede dell'attività di lavoro, è agevole calcolare il livello complessivo di accelerazione ponderata, come somma dei livelli delle singole frequenze. In questo modo è stata calcolata la legge di variazione del livello di accelerazione ponderata in funzione della distanza, la quale è mostrata graficamente di seguito, per ogni scenario.

Nelle figure seguenti sono riportate la propagazione dello spettro nel terreno, per gli scenari di lavorazioni individuate in precedenza per le aree di cantiere.

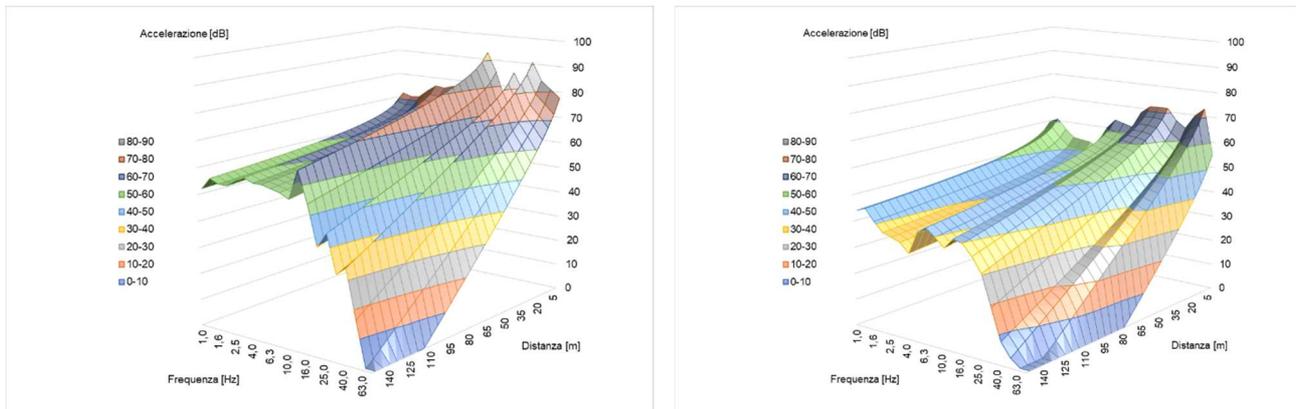


Figura 11 -- Propagazione dei livelli di accelerazione in dB per singola frequenza, a sinistra per Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura), a destra per Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)

5.9 Valutazione del disturbo alle persone (UNI 9614:2017)

Il modello di propagazione illustrato fa riferimento ai soli fenomeni che avvengono nel terreno, supposto omogeneo ed isotropo (almeno all'interno di ogni strato), senza tenere in considerazione per il momento 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.

Inoltre, si rammenta il fenomeno della risonanza strutturale di elementi dei fabbricati, con particolare riferimento ai solai: quando infatti la frequenza dell'evento eccitante coincide con la frequenza naturale di oscillazione libera della struttura, quest'ultima registra un significativo incremento dei livelli di vibrazione rispetto a quelli registrabili sull'interfaccia terreno - costruzione.

Una stima dell'effetto locale di riduzione/amplificazione di ciascun edificio è possibile parametrizzando gli effetti combinati secondo curve empiriche che consentono la stima dei livelli di vibrazione in funzione dei livelli di vibrazione del terreno.

Sulla base di tali ipotesi, diviene possibile stimare in maniera approssimata per ogni edificio, note le sue caratteristiche costruttive, l'eventuale variazione massima sul solaio più sfavorito.

In merito alla previsione relativamente alla UNI 9614:2017 nelle seguenti considerazioni sull'entità dell'impatto vibrazionale presso i ricettori, avendo, da norma, per edifici residenziali un valore limite ammissibile pari a 7,2 mm/s² in virtù del periodo di lavoro diurno e 3,6 mm/s² per quello notturno e per ricettori sensibili quali ospedali, case di cura 2 mm/s², case di riposo 3,6 mm/s², scuole 5,4 mm/s², si

applicherà un fattore che tenga conto della possibile sovramplicazione da parte della struttura dell'edificio ricettore (assunta mediamente pari a +5dB¹) permettendo così la valutazione all'interno degli edifici.

In relazione al Vettore Residuo, esso sarà determinato dalle osservazioni ed ipotesi dei ricettori considerando il contesto in cui sono ubicati. Considerando quanto evidenziato per i ricettori caratterizzanti l'area e i dati di indagini sperimentali analoghe si individua un valore di vibrazione residua pari a 0,4 mm/s². Tale assunzione, oltre ad essere cautelativa, è motivata perché molti ricettori si trovano in un contesto isolato con limitate sorgente attive sul territorio. Nel modello, al fine della determinazione di V_{sorg} ed in modo da individuare una predizione conservativa, sarà considerato quindi il valore di residuo, V_{res}, pari a 0,4 mm/s².

Dall'analisi della propagazione spaziale del valore complessivo ponderato dell'accelerazione (Vettore Immissione) per gli scenari individuati e considerando il Vettore residuo, si determina il Vettore Sorgente. Di seguito l'analisi per ogni scenario individuato.

5.9.1 Scenario emissivo "1": rifacimento manto stradale / fase di rullatura

Per la realizzazione del nuovo manto stradale ed in particolare per la fase di rullatura, per la sua compattazione con il rullo vibrante, il limite del periodo diurno di 7,2 mm/s², per i ricettori residenziali, si valuta cautelativamente raggiunto ad una distanza di circa 120 m, considerando i possibili effetti di amplificazioni prodotti dagli edifici ed assunti pari ad ulteriori 5 dB. In situazioni di assenza di amplificazione strutturale dell'edificio, tale distanza, si riduce a 80 m.

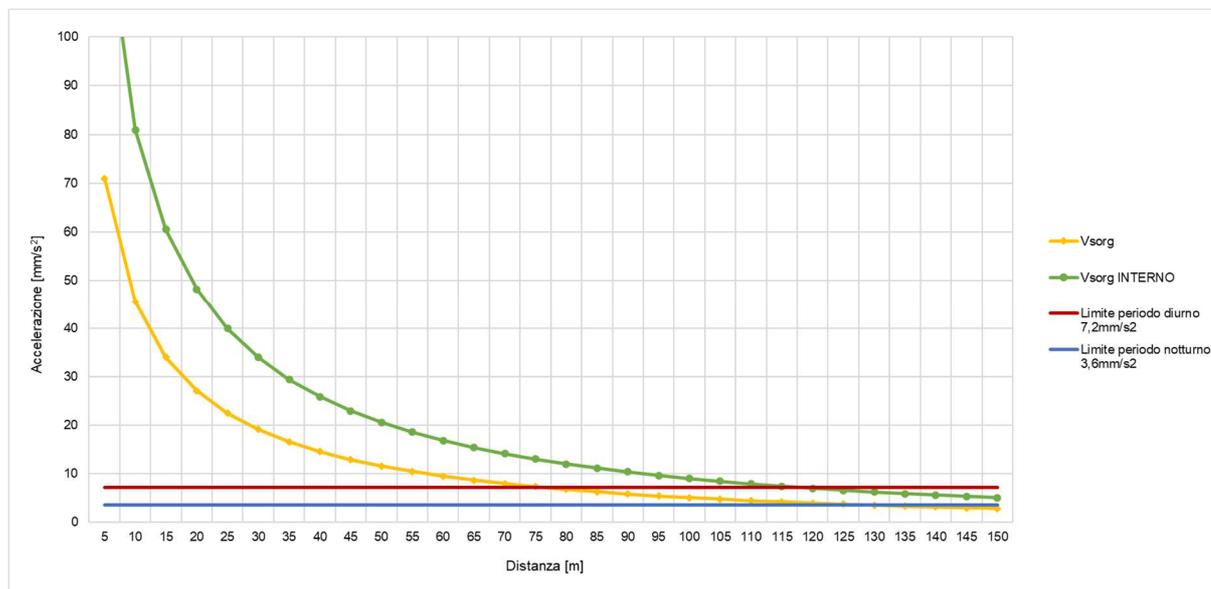


Figura 12 – Propagazione dei livelli di accelerazione per Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)

¹ VALUTAZIONE DEI LIVELLI DI VIBRAZIONI IN EDIFICI RESIDENZIALI Normativa, tecniche di misura e di calcolo di Angelo Farina Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale.

5.9.2 Scenario emissivo "2": realizzazione del ponte e opere civili

Per la realizzazione del ponte e delle opere civili, considerando la fase in cui è impiegato l'escavatore idraulico e il generatore per i servizi ausiliari, il limite del periodo diurno di $7,2 \text{ mm/s}^2$, per i ricettori residenziali, si valuta cautelativamente raggiunto ad una distanza di circa 20 m, considerando i possibili effetti di amplificazioni prodotti dagli edifici ed assunti pari ad ulteriori 5 dB. In situazioni di assenza di amplificazione strutturale dell'edificio, tale distanza, si riduce a 10 m.

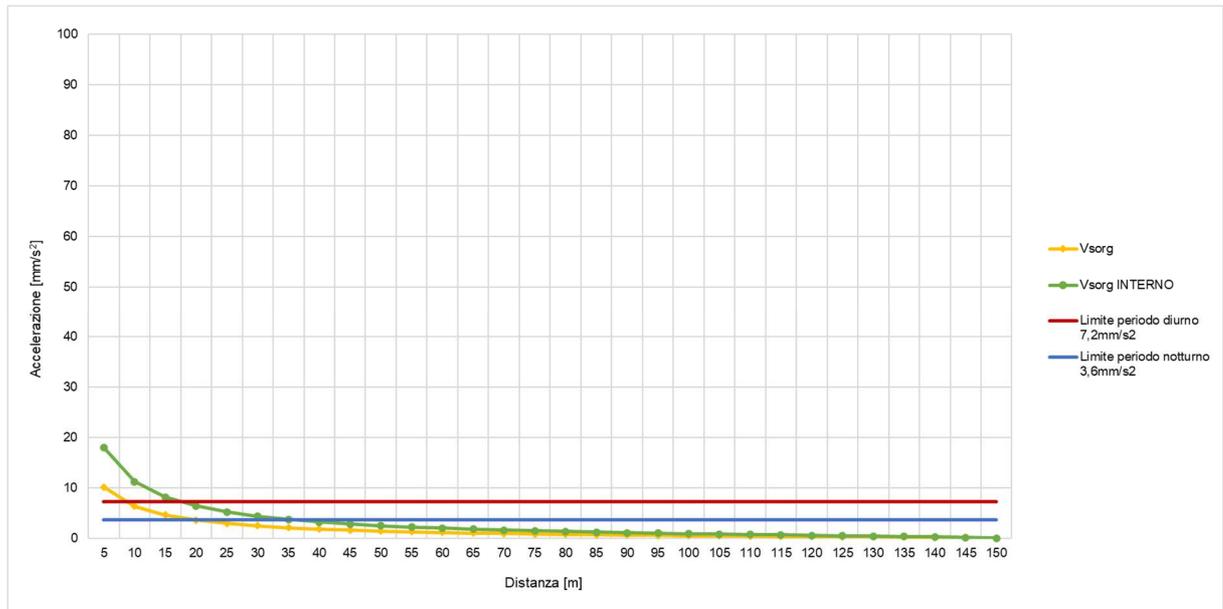


Figura 13 – Propagazione dei livelli di accelerazione per Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili opere civili lungo la viabilità)

5.10 Valutazione del danno strutturale (UNI 9916:2014)

Procedendo alla conversione delle accelerazioni stimate in termini di velocità è possibile stimare la possibilità di avere un eventuale possibile danno strutturale. Di seguito le valutazioni per gli scenari considerati.

5.10.1 Scenario emissivo "1": rifacimento manto stradale / fase di rullatura

Per la realizzazione del nuovo manto stradale ed in particolare per la fase di rullatura, per la sua compattazione con il rullo vibrante, si stima il valore massimo pari a $1,2 \text{ mm/s}$ a 5 m dalla sorgente. Oltre questa distanza il valore è sempre inferiore a 1 mm/s .

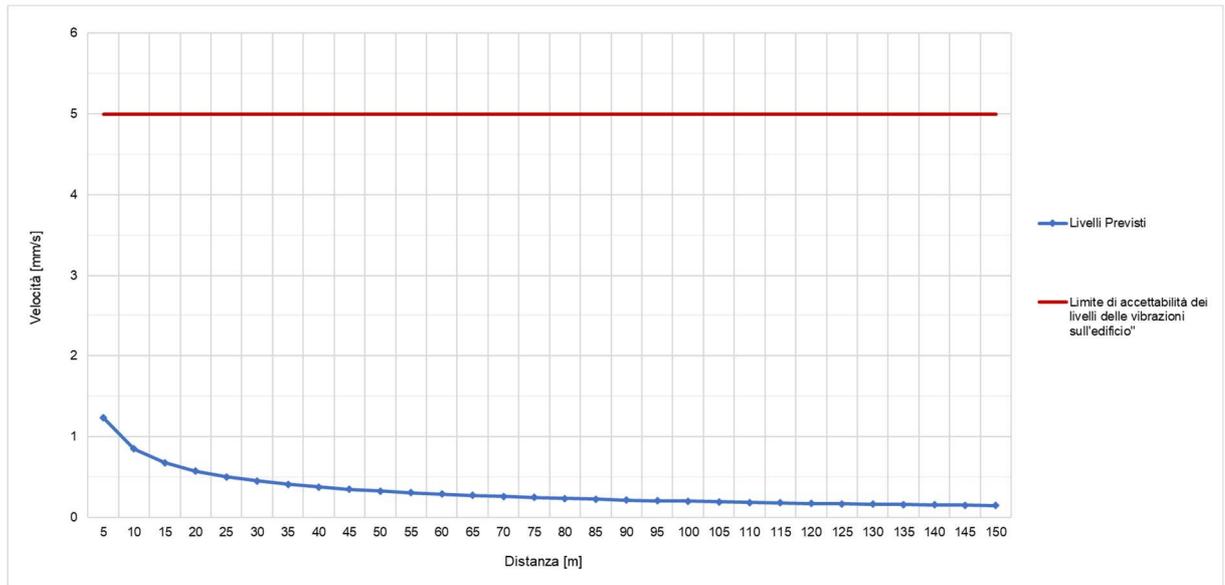


Figura 14 – Propagazione della velocità per lo Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)

5.10.2 Scenario emissivo "2": realizzazione del ponte e opere civili

Per la fase di realizzazione delle opere civili il valore di 1 mm/s non è raggiunto a nessuna distanza.

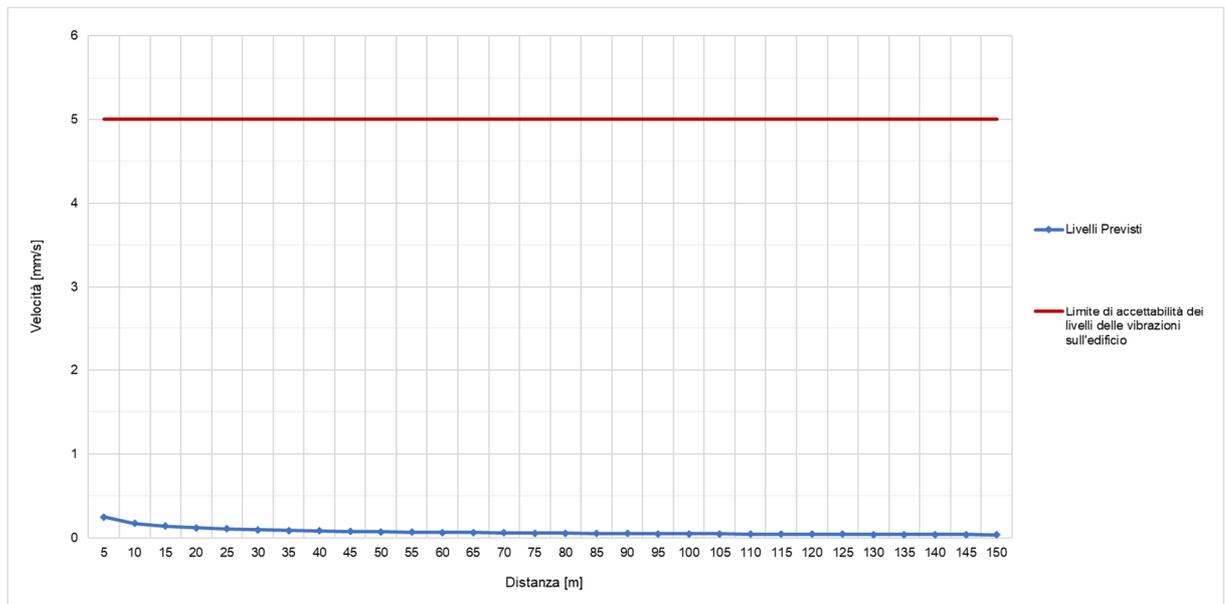


Figura 15 – Propagazione della velocità per lo Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)

5.11 Valutazione delle vibrazioni ai ricettori

Valutando il valore delle vibrazioni emesse ai ricettori, in base alla funzione di trasferimento ottenuta dagli scenari ipotizzati, ritenuti cautelativi in quanto nella reale fase di costruzione non si dovrebbe assistere al contemporaneo utilizzo di tutti i mezzi valutati in prossimità della distanza minima del ricettore ed in contemporanea, si definisce quanto segue.

Per la valutazione del disturbo alle persone (UNI 9614:2017) si definisce come distanza limite per lo scenario 1, relativo al rifacimento manto stradale / fase di rullatura, il valore di 120 m considerando l'amplificazione possibile degli edifici e di 20 m per lo scenario 2, relativo alla realizzazione del ponte e delle opere civili (p.es. realizzazione del nuovo marciapiede).

In base all'analisi dei ricettori e alle distanze alle quali si riscontra un potenziale disturbo si determina che nella fase di rullatura, per la compattazione del nuovo manto stradale, si potrebbero verificare dei superamenti del limite, per edifici ad uso abitativo, indicato dalla della UNI 9614:2017. Si evidenzia che tale lavorazione prevede una durata molto limitata nel tempo, il disturbo arrecato sarà quindi di breve durata e cessata la lavorazione terminerà di essere presente. In merito alla fase di realizzazione del ponte e comunque a quelle relative alle lavorazioni lungo la viabilità legate ad altre opere civili o fasi di lavoro per la realizzazione della nuova viabilità (p.es. realizzazione dei marciapiedi, sistemazione sottofondo, ecc.), si verifica il rispetto del valore limite della UNI 9614:2017, a distanza oltre i 20 m dalla sorgente, per cui alcuni ricettori, ubicati a distanze minori potrebbero avvertire un disturbo.

Valutando le vibrazioni indotte dalle lavorazioni, in termini di velocità, come richiesto dalla norma UNI 9916:2014 relativa alla valutazione del danno strutturale, non si riscontrano in nessuna situazione di lavoro valori eccedenti i limiti ai ricettori: il valore massimo stimato è pari a 1,2 mm/s alla distanza di 5m per la lavorazione di compattazione con il rullo vibrante, alle altre distanze e per le altre lavorazioni il valore è sempre inferiore a 1 mm/s.

Di seguito la tabella con i valori stimati in riferimento alla UNI 9614:2017 relativa al disturbo alle persone.

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dal ciglio della carreggiata (f) (m)	Limite diurno UNI 9614 (mm/s ²)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9614:2017 (mm/s ²)		Valutazione Scenari per il disturbo alle persone UNI 9614:2017	
					Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)	Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)
1	Residenziale	2	6,7	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
2	Non Residenziale non abitato	1	7,5	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
3	Residenziale non abitato	2	12,3	7,2	81,0	11,2	oltre il limite di 73,8	oltre il limite di 4
4	Residenziale	2	20,6	7,2	48,2	6,4	oltre il limite di 41	entro il limite
5	Residenziale	3	196,3	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
6	Residenziale	2	187,3	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
7	Residenziale	3	211,7	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
8	Residenziale	2	210,4	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
9	Residenziale	2	209,5	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
10	Residenziale	2	221,7	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dal ciglio della carreggiata (f) (m)	Limite diurno UNI 9614 (mm/s ²)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9614:2017 (mm/s ²)		Valutazione Scenari per il disturbo alle persone UNI 9614:2017	
					Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)	Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)
11	Residenziale	2	230,8	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
12	Residenziale	3	226,5	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
13	Residenziale	3	241,1	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
14	Residenziale	2	270,8	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
15	Residenziale	3	290,6	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
16	Residenziale	2	340,2	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
17	Residenziale	2	343,7	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
18	Residenziale	2	347,8	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
19	Residenziale	1	8,6	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
20	Residenziale	3	31,6	7,2	34,0	4,3	oltre il limite di 26,8	entro il limite
21	Residenziale	2	339,2	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
22	Residenziale	2	345,1	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
23	Residenziale	2	322,8	7,2	<<	<<	entro il limite	entro il limite
24	Residenziale	2	37,6	7,2	29,4	3,7	oltre il limite di 22,2	entro il limite
25	Residenziale	1	5,7	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
26	Residenziale	1	5,5	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
27	Residenziale	1	6,4	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
28	Residenziale	1	3,4	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
29	Residenziale	1	7,5	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
30	Residenziale non abitato	1	10,2	7,2	81,0	11,2	oltre il limite di 73,8	oltre il limite di 4
31	Residenziale non abitato	1	8,3	7,2	126,2	18,0	oltre il limite di 119	oltre il limite di 10,8
32	Residenziale non abitato	2	24	7,2	48,2	6,4	oltre il limite di 41	entro il limite
33	Residenziale	3	52,7	7,2	20,6	2,5	oltre il limite di 13,4	entro il limite
34	Residenziale	2	71,9	7,2	14,1	1,6	oltre il limite di 6,9	entro il limite
35	Residenziale	2	53,6	7,2	20,6	2,5	oltre il limite di 13,4	entro il limite
36	Residenziale	2	58,2	7,2	18,6	2,2	oltre il limite di 11,4	entro il limite

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dal ciglio della carreggiata (f) (m)	Limite diurno UNI 9614 (mm/s ²)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9614:2017 (mm/s ²)		Valutazione Scenari per il disturbo alle persone UNI 9614:2017	
					Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)	Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)
37	Residenziale	3	50,2	7,2	20,6	2,5	oltre il limite di 13,4	entro il limite
38	Residenziale	2	54,9	7,2	20,6	2,5	oltre il limite di 13,4	entro il limite
39	Residenziale (*)	2	28	7,2	40,0	5,2	oltre il limite di 32,8	entro il limite
40	Residenziale (*)	2	39	7,2	29,4	3,7	oltre il limite di 22,2	entro il limite
41	Residenziale (*)	2	30,9	7,2	34,0	4,3	oltre il limite di 26,8	entro il limite
42	Residenziale (*)	2	36,8	7,2	29,4	3,7	oltre il limite di 22,2	entro il limite
43	Residenziale (*)	2	45	7,2	22,9	2,8	oltre il limite di 15,7	entro il limite
44	Residenziale (*)	3	44,3	7,2	25,8	3,2	oltre il limite di 18,6	entro il limite
45	Residenziale (*)	2	57,8	7,2	18,6	2,2	oltre il limite di 11,4	entro il limite
46	Residenziale (*)	3	62,4	7,2	16,9	2,0	oltre il limite di 9,7	entro il limite
47	Residenziale (*)	3	70,6	7,2	14,1	1,6	oltre il limite di 6,9	entro il limite
48	Residenziale (*)	3	82	7,2	12,0	1,3	oltre il limite di 4,8	entro il limite
49	Residenziale (*)	2	84,9	7,2	12,0	1,3	oltre il limite di 4,8	entro il limite
50	Residenziale (*)	2	73	7,2	14,1	1,6	oltre il limite di 6,9	entro il limite
51	Residenziale (*)	2	67	7,2	15,4	1,8	oltre il limite di 8,2	entro il limite
52	Residenziale (*)	3	85	7,2	11,1	1,2	oltre il limite di 3,9	entro il limite
53	Residenziale (*)	3	92,6	7,2	10,4	1,1	oltre il limite di 3,2	entro il limite
54	Residenziale (*)	2	88	7,2	11,1	1,2	oltre il limite di 3,9	entro il limite
55	Residenziale (*)	3	78	7,2	13,0	1,4	oltre il limite di 5,8	entro il limite
56	Residenziale (*)	3	92	7,2	10,4	1,1	oltre il limite di 3,2	entro il limite
57	Residenziale (*)	2	86	7,2	11,1	1,2	oltre il limite di 3,9	entro il limite
58	Residenziale (*)	3	100	7,2	9,0	0,9	oltre il limite di 1,8	entro il limite
59	Residenziale (*)	3	102	7,2	9,0	0,9	oltre il limite di 1,8	entro il limite
60	Residenziale (*)	1	106,2	7,2	8,4	0,8	oltre il limite di 1,2	entro il limite

(f) distanza dal ciglio della carreggiata al baricentro dell'edificio;
(*) edificio ubicato sopra la galleria, la distanza riportata considera una copertura minima di 25m.

Tabella 6- Valutazione ai ricettori rispetto alla UNI 9614:2017

Di seguito la tabella con i valori stimati in riferimento alla UNI 9916:2014 relativa al danno strutturale.

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dal ciglio della carreggiata (f) (m)	Limite UNI 9916 (mm/s)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9916:2014 (mm/s)		Valutazione Scenari UNI 9916:2014	
					Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)	Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)
1	Residenziale	2	6,7	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
2	Non Res. non abit.	1	7,5	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
3	Resid. non abitato	2	12,3	5	0,8	0,2	entro il limite	entro il limite
4	Residenziale	2	20,6	5	0,6	0,1	entro il limite	entro il limite
5	Residenziale	3	196,3	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
6	Residenziale	2	187,3	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
7	Residenziale	3	211,7	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
8	Residenziale	2	210,4	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
9	Residenziale	2	209,5	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
10	Residenziale	2	221,7	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
11	Residenziale	2	230,8	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
12	Residenziale	3	226,5	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
13	Residenziale	3	241,1	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
14	Residenziale	2	270,8	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
15	Residenziale	3	290,6	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
16	Residenziale	2	340,2	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
17	Residenziale	2	343,7	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
18	Residenziale	2	347,8	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
19	Residenziale	1	8,6	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
20	Residenziale	3	31,6	5	0,5	0,1	entro il limite	entro il limite
21	Residenziale	2	339,2	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
22	Residenziale	2	345,1	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
23	Residenziale	2	322,8	5	<<	<<	entro il limite	entro il limite
24	Residenziale	2	37,6	5	0,4	0,1	entro il limite	entro il limite
25	Residenziale	1	5,7	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
26	Residenziale	1	5,5	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
27	Residenziale	1	6,4	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
28	Residenziale	1	3,4	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
29	Residenziale	1	7,5	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
30	Resid. non abitato	1	10,2	5	0,8	0,2	entro il limite	entro il limite
31	Resid. non abitato	1	8,3	5	1,2	0,2	entro il limite	entro il limite
32	Resid. non abitato	2	24	5	0,6	0,1	entro il limite	entro il limite
33	Residenziale	3	52,7	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
34	Residenziale	2	71,9	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
35	Residenziale	2	53,6	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
36	Residenziale	2	58,2	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
37	Residenziale	3	50,2	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
38	Residenziale	2	54,9	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
39	Residenziale (*)	2	28	5	0,5	0,1	entro il limite	entro il limite
40	Residenziale (*)	2	39	5	0,4	0,1	entro il limite	entro il limite

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dal ciglio della carreggiata (f) (m)	Limite UNI 9916 (mm/s)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9916:2014 (mm/s)		Valutazione Scenari UNI 9916:2014	
					Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)	Sc.1 (rifacimento manto stradale / fase di rullatura)	Sc.2 (realizzazione del ponte e opere civili lungo la viabilità)
41	Residenziale (*)	2	30,9	5	0,5	0,1	entro il limite	entro il limite
42	Residenziale (*)	2	36,8	5	0,4	0,1	entro il limite	entro il limite
43	Residenziale (*)	2	45	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
44	Residenziale (*)	3	44,3	5	0,4	0,1	entro il limite	entro il limite
45	Residenziale (*)	2	57,8	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
46	Residenziale (*)	3	62,4	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
47	Residenziale (*)	3	70,6	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
48	Residenziale (*)	3	82	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
49	Residenziale (*)	2	84,9	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
50	Residenziale (*)	2	73	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
51	Residenziale (*)	2	67	5	0,3	0,1	entro il limite	entro il limite
52	Residenziale (*)	3	85	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
53	Residenziale (*)	3	92,6	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
54	Residenziale (*)	2	88	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
55	Residenziale (*)	3	78	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
56	Residenziale (*)	3	92	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
57	Residenziale (*)	2	86	5	0,2	0,1	entro il limite	entro il limite
58	Residenziale (*)	3	100	5	0,2	0,0	entro il limite	entro il limite
59	Residenziale (*)	3	102	5	0,2	0,0	entro il limite	entro il limite
60	Residenziale (*)	1	106,2	5	0,2	0,0	entro il limite	entro il limite

(f) distanza dal ciglio della carreggiata al baricentro dell'edificio;
 (*) edificio ubicato sopra la galleria, la distanza riportata considera una copertura minima di 25m.

Tabella 7- Valutazione ai ricettori rispetto alla UNI 9916:2014

5.12 Impatto vibrazionale in fase di cantiere

La presente relazione specialistica è relativa alla valutazione previsionale dell'impatto vibrazionale indotto dall'attività di cantiere necessarie per la realizzazione del progetto ed in particolare della realizzazione del nuovo manto stradale e delle opere civili della nuova viabilità come il ponte nei pressi l'abitato di Ponte Trebbia, ritenute le fasi più critiche per l'emissione delle vibrazioni.

Per la definizione degli scenari di corso d'opera è stata applicata la metodologia del "Worst Case Scenario". Questo permette di valutare le condizioni di esposizione alle vibrazioni indotte dalle attività di cantiere e di verificare il rispetto dei limiti normativi nelle condizioni operative più gravose sul territorio, che nel caso positivo, permettono di accertare una condizione di rispetto anche nelle situazioni meno critiche.

Nel modello è stato imputato il layout delle diverse aree di lavorazione ritenute più impattanti nei confronti dei ricettori presenti nell'area.

Per ciascun scenario è stata considerata la condizione operativa potenzialmente più impattante definita sulla scorta delle lavorazioni previste, impianti e macchinari presenti, caratteristiche emissive e maggior frequenza di esecuzione. In tal senso gli scenari simulati tengono conto della presenza di ricettori, della tipologia di lavorazioni previste e della contemporaneità delle stesse. In virtù di quanto detto gli scenari assunti nelle simulazioni previsionali delle vibrazioni si ritengono cautelativi e rappresentativi delle seguenti situazioni:

- scenario 1: rifacimento manto stradale / fase di compattazione;
- scenario 2: realizzazione del ponte presso l'abitato di Ponte Trebbia e opere civili lungo la viabilità.

Per quanto concerne le sorgenti di vibrazioni caratterizzanti le aree di cantiere, l'analisi consiste nella verifica dei livelli previsti dalla norma UNI 9614:2017 al fine di valutare il disturbo alle persone e della UNI 9916:2014 per quanto riguarda i possibili danni strutturali, in relazione alla destinazione d'uso del ricettore. La verifica dei livelli di emissione è stata effettuata considerando il vettore sorgente indotto dai macchinari utilizzati per le lavorazioni.

Le sorgenti emissive presenti all'interno dei cantieri sono state schematizzate all'interno del modello di calcolo come sorgenti di tipo puntuale e posizionate lungo il perimetro delle aree di lavoro in modo da stimare la distanza minima da ogni ricettore.

In base a quanto descritto sono, quindi, state raccolte le informazioni di input necessarie per la caratterizzazione sia dei mezzi, delle lavorazioni, della posizione dei ricettori che della matrice suolo per la stima della propagazione delle vibrazioni. Successivamente è stata valutata, tramite l'utilizzo di un modello previsionale, la funzione di trasferimento delle vibrazioni nel suolo ed all'interno delle strutture individuate nell'ambito di studio, valutando l'impatto vibrometrico che determineranno le attività di cantiere ai ricettori e simulando i vari scenari operativi individuati.

Per ogni scenario si stima che potrebbero essere influenzati i ricettori più prossimi alle lavorazioni, per i quali si valuta il superamento dei limiti fissati dalla UNI 9614:2017, relativa al disturbo alle persone, per le fasi di lavoro attinenti alle opere civili e realizzazione della nuova viabilità entro la distanza di 20m dalla sorgente e un disturbo, sino a circa 120m, nella fase di compattazione per la realizzazione del manto stradale.

È necessario specificare che, poiché nella realtà le emissioni delle vibrazioni prodotte dai mezzi pesanti e macchinari operanti all'interno dei cantieri sono caratterizzate da durate temporali e potenze emissive variabili, sono state fatte assunzioni che permettono di effettuare le simulazioni ipotizzando il caso peggiore dal punto di vista delle emissioni di vibrazioni. Si è scelto di utilizzare un approccio altamente cautelativo individuando nelle fasi di lavoro dei diversi scenari l'accensione contemporanea di tutti i mezzi ad essa correlati, situazione che nella normale operatività del cantiere non dovrebbe verificarsi.

Valutando le vibrazioni indotte dalle lavorazioni, in termini di velocità, come richiesto dalla norma UNI 9916:2014, relativa alla valutazione del danno strutturale, non si riscontrano in nessuna situazione di lavoro valori eccedenti i limiti: il valore massimo stimato è 1,2 mm/s a 5m per la fase di rullatura, a distanze maggiori e per le altre lavorazioni sempre inferiore a 1 mm/s. Pertanto, in merito alla valutazione del possibile danno strutturale non si evidenziano criticità.

Nel ribadire che i valori previsti sono il risultato di un approccio altamente cautelativo, si sottolinea inoltre che, l'aggravio del clima vibrazionale che provocherà il cantiere sarà del tutto temporaneo e reversibile in quanto si esaurirà del tutto con il termine dei lavori.

In termini di disturbo alle persone va evidenziato come, in generale, la maggior parte delle lavorazioni che danno origine a vibrazioni e che potrebbero arrecare disturbo ai residenti, prossimi alle aree di lavoro, si svolgono in orario diurno.

In termini di severità, l'impatto atteso si estenderà alla sola limitata durata dei lavori e sarà, quindi, limitato nel tempo.

L'ambito nel quale si colloca il progetto, considerando la presenza di alcuni ricettori a distanza ridotta rispetto alle aree di cantiere, risulta sensibile al fenomeno.

Si consiglia, per una buona conduzione del cantiere e nel garantire un rispetto della componente ambientale, che dell'appaltatore, prima di eseguire i lavori, preveda di attuare una serie di procedure operative per limitare gli impatti dovuti all'emissione di vibrazioni sia degli impianti fissi che mobili, nonché valutare le fasce orarie di lavoro al fine di arrecare il minor disturbo ed attivando una procedura di informazione del possibile disturbo ai ricettori interessati.

6 ANALISI DEI POTENZIALI IMPATTI IN FASE DI ESERCIZIO

Di seguito saranno effettuate le valutazioni previsionali di impatto delle vibrazioni per lo scenario di esercizio relativamente alla futura fruizione dell'opera.

6.1 Valutazione delle sorgenti per lo scenario di esercizio

Le sorgenti che potrebbero emettere vibrazioni nella fase di esercizio dell'opera sono prevalentemente di tipo lineare ed attinenti alla fruizione della viabilità dal traffico veicolare futuro.

Il progetto prevede la realizzazione dei lavori di adeguamento alla sezione stradale di categoria C2 della SS 45 Val di Trebbia, nei tratti compresi tra le chilometriche 32+287 - 32+446 e 33+080 - 35+600, ubicati nei comuni di Torrighia e, per una piccola parte, di Montebruno, entrambi ricadenti nel territorio della Città Metropolitana di Genova. L'intervento di progetto costituisce la prosecuzione di un esteso programma di adeguamenti dell'infrastruttura stradale di interesse nazionale che collega la pianura padana con il litorale tirreno-ligure, attraversando un territorio orograficamente pronunciato.

La caratterizzazione della sorgente emissiva nello stato di esercizio si considera simile a quella attuale non prevedendo una significativa variazione dei flussi di traffico. Per cui, data la localizzazione spaziale e temporale dell'intervento, si considerano i seguenti flussi di traffico.

Fascia oraria	TGM leggeri	TGM pesanti
6.00-22.00	117	1
22.00-6.00	14	0

Tabella 8- Traffico stimato transitante in esercizio

Di seguito i dati sulle velocità di progetto e sulla pavimentazione:

- velocità di transito: 50 km/h nella zona dell'abitato di Ponte Trebbia;
- velocità di transito: 70 km/h nel resto della viabilità;
- tipo di asfalto liscio.

In definitiva, le emissioni delle vibrazioni saranno originate dal traffico su gomma riguardanti il traffico di mezzi prevalentemente leggeri.

6.2 Valutazione della propagazione delle vibrazioni sull'infrastruttura stradale

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

In base a indagini sperimentali è possibile riscontrare che 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.).

Nella tabella seguente si riportano alcuni risultati di rilievi condotti. I valori riportati sono relativi al transito selezionato, ritenuto peggiore, dal quale si stima il vettore immissione V_{imm} .

Infrastruttura	Tipologia tracciati	Postazione	Valore di V_{imm}
A7	Rilevato	23 m dal ciglio	2,4 mm/s ²
A21	Raso	65 m dal ciglio	1,0 mm/s ²
A4	Raso	9 m dal ciglio	1,0 mm/s ²

Considerando un vettore residuo, per esempio per un ricettore posto a circa 30 m da una viabilità, il quale è influenzato limitatamente da altre sorgenti e ipotizzato pari a V_{res} di 0,4 mm/s², si deduce che i valori del Vettore Sorgente V_{sorg} , da confrontare con il limite della UNI 9614:2017 (per abitazione pari a 7,2 mm/s² in periodo diurno e 3,6 mm/s² in periodo notturno), sono trascurabili e quindi entro i limiti della norma citata.

Facendo riferimento, invece, a valutazioni di letteratura e studi specialistici che hanno valutato situazioni e infrastrutture analoghe si può definire quanto segue.

In particolare, come dato di letteratura, si può fare riferimento ai risultati dello studio vibrazionale per il progetto riguardante la progettazione definitiva dell'“adeguamento del tratto Trisungo-Acquasanta Terme, tratto galleria Valgarizia - Acquasanta Terme, all'interno del lotto 2 dal km 155+400 al km 159+000 della S.S n. 4 - Salaria”.

Lo studio, in base a rilievi sperimentali per la determinazione della funzione di trasferimento delle vibrazioni indotte dal traffico stradale, ha determinato le distanze oltre le quali per i ricettori residenziali si prevedeva il rispetto del limite della UNI 9614:2017.

Nello studio in questione era stata considerata una velocità media pari 90 km/h per i mezzi leggeri e 80 km/h per i mezzi pesanti. Il numero di transiti considerato in progetto è stato di circa 300 mezzi/ora nel periodo diurno e 50 mezzi/ora in quello notturno, per i veicoli leggeri, e circa 20 mezzi/ora nel periodo diurno e 5 mezzi/ora in quello notturno, per i veicoli pesanti.

Dalle valutazioni compiute si determinava una distanza, oltre la quale si prevedeva il rispetto dei limiti della UNI 9614:2017 per ricettori residenziali, nei tratti in viadotto nel periodo diurno non determinabile, essendo sempre rispetto il limite dalla previsione di propagazione già al limite della carreggiata e in quello notturno di circa 19m. Per i tratti in galleria si prevedeva nel periodo diurno una distanza di circa 5m e in quello notturno di circa 15m.

A fronte di quanto sopra descritto, considerando che la pavimentazione stradale sarà di nuova realizzazione, considerando altresì che il volume di traffico transitante sui tratti autostradali di cui si è detto risulta maggiore rispetto a quello previsto nello scenario progettuale in esame, inoltre considerando i riferimenti modellistici, i risultati di studi analoghi i cui i dati di traffico erano superiori sia in termini di velocità che di flussi e i dati nel progetto in valutazione è possibile stimare la distanza, per la quale si ha il rispetto dei limiti della UNI 9614:2017, nel periodo diurno come non determinabile essendo sempre rispettato il limite e nel periodo notturno, cautelativamente, pari a 5m per ricettori residenziali. Si può quindi ritenere che in fase di esercizio non vi siano possibili criticità in merito 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.

In relazione alla valutazione delle vibrazioni per l'infrastruttura stradale ai ricettori, in considerazione delle valutazioni compiute, per mezzo delle quali è stato possibile stimare la distanza per la quale si ha il rispetto dei limiti della UNI 9614:2017, predetti in 5m per ricettori residenziali in periodo notturno ed in considerazione della distanza dei ricettori dalla nuova viabilità, si riscontra il rispetto del limite della norma UNI 9614:2017. Dall'analisi della distanza dei ricettori dall'infrastruttura si riscontra che essa è sempre maggiore a 5m. Pertanto, non si identificano ricettori che subiscono l'effetto delle vibrazioni indotte dal traffico stradale e quindi criticità per la nuova viabilità. Si segnala un solo ricettore (ricettore nr. 28) la cui distanza risulta essere prossima alla distanza limite per il rispetto della UNI 9614:2017 nel periodo notturno: il ricettore in esame è ubicato, infatti, a 5,2m dall'asse della carreggiata più prossima, mentre la distanza limite è stimata a 5m. Per tale ricettore si consiglia di procedere ad eseguire un monitoraggio nella fase di esercizio per verificare quanto predetto delle stime modellistiche.

Si evidenzia altresì che la distanza di propagazione delle vibrazioni predette nella valutazione potrebbero essere ulteriormente ridotte a causa delle presenze di sottoservizi o altre opere sotterranee, che potrebbero influenzare la trasmissione delle vibrazioni dando origine a tratti di discontinuità, che potrebbero interrompere la propagazione e quindi ridurre la distanza di propagazione a pochi metri dall'asse della carreggiata.

Ulteriormente la presenza di un nuovo pacchetto stradale per la viabilità permetterà una aggiuntiva riduzione delle vibrazioni indotte in quanto, rispetto l'attuale ed agli esempi sperimentali riportati come riferimento, presenteranno superfici maggiormente regolari e una migliore percorribilità del tracciato.

In conclusione, la nuova viabilità darà luogo a valori di emissione, che non modificano in modo significativo lo stato ambientale delle vibrazioni nelle aree e recettori allo studio e compatibili con i limiti della UNI 9614:2017.

Pertanto, in considerazione di quanto valutato, non si ritiene necessario prevedere mitigazioni antivibranti sulla viabilità stradale.

Di seguito la tabella con la valutazione in riferimento alla UNI 9614:2017 relativa al disturbo alle persone per la fase di esercizio. Per ogni ricettore è valutato il rispetto del limite, inoltre essendo i limiti della norma UNI 9614:2017 più restrittivi rispetto quelli previsti dalla UNI 9916:2014, si valuta anche il rispetto del limite per quest'ultima norma e quindi l'assenza del danno strutturale alla fruizione dell'opera.

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dall'asse della carreggiata (f) (m)	Limite diurno UNI 9614 (mm/s ²)	Limite notturno UNI 9614 (mm/s ²)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9614:2017		Valutazione Scenari per il disturbo alle persone UNI 9614:2017	
						Distanza limite periodo diurno (m)	Distanza limite periodo notturno (m)	Valutazione dell'esercizio nel periodo diurno	Valutazione dell'esercizio nel periodo notturno
1	Residenziale	2	8,5	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
2	Non Res. non ab.	1	9,3	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
3	Res. non abitato	2	14,1	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
4	Residenziale	2	22,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
5	Residenziale	3	198,1	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
6	Residenziale	2	189,1	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
7	Residenziale	3	213,5	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
8	Residenziale	2	212,2	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
9	Residenziale	2	211,3	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
10	Residenziale	2	223,5	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
11	Residenziale	2	232,6	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
12	Residenziale	3	228,3	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
13	Residenziale	3	242,9	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
14	Residenziale	2	272,6	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
15	Residenziale	3	292,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
16	Residenziale	2	342,0	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
17	Residenziale	2	345,5	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
18	Residenziale	2	349,6	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
19	Residenziale	1	10,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
20	Residenziale	3	33,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
21	Residenziale	2	341,0	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
22	Residenziale	2	346,9	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
23	Residenziale	2	324,6	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
24	Residenziale	2	39,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
25	Residenziale	1	7,5	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
26	Residenziale	1	7,3	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
27	Residenziale	1	8,2	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
28	Residenziale	1	5,2	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite (**)
29	Residenziale	1	9,3	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
30	Res. non abitato	1	12,0	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
31	Res. non abitato	1	10,1	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
32	Res. non abitato	2	25,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
33	Residenziale	3	54,5	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
34	Residenziale	2	73,7	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
35	Residenziale	2	55,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
36	Residenziale	2	60,0	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
37	Residenziale	3	52,0	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
38	Residenziale	2	56,7	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
39	Residenziale (*)	2	29,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
40	Residenziale (*)	2	40,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
41	Residenziale (*)	2	32,7	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
42	Residenziale (*)	2	38,6	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
43	Residenziale (*)	2	46,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
44	Residenziale (*)	3	46,1	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite

ID Ric.	Destinazione	Numero di Piani	Distanza dall'asse della carreggiata (f) (m)	Limite diurno UNI 9614 (mm/s ²)	Limite notturno UNI 9614 (mm/s ²)	Valori stimati per gli scenari di riferimento UNI 9614:2017		Valutazione Scenari per il disturbo alle persone UNI 9614:2017	
						Distanza limite periodo diurno (m)	Distanza limite periodo notturno (m)	Valutazione dell'esercizio nel periodo diurno	Valutazione dell'esercizio nel periodo notturno
45	Residenziale (*)	2	59,6	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
46	Residenziale (*)	3	64,2	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
47	Residenziale (*)	3	72,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
48	Residenziale (*)	3	83,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
49	Residenziale (*)	2	86,7	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
50	Residenziale (*)	2	74,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
51	Residenziale (*)	2	68,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
52	Residenziale (*)	3	86,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
53	Residenziale (*)	3	94,4	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
54	Residenziale (*)	2	89,9	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
55	Residenziale (*)	3	80,1	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
56	Residenziale (*)	3	93,7	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
57	Residenziale (*)	2	87,3	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
58	Residenziale (*)	3	101,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
59	Residenziale (*)	3	103,8	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite
60	Residenziale (*)	1	108,0	7,2	3,6	/	5	entro il limite	entro il limite

(f) distanza dall'asse della carreggiata al baricentro dell'edificio.
 (*) edificio ubicato sopra la galleria, la distanza riportata considera una copertura minima di 25m;
 (**) valutazione delle vibrazioni entro il limite. Si segnala che la distanza dell'edificio è prossima alla distanza limite per il rispetto del limite.

7 MISURE DI MITIGAZIONE

Dalle valutazioni compiute risulta necessaria l'adozione di mitigazioni per la matrice vibrazioni per la fase di cantiere. Allo scopo, comunque, di ottimizzare il rapporto dell'opera nella fase di esercizio con l'ambiente circostante, si indicano delle opere di mitigazioni che potrebbero comunque essere messe in atto in esercizio.

7.1 Mitigazioni delle vibrazioni in fase di cantiere

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

Le misure di dettaglio potrebbero essere definite sulle caratteristiche dei macchinari impiegati e su apposite procedure di condotta delle lavorazioni. In linea indicativa, potrebbero essere osservate le seguenti indicazioni:

- rispettare la norma di riferimento ISO 2631 con i livelli massimi ammissibili delle vibrazioni sulle persone;
- contenere i livelli vibrazionali generati dai macchinari agendo sulle modalità di utilizzo dei medesimi e sulla loro tipologia;
- selezione di macchinari e veicoli sulla base delle migliori tecnologie disponibili in termini di riduzione delle emissioni di vibrazioni;
- definire le misure di dettaglio di riduzione delle vibrazioni basandosi sulle caratteristiche dei macchinari effettivamente impiegati;
- spegnimento di tutte le macchine quando non sono previste dal ciclo di lavoro;
- preventiva informazione degli utilizzatori delle macchine del potenziale disturbo alle vibrazioni arrecabile ai ricettori nei pressi dell'area di lavoro;
- posizionare impianti fissi lontano dai ricettori, in particolare se presenti di sensibili;
- mantenere la buona cura delle aree di cantiere, come conservare in buono stato le strade di cantiere ed eliminare avvallamenti o buche.
- per gli eventuali ricettori sensibili presenti, dove presumibilmente le attività legate alle lavorazioni più impattanti saranno incompatibili con la fruizione del ricettore, dovranno essere attuate procedure operative che consentano di evitare lavorazioni impattanti negli orari e nei tempi di utilizzo dei ricettori e nel periodo di riposo degli occupanti.
- di predisporre una attività informativa preventiva in modo da tenere informata la popolazione interessata e quindi facilitare la tollerabilità delle persone alle vibrazioni indotte.

7.2 Mitigazioni delle vibrazioni 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.

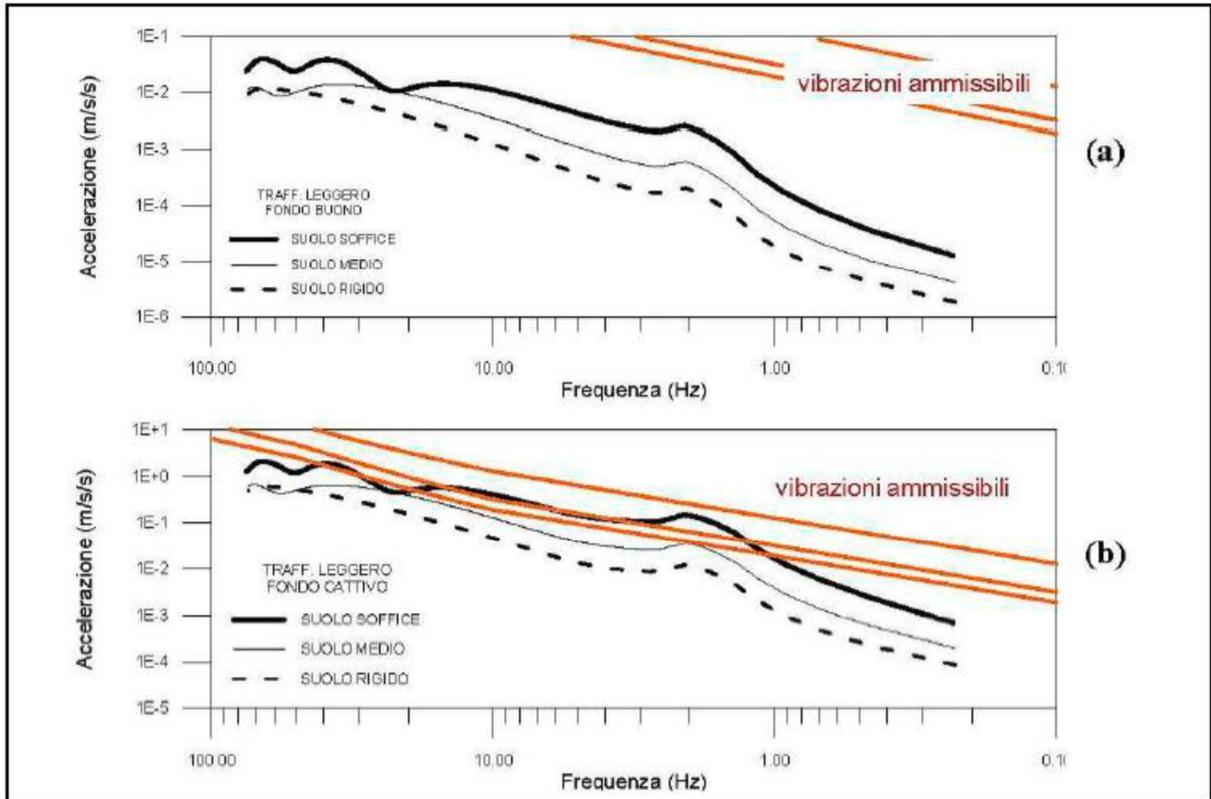


Figura 16 - Influenza della rugosità del fondo stradale - (a) fondo buono - (b) fondo scadente